



**ESCUELA DE DOCTORADO DE LA  
UNIVERSIDAD DE CÁDIZ**

**Departamento en Ingeniería en Automática, Electrónica, Arquitectura  
y Redes de Computadores**

**Tesis Doctoral**

**“Técnicas de análisis exploratorio de datos y estrategias de  
visualización multidimensional del suministro eléctrico basadas en  
estadísticos de orden superior: indicadores globales para  
instrumentación moderna”**

*Presentada por:*

Paula Remigio Carmona

*Dirigida por:*

Director y Tutor: Dr. Juan José González de la Rosa

Directora: Dra. Olivia Florencias Oliveros

Programa de Doctorado en Ingeniería Energética y Sostenible de la Escuela  
de Doctorado de la Universidad de Cádiz (EDUCA)

Grupo de Investigación en Instrumentación Computacional y Electrónica  
Industrial (ICEI) PAIDI-TIC-168

Algeciras, Cádiz, Junio de 2025



**DOCTORAL SCHOOL OF THE UNIVERSITY OF  
CÁDIZ**

**Department of Automation Engineering, Electronics, Architecture and  
Computers Networks**

**Doctoral Thesis**

**“Exploratory data analysis techniques and multidimensional  
visualization of the electricity supply based on higher-order statistics:  
global indicators for modern instrumentation”**

*Presented by:*

Paula Remigio Carmona

*Supervised by:*

Dr. Juan José González de la Rosa

Dr. Olivia Florencias Oliveros

Doctoral Program in Energy and Sustainable Engineering

Doctoral School of the University of Cádiz

Research Group PAIDI-TIC-168 in Computational Instrumentation and

Industrial Electronics (ICEI)

Algeciras, Cádiz, June of 2025



Para el desarrollo de esta investigación y tesis doctoral, la doctoranda ha disfrutado de un contrato de personal investigador predoctoral en formación (PIF) asociado al proyecto PID2019-108953RB-C21, denominado “Datos operacionales energéticos y meteorológicos para sistemas fotovoltaicos” por parte de la Universidad de Cádiz, convocado en la resolución del Rector de la Universidad de Cádiz UCA/REC13VPCT/2020, de 31 de julio, por la que se convoca proceso selectivo para la contratación de personal investigador predoctoral en formación asociado a proyectos.



## **Abstract**

This doctoral thesis proposes a multidimensional approach to power supply quality analysis, integrating traditional and non-traditional indicators, advanced visualization tools, and artificial intelligence techniques. The general objective consists of developing new measurement methods for characterizing and classifying complex electrical events that arise in modern electrical networks, marked by the growing incorporation of renewable energies and nonlinear behaviours.

The research begins with an exhaustive literature review, identifying gaps in traditional approaches, particularly in the detection and differentiation of hybrid events. Based on this analysis, key traditional power quality indicators were selected (crest factor, THD, SNR) and complemented by higher-order statistics. Subsequently, a global indicator has been used to combine them all, providing a unified view of the electrical network's state. Additionally, radar charts were developed as optimized visual tools to facilitate the interpretation of electrical phenomena for both experts and users with less technical experience, and also to avoid subjective interpretations of the system under test.

The developed methods have been validated using, first, synthetic signals that model pure electrical disturbances, that is, isolated disturbances. These disturbances come from previously published data sets, in prestigious databases, such as the IEEE DataPort platform. Additionally, real signals were used, obtained by the PAIDI-TIC-168 research group monitoring the University's electrical installation.

The results demonstrated nearly 100% accuracy in detecting synthetic events and real-life events like sags, and 29.79% for real impulsive transients. Compared to traditional methods, the developed tools showed significant improvement in detecting events such as notches (73%), impulsive transients (54%) and spikes (38%). Furthermore, the success rate in classifying disturbances, using a decision tree based on the indicators, ranged from 90% to 100%, depending on the disturbance under test.

To sum up, the thesis demonstrates that selected combinations of indicator, signal processing techniques and tools, along with AI and visualization tools improves PQ analysis, making easier the detection of specific disturbances.

## Resumen

Esta tesis doctoral propone un enfoque multidimensional para el análisis de la calidad del suministro eléctrico, integrando indicadores tradicionales y no tradicionales, herramientas de visualización avanzadas y técnicas de inteligencia artificial, con el objetivo principal de desarrollar nuevos métodos de medición que permitan caracterizar y clasificar eventos eléctricos complejos que surgen en redes modernas, marcadas por la creciente incorporación de energías renovables y comportamientos no lineales.

La investigación comienza con una revisión exhaustiva de la literatura, identificando lagunas en los enfoques tradicionales, particularmente en la detección y diferenciación de eventos híbridos. A partir de este análisis, se seleccionaron indicadores tradicionales clave de calidad del suministro eléctrico (factor de cresta, THD, SNR), y se complementaron con estadísticos de orden superior. Posteriormente, se utilizó un indicador global para combinarlos, proporcionando una visión unificada del estado de la red eléctrica. Además, se desarrollaron gráficos radar como herramientas visuales optimizadas para facilitar la interpretación de fenómenos eléctricos tanto a expertos como a usuarios con menor experiencia técnica, así como impedir interpretaciones subjetivas del sistema objeto de estudio.

Los métodos desarrollados se validaron utilizando, en primer lugar, señales sintéticas que modelan perturbaciones eléctricas puras, es decir, eventos aislados. Estas perturbaciones proceden de set de datos previamente publicados en bases de datos de prestigio, como la plataforma IEEE DataPort. Además, se utilizaron señales reales obtenidas por el grupo de investigación PAIDI-TIC-168, que monitoriza la instalación eléctrica de la Universidad.

Los resultados demostraron una precisión cercana al 100% en la detección de eventos sintéticos y de eventos reales como *sags*, y del 29.79% para transitorios impulsivos reales. En comparación con métodos tradicionales, las herramientas desarrolladas ofrecieron mejoras significativas en la detección de eventos como *notches* (73%), transitorios impulsivos (54%) y *spikes* (38%). Asimismo, la tasa de éxito en la clasificación de las perturbaciones, a través de un árbol de decisiones diseñado en base a los indicadores, osciló entre el 90% y el 100%, en función de la perturbación analizada.

En resumen, la tesis demuestra que combinaciones seleccionadas de indicadores, técnicas y herramientas de procesamiento de señales, junto con herramientas de IA y visualización, mejoran el análisis de PQ, facilitando la detección de perturbaciones específicas.



## Agradecimientos

A mis directores Olivia y JuanJo, por guiarme en este camino con paciencia y ayudarme a mejorar día tras día, por aconsejarme y luchar contra mi cabezonería, aunque a veces cueste.

A mis compañeros: José María, por su disposición para escucharme y ofrecerme otros puntos de vista en la investigación, Agustín, Manuel y José Carlos, por sus consejos y su apoyo a lo largo del proceso, que hicieron este camino un poco más llevadero.

A mis padres, por enseñarme a luchar para perseguir mis sueños sin importar lo duro que sea, sabiendo que siempre contaré con su apoyo. Por creer siempre en mí.

A Patri, por impulsarme a ser el Sol y no la Luna.

A Sofía y Paquito, por sacarme una sonrisa en los peores días, aunque ni ellos mismos lo sepan.

Y, sobre todo, a Alex. Por estar ahí. Por ser mi apoyo constante. Por recordarme que, además de trabajar en la tesis, tengo que comer y dormir. Por celebrar cada pequeño paso como si fuera el hallazgo del siglo.

Si he llegado hasta aquí, es por vosotros.



# Contenido

Abstract.....	IV
Agradecimientos.....	VIII
Contenido .....	X
Abreviaturas y acrónimos.....	XII
Índice de figuras .....	XIII
Índice de tablas .....	XXI
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1. Contexto y justificación .....	2
1.2. Objetivos de la tesis.....	4
1.3. Metodología de investigación .....	5
Capítulo 2. Estado del Arte.....	8
2.1. Calidad del suministro eléctrico .....	9
2.1.1. Definición, relevancia e instrucciones asociadas a la calidad de suministro eléctrico.....	9
2.1.2. Eventos de la calidad de suministro. Principales desafíos y problemas asociados .....	11
2.2. Técnicas de Detección y Clasificación de Perturbaciones en la Red Eléctrica..	16
Capítulo 3. Conceptualización y diseño de herramientas de visualización multidimensional .....	29
3.1. Bases de datos disponibles .....	30
3.2. Selección de indicadores .....	32
3.3. Herramientas de visualización multidimensional .....	52
3.4. Diseño del gráfico de radar .....	56
3.5. Diseño del diagrama de caja.....	66
Capítulo 4. Análisis de datos a través de gráficos radar y diagramas de caja .....	69
4.1. Estudio de la evolución de los indicadores con señales sintéticas .....	71

4.1.1.	Patrones de gráficos radar por evento y estado .....	88
4.1.2.	Indicador global de la calidad de suministro .....	96
4.1.3.	Comprobación de diagramas de caja frente a la base de datos <i>Machlev</i> .....	98
4.2.	Aplicación de los patrones de comportamiento a otras señales sintéticas .....	105
4.3.	Aplicación de los patrones de comportamiento a señales reales.....	118
4.3.1.	Análisis de la base de datos IEEE DataPort .....	118
4.3.2.	Análisis de la base de datos PAIDI-TIC-168 .....	132
Capítulo 5. Árbol de decisiones.....		153
5.1.	Diseño del árbol de decisiones. Sentencias y orden.....	154
5.2.	Validación del árbol de decisiones.....	162
Capítulo 6. Discusión y conclusiones.....		164
6.1.	Discusión.....	165
6.2.	Conclusiones .....	167
Referencias .....		170

## Abreviaturas y acrónimos

<b>CF</b>	Crest Factor / Factor de cresta
<b>DFT</b>	Discrete Fourier Transform / Transformada discreta de Fourier
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform / Transformada rápida de Fourier
<b>FOS</b>	Fifth-Order Statistic / Estadístico de quinto orden
<b>HHT</b>	Hilbert-Huang Transform / Transformada Hilbert-Huang
<b>HOS</b>	Higher-Order Statistics / Estadísticos de orden superior
<b>HT</b>	Hilbert Transform / Transformada Hilbert
<b>IA</b>	Inteligencia Artificial
<b>K</b>	Kurtosis / Curtosis
<b>KF</b>	Kalman Filters / Filtros Kalman
<b>PQ</b>	Power Quality / Calidad del suministro
<b>RMS</b>	Root Mean Square / Valor Cuadrático Medio
<b>SINAD</b>	Signal-to-Noise And Distortion ratio / Relación señal-ruido y distorsión
<b>Sk</b>	Skewness / Asimetría
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio / Relación Señal-Ruido
<b>SOS</b>	Sixth-Order Statistic / Estadístico de sexto orden
<b>ST</b>	Stockwell (S) Transform / Transformada Stockwell o Transformada S
<b>STFT</b>	Short-Time Fourier Transform / Transformada de Fourier de tiempo corto
<b>THD</b>	Total Harmonic Distortion / Distorsión armónica total
<b>WT</b>	Wavelet Transform / Transformada Wavelet

## Índice de figuras

Figura 1. Evolución de las tasas de emisión por tonelada de CO <sub>2</sub> . Fuente: SENDECO2. .....	10
Figura 2. Ejemplo de señales eléctricas con eventos transitorios.....	12
Figura 3. Ejemplo de señales eléctricas con interrupción, <i>sag</i> y <i>swell</i> .....	13
Figura 4. Ejemplo de señal eléctrica con armónicos. ....	14
Figura 5. Ejemplo de señal eléctrica con <i>notch</i> . ....	14
Figura 6. Ejemplo de señal eléctrica con <i>flicker</i> .....	15
Figura 7. Ejemplo de señal eléctrica con <i>spike</i> .....	15
Figura 8. Ejemplo de señales eléctricas con armónicos con <i>sag</i> y armónicos con <i>swell</i> . .....	16
Figura 9. Esquema de los pasos seguidos típicamente para el análisis de PQ. ....	17
Figura 10. Distribución temporal de la publicación de los documentos analizados.....	17
Figura 11. Conjunto paralelo que relaciona los métodos más habituales con el rango temporal y el entorno en el que se desarrolla el estudio.....	22
Figura 12. Conjunto paralelo que relaciona el origen de la señal con la complejidad de los eventos, técnica de detección, uso de IA y tipo de evento localizado. ....	24
Figura 13. Conjunto paralelo que relaciona la evolución temporal de métodos que extraen características no lineales y aquellos que no las extraen con el tipo de técnica utilizada. ....	26
Figura 14. Gráfico de doble anillo que clasifica las publicaciones según su naturaleza y origen. ....	27
Figura 15. Evolución ciclo a ciclo de varianza, <i>skewness</i> , <i>kurtosis</i> , estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden y factor de cresta frente a un <i>sag</i> . ....	36
Figura 16. Evolución ciclo a ciclo de varianza y estadístico de sexto orden frente a un transitorio impulsivo y un <i>swell</i> . ....	37
Figura 17. Diagrama de caja y bigotes con los valores de varianza y estadístico de sexto orden de señales con <i>sag</i> , transitorio impulsivo y <i>swell</i> .....	38

Figura 18. Diagrama de caja y bigotes con los valores de varianza y estadístico de sexto orden de señales con ruido de 30 dB, <i>flicker</i> , <i>notch</i> y <i>spike</i> .....	38
Figura 19. Diagramas de dispersión entre indicadores para armónicos. ....	40
Figura 20. Diagramas de dispersión entre indicadores para <i>flickers</i> . ....	40
Figura 21. Diagramas de dispersión entre indicadores para interrupciones. ....	40
Figura 22. Diagramas de dispersión entre indicadores para <i>notches</i> .....	41
Figura 23. Diagramas de dispersión entre indicadores para <i>sags</i> .....	41
Figura 24. Diagramas de dispersión entre indicadores para <i>spikes</i> . ....	41
Figura 25. Diagramas de dispersión entre indicadores para <i>swells</i> . ....	42
Figura 26. Diagramas de dispersión entre indicadores para transitorios impulsivos. ....	42
Figura 27. Diagramas de dispersión entre indicadores para transitorios oscilatorios. ...	42
Figura 28. Diagramas de dispersión entre indicadores para armónicos + <i>sag</i> . ....	43
Figura 29. Diagramas de dispersión entre indicadores para armónicos + <i>swell</i> .....	43
Figura 30. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para <i>flickers</i> . ....	45
Figura 31. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para armónicos. ....	45
Figura 32. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para interrupciones. ....	46
Figura 33. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para <i>notches</i> . ....	46
Figura 34. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para <i>sags</i> . ....	47
Figura 35. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para <i>spikes</i> . ....	48
Figura 36. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para <i>swells</i> . ....	48
Figura 37. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para transitorios impulsivos.....	49

Figura 38. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para transitorios oscilatorios.....	49
Figura 39. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para armónicos con <i>sag</i> . .....	50
Figura 40. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para armónicos con <i>swell</i> . .....	50
Figura 41. Señal con <i>sag</i> usada para ejemplificar las herramientas de visualización multidimensional. ....	52
Figura 42. Ejemplo de diagrama de caja aplicado a una señal con <i>sag</i> .....	53
Figura 43. Ejemplo de mapa de calor aplicado a una señal con <i>sag</i> . ....	54
Figura 44. Ejemplo de gráficos de radar aplicados a los cuatro primeros ciclos de una señal con <i>sag</i> .....	55
Figura 45. Ejemplo de diagramas de dispersión aplicados a una señal con <i>sag</i> .....	55
Figura 46. Variación de los indicadores respecto al valor nominal según el nivel de ruido de la señal eléctrica. ....	58
Figura 47. Primera versión de radar con los límites de los ejes mostrados en la tabla 11. ....	63
Figura 48. Ejemplo de diagrama de caja adaptado. ....	66
Figura 49. Diagrama de caja adaptado correspondiente al conjunto de valores por ciclo de señales con <i>flicker</i> . ....	68
Figura 50. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un <i>flicker</i> . ....	74
Figura 51. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a una interrupción. ....	75
Figura 52. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un <i>notch</i> . ....	76
Figura 53. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un <i>sag</i> .....	77
Figura 54. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un <i>spike</i> . ....	78
Figura 55. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un <i>swell</i> . ....	80
Figura 56. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un transitorio impulsivo. ....	81

Figura 57. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un transitorio oscilatorio. .....	84
Figura 58. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a armónicos. ....	85
Figura 59. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un <i>sag</i> con armónicos. .	86
Figura 60. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un <i>swell</i> con armónicos. .....	87
Figura 61. Gráficos radar por estado frente a un <i>flicker</i> . ....	92
Figura 62. Gráficos radar por estado frente a una interrupción. ....	92
Figura 63. Gráficos radar por estado frente a un <i>notch</i> . ....	93
Figura 64. Gráficos radar por estado frente a un <i>sag</i> . ....	93
Figura 65. Gráficos radar por estado frente a un <i>spike</i> . ....	93
Figura 66. Gráficos radar por estado frente a un <i>swell</i> . ....	94
Figura 67. Gráficos radar por estado frente a un transitorio impulsivo. ....	94
Figura 68. Gráficos radar por estado frente a un transitorio oscilatorio. ....	94
Figura 69. Gráficos radar por estado frente a armónicos. ....	95
Figura 70. Gráficos radar por estado frente a armónicos con <i>sag</i> . ....	95
Figura 71. Gráficos radar por estado frente a armónicos con <i>swell</i> . ....	95
Figura 72. Diagramas de caja adaptados para las señales con <i>flicker</i> de la base de datos #1. ....	99
Figura 73. Diagramas de caja adaptados para las señales con interrupción de la base de datos #1. ....	100
Figura 74. Diagramas de caja adaptados para las señales con <i>notch</i> de la base de datos #1. ....	100
Figura 75. Diagramas de caja adaptados para las señales con <i>sag</i> de la base de datos #1. .....	101
Figura 76. Diagramas de caja adaptados para las señales con <i>spike</i> de la base de datos #1. ....	101
Figura 77. Diagramas de caja adaptados para las señales con <i>swell</i> de la base de datos #1. ....	102

Figura 78. Diagramas de caja adaptados para las señales con transitorio impulsivo de la base de datos #1.....	102
Figura 79. Diagramas de caja adaptados para las señales con transitorio oscilatorio de la base de datos #1.....	103
Figura 80. Diagramas de caja adaptados para las señales con armónicos de la base de datos #1.....	103
Figura 81. Diagramas de caja adaptados para las señales con armónicos con <i>sag</i> de la base de datos #1.....	104
Figura 82. Diagramas de caja adaptados para las señales con armónicos con <i>swell</i> de la base de datos #1.....	105
Figura 83. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con interrupción #1 de la base de datos Preclasificados simples. ....	108
Figura 84. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con interrupción #2 de la base de datos Preclasificados simples. ....	109
Figura 85. Diagramas de caja de las señales con interrupción de la base de datos Preclasificados simples.....	110
Figura 86. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con <i>sag</i> #1 de la base de datos Preclasificados simples. ....	111
Figura 87. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con <i>sag</i> #2 de la base de datos Preclasificados simples. ....	112
Figura 88. Diagramas de caja de las señales con <i>sags</i> de la base de datos Preclasificados simples.....	113
Figura 89. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con <i>swell</i> #1 de la base de datos Preclasificados simples.....	114
Figura 90. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con <i>swell</i> #2 de la base de datos Preclasificados simples.....	115
Figura 91. Diagramas de caja de las señales con <i>swells</i> de la base de datos Preclasificados simples.....	116
Figura 92. Diagramas de caja adaptados para las señales con interrupciones de la base de datos Preclasificados simples. ....	117

Figura 93. Diagramas de caja adaptados para las señales con <i>sags</i> de la base de datos Preclasificados simples.....	117
Figura 94. Diagramas de caja adaptados para las señales con <i>swells</i> de la base de datos Preclasificados simples.....	118
Figura 95. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con transitorio impulsivo #1 de la base de datos IEEE DataPort. ....	121
Figura 96. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con transitorio impulsivo #2 de la base de datos IEEE DataPort. ....	122
Figura 97. Diagramas de caja adaptados para las señales reales con transitorio impulsivo #1 y #2 de la base de datos IEEE DataPort. ....	123
Figura 98. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con <i>sag</i> #1 de la base de datos IEEE DataPort. ....	124
Figura 99. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con <i>sag</i> #2 de la base de datos IEEE DataPort. ....	125
Figura 100. Diagramas de caja adaptados para las señales reales con <i>sags</i> #1 y #2 de la base de datos IEEE DataPort. ....	126
Figura 101. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con <i>sag</i> e impulsivo de la base de datos IEEE DataPort. ....	128
Figura 102. Diagrama de caja adaptado de la señal real con <i>sag</i> e impulsivo de la base de datos IEEE DataPort. ....	129
Figura 103. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con <i>sags</i> complejos #1 de la base de datos IEEE DataPort. ....	129
Figura 104. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con <i>sags</i> complejos #2 de la base de datos IEEE DataPort. ....	130
Figura 105. Diagrama de caja adaptado de las señales reales con <i>sags</i> complejos #1 y #2 de la base de datos IEEE DataPort. ....	131
Figura 106. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:00:22 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	134
Figura 107. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:59:25 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	135

Figura 108. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 14:12:35 del 05/09/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	135
Figura 109. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 14:12:36 del 05/09/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	136
Figura 110. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 14:12:37 del 05/09/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	136
Figura 111. Diagrama de caja adaptado de las señales de las reales con transitorios impulsivos de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	137
Figura 112. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 16:41:03 del 16/06/2021 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	140
Figura 113. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:41:16 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	141
Figura 114. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:44:52 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	142
Figura 115. Diagrama de caja adaptado de las señales de las reales con <i>sags</i> de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	143
Figura 116. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:47:56 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	145
Figura 117. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:48:36 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	146
Figura 118. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:49:06 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	147
Figura 119. Diagrama de caja adaptado de las señales de las reales con desequilibrios de la tensión de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	148
Figura 120. Diagrama de caja adaptado de la señal real sin eventos de las 12:00:01 del 3 de junio de 2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	150
Figura 121. Esquema del árbol de decisiones para la clasificación de eventos de la calidad del suministro eléctrico. ....	161
Figura 122. Evento de armónico con <i>swell</i> incluido en la figura 121 (en rojo). ....	161
Figura 123. Evento de transitorio oscilatorio incluido en la figura 121 (en azul).....	162

Figura 124. Evento de *notch* incluido en la figura 121 (en verde)..... 162

## Índice de tablas

Tabla 1. Criterios de clasificación de los documentos del estado del arte. ....	18
Tabla 2. Publicaciones de energías renovables en el ámbito de la calidad de suministro. .....	22
Tabla 3. Valores nominales obtenidos para indicadores por ciclo tras analizar señales sin eventos de la base de datos #1.....	36
Tabla 4. Conjuntos mínimos de indicadores por evento e indicadores calculados. ....	51
Tabla 5. Valores máximos y mínimos por evento para <i>skewness</i> . ....	59
Tabla 6. Valores máximos y mínimos por evento para <i>kurtosis</i> . ....	59
Tabla 7. Valores máximos y mínimos por evento para el estadístico de quinto orden. .	59
Tabla 8. Valores máximos y mínimos por evento para el estadístico de sexto orden. ...	59
Tabla 9. Valores máximos y mínimos por evento para el factor de cresta.....	60
Tabla 10. Valores máximos y mínimos por evento para THD.....	60
Tabla 11. Límites superiores e inferiores de cada eje de la primera versión del gráfico radar.....	63
Tabla 12. Criterios de diseño de los ejes del gráfico radar: ecuaciones, límites y condicionantes. ....	65
Tabla 13. Rango de valores establecido para considerar que no se detectan eventos en el diagrama de caja por indicador.....	67
Tabla 14. Ecuaciones que rigen la normalización de los diagramas de caja. ....	67
Tabla 15. Valores máximos y mínimos por evento para el indicador global de la calidad de suministro. ....	98
Tabla 16. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con transitorios impulsivos #1 y #2.....	122
Tabla 17. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con <i>sags</i> #1 y #2. .....	125
Tabla 18. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con <i>sag</i> e impulsivo, <i>sags</i> complejos #1 y #2.....	131

Tabla 19. Análisis a partir del indicador global de tramos horarios de señales de la base de datos #4.....	132
Tabla 20. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales transitorios impulsivos de la base de datos PAIDI-TIC-168.....	138
Tabla 21. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con <i>sag</i> de la base de datos PAIDI-TIC-168. ....	143
Tabla 22. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con desequilibrios de la tensión de la base de datos PAIDI-TIC-168. ....	149
Tabla 23. Comparativa de variación de los indicadores frente a ruido de las bases de datos <i>Machlev</i> y PAIDI-TIC-168. ....	150
Tabla 24. Tasa de detección de eventos y falsos positivos de los diagramas de caja adaptados con nuevos límites por tipo de evento y base de datos.....	151
Tabla 25. Precisión del árbol de decisiones en la clasificación de eventos de la calidad del suministro. ....	163



# Capítulo 1. Introducción

## 1. Introducción

El presente capítulo es una introducción al contexto de la tesis doctoral. En él se establece el ámbito de estudio y las pautas consideradas para el desarrollo de la investigación.

### 1.1.Contexto y justificación

La calidad de suministro eléctrico o *Power quality* (PQ) se define como un grupo de características que los sistemas electrónicos deben cumplir en todo su recorrido, lo que incluye el suministro, la distribución y la entrega de energía. Esto implica garantizar la llegada de un suministro adecuado, tanto de tensión como de corriente, a los usuarios finales, asegurando un funcionamiento óptimo y la mayor reducción posible de las perturbaciones en la red eléctrica en general.

En las redes eléctricas modernas, la calidad de suministro se ha convertido en un factor crítico para la estabilidad y confiabilidad de los sistemas eléctricos interconectados con ella. En efecto, en un entorno donde la electrificación avanza a un ritmo acelerado y la integración (a veces no controlada) de fuentes de energía renovables crece exponencialmente, garantizar un suministro confiable es fundamental tanto para la industria como para los usuarios finales.

Por otra parte, el aumento de dichas energías renovables, como la eólica y la fotovoltaica, ha transformado las redes eléctricas, introduciendo nuevas complejidades. Estas fuentes, por su naturaleza intermitente, provocan alteraciones en la red, generando con ello eventos de la calidad de suministro eléctrico como *sags* o transitorios, afectando la estabilidad del sistema, como se verá más adelante. Además, el auge de la generación distribuida y los sistemas prosumidores añade nuevos puntos de inyección y consumo, haciendo que las redes sean más dinámicas y menos predecibles.

Paralelamente, la globalización y el crecimiento industrial han incrementado la dependencia de un suministro eléctrico confiable. Interrupciones o perturbaciones en la red pueden traducirse en pérdidas económicas significativas, no solo en el sector industrial, sino también en ámbitos urbanos y domésticos, subrayando la necesidad de una mejora continua en la calidad del suministro eléctrico.

Para afrontar este escenario, existen normativas internacionales que regulan aspectos básicos del suministro eléctrico, como la UNE-EN 50160 y el estándar IEEE 1159-

2019, sin embargo, estas no abordan completamente la diversidad y complejidad de los eventos presentes en las redes modernas. Además, la fragmentación de la información y la falta de herramientas accesibles para el análisis multidimensional dificultan que investigadores y profesionales interpreten los fenómenos eléctricos de manera integral (práctica y útil).

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar herramientas que no solo sean técnicamente rigurosas, sino también comprensibles para usuarios con menor experiencia técnica. Este enfoque resulta esencial para optimizar la operación de las redes eléctricas en tiempo real y para garantizar su confiabilidad frente a las demandas crecientes de sostenibilidad y eficiencia energética.

Esta investigación contribuye a mejorar estas lagunas, proporcionando herramientas de análisis basadas en estadísticos de orden superior y estrategias de visualización accesibles. La tesis busca consolidar un marco de referencia que permita interpretar la calidad del suministro eléctrico de manera efectiva, unificando herramientas y datos relevantes para facilitar el estudio y análisis, y proponiendo soluciones prácticas que beneficien tanto a la comunidad científica como a usuarios finales de la red eléctrica.

En esta línea, esta tesis parte de la siguiente hipótesis: **el uso de un conjunto mínimo de indicadores permitiría determinar y caracterizar cada tipo de perturbación eléctrica de una manera eficaz**. Esta hipótesis no presupone la existencia de un conjunto universal o invariante, sino que reconoce que la selección óptima de indicadores depende en gran medida del contexto en el que se realiza la medida. Dicho contexto abarca factores como el emplazamiento físico en el que se ubican los dispositivos de medición – que puede estar influido por la proximidad a fuentes de energía o por condiciones ambientales como altitud, temperatura o humedad –; el tipo de instrumentación utilizada (que determina la sensibilidad, precisión y capacidad de análisis), la resolución temporal y espectral, los métodos de filtrado y procesamiento empleados, así como las condiciones operativas y la topología de la red eléctrica, entre otros.

Este enfoque responde a una necesidad práctica fundamental: simplificar el análisis de calidad del suministro sin comprometer su precisión. Identificar qué indicadores pueden considerarse redundantes – al ofrecer información equivalente a la proporcionada por otros, ya sea de forma directa o con una representación funcional equivalente – permite reducir no solo la carga computacional del análisis, sino también los requisitos físicos de “sensorización”. En términos prácticos, esto puede traducirse en un ahorro conside-

rable para una empresa distribuidora, al evitar la necesidad de instalar equipos específicos para medir ciertos parámetros cuando estos pueden inferirse de forma fiable a partir de otros indicadores ya disponibles. Esta optimización, por tanto, no solo se traduce en eficiencia algorítmica, sino también en una reducción tangible de costes de implementación y mantenimiento de infraestructuras.

Con esta base, se establecen las líneas de trabajo principales que conducen la investigación, abarcando desde el diseño de nuevos indicadores hasta su validación en entornos reales y simulados, lo cual se desarrollará en detalle en los capítulos siguientes.

Cabe señalar que a lo largo del documento se emplean tanto términos procedentes de normativa internacional (IEEE) como denominaciones comúnmente utilizadas en literatura técnica anglosajona para referirse a los distintos eventos de la calidad de suministro eléctrico. Esta elección responde tanto a la frecuencia con que dichos términos aparecen en las fuentes bibliográficas consultadas como a su capacidad descriptiva en el contexto del análisis. A fin de mantener la claridad, se ha optado por no unificar la nomenclatura, aunque se procura utilizar los términos más precisos y reconocibles en cada caso.

Asimismo, en las representaciones numéricas se utiliza el punto como separador decimal, en coherencia con el estándar anglosajón empleado en gran parte de la bibliografía técnica consultada.

### **1.2. Objetivos de la tesis**

Para el desarrollo de esta tesis, se han marcado los siguientes objetivos:

- Realizar una revisión exhaustiva de las diferentes técnicas aplicadas al campo de la calidad de suministro en los últimos 25 años. Esto permite conocer las metodologías seguidas hasta el momento, localizar sus carencias y plantear con ello futuras líneas de investigación.
- Aplicar estadísticos de orden superior al análisis en dominio del tiempo para mejorar la caracterización del estado de la red y de las perturbaciones en el suministro eléctrico. Esto incluye el uso de estadísticos de quinto y sexto orden, cuyo desarrollo aún es incipiente y por lo que requieren de mayor investigación para evaluar su verdadero potencial.

- Desarrollar el diseño de un gráfico en 2D que refleje el estado de la red y posibles perturbaciones de forma amena, reduciendo la dificultad tradicionalmente asociada a la comprensión técnica de la calidad de suministro. Para este fin, se consideran idóneos los gráficos que permiten mostrar varios vértices o ejes al mismo tiempo, asignando a cada uno de ellos un indicador del estado de la red.
- La formulación de nuevos indicadores globales de la calidad de suministro que incluyan tanto parámetros tradicionales como novedosos.

### 1.3. Metodología de investigación

Con el fin de abordar los objetivos planteados en esta tesis, se ha diseñado una metodología estructurada en etapas, considerando tres elementos: técnicas de análisis exploratorio de datos, desarrollo de herramientas de visualización y validación experimental. Estas etapas se describen a continuación:

1. Revisión bibliográfica: Se realizará un análisis detallado de la literatura existente en el ámbito de la calidad del suministro eléctrico, con especial énfasis en las técnicas de detección y clasificación de perturbaciones publicadas en los últimos 25 años, y prestando particular atención a los trabajos publicados a partir de 2018.

Para ello, se llevarán a cabo búsquedas en inglés de documentación en bases de datos reconocidas como IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) Xplore, ScienceDirect, Web of Science y Google Académico, utilizando palabras clave como “*monitoring*”, “*indices*” “*photovoltaic*” combinadas con “*power quality*”, además de otros términos específicos relacionados con métodos de detección y clasificación de eventos, como “*artificial intelligence*”, “*higher-order statistics*” o “*wavelet transform*”.

La documentación recopilada tras esta búsqueda se clasificará según criterios como el método de detección utilizado, la complejidad de los eventos detectados o la inclusión de energías renovables en los estudios. Este proceso ofrecerá una perspectiva temporal del campo de la calidad de suministro eléctrico y permitirá identificar las principales carencias de los enfoques tradicionales, estableciendo una base sólida para esta investigación.

2. Implementación de herramientas de visualización multidimensional: Siguiendo la hipótesis inicial, se buscará seleccionar, mediante métodos de regresión como diagramas de dispersión y redes de regresión, un conjunto mínimo de indicadores relevantes que, combinados, permitan caracterizar un amplio espectro de particularidades presentes en la red eléctrica. Asimismo, se estudiarán varias herramientas existentes para representar de manera intuitiva y simultánea la evolución de distintos indicadores de calidad del suministro, evaluando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

A continuación, se diseñarán y optimizarán las herramientas gráficas seleccionadas con la incorporación de dichos indicadores, con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados tanto a expertos como a usuarios con menor conocimiento técnico.

Para evaluar el rendimiento de los indicadores y configurar las herramientas, se generarán señales sintéticas que representen distintos eventos eléctricos (*sags*, *swells*, transitorios y armónicos, entre otros). Posteriormente, estas herramientas serán validadas mediante una segunda base de datos sintética y señales reales obtenidas de IEEE DataPort y las instalaciones del grupo de investigación PAIDI-TIC-168. Este proceso permitirá verificar la capacidad de los indicadores para caracterizar perturbaciones en condiciones de red reales.

3. Desarrollo de indicadores globales: A partir de las herramientas de visualización propuestas, se desarrollará un nuevo indicador global de la calidad del suministro eléctrico que combine los indicadores incluidos en las herramientas visuales. Este desarrollo requerirá un análisis detallado del comportamiento esperado de los indicadores, tanto individual como conjuntamente, frente a distintos estados de la red eléctrica, información que se obtendrá durante la configuración inicial de las herramientas utilizando la primera base de datos sintética, diseñada para contener múltiples tipos de eventos de la calidad del suministro.

4. Incorporación de técnica de inteligencia artificial clasificatoria: Una vez validadas las herramientas visuales para detectar eventos de la calidad de suministro, se integrará una técnica de inteligencia artificial que permita clasificar correctamente los eventos detectados.

Este proceso se basará en las observaciones realizadas sobre los comportamientos de los indicadores durante el análisis de las bases de datos, desarrollando

modelos de clasificación robustos que refuercen la capacidad de las herramientas propuestas.

5. Evaluación comparativa y discusión: Los resultados obtenidos se compararán con enfoques tradicionales, analizando las ventajas y desventajas de cada una de las herramientas de visualización aplicadas a la investigación. Además, se discutirán las limitaciones identificadas y se propondrán posibles mejoras y líneas de investigación futuras.

## Capítulo 2. Estado del Arte

## 2. Estado del Arte

### 2.1. Calidad del suministro eléctrico

#### 2.1.1. Definición, relevancia e instrucciones asociadas a la calidad de suministro eléctrico

En el apartado anterior se ha introducido brevemente el concepto de calidad de suministro, pero no se ha hecho suficiente hincapié en todo lo que engloba realmente este concepto. De la forma más resumida posible, **una mala calidad de suministro significa pérdidas**, evidentemente eléctricas, pero, a un nivel aún mayor, económicas. Como se verá más extensamente en el siguiente subapartado, la aparición de perturbaciones o eventos en la red puede ir ligado a fallos de los equipos, pérdidas de datos, reseteo de maquinaria, etc. Además de los daños ocasionados en los equipos, estos conllevan paradas en la producción y, por lo tanto, pérdidas indirectas.

Pero, más allá del nivel industrial, no puede comprenderse verdaderamente la importancia de la calidad de suministro sin entrar al contexto actual, que abarca dimensiones socioeconómicas y culturales. Cabe aclarar que, puesto que esta tesis se desarrolla en España, voy a centrarme en el contexto a nivel europeo, principalmente. Para empezar, habría que situarse en el 11 de diciembre de 1997, fecha en la que se acuerda el Protocolo de Kioto en el marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, por el que se obliga a los países industrializados a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero [1]. Este acuerdo internacional, pese a no entrar en vigor hasta febrero de 2005, sembró las bases de posteriores políticas y objetivos climáticos para las Naciones Unidas, como el Acuerdo de París de 2015, y especialmente para la Unión Europea (UE), con la creación de proyectos como:

- La Estrategia Europea para la Energía Sostenible de 2006, que promueve el uso de energías renovables y la eficiencia energética con el objetivo del 20% de energía renovable en el consumo energético de la UE para 2020 [2].
- El Paquete de Clima y Energía de 2008, también conocido como Paquete 20-20-20, que añade al objetivo anterior metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejora de la eficiencia energética.
- El Paquete de Energía Limpia para Todos los europeos de 2016, que propone reformar el mercado energético con la mejora de la eficiencia energética y el fo-

mento de energías renovables, con el objetivo de que el 32% del consumo eléctrico de la UE tenga origen renovable para 2030.

- La Estrategia de Energía Renovable para 2030 de 2018, que revisa el objetivo anterior añadiendo directrices para la integración de energías renovables y desarrollo de infraestructura energética.
- El Pacto Verde Europeo de 2019, que propone conseguir para 2050 que Europa sea un continente neutro en emisiones de dióxido de carbono a través de la transformación del sistema energético mediante el uso de energías renovables.
- La Ley Europea del Clima de 2021, que establece el objetivo de reducir la emisión de gases de efecto invernadero en un 55% mínimo para 2030, en vías de lograr la neutralidad ya mencionada de 2050.

Como se aprecia, a lo largo de los años van surgiendo políticas que buscan aumentar cada vez más el porcentaje de producción y consumo de energías renovables. Pero, además, a esta progresión de naturaleza principalmente ambiental se une en 2022 el Plan REPowerEU: tras el comienzo del conflicto bélico de Rusia-Ucrania, los estados miembros de la Unión Europea acordaron eliminar gradualmente la dependencia de los combustibles fósiles rusos, a través de la mejora de la eficiencia energética y un mayor desarrollo de las energías renovables [3]. La generación de energía a través de fuentes renovables y la eficiencia energética, por tanto, cobran ya un papel fundamental no solo en la política medioambiental sino también en la política exterior de la UE.

Estas estrategias de la Unión Europea se ven incentivadas además económicamente por las progresivas subidas en el precio del derecho de emisión de dióxido de carbono [4], tal y como refleja la figura 1, y por los beneficios a nivel social que conllevan [5].

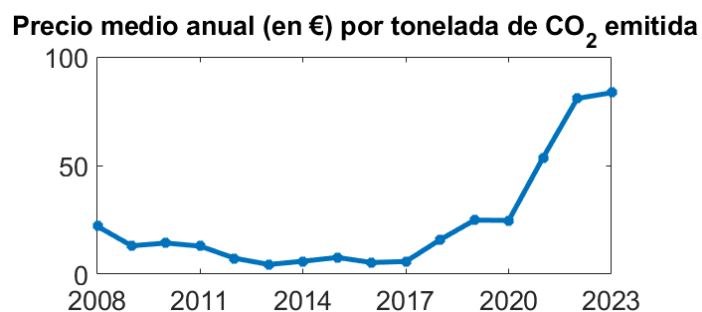


Figura 1. Evolución de las tasas de emisión por tonelada de CO<sub>2</sub>. Fuente: SENDECO2.

Sin embargo, la implementación de fuentes de energía renovables cada vez más consolidadas y necesarias en el marco eléctrico europeo conllevan una serie de retos a su-

perar. A diferencia de otros métodos de producción eléctrica tradicionales, energías como la eólica o la fotovoltaica conllevan inherentemente una inestabilidad debida a las variaciones de las condiciones climáticas, generando fluctuaciones en la red eléctrica que pueden provocar eventos de la calidad de suministro. A este hecho se suma la descentralización de la generación eléctrica, con numerosas instalaciones conectadas a la red, añadiendo mayores puntos de entrada y salida de energía. Estos factores que desequilibran la red eléctrica provocan que cada vez sea más necesario un monitoreo continuo y a tiempo real de la calidad de suministro para evitar el decrecimiento de esta. [6]

Nuevamente, es importante subrayar que una baja calidad de suministro equivale a pérdidas. Como indica el refrán, ‘poderoso caballero es Don Dinero’, y este principio se aplica igualmente para la calidad de suministro, ya que la investigación en esta área se beneficia de la necesidad de un suministro eléctrico altamente eficiente en eventos internacionales de gran magnitud, como los torneos deportivos de la Copa Mundial de la FIFA y los Juegos Olímpicos, así como eventos culturales como la Expo 2020 de Dubái, que conllevan el manejo de grandes sumas de dinero [7].

Todo esto ha llevado a la redacción de varias normativas y recomendaciones, siendo las más influyentes:

- La norma europea UNE-EN 50160:2011, titulada “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución”, especifica los parámetros principales de la tensión suministrada en condiciones normales de explotación para baja, media y alta tensión, aportando valores límite en términos de frecuencia, variaciones de tensión o armónicos [8].
- El estándar IEEE 1159-2019, titulado *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* (Recomendaciones Prácticas para el Monitoreo de la Calidad de Suministro Eléctrico) hace una descripción de diferentes eventos de la calidad de suministro y a la vez define qué se consideran condiciones nominales o desviaciones de estas [9]. A diferencia de la UNE-EN 50160:2011, se tratan meramente de pautas facultativas, aunque sí recomendables.

### **2.1.2. Eventos de la calidad de suministro. Principales desafíos y problemas asociados**

Por propia definición, se considera un evento de la calidad de suministro eléctrico a cualquier incidente o perturbación que compromete la estabilidad, confiabilidad o segu-

riedad del sistema de suministro eléctrico. En este apartado se van a detallar un grueso de los eventos de calidad de suministro más comunes en la red eléctrica y aplicados para el estudio de esta tesis. Siguiendo las categorías expuestas en el estándar IEEE 1159:2019, los eventos se pueden clasificar como:

- Transitorios. Bollen y Gu [10] describen los transitorios como eventos de tensión o corriente con una duración breve. Dentro de los eventos transitorios, se distinguen los transitorios impulsivos y los oscilatorios (figura 2): los eventos impulsivos tienen una naturaleza súbita, con picos rápidos en la forma de onda, y con duraciones extremadamente breves, del rango de nanosegundos a milisegundos, mientras que la duración de los eventos transitorios oscilatorios es mayor, con duraciones típicas de hasta 50 milisegundos.

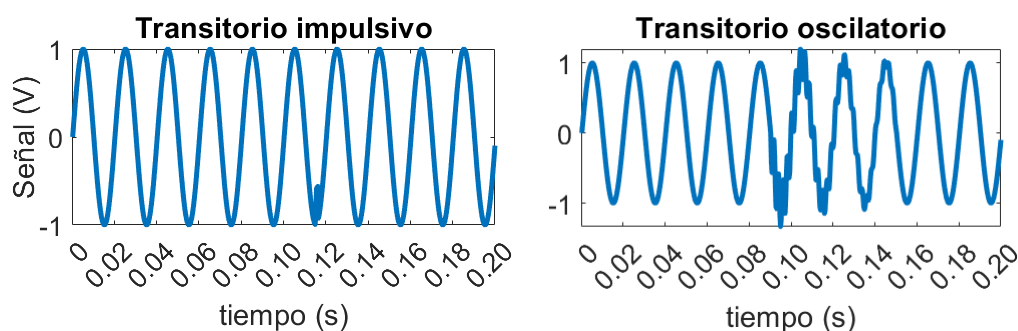


Figura 2. Ejemplo de señales eléctricas con eventos transitorios.

En cuanto a las causas, los eventos impulsivos se forman de manera más abrupta, por fenómenos atmosféricos como rayos, conmutación de equipos o fallos repentinos de la red eléctrica; sin embargo, los oscilatorios suelen generarse a partir de problemas como resonancias en la red, interacción entre cargas no lineales y fuentes de energía, o perturbaciones en la generación de energía. Debido a esto, los eventos transitorios pueden acarrear problemas como el aumento de la tensión en los componentes y el aislamiento, lo que provoca la degradación del aislamiento y los propios componentes, acortando la vida útil de los equipos si se repite de manera continuada; conmutaciones falsas de dispositivos de estado sólido que provocan el mal funcionamiento o destrucción de los equipos, o múltiples cruces por cero que generan problemas de sincronización, lo que afecta a los dispositivos relacionados con el tiempo, como relojes, cintas magnéticas y discos [11], [12].

- Variaciones de corta duración del RMS o valor eficaz de la señal (*Root Mean Square*, Valor Cuadrático Medio). Dentro de esta categoría se estudian las inte-

rupciones, los *sags* o caídas de tensión, y los *swells* o aumentos de tensión, todos ellos, mostrados en la figura 3, caracterizados por variaciones del valor de la tensión con duraciones desde medio ciclo hasta un minuto.

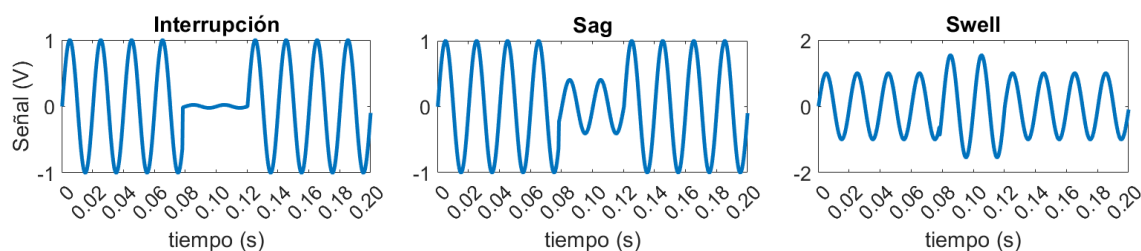


Figura 3. Ejemplo de señales eléctricas con interrupción, *sag* y *swell*.

- Interrupciones. Estos eventos implican una reducción temporal en la tensión a valores por debajo del 10% de la amplitud nominal de la forma de onda. Pueden provocar pérdida de producción y borrado de datos computacionales [12].
- *Sags*. Como en el caso de las interrupciones, supone una disminución temporal de la amplitud. Sin embargo, en el caso de los *sags*, la tensión disminuye entre el 10% y el 90% de su valor. Son los eventos habitualmente más comunes (en [13], por ejemplo, llegan a detectar en torno a 200 *sags* anualmente) y, por tanto, de los que se conoce mayor problemática vinculada, como es la desconexión de contactores de corriente alterna, el reseteo de ordenadores, PLC y relojes digitales, deposiciones incorrectas en fabricación, fallos de tolerancia en la fabricación de productos, desconexión automática de cargas eléctricas, desconexión automática de generadores en plantas térmicas, o las interrupciones de los variadores de velocidad (VSD, *Variable Speed Drives*) [11], [12].
- *Swells*. Estos eventos suponen un incremento de la tensión de entre el 10 y el 80% de su valor. Principalmente, conlleva problemas de sobrecargas en equipos y elementos relacionados, lo que acorta su vida útil o los rompe directamente, la desconexión automática de inversores conectados a la red, o la desconexión de cargas como los variadores de velocidad [11].
- Distorsiones de la forma de onda. En esta categoría, la norma considera eventos como la distorsión armónica o el *notch*, ambos eventos de régimen permanente.
- Armónicos. Son perturbaciones de la forma de onda causadas por la presencia de frecuencias adicionales a la frecuencia fundamental, como ilustra la figura 4 (50 Hz para Europa y gran parte del mundo, o 60 Hz en otras zonas como

Norteamérica o Corea, por ejemplo). Los armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, y pueden provocar ruido acústico y vibraciones, interferencias en las comunicaciones, cavitación en motores, sobrecalentamiento en máquinas rotativas, transformadores y cables, lo que acorta su vida útil o puede llegar incluso a destruirlos, la rotura de capacitores que no estén equipados con inductores, o la destrucción de componentes de medida inteligentes por el incremento de la corriente o tensión [11], [12], [14]. De hecho, se consideran los eventos que se generan más frecuentemente por la conexión a sistemas de generación de energía fotovoltaicos [15], [16].

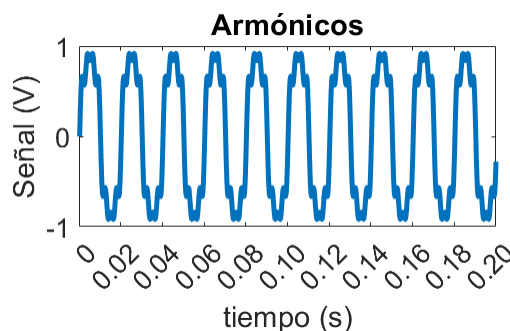


Figura 4. Ejemplo de señal eléctrica con armónicos.

- *Notches*. La traducción literal de estos eventos es “muescas”, y, como su nombre indica, es una perturbación que se presenta de forma periódica con bajadas muy breves de tensión, lo que se refleja en la forma de onda como muescas, tal y como se muestra en la figura 5. Aunque estos eventos no han sido estudiados tan ampliamente como las variaciones cortas de RMS, sí se sabe que pueden causar mal funcionamiento de los equipos, debido a la disminución de la tensión en las conmutaciones, y la destrucción de semiconductores [11].

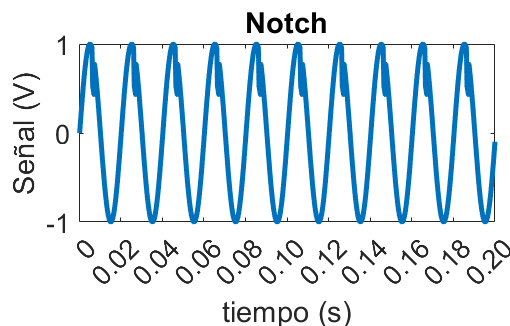


Figura 5. Ejemplo de señal eléctrica con *notch*.

Además de los mencionados, en esta tesis se han tenido en cuenta algunos eventos que no se incluyen en el estándar IEEE 1159:2019, como son el *flicker* o parpadeo y los *spikes*.

- *Flickers*. Los *flickers* son eventos caracterizados por variaciones rápidas y repetitivas de la tensión, lo que provoca fluctuaciones (véase figura 6). Habitualmente, estas fluctuaciones pueden apreciarse en la intensidad luminosa de las luces, provocando un parpadeo con las variaciones de tensión. Puesto que son percibidas por el ojo humano, se trata de un fenómeno molesto. Además de eso, puede causar interferencias en los equipos de comunicación, mal funcionamiento en sistemas de control o desconexión automática de equipos electrónicos [11], [12].

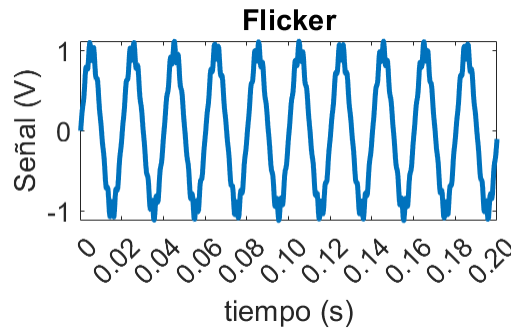


Figura 6. Ejemplo de señal eléctrica con *flicker*.

- *Spikes*. Cuando se habla de *spikes*, normalmente se refiere a *multiple spikes*. Mientras que un *spike* equivaldría a un transitorio impulsivo, cuando se encuentran de manera múltiple estas subidas de tensión se repiten de forma periódica, de forma opuesta a los *notches*, ya que la tensión disminuía brevemente para estos últimos, tal y como muestra la figura 7. Estos eventos pueden provocar daños en los equipos electrónicos y su aislamiento y reducir su vida útil.

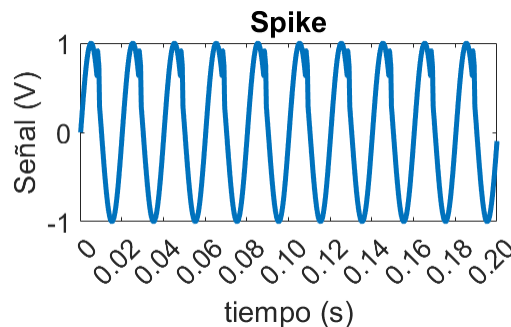


Figura 7. Ejemplo de señal eléctrica con *spike*.

En los estándares mencionados tampoco se hace referencia a los eventos complejos. Como se trató en el apartado anterior, por la casuística de la red eléctrica actual este tipo de eventos son cada vez más comunes y, sin embargo, no están adecuadamente incluidos en la normativa, por lo que esta no cubre todo el espectro de posibles eventos de la calidad de suministro actuales. Este hecho denota la necesidad de un estudio de eventos híbridos que permita concluir qué tipo de consecuencias pueden acarrear o qué valores son permisibles y cuáles no para el buen funcionamiento de los equipos.

Para el análisis de señales eléctricas de esta tesis, se incluyen eventos de armónicos con *sag* y armónicos con *swell*. En ambos casos, ilustrados en la figura 8, a una señal con distorsión armónica se le suma la aparición de variaciones de RMS, dentro de los mismos rangos de estos eventos en su forma simple.

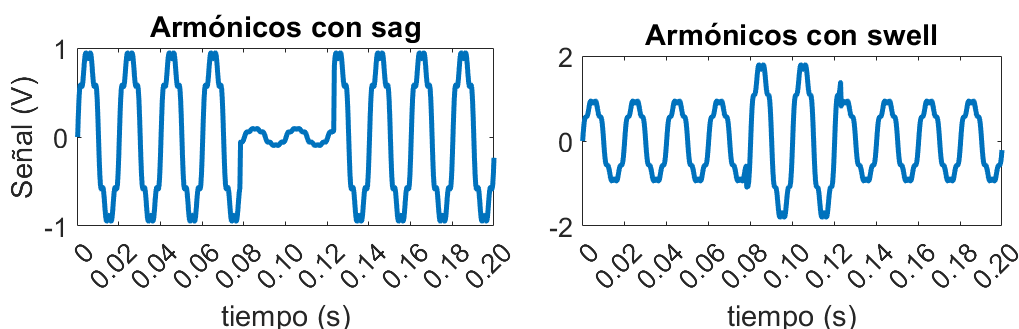


Figura 8. Ejemplo de señales eléctricas con armónicos con *sag* y armónicos con *swell*.

## 2.2. Técnicas de Detección y Clasificación de Perturbaciones en la Red Eléctrica

Especialmente en los últimos veinticinco años, de forma paralela al avance de las energías verdes (y por tanto a la aparición de cargas no lineales), han ido surgiendo y se ha ido profundizando en técnicas que permitan analizar el estado de la red y su calidad, detectando y clasificando los distintos eventos que pudieran tener lugar.

A finales del pasado siglo, autores como Math H. J. Bollen [10], Ewald F. Fuchs [17] o Jos Arrillaga [18] sembraron las bases del estudio de la calidad de suministro tal y como lo conocemos hoy. Por ejemplo, Bollen [10] aporta una serie de pasos seguidos habitualmente para el análisis de PQ de una señal eléctrica, resumidos en la figura 9. Inicialmente, se recopila la información relevante de las señales eléctricas, tanto los puntos medidos como la frecuencia de muestreo, las condiciones de medida, etc. para, en la fase de pre-procesamiento, normalizar y segmentar estas señales en función de las necesidades del estudio. En la fase de extracción de características se incluyen todas las téc-

nicas de procesamiento de señales basadas en dominio del tiempo, de la frecuencia, o ambos y, finalmente, en la fase de clasificación, se aplican técnicas que permiten identificar el tipo de evento presente en la señal.

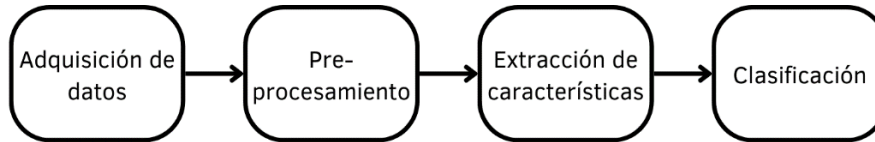


Figura 9. Esquema de los pasos seguidos típicamente para el análisis de PQ.

Para comenzar, se han analizado y clasificado 220 documentos sobre la calidad de suministro eléctrico publicados entre 1998 y 2024, prestando especial atención en los últimos 5-10 años, tal y como muestra la figura 10.

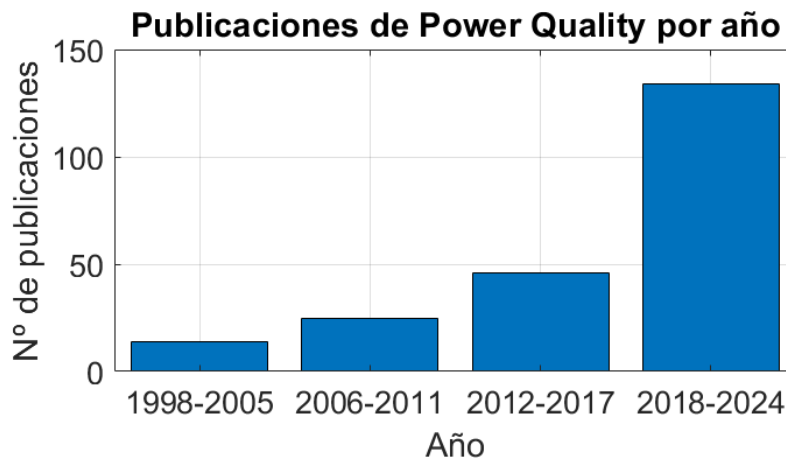


Figura 10. Distribución temporal de la publicación de los documentos analizados.

Para su análisis, estos documentos se han ido clasificando con distintos criterios, que incluyen la técnica o método de extracción, si cuenta con alguna técnica de clasificación basada en Inteligencia Artificial (IA), la complejidad de los eventos estudiados, el entorno de estudio, si se consideran energías renovables, los tipos de eventos detectados, si se trabaja en dominio del tiempo, de la frecuencia, o ambos; qué estadísticos de orden superior se estudian (si corresponde), cuál es el origen de las señales analizadas, qué tipo de instrumentación se emplea para la toma de datos, o si se trata de un documento teórico. Todos estos criterios están recogidos en la tabla 1, donde además se especifica los posibles valores que desembocan de cada uno de ellos.

Tabla 1. Criterios de clasificación de los documentos del estado del arte.

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Posibles valores</b>
<b>Método de extracción</b>	Tipo de método(s) o técnica(s) utilizado(s) para la detección de eventos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transformada discreta de Fourier (DFT, <i>Discrete Fourier Transform</i>) o transformada rápida de Fourier (FFT, <i>Fast Fourier Transform</i>)</li> <li>- Transformada Wavelet (WT, <i>Wavelet Transform</i>)</li> <li>- Transformada Stockwell (ST, <i>Stockwell Transform</i>)</li> <li>- Transformada de Fourier de corto tiempo (STFT, <i>Short Time Fourier Transform</i>)</li> <li>- Filtros Kalman (KF, <i>Kalman Filters</i>)</li> <li>- Transformada Hilbert (HT, <i>Hilbert Transform</i>) o Hilbert-Huang (HHT, <i>Hilbert-Huang Transform</i>)</li> <li>- Estadísticos de orden superior (HOS, <i>Higher-Order Statistics</i>)</li> <li>- Distorsión armónica total (THD, <i>Total Harmonic Distortion</i>)</li> <li>- RMS</li> <li>- Otras técnicas de extracción de características</li> </ul>
<b>Clasificación con IA</b>	¿Se utiliza alguna técnica de IA para clasificar los eventos?	Sí, no
<b>Complejidad de los eventos</b>	Diferenciación entre eventos simples o eventos formados por más de un evento simple (eventos complejos)	Eventos simples, eventos complejos
<b>Entorno</b>	Tipo de entorno de la red en la que se enfoca el estudio	Generación, entorno industrial, entorno urbano o doméstico
<b>Energías renovables</b>	Fuente de energía renovable, en caso de que se incluya en el estudio	Sistemas eólicos, sistemas fotovoltaicos
<b>Eventos</b>	Tipo de eventos detectados	<i>Sag, swell</i> , armónicos, <i>flicker</i> , transitorios, interrupción, <i>notch, spike, sag</i> con armónicos, <i>swell</i> con armónicos, otros eventos complejos
<b>Dominio</b>	Dominio en el que se procesan las señales	Dominio del tiempo, dominio de la frecuencia

Tabla 1. Criterios de clasificación de los documentos del estado del arte (cont.).

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Posibles valores</b>
<b>Estadísticos de orden superior</b>	¿Qué estadísticos se incluyen en el estudio (si corresponde)?	Asimetría o <i>Skewness</i> (Sk), curtosis o <i>Kurtosis</i> (K), estadístico de quinto orden (FOS, <i>Fifth-Order Statistic</i> ), estadístico de sexto orden (SOS, <i>Sixth-Order Statistic</i> )
<b>Origen de la señal</b>	Tipo de señales usadas en el análisis	Señales reales, señales sintéticas
<b>Instrumentación</b>	Instrumentación utilizada para la obtención de señales reales	Instrumentación comercial, instrumentación diseñada por los autores
<b>Documento teórico</b>	El documento es una recopilación de artículos ( <i>review</i> ) o teórico	Sí, no

Puesto que el objetivo es proporcionar un estado del arte lo más claro posible, se van a ilustrar los datos con gráficos de conjuntos paralelos, diseñados por Kosara *et al.* [19], [20]. En estos gráficos, las categorías están representadas por barras verticales, y el conjunto de datos de cada categoría forma una línea de flujo, que será más o menos ancha en tanto mayor sea el grupo de datos que forma la categoría.

De forma general, y una vez revisados todos los documentos considerados para el estado del arte, se aprecia que los métodos que más se utilizan para el análisis de señales en términos de calidad de suministro son la transformada Wavelet (WT) (51 documentos), la transformada discreta y transformada rápida de Fourier (DFT/FFT) (44 documentos) y los estadísticos de orden superior (HOS) (42 documentos). Respecto a los métodos de clasificación, un total de 95 documentos incorporan alguna técnica de inteligencia artificial (IA) al estudio.

Sin embargo, la relevancia de estos métodos ha ido variando a lo largo del último cuarto de siglo, tal y como se aprecia en la figura 11. Centrando la atención en la primera parte del gráfico, en la primera columna se distinguen cuatro grupos, formados por la transformada Wavelet, los estadísticos de orden superior, la transformada discreta/rápida de Fourier, y otras técnicas, donde se incluirían la transformada Stockwell, filtros Kalman o la transformada Hilbert/Hilbert-Huang, entre otros métodos.

Estos grupos están divididos a su vez en franjas temporales, mostrando con ello la popularidad que ha ido experimentando cada técnica. Por ejemplo, para los años desde 1998 hasta 2005 destaca especialmente la transformada Wavelet, y de forma más comedida las transformadas discreta/rápida de Fourier, mientras que la investigación con estadísticos de orden superior es inexistente. En el siguiente rango desde 2006 hasta 2011, se mantiene la investigación en WT y DFT/FFT pero comienzan a tener mayor presencia los HOS, situación que en ambos casos se conserva entre 2012 y 2017. Es a partir de 2018 donde se observa un cambio más considerable: si bien la investigación con transformada Wavelet se mantiene, su popularidad mengua hasta ser un 13% del total, frente al 30% que representaba en el primer rango y que había mantenido prácticamente (27.3%) hasta 2017. Por el contrario, el análisis de señales con estadísticos de orden superior aumenta progresivamente durante los años, hasta alcanzar un 17% del total entre 2018 y 2024, mientras que la transformada discreta/rápida de Fourier se mantiene en torno a un 19% hasta 2011, y desciende a un 15% de ahí en adelante. Asimismo, en la última franja temporal hay un aumento del uso de otras técnicas. Hasta 2017, estas otras técnicas representaban hasta el 40% del total por año, cifra que se eleva hasta el 53% entre 2018 y 2024, debido a que algunas investigaciones buscan facilitar el análisis y la comprensión de la calidad de suministro eléctrico con cargas no lineales en técnicas más alternativas, como el uso de análisis de componentes principales, análisis de espectro singular o incluso el desarrollo de métodos nuevos, fusionando dos o más métodos ya existentes.

Si bien en los últimos seis años se ha obtenido, por ejemplo, que el 13% de los documentos usan la transformada Wavelet y el 53% emplean otra técnica distinta de las más populares, estos porcentajes no son excluyentes. Es decir, puede haber publicaciones que integren más de un método de detección, con lo cual un mismo artículo puede estar contenido en ambas categorías. De hecho, la combinación de transformada Wavelet con otras técnicas de detección se da en [14], [21], [22], [23], [24], [25].

En general, es habitual que los investigadores usen uno o varios métodos de detección. Las referencias [26], [27] aplican la mayoría de las técnicas mencionadas en este estado del arte, y [28] aporta una selección de técnicas distintas a las transformadas habituales, como los filtros Kalman o los estadísticos de orden superior. También es común el uso combinado de IA con una técnica de detección, como es el caso de [29] con transformada Hilbert-Huang, [30], [31] con HOS, [32] con RMS, [33] con THD, [34], [35], [36]

con transformada Stockwell, [37], [38], [39] con transformada Wavelet, y [40], [41] con DFT/FFT.

Algunos autores van más allá, usando, además de la IA, más de una técnica de extracción de características, como es el ejemplo de [42] con transformada Wavelet y DFT/FFT, [43] con DFT/FFT, transformada Stockwell y transformada Hilbert-Huang, [44] con DFT/FFT, estadísticos de orden superior y transformada Hilbert-Huang, [45], [46], [47] con transformada Stockwell y estadísticos de orden superior, [48] con transformada Stockwell con THD y RMS, y [49] con estadísticos de orden superior y transformada Hilbert-Huang.

Es más, algunos investigadores optan por la caracterización multidimensional de las señales eléctricas, esto es, la combinación de varios indicadores que extraen distinta información de la señal y que, en su conjunto, permiten la detección y/o clasificación de eventos. Por ejemplo, [50] usa múltiples indicadores, incluidos el factor de cresta, la distorsión armónica total y el factor K para detectar eventos transitorios, y [51] fusiona características extraídas tanto del dominio del tiempo como de la frecuencia para detectar eventos híbridos. En [52], se implementa una combinación de estadísticos de orden superior y RMS para detectar eventos complejos, mientras que [21] incorpora un conjunto de indicadores y métodos para detectar eventos simples y complejos, haciendo uso de estadísticos de orden superior, entropía, factor de cresta y factor de forma. Shen *et al.* [53] también usa HOS, factor de cresta y factor de forma, pero añadiendo características como el RMS y el rango. Thirumala *et al.* [54] proponen clasificar señales sintéticas combinando indicadores menos habituales como la tensión pico a pico, la media y el máximo de 10 valores de la THD, o el factor de distorsión instantáneo total.

Por otra parte, se muestra la relevancia del entorno de la red eléctrica estudiada a lo largo del tiempo (segunda parte del gráfico en la figura 11), donde se aprecia que el incremento de la investigación en generación, de inexistente a alcanzar el 28% del total entre 2018 y 2024, está fuertemente ligado al contexto sociocultural. Como se ha comentado en el apartado anterior, cada vez es mayor la demanda legal y ecológica de energías renovables como fuentes principales de generación de energía, y, puesto que estas provocan la aparición de cargas no lineales y diversas perturbaciones más complejas en la red [26], [55], es lógico que una parte considerable de la investigación en calidad de suministro se centre en distintos aspectos de este ámbito, como pueden ser los componentes necesarios de las fuentes de energía renovables para especificar el origen de las

perturbaciones [11], [22], [56], [57], [58], [59], o las condiciones meteorológicas [60], [61]. En la tabla 2 se recogen las publicaciones analizadas que involucran sistemas fotovoltaicos, sistemas eólicos, o ambos.

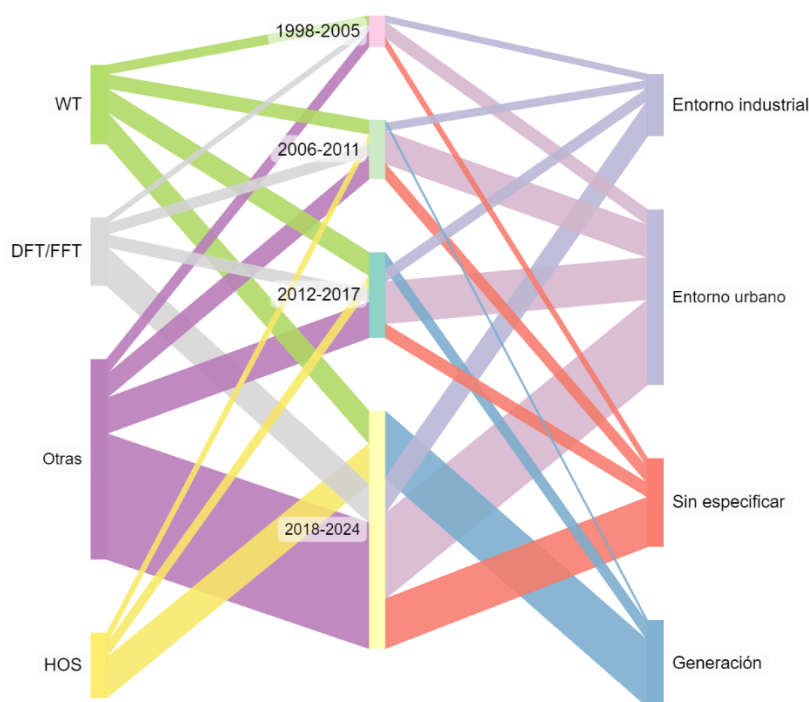


Figura 11. Conjunto paralelo que relaciona los métodos más habituales con el rango temporal y el entorno en el que se desarrolla el estudio.

Tabla 2. Publicaciones de energías renovables en el ámbito de la calidad de suministro.

Fuente de energía renovable estudiada	N.º de publicaciones	Referencias
Fotovoltaica	24	[15], [16], [31], [36], [43], [60], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79]
Eólica	4	[53], [80], [81], [82]
Fotovoltaica y eólica	17	[11], [22], [26], [55], [56], [57], [58], [59], [61], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90]

Como último apunte del gráfico en la figura 11, mientras que la investigación en entorno industrial permanece en un porcentaje constante en el tiempo, alrededor del 15%, la investigación en entorno urbano o doméstico se reduce a un 36% en el último rango frente al 50% constante que ostentaba anteriormente. Este decaimiento tiene lugar en pos de una mayor investigación en generación, como ya se ha comentado.

Otro factor interesante de la clasificación de documentos es conocer la fuente de las señales utilizadas para cada investigación, es decir, si las señales son de origen real o sintético. Aunque algunos artículos utilizan ambos tipos para corroborar la programación o los cálculos [91], [92], [93], estos solo representan el 19.6% de las publicaciones no teóricas contempladas, usándose en la mayoría de investigaciones solo uno de los tipos de origen de la señal. Otros ejemplos del uso de señales tanto reales como sintéticas son [94], [95], [96], aplicados al análisis de la calidad de suministro con estadísticos de orden superior, y [97], [98], [99], aplicados al análisis con transformada Wavelet.

Como ya se ha comentado, la incorporación al sistema eléctrico de fuentes de energía alternativas trae consigo la aparición más habitual de cargas no lineales y de un espectro de eventos más complejos de los que se habían observado con fuentes de generación tradicionales. Este hecho hace necesaria una mayor investigación en eventos híbridos o complejos, del que surge entonces un dilema para los investigadores: ¿es mejor estudiar señales reales, pudiendo entonces analizar únicamente los tipos de eventos localizados (y con el riesgo de no localizar eventos complejos en esa campaña de medida), o es mejor usar señales sintéticas que garanticen caracterizar los eventos complejos deseados, pero sin tener el contexto de una red real que pueda llegar a ser inestable?

La respuesta de cada investigador a esta cuestión puede depender de distintos factores, como, por ejemplo, si existe la posibilidad de realizar una campaña de medida por cuestiones de instrumentación o capacidad de almacenamiento de datos eléctricos, pero, a grandes rasgos, el 52.7% de las publicaciones analizadas eligen usar señales sintéticas únicamente (usando, por tanto, solamente señales reales en el 27.7% de los documentos). Pese a ello, sólo aproximadamente un tercio (32.5%) de las señales sintéticas que se estudian contemplan eventos híbridos, tal y como ilustra la figura 12, si bien el porcentaje con señales reales es aún menor, del 28%. Además, cuando se trata de estudiar eventos complejos, los investigadores suelen confiar más en técnicas como la transformada Wavelet, los estadísticos de orden superior o métodos alternativos que también permitan la detección de características no lineales de la señal, en detrimento de técnicas como DFT/FFT que dificultan esta tarea, motivo por el que probablemente en los últimos años ha aumentado la investigación de ese primer grupo de métodos. En la mayoría de las publicaciones que emplean estos métodos, se usa además de forma complementaria alguna técnica de IA para clasificar los eventos, lo cual tiene sentido si se observa que los eventos complejos son detectados y clasificados en su mayoría a través de técni-

cas de IA, mientras que las investigaciones que no recurren a estos sistemas se centran en eventos simples más fácilmente identificables, como *sags*, *swells*, armónicos o transitorios.

Por otra parte, resulta interesante destacar que, pese a que los *sags* son el tipo de evento más común [64], [100], [101], los armónicos los superan como los eventos más estudiados (el 17.9% de los eventos estudiados son armónicos, frente al 15.3% de los *sags*), ambos seguidos por los transitorios (14.4%) y los *swells* (11.4%). Resulta lógico, pues, que el evento complejo más estudiado sean los armónicos con *sag* (6.7% de los eventos).

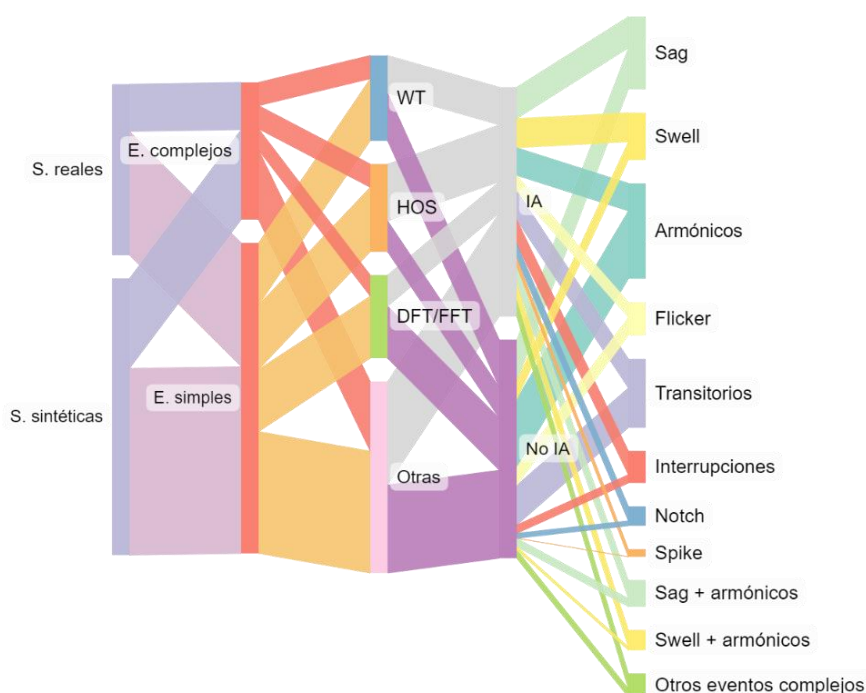


Figura 12. Conjunto paralelo que relaciona el origen de la señal con la complejidad de los eventos, técnica de detección, uso de IA y tipo de evento localizado.

En otro orden de cosas, anteriormente se han mencionado en varias ocasiones las características no lineales de una señal eléctrica. Las características no lineales son comportamientos anómalos en la señal que no pueden describirse mediante relaciones lineales simples, es decir, son, principalmente, distorsiones, eventos transitorios o variaciones no estacionarias. Mientras que algunas técnicas como los estadísticos de orden superior, los filtros Kalman, la transformada Hilbert-Huang o la transformada Wavelet permiten extraer características no lineales de la señal, con otros métodos como el RMS o la transformada discreta/rápida de Fourier no es posible, lo que ha llevado a que la investigación se focalice cada vez más en estudiar las técnicas con las que sí pueden evaluarse las

características no lineales, como queda representado en la figura 13. Entre 1998 y 2011, la investigación en métodos que extraen características no lineales (CNL en el gráfico) era minoritaria, sin embargo, esta situación cambia desde 2012 hasta nuestros días, cuando la división entre ambos grupos de métodos está más igualada.

Además, el hecho de que una publicación emplee alguna técnica que no extrae características no lineales (No CNL) no significa que sea el único método utilizado para el estudio. Como se recalcó anteriormente, un grueso de las investigaciones incorpora más de un método en su estudio, por lo que, aun usando un método No CNL, pueden estudiarse fenómenos no estacionarios. Es más, de 2018 en adelante, el 68.75% de las publicaciones con técnicas No CNL incluyen también, como mínimo, uno de los otros métodos. Un claro ejemplo sería [102], donde se aplica la transformada rápida de Fourier junto con estadísticos de orden superior, en este caso la *kurtosis* (aunque este término en español es *curtosis*, por semejanza a la bibliografía va a emplearse el término en lengua inglesa) espectral, para estudiar la calidad de suministro en señales eléctricas.

Dicha *kurtosis* espectral es una variante, medida en el dominio de la frecuencia, del estadístico de cuarto orden, conocido como *kurtosis* ( $K$ ), cuyo valor se obtiene analizando la señal en el dominio del tiempo. Tal y como resalta el gráfico de la figura 13, el estadístico de cuarto orden es el más utilizado (incluido en 36 publicaciones), seguido por el estadístico de tercer orden o *skewness* ( $Sk$ , asimetría en español, con 27 publicaciones). Para los estadísticos de quinto y sexto orden (FOS y SOS, respectivamente), sin embargo, sólo se han localizado cuatro publicaciones que los incluyen en las investigaciones, por lo que su investigación es incipiente; en [31] se extraen los estadísticos de orden par (segundo, cuarto y sexto orden); en [103], se utilizan los estadísticos de tercer, cuarto y quinto orden, y, en [81], [104], se emplean estadísticos de tercer, cuarto, quinto y sexto orden para la detección de eventos complejos de la calidad de suministro. Es muy habitual, de hecho, que se estudie más de un estadístico al mismo tiempo, situación dada en el 75,7% de las publicaciones que trabajan con estadísticos de orden superior.

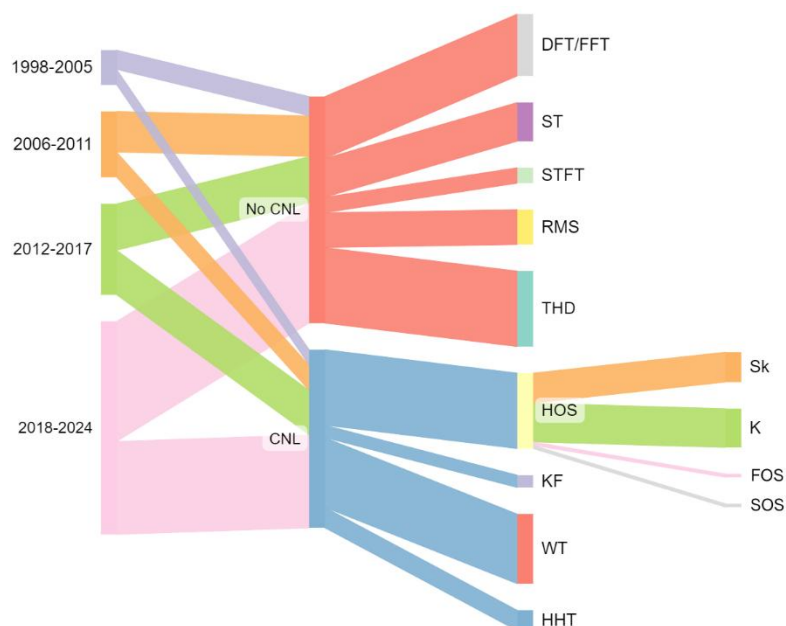


Figura 13. Conjunto paralelo que relaciona la evolución temporal de métodos que extraen características no lineales y aquellos que no las extraen con el tipo de técnica utilizada.

Aunque, hasta el momento, se han analizado principalmente las publicaciones con análisis de señales práctico, casi un tercio (29.8%) de los documentos contemplados para este estado del arte son teóricos (véase figura 14). Si bien las publicaciones teóricas son en su mayoría revisiones bibliográficas, un 22% de los documentos teóricos se emplean para otros fines, como la teorización de otros métodos de detección/clasificación, aun sin ser puestos a prueba con datos eléctricos.

Las publicaciones en las que se trabaja con señales ya sean reales o sintéticas, representan el 70.2% del total. Para el análisis de datos eléctricos, pueden emplearse el dominio del tiempo, el dominio de la frecuencia, o ambos, ocurriendo este último en el 48% de los casos. De hecho, en el 90.6% de las publicaciones se estudian las señales en el dominio del tiempo, ya sea de forma exclusiva o en combinación con el dominio de la frecuencia. Este porcentaje es menor, del 57.5%, para el dominio de la frecuencia, y aún más infrecuente en el caso de publicaciones que estudian señales exclusivamente en el dominio de la frecuencia (9.4%).

En un segundo anillo interior, en la figura 14, se dividen las publicaciones de cada dominio en el origen, real o sintético, de las señales usadas en el estudio. En líneas generales, es más común analizar señales reales en el dominio del tiempo (el 54.2% de las publicaciones que usan señales reales, analizan únicamente en el dominio del tiempo) o bajo ambos dominios (35.6%) que en el dominio de la frecuencia (10.2%).

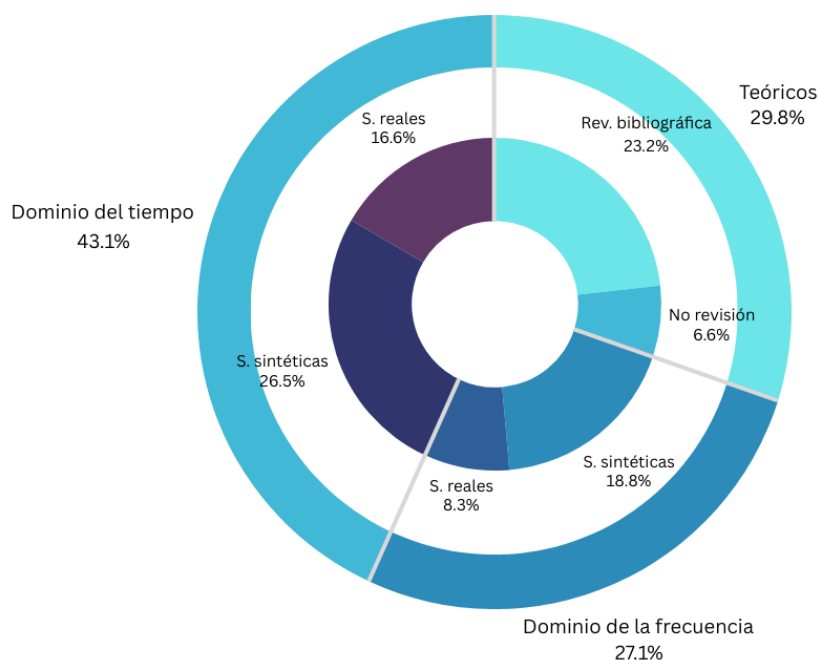


Figura 14. Gráfico de doble anillo que clasifica las publicaciones según su naturaleza y origen.

Remontándonos a la recolección de datos de estas señales reales, aunque la mayoría de los investigadores, concretamente un 82%, optan por el uso de instrumentación comercial, el alto coste que implican estos dispositivos, o la dificultad para programar en ellos algoritmos complejos, lleva a que algunos estudios, como [105], usen instrumentación diseñada por los propios investigadores. De hecho, en [106], [107], [108], [109], se centran en explicar en detalle cómo se lleva a cabo el diseño para la recopilación de datos de calidad de suministro eléctrico.

En conclusión, tras los resultados volcados por el análisis de publicaciones, se pueden conjeturar algunas tendencias en la investigación en años venideros: indudablemente, los investigadores buscan facilitar el conocimiento sobre eventos complejos y fenómenos anómalos que están teniendo lugar en la red eléctrica tras la incorporación no ya sólo de grandes parques de fuentes de energías renovables, sino también de usuarios prosumidores, o consumidores de grandes cantidades de energía en plazos cortos de tiempo (por ejemplo, carga de coches eléctricos). Por ello, hay un crecimiento exponencial de publicaciones que incorporan una técnica de inteligencia artificial que permita identificar y clasificar con un margen de error mínimo los eventos, simples e híbridos, de la calidad de suministro.

De hecho, y con este mismo fin de acercar el conocimiento sobre calidad de suministro a la comunidad científica, o incluso a individuos que no manejan los conocimientos técnicos necesarios para el procesamiento de las técnicas mencionadas, como operado-

res de planta o usuarios de red, algunas investigaciones se complementan con una técnica de análisis exploratorio de datos (EDA, *Exploratory Data Analysis*). Las técnicas EDA son un conjunto de métodos utilizados para analizar datos, orientados en descubrir patrones de comportamiento, detección de anomalías o verificar supuestos, entre otras áreas, siendo clave la representación visual de la información a través de gráficos, histogramas, diagramas, etc. En [110], [111] se establecen patrones de trayectorias circulares y elípticas para la detección de eventos simples y complejos. En [112], se observa mediante diagramas de dos dimensiones trazados con estadísticos de orden superior la evolución de la señal eléctrica frente a perturbaciones, herramienta que se mejora en [113], y en [114], se propone otro enfoque visual para detectar comportamientos anormales en la red, si bien sendas herramientas requieren de conocimientos más específicos para su comprensión. Por el contrario, en [115] se describe un instrumento que incorpora indicadores en código de color para facilitar la identificación de perturbaciones, y, de manera similar, [116] presenta una serie de herramientas diseñadas para representar los eventos de calidad de suministro localizados; no obstante, ambos estudios se basan en la aplicación de la normativa comentada al inicio de este capítulo y que, como ya se ha comentado, puede no acoger completamente el comportamiento complejo de las cargas integradas en la red eléctrica.

Capítulo 3.  
Conceptualización y diseño  
de herramientas de  
visualización  
multidimensional

### 3. Conceptualización y diseño de herramientas de visualización multidimensional

Tras analizar las tendencias actuales y futuras en el campo de la calidad de suministro eléctrico en el capítulo anterior, se decide el uso de una herramienta de visualización multidimensional, que pueda incorporar además alguna técnica de IA de forma complementaria, compatible con la detección de eventos complejos y que sea puesta a prueba con señales sintéticas y reales.

Para poder decidir los indicadores utilizados y el tipo de herramientas, es fundamental establecer primero las bases de datos de señales eléctricas a disposición del estudio.

#### 3.1. Bases de datos disponibles

Inicialmente, en el plan de investigación se planteó el uso de tres bases de datos distintas: datos de señales con eventos simples preclasificados disponibles en IEEE DataPort [117], [118], señales obtenidas en el grupo de investigación PAIDI-TIC-168, en Algeciras, y señales obtenidas en el grupo de investigación PAI-TIC-240, en Córdoba.

Sin embargo, fue necesario implementar algunos cambios, ya que las señales recolectadas en Córdoba son medidas a una frecuencia de muestreo de 32 Hz, lo cual es insuficiente para la caracterización de la señal, considerando que el teorema de Nyquist establece que para evitar la pérdida de información la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia de la señal (para redes europeas, 50 Hz), es decir, 100 Hz.

Además de esto, existía una carencia de señales sintéticas con eventos simples y complejos preclasificados que permitiesen concluir patrones de comportamiento claros de los indicadores frente a distintos tipos de perturbaciones. Si bien el grupo de investigación PAIDI-TIC-168 contaba con un set de señales sintéticas preclasificadas con algunos eventos simples, estas no eran suficientes para caracterizar gran parte del espectro de eventos de la calidad de suministro en redes eléctricas, por lo que fue necesario integrar a la investigación otra base de datos, de origen sintético, que cubriera una gran variedad de eventos de la calidad de suministro. Por lo tanto, se han utilizado las siguientes bases de datos:

- Base de datos #1 – Base de datos *Machlev*. A través de la herramienta de MATLAB propuesta por [119], se obtuvieron lotes de 100 señales sintéticas por

tipo de evento y nivel de ruido, con duración de 10 ciclos (0.2 segundos) y frecuencia de muestreo 3.2 kHz. Específicamente, se crearon señales con: armónicos (del que se obtuvieron 315 señales), *flicker*, interrupciones, *notches*, *sags*, *spikes*, *swells*, transitorios impulsivos, transitorios oscilatorios, armónicos con *sag* y armónicos con *swell*, además de señales sin eventos, tanto sin ruido como con ruido blanco de 30, 40, 50, 60 y 70 dB. Esta base de datos se emplea porque cubre el mayor número de perturbaciones eléctricas.

- Base de datos #2 – Base de datos Preclasificados Simples. Esta base de datos sintética y libre de ruido fue creada en el grupo de investigación PAIDI-TIC-168 con frecuencia de muestreo de 20 kHz, y está formada por 20 señales de 0.1 segundos de duración con transitorios impulsivos, 63 señales con interrupciones y 567 señales con *sags*, ambos grupos repartidos equitativamente en señales de: 0.3 segundos, 0.6 segundos, 1.2 segundos, 4 segundos, 22 segundos, 80 segundos y 200 segundos de duración; y cuatro señales de 4 segundos de duración con *swells*. Esta base de datos se emplea para comparar las conclusiones obtenidas tras el análisis de eventos sintéticos generados desde diferentes condiciones y con diferentes duraciones y frecuencias de muestreo.
- Base de datos #3 – Base de datos IEEE DataPort. Se establece como primera base de datos con señales reales los dos sets de señales publicados en [117], [118], que incluyen 42 señales preclasificadas con transitorios impulsivos y 26 señales con *sags*, todas ellas medidas a 20 kHz y con duraciones que oscilan entre 1 y 3.06 segundos. Esta base de datos se emplea porque permite estudiar la concordancia entre el comportamiento de los indicadores en eventos específicos sintéticos y reales.
- Base de datos #4 – Base de datos PAIDI-TIC-168. De forma constante, el grupo de investigación recopila datos de suministro eléctrico con una frecuencia de muestreo de 10 kHz y duraciones de un segundo. En este caso, no se cuentan con eventos preclasificados y las señales deben ser analizadas, por tanto, para localizar eventos de la calidad de suministro. Esta base de datos se emplea porque con ella se corrobora la utilidad de la herramienta para la localización de eventos en señales sin previa clasificación.

### 3.2. Selección de indicadores

En este apartado se contemplan los posibles indicadores que van a formar parte de la herramienta multidimensional de monitoreo de la calidad de suministro. Se han tenido en cuenta, para ello, los estadísticos de orden superior y otros indicadores tradicionales, denominados así por ser usados habitualmente en la instrumentación, que han probado ser útiles en otras publicaciones mencionadas en el estado del arte. Se va a comparar el comportamiento de estos parámetros frente a distintos tipos de eventos de la calidad de suministro, y de entre ellos se van a seleccionar los que se consideran óptimos para el desarrollo de una herramienta de visualización multidimensional descartando, por ejemplo, aquellos que aporten información redundante.

Con todo ello, los indicadores a estudiar son:

- Varianza (var). Mide la dispersión de los valores de una señal en torno a su media, reflejando las variaciones en la tensión e indicando con ellos posibles inestabilidades.

$$var(x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ \frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \right]^2 \quad (1)$$

Donde 'X<sub>j</sub>' es el valor de cada dato,  $\sigma$  es la desviación estándar y 'N' es el número total de datos. Esto aplica para las ecuaciones desde la 1 a la 5.

- *Skewness* o asimetría (sk). Indica la asimetría de la distribución de la señal. Un valor positivo indica que la distribución de datos tiene una cola más larga a la derecha, y negativo, a la izquierda.

$$sk(x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ \frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \right]^3 \quad (2)$$

- *Kurtosis* (k). Mide el "apuntamiento" de la distribución de probabilidad de la señal, es decir, un valor alto de *kurtosis* indica picos más pronunciados, mientras que una baja *kurtosis* implica una distribución más plana.

$$k(x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ \frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \right]^4 \quad (3)$$

- Estadístico de quinto orden (FOS). El estadístico de quinto orden utilizado es el momento de quinto orden. No se conoce la función de este indicador mucho más allá de analizar patrones complejos y no lineales en las señales.

$$FOS(x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [x_j - \bar{x}]^5 \quad (4)$$

- Estadístico de sexto orden (SOS). El estadístico de sexto orden utilizado es el momento de sexto orden. Similar al estadístico de quinto orden, requiere mayor estudio y únicamente se parte de saber que resulta útil para analizar características complejas y no lineales de una señal eléctrica.

$$SOS(x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [x_j - \bar{x}]^6 \quad (5)$$

- Factor de cresta (CF). Es la relación entre el valor de pico de una señal y su valor RMS, indicando un alto factor de cresta, por tanto, picos pronunciados en la señal.

$$CF = \frac{V_{peak}}{V_{rms}} \quad (6)$$

- Relación señal-ruido (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*). Es la relación entre la potencia de la señal útil y la potencia del ruido. Un SNR alto indica que la señal es clara y menos afectada por el ruido.

$$SNR = 10 \cdot \log\left(\frac{P_S}{P_N}\right) \quad (7)$$

Donde  $P_S$  es la potencia de la señal,  $P_N$  es la potencia del ruido, y  $P_D$  es la potencia de la distorsión, para las ecuaciones 7 y 8.

- Relación señal-ruido y distorsión (SINAD, *Signal-to-Noise and Distortion ratio*). Mide la relación entre la potencia de la señal y la suma del ruido y la distorsión presentes. Es un indicador general de la calidad de la señal, combinando ruido y distorsión.

$$SINAD = 10 \cdot \log\left(\frac{P_S + P_N + P_D}{P_N + P_D}\right) \quad (8)$$

- Distorsión armónica total (THD, *Total Harmonic Distortion*). Mide la distorsión armónica en la señal, comparando la suma de las potencias de todos los armónicos con la potencia de la frecuencia fundamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n-rms}^2}}{V_{fund-rms}} \quad (9)$$

Donde  $V_{n-rms}$  es el valor RMS del  $n$ -ésimo componente armónico y  $V_{fund-rms}$  es el valor RMS de la componente fundamental.

Previo a comparar los indicadores, deben conocerse sus valores nominales como referencia, esto es, qué valor se obtendría al aplicar estos indicadores a una señal ideal sinusoidal de 50 Hz, sin presencia alguna de ruido ni eventos de la calidad de suministro que alteren su comportamiento. En el caso de la varianza o el factor de cresta, la bibliografía aporta valores nominales claros: entre otros autores, Florencias-Oliveros *et al.* [113] establecen el valor nominal de la varianza en 0.5; el valor nominal del factor de cresta, por su propia definición y como confirman autores como Shen *et al.* [53], es 1.4142. El valor nominal de la *skewness* para una señal sinusoidal de 50 Hz libre de ruido y perturbaciones es cero, tal y como se afirma en [95], [104], [113].

Sin embargo, aquí acaba todo consenso de la comunidad científica respecto a los valores nominales de los estadísticos de orden superior. Mientras que estudios como [31], [104] indican que el valor nominal de la *kurtosis* es  $-1.5$ , otros investigadores [95], [112], [120] establecen este valor nominal en  $1.5$ . La única referencia de un valor nominal del estadístico de quinto orden es cero, dato extraído de [104], por lo que este dato no ha podido ser contrastado. Finalmente, [31] estima que el valor nominal del estadístico de sexto orden es  $-6.2$ , mientras que [104] establece que es  $2.48$ .

Estas discrepancias pueden provenir de las diferencias entre puntos de referencia o normalización de las señales, pero evidencian la necesidad de un previo estudio de los valores nominales de los estadísticos de orden superior frente a señales ideales sinusoidales de 50 Hz.

Todos los indicadores cuyo valor nominal ya ha sido mencionado, consensuado o no, suelen medirse por ciclo de señal; sin embargo, la distorsión armónica total, tal y como establecen las normas UNE-EN 61000-4-7:2004, titulada “Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida. Guía general relativa a las

medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas.”, y UNE-EN 61000-4-30:2015, titulada “Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro”, debe ser medida cada diez ciclo de señal (en señales de 50 Hz) y su valor no debe ser superior al 8% [121], [122].

El valor de SNR y SINAD, por su parte, es único para cada señal analizada. Si bien las referencias sobre ambos indicadores afirman que, cuanto mayor sea el valor obtenido, más “limpia” está la señal de ruido y perturbaciones, establecen que, para señales reales, sus valores suelen oscilar entre 30 y 70 decibelios [44], [123].

Para determinar qué valores nominales se usan como referencia para cada indicador en esta investigación, se estudian inicialmente las señales sin eventos de la base de datos #1. El lote de 100 señales de 10 ciclos sin eventos y sin ruido está configurado de forma que las señales comienzan en puntos distintos de la forma de onda, lo que permite verificar si esto influye de alguna forma en los valores nominales. Tras el análisis del lote completo de señales, se verifica que el punto de inicio de la forma de onda es indiferente para el cálculo de los indicadores por ciclo, y se concluyen los valores nominales de referencia para el análisis de señales con eventos especificados en la tabla 3.

En esta tabla no se han incluido valores nominales para THD, SNR ni SINAD puesto que no es correcto hablar de un valor nominal único para estos indicadores, ya que se considera adecuado u óptimo cierto rango de valores. Por ejemplo, puesto que, tal y como se ha indicado anteriormente, SNR y SINAD en señales reales varían entre 30 y 70 dB, se considerará una señal ideal en cuestiones de ruido desde 80 dB en adelante. Para THD, se consideran adecuados los valores inferiores al 8%. Como referencia, para el lote de señales estudiadas, se han obtenido valores de  $5 \cdot 10^{-4}$  % para THD, y alrededor de 120 dB para SNR y SINAD.

Tabla 3. Valores nominales obtenidos para indicadores por ciclo tras analizar señales sin eventos de la base de datos #1.

Indicador	Valor nominal
<b>Varianza</b>	0.50
<i>Skewness</i>	0 (obtenido en MATLAB como valores inferiores a $10^{-14}$ )
<i>Kurtosis</i>	1.50
<b>Estadístico de quinto orden</b>	0 (obtenido en MATLAB como valores inferiores a $10^{-14}$ )
<b>Estadístico de sexto orden</b>	0.3125
<b>Factor de cresta</b>	1.4142

Una vez establecidos estos valores nominales, se estudia, con esa misma base de datos, el comportamiento de los indicadores frente a distintos eventos de la base de datos #1, observando con ello las similitudes y diferencias entre indicadores.

Para eventos de tipo *sag*, por ejemplo, se obtienen los valores para cada indicador, por ciclo, mostrados en la figura 15. En este caso, se observa que el valor de los indicadores varía respecto al nominal en presencia de un evento.

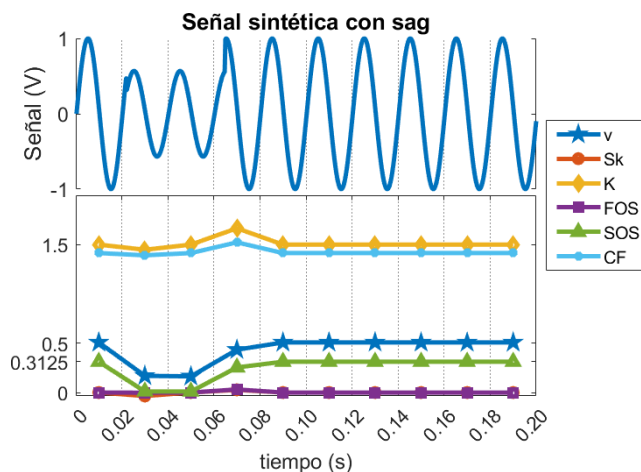


Figura 15. Evolución ciclo a ciclo de varianza, *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden y factor de cresta frente a un *sag*.

Asimismo, el comportamiento de la varianza y del estadístico de sexto orden es semejante, por lo que se decide la comparativa de ambos indicadores con todos los eventos y situaciones de ruido disponibles en la base de datos #1, para determinar si su comportamiento es lo suficientemente similar como para poder omitir uno de ellos sin que se desprecie información relevante para el estudio. De este proceso de análisis se concluye

que se mantienen las similitudes entre ambos indicadores, si bien las variaciones respecto al valor nominal del estadístico de sexto orden son más notables que las de la varianza, véase la figura 16 como ejemplo, con señales con un transitorio impulsivo y un *swell*, y que, por tanto, y en la búsqueda de otra perspectiva para la comparación de ambos estadísticos, van a aplicarse herramientas gráficas. En este caso se decide el uso de los gráficos de caja y bigotes, que muestran la distribución de un conjunto de datos a través de sus cuartiles, resaltando la mediana, los cuartiles superior e inferior, y posibles valores atípicos.

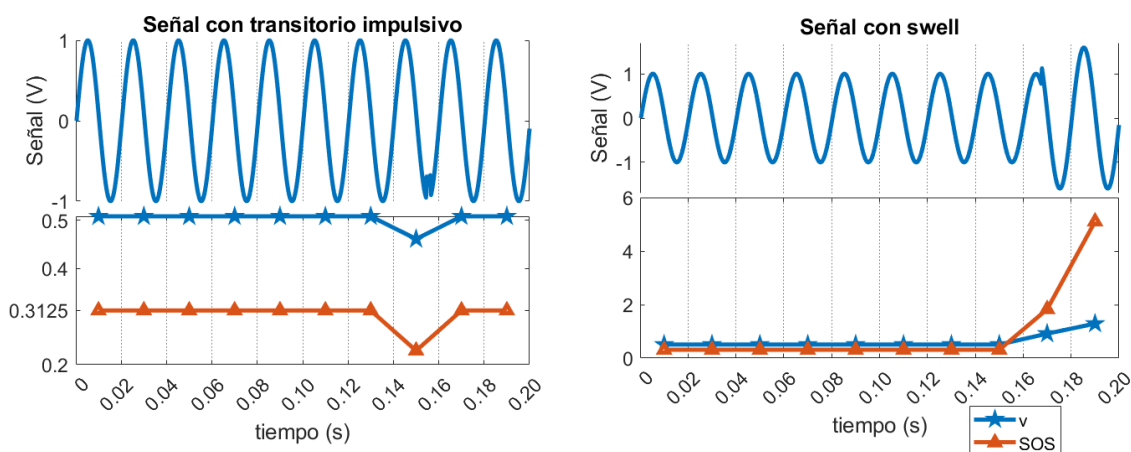


Figura 16. Evolución ciclo a ciclo de varianza y estadístico de sexto orden frente a un transitorio impulsivo y un *swell*.

Por cada lote de señales por tipo de evento de la base de datos #1, se obtienen 1000 valores de varianza y de estadístico de sexto orden (correspondiente a los 10 ciclos por señal, siendo lotes de 100 señales), usados para obtener un diagrama de caja y bigotes por tipo de evento. En la figura 17 se muestran los diagramas de caja y bigotes de los tres eventos cuya evolución ciclo a ciclo ha sido ya ilustrada, es decir, *sag*, transitorio impulsivo y *swell*.

En estos diagramas se observa con aún mayor claridad que el rango de variación respecto al valor nominal es mayor para el estadístico de sexto orden que para la varianza (con la excepción de los *sags* y las interrupciones, en cuyo caso el rango de variación en ambos casos va desde el valor nominal a cero y, al ser más alto el valor nominal de la varianza, 0.5 frente a 0.3125, este rango es mayor). Este hecho puede ser tanto positivo como negativo para la detección de eventos: por un lado, complica la predicción exacta del comportamiento del estadístico de sexto orden, pero, por otro lado, ese mayor rango de variación puede mejorar la predicción de eventos más difíciles de localizar porque

pueden tomarse como ruido, como es el caso de *flicker*, *notch* o *spike*. Se decide, por tanto, comparar con diagramas de caja y bigotes el comportamiento de ambos indicadores frente a estos eventos y a señales sin eventos con ruido de 30 dB, mostrados en la figura 18.

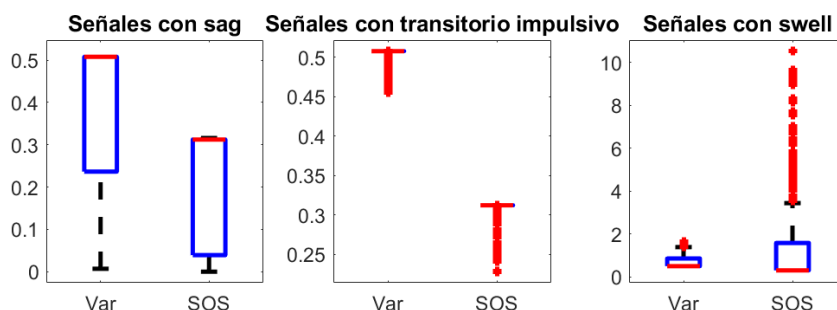


Figura 17. Diagrama de caja y bigotes con los valores de varianza y estadístico de sexto orden de señales con *sag*, transitorio impulsivo y *swell*.

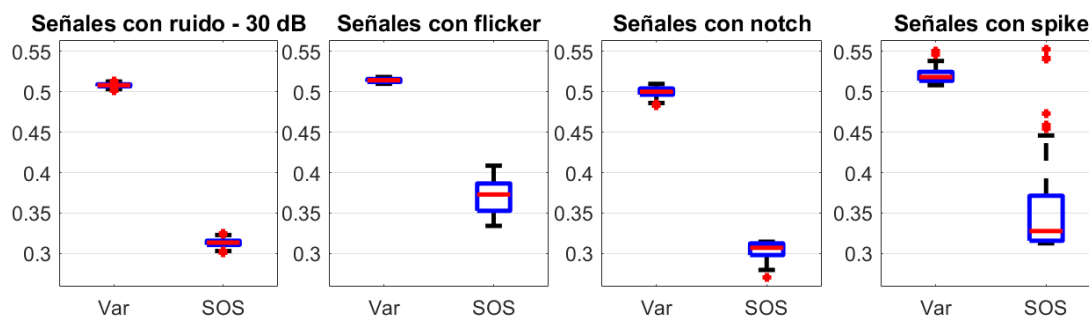


Figura 18. Diagrama de caja y bigotes con los valores de varianza y estadístico de sexto orden de señales con ruido de 30 dB, *flicker*, *notch* y *spike*.

Se observa que las variaciones respecto al valor nominal del estadístico de sexto orden en estos eventos supera en todos los casos a las variaciones originadas por ruido incluso en el peor de los casos, puesto que en señales reales el ruido SNR oscila entre 30 y 70 dB. Por lo tanto, el estadístico de sexto orden es muy sensible ante estas perturbaciones.

Sin embargo, no ocurre lo mismo en el caso de la varianza puesto que, frente a un *flicker*, sus márgenes de variación son menores a los de una señal con ruido y, por lo tanto, no sería adecuada para la detección de estos eventos. Asimismo, el valor de la varianza no se ve afectado por la distorsión armónica, a diferencia del estadístico de sexto orden, lo que dificulta la detección de eventos armónicos. Por todo ello, se decide que ambos indicadores presentan suficiente parecido como para emplear únicamente uno de ellos, siendo este el estadístico de sexto orden, por las ventajas previamente descritas.

Además de la revisión de estos indicadores ciclo a ciclo, se considera conveniente elegir entre SINAD y THD, ya que ambos aportan información sobre la posible distorsión armónica en la señal eléctrica. La diferencia entre SNR y SINAD es, de hecho, la distorsión, pudiendo ser indicador de presencia armónica el equivalente de restar ambos valores (si  $SNR - SINAD$  es 0, no se detecta distorsión en la señal, mientras que en caso contrario sí se detecta). Sin embargo, incluso en señales ideales de 50 Hz pueden producirse diferencias de decimales entre SNR y SINAD, por lo que debe definirse qué margen de diferencia entre SNR y SINAD determina realmente la presencia o no de armónicos en la señal eléctrica. Para ello, se estudian ambos valores para todas las señales con armónicos de la base de datos #1, obteniendo que la diferencia mínima entre SNR y SINAD es de 1.37 dB; por lo tanto, el criterio para detectar presencia armónica con SINAD es: si la diferencia de SINAD con SNR es mayor o igual a 1.37 dB, hay presencia armónica.

En el caso de THD, el criterio de detección es más sencillo y viene marcado por los estándares: si THD es mayor o igual al 8%, hay presencia armónica. Sin embargo, si se emplea THD como indicador, la herramienta visual queda restringida al análisis de señales con 10 o más ciclos.

Considerando ambos criterios, se han analizado todas las señales disponibles en las bases de datos #1, #2 y #3, obteniéndose que, con SINAD, se detectan el 98% de los eventos armónicos, pero con una incorrecta detección de armónicos en el 26% de los otros eventos (es decir, un 26% de falsos positivos en presencia armónica). Con THD, se detectan correctamente también el 98% de los eventos armónicos, mientras que los falsos positivos descienden al 10%. Por esta diferencia, y pese a la limitación de 10 ciclos, se elige THD como el indicador seleccionado para estudiar la presencia armónica.

En consecuencia, de los nueve indicadores contemplados inicialmente, se han descartado la varianza y SINAD, quedando por lo tanto configurado el set de indicadores de partida: *skewness*, *kurtosis*, momento de quinto orden, momento de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD. Seguidamente, con el fin de reducir la dimensión de la herramienta visual, se estudian los diagramas de dispersión de estos indicadores entre sí por tipo de evento. Los diagramas de dispersión permiten determinar si existe relación en el comportamiento de los indicadores y si, por tanto, el uso de todos ellos aporta información redundante que aumente la carga computacional de la herramienta innecesariamente. De esta forma, para todos los eventos contemplados en la base de datos #1 se obtie-

nen las relaciones entre indicadores de las figuras 19-29. En azul, se representan todos los puntos medidos mientras transcurre el evento; en naranja, el punto correspondiente a los valores nominales de ambos indicadores.

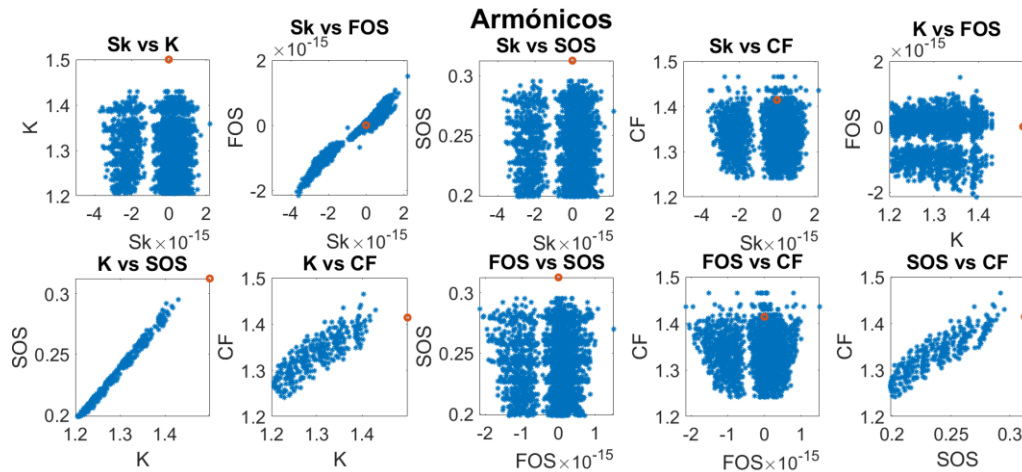


Figura 19. Diagramas de dispersión entre indicadores para armónicos.

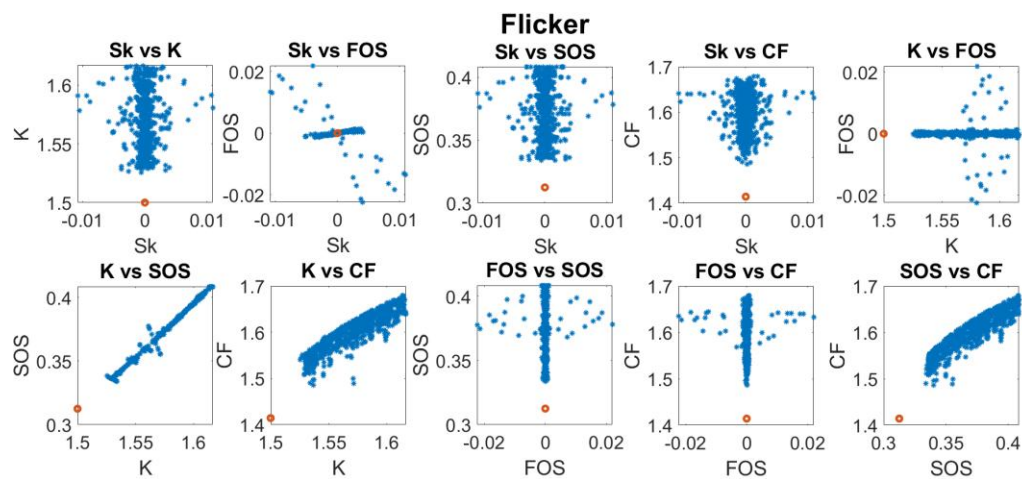


Figura 20. Diagramas de dispersión entre indicadores para flickers.

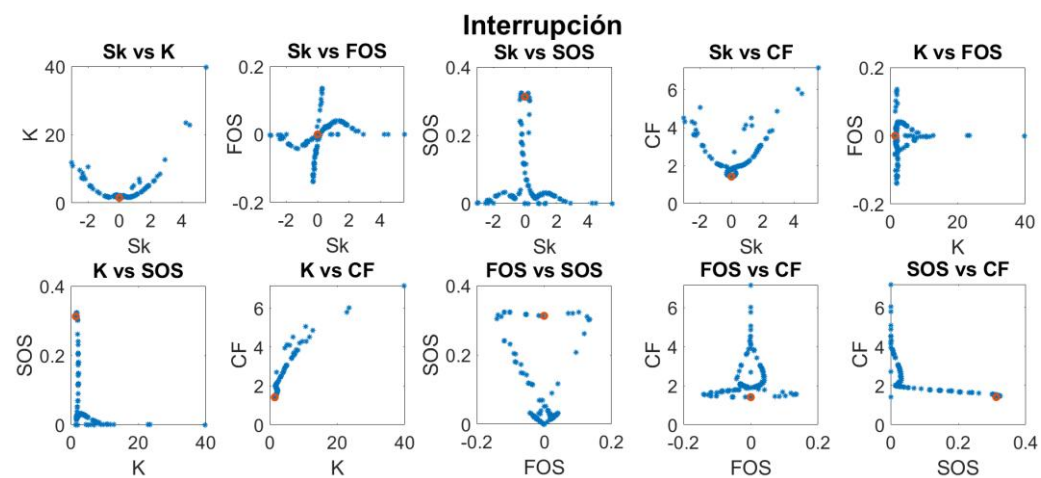


Figura 21. Diagramas de dispersión entre indicadores para interrupciones.

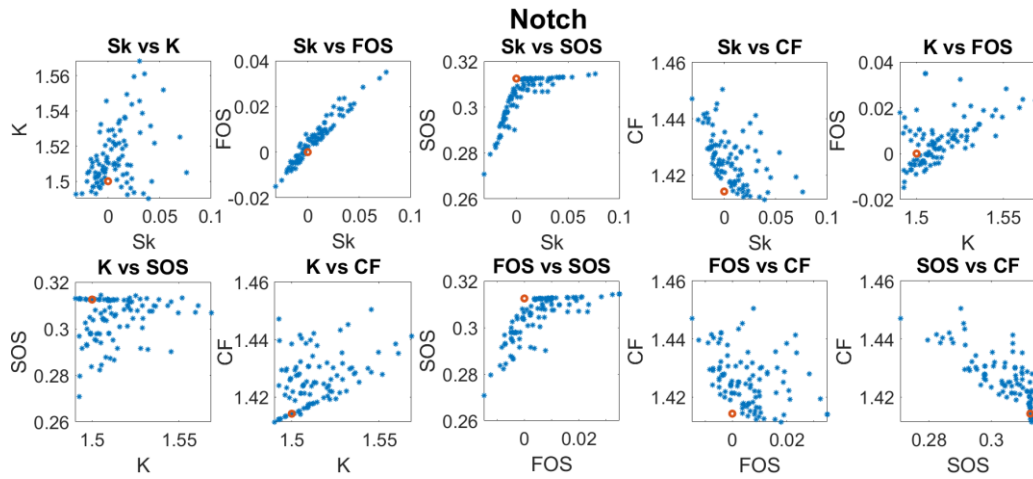


Figura 22. Diagramas de dispersión entre indicadores para *notches*.

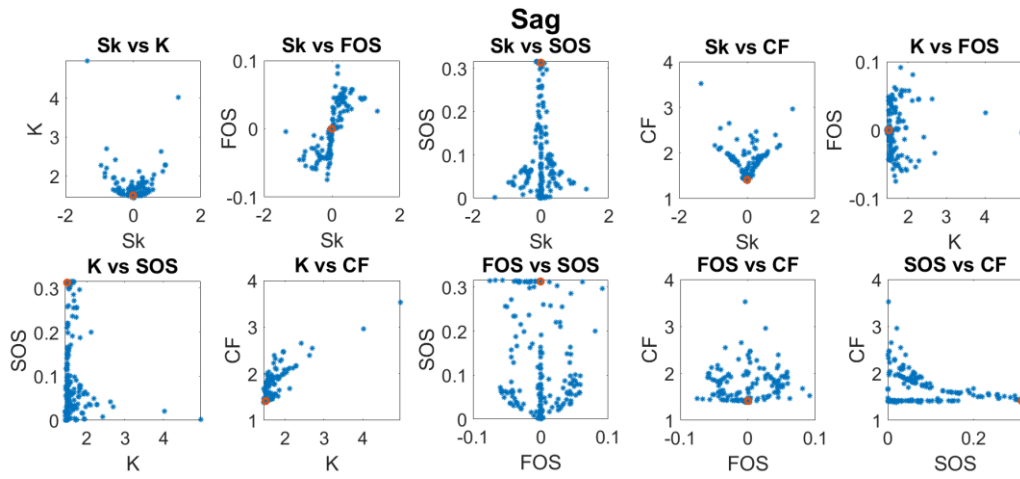


Figura 23. Diagramas de dispersión entre indicadores para *sags*.

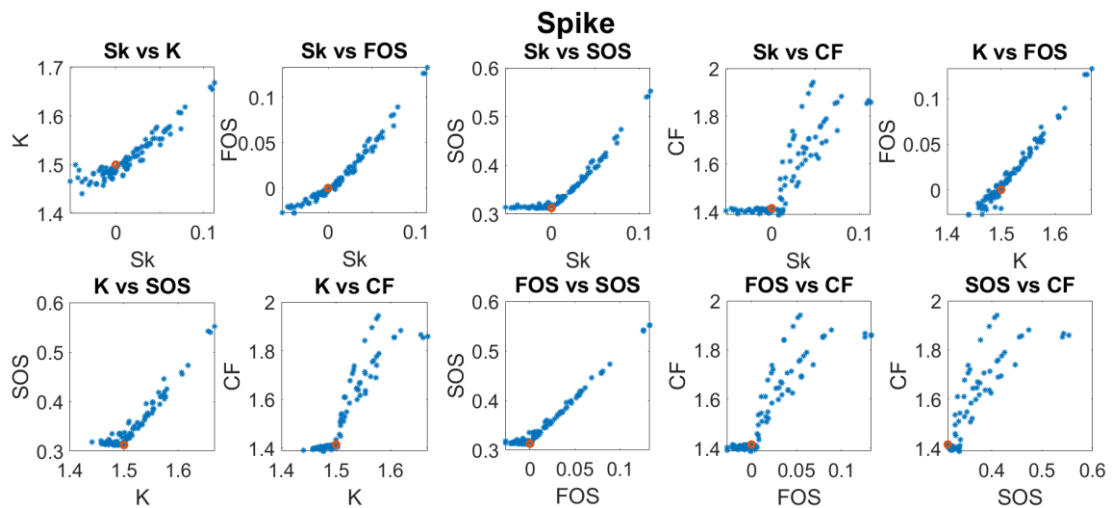


Figura 24. Diagramas de dispersión entre indicadores para *spikes*.

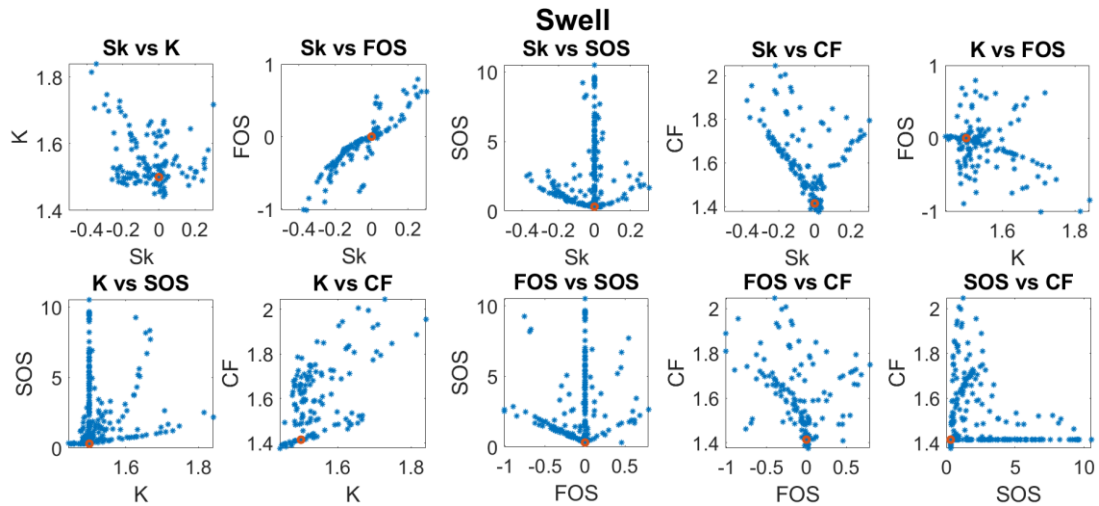


Figura 25. Diagramas de dispersión entre indicadores para *swells*.

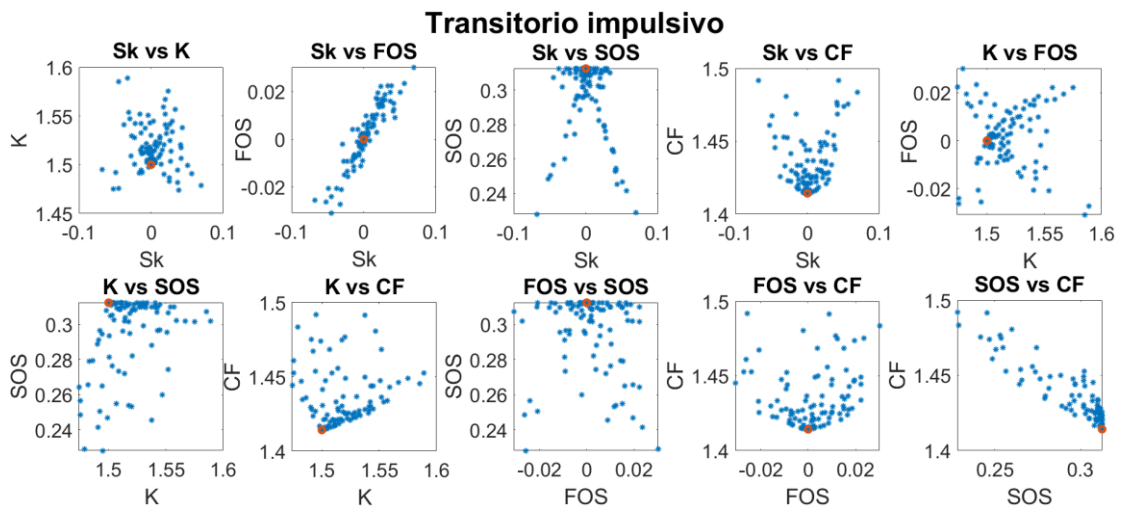


Figura 26. Diagramas de dispersión entre indicadores para transitorios impulsivos.

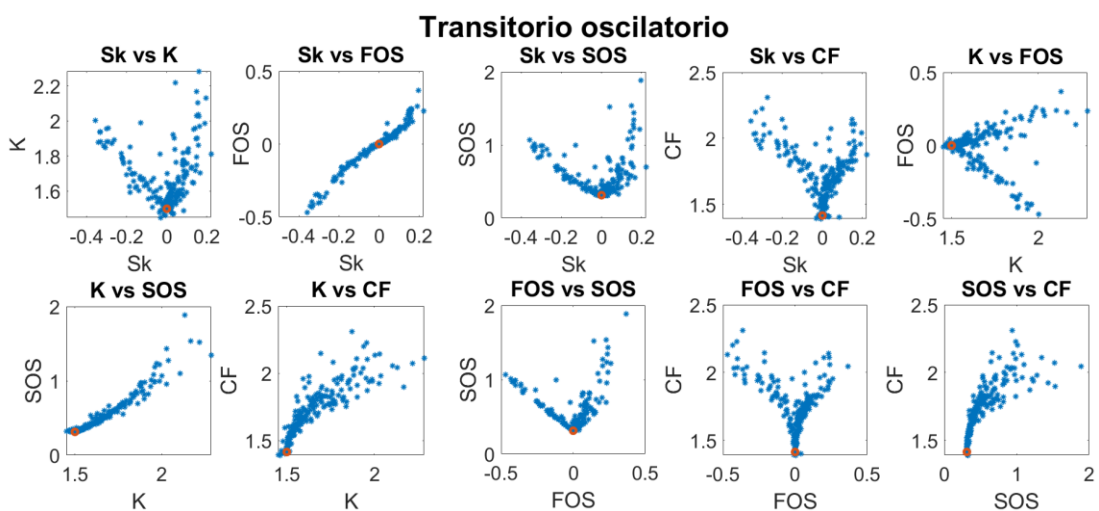


Figura 27. Diagramas de dispersión entre indicadores para transitorios oscilatorios.

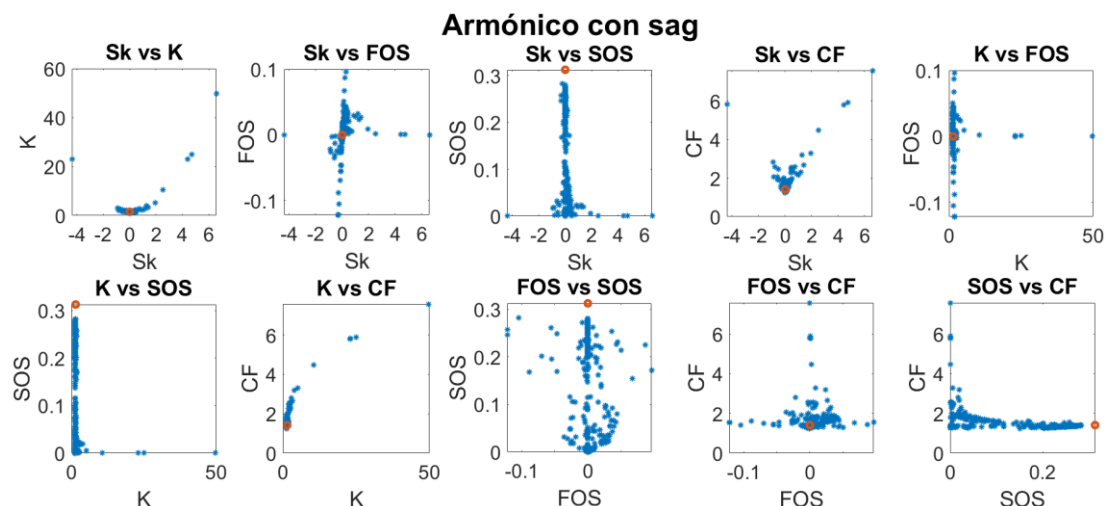


Figura 28. Diagramas de dispersión entre indicadores para armónicos + *sag*.

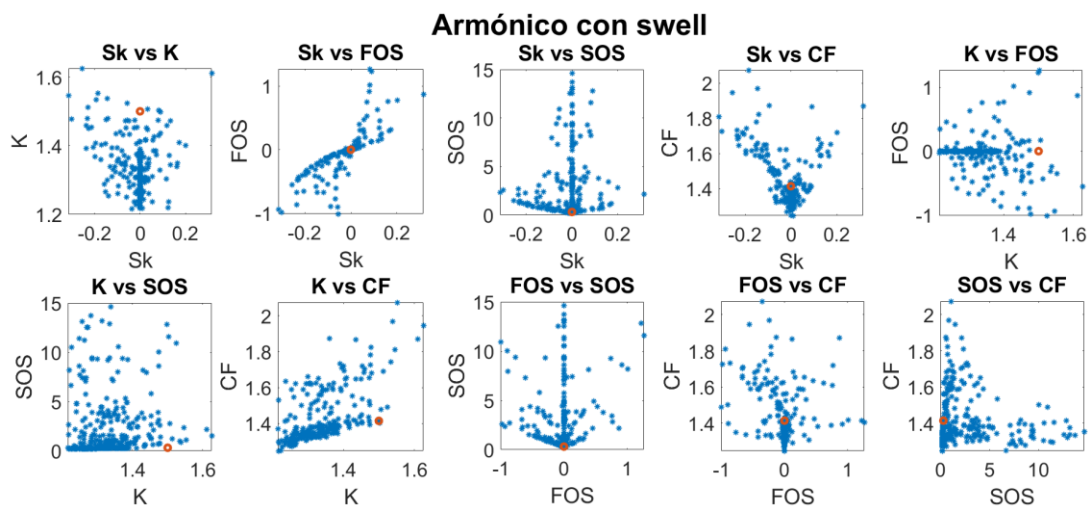


Figura 29. Diagramas de dispersión entre indicadores para armónicos + *swell*.

Si bien en algunos diagramas de dispersión se observan claramente relaciones lineales o cuasi-lineales entre indicadores – como sucede, por ejemplo, con todas las relaciones entre indicadores frente a *spikes*, o la relación entre *skewness* y estadístico de quinto orden para armónicos, *notches* y eventos transitorios –, son más habituales los patrones de posibles relaciones no lineales, como es el caso de las relaciones establecidas entre los indicadores frente a interrupciones o transitorios oscilatorios, o patrones en los que, a priori, no se distingue relación alguna entre los valores adquiridos por los indicadores, verbigracia la relación entre el estadístico de quinto orden y el factor de cresta en armónicos, o entre *kurtosis* y estadístico de sexto orden ante *notches*. Esa prevalencia de relaciones no lineales u ocultas/inexistentes denota la necesidad de una mayor profundización en el estudio de posibles redundancias entre indicadores.

Es por ello por lo que se utilizan adicionalmente redes de regresión. Concretamente, se opta por el uso de redes neuronales sencillas, de tipo *feedforward*, cuya función consiste en aprender a relacionar unos valores de entrada con un valor de salida. Cada red está compuesta por una única capa oculta con 10 neuronas, y se entrena usando el método *Levenberg-Marquardt*. Una vez entrenada la red, se comparan los valores predichos con los reales, obteniéndose como métricas de evaluación un coeficiente de correlación y el error cuadrático medio. En este estudio, se han procesado todos los valores por evento de la base de datos #1, con el objetivo de entrenar una serie de redes que permitan predecir, para cada tipo de evento, el valor de un indicador a partir del comportamiento del resto de indicadores para ese mismo ciclo.

De esta forma, se establece como hipótesis inicial que debe alcanzarse, al menos, un 95% de coincidencia entre los valores reales del indicador y los predichos por la red neuronal (es decir, un coeficiente de correlación igual o superior al 0.95) para considerar que, efectivamente, dicho indicador puede calcularse a partir de los demás y, por lo tanto, es redundante su medición directa. Asimismo, si más de un indicador se predijera por encima de dicho umbral, se aplicará el siguiente criterio: se considerará redundante, en primer lugar, el indicador con mayor porcentaje de coincidencia. A continuación, se entrenará un nuevo conjunto de redes en las que se excluya dicho indicador como entrada, repitiendo el proceso con los restantes hasta que ningún otro indicador alcance o supere el umbral del 95%. De este modo, se obtiene, para cada tipo de evento de la base de datos #1, un conjunto mínimo de indicadores necesarios para su detección, que se resumen en la tabla 4 y se detallan a continuación:

- Para *flickers*, el único indicador que puede predecirse a partir del resto con una correlación superior al umbral (99.74%) es la *kurtosis*, como refleja la figura 30, con un error cuadrático medio de  $8.48 \cdot 10^{-6}$ . En consecuencia, el conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar *flickers* sería: *skewness*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD.

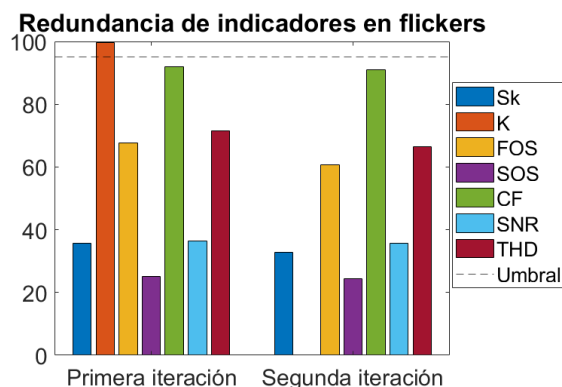


Figura 30. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para *flickers*.

- Para armónicos, la *kurtosis* puede predecirse con una correlación del 98.09% y un error cuadrático medio de  $2.41 \cdot 10^{-4}$ . Dado que ningún otro indicador supera el umbral de correlación establecido (véase figura 31), el conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar armónicos sería: *skewness*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD.

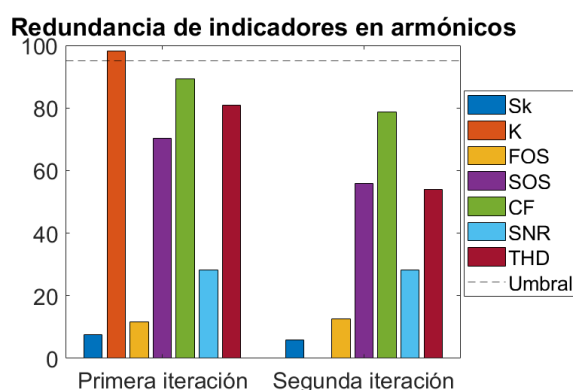


Figura 31. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para armónicos.

- Para interrupciones, tanto la *kurtosis* como el estadístico de quinto orden y el factor de cresta pueden ser predichos inicialmente con correlaciones superiores al 95% – 99.55%, 97.01% y 97.73%, respectivamente –, considerándose en primer lugar redundante la *kurtosis* (error cuadrático medio de  $3.81 \cdot 10^{-4}$ ). Tras un segundo conjunto de entrenamientos sin esta como entrada, la correlación del estadístico de quinto orden desciende al 93.13%, y la del factor de cresta, al 94.23% (figura 32). Por tanto, en ausencia de la *kurtosis*, ninguno de estos indicadores puede considerarse redundante. El conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar interrupciones sería: *skewness*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD.

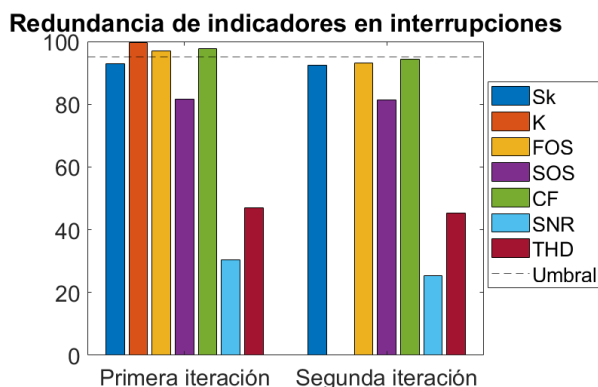


Figura 32. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para interrupciones.

- Para *notches*, la *skewness*, la *kurtosis* y el estadístico de quinto orden superan el umbral de correlación del 95%, con correlaciones del 99.80%, 99.57% y 99.60%, respectivamente. Siguiendo la metodología propuesta para la reducción de indicadores por redundancia, se considera la *skewness* como primer indicador redundante. Tras un segundo conjunto de entrenamientos, se obtienen correlaciones del 99.50% para la *kurtosis* y 99.35% para el estadístico de quinto orden. En un tercer conjunto de entrenamientos, considerando también la *kurtosis* como redundante, el estadístico de quinto orden sigue pudiendo predecirse con un 99.21% de similitud. Este proceso se muestra en la figura 33. El conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar *notches* sería: estadístico de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD. Con los valores adquiridos por estos indicadores como entrada, se estima la *skewness* con un 99.49% de correspondencia y un error cuadrático medio de  $1.30 \cdot 10^{-5}$ , la *kurtosis*, con un 99.38% y un error de  $9.0 \cdot 10^{-6}$ ; y el estadístico de quinto orden, con un 99.21% y un error de  $6.44 \cdot 10^{-6}$ .

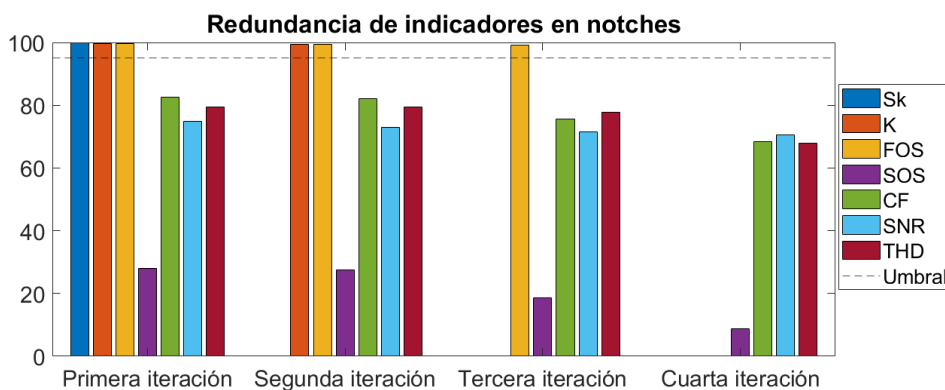


Figura 33. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para *notches*.

- Para *sags*, los coeficientes de correlación de *skewness* (96.09%), *kurtosis* (96.68%), estadístico de quinto orden (97.27%) y factor de cresta (95.69%) superan el umbral establecido. Siguiendo la metodología de reducción propuesta, se considera inicialmente redundante el estadístico de quinto orden, asumiendo con ello un error cuadrático medio de  $2.24 \cdot 10^{-4}$ . Tras un segundo conjunto de entrenamientos con la omisión del estadístico de quinto orden, ningún indicador puede predecirse por encima del 95% (figura 34). Por lo tanto, el conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar *sags* sería: *skewness*, *kurtosis*, estadístico de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD.

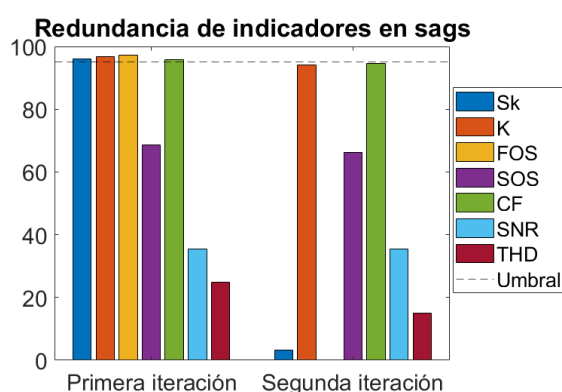


Figura 34. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para *sags*.

- Para *spikes*, se obtienen coeficientes de correlación muy altos para *skewness* (99.90%), *kurtosis* (99.90%), estadístico de quinto orden (99.97%) y factor de cresta (99.90%). Siguiendo el mismo criterio de los casos anteriores, se considera redundante el estadístico de quinto orden, y un nuevo conjunto de entrenamientos de la red neuronal ofrece correlaciones del 99.43% para *skewness*, 99.89% para *kurtosis* y 99.85% para el factor de cresta. La consecuente eliminación de la *kurtosis* devuelve, con otro conjunto de entrenamientos, correspondencias del 98.20% para *skewness* y del 98.70% para el factor de cresta, siendo por tanto este último indicador considerado redundante. A partir únicamente del estadístico de sexto orden, SNR y THD, la *skewness* puede predecirse con una correspondencia del 96.13%, siendo este el conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar *spikes* (figura 35). Usando como valores de entrada el estadístico de sexto orden, SNR y THD, se calcula la *skewness* con una correspondencia del 96.13% y un error cuadrático medio de  $2.41 \cdot 10^{-4}$ , la *kurtosis*, con una correspondencia del 96.93% y un error de  $2.44 \cdot 10^{-5}$ , el estadístico de quinto or-

den, con una correspondencia del 99.14% y un error de  $2.43 \cdot 10^{-4}$ ; y el factor de cresta, con una correspondencia del 96.10% y un error de  $5.06 \cdot 10^{-4}$ .

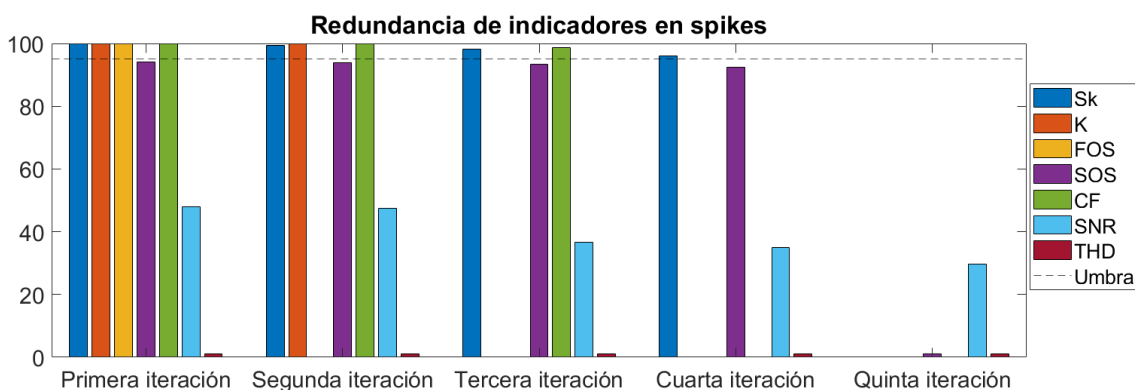


Figura 35. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para *spikes*.

- Para *swells*, el único indicador que puede predecirse con una correspondencia superior al 95% (95.71%) es la *skewness*, con un error cuadrático medio de  $1.42 \cdot 10^{-3}$ , tal y como refleja la figura 36. Por lo tanto, el conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar *swells* sería: *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD.

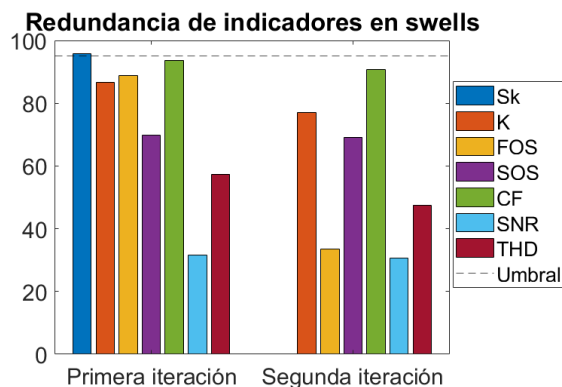


Figura 36. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para *swells*.

- Para transitorios impulsivos, el factor de cresta puede predecirse con una correspondencia del 95.16% y un error cuadrático medio de  $8.39 \cdot 10^{-6}$ . Como muestra la figura 37, es el único indicador que puede considerarse redundante, siendo el conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar transitorios impulsivos: *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden, SNR y THD.

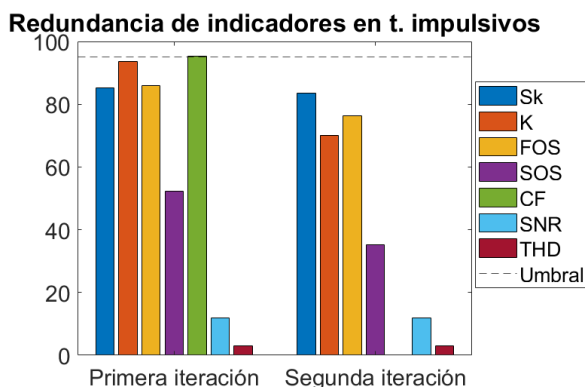


Figura 37. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para transitorios impulsivos.

- Para transitorios oscilatorios, la *skewness* (98.74%), la *kurtosis* (98.64%) y el estadístico de quinto orden (99.70%) superan el umbral establecido para considerar redundancia (véase figura 38). Siguiendo el método propuesto, se considera redundante el estadístico de quinto orden y se realiza un segundo conjunto de entrenamientos, que devuelve correspondencias de 70.89% y 98.57% para *skewness* y *kurtosis*, respectivamente, lo que permite considerar a esta última como redundante. De esta forma, el conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar transitorios oscilatorios sería: *skewness*, estadístico de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD. A partir de ellos, puede calcularse la *kurtosis*, con una correspondencia del 98.57% y un error cuadrático medio de  $9.67 \cdot 10^{-4}$ , y el estadístico de quinto orden, con una correspondencia del 99.68% y un error cuadrático medio de  $3.53 \cdot 10^{-4}$ .

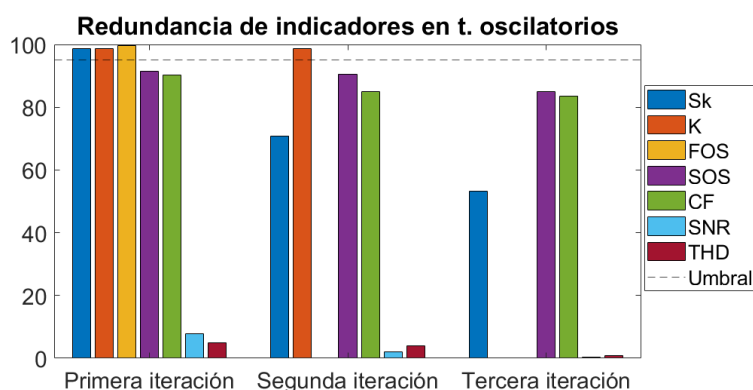


Figura 38. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para transitorios oscilatorios.

- Para armónicos con *sag*, los indicadores susceptibles de ser eliminados son la *kurtosis*, con una correspondencia del 95.10%, y el estadístico de quinto orden,

con una correspondencia del 97.19% (figura 39). Siguiendo la metodología propuesta, el nuevo conjunto de entrenamientos sin el estadístico de quinto orden devuelve una correspondencia del 94.07% para la *kurtosis*, por lo que no se alcanza el umbral establecido y, por tanto, no puede ser considerada redundante. Finalmente, el conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar armónicos con *sag* sería: *skewness*, *kurtosis*, estadístico de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD. Se asume un error cuadrático medio en el cálculo del estadístico de quinto orden de  $1.06 \cdot 10^{-4}$ .

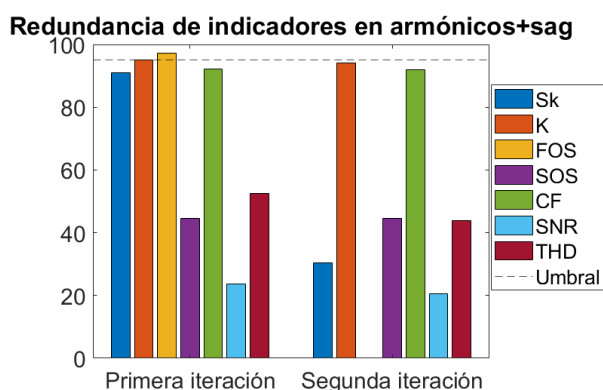


Figura 39. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para armónicos con *sag*.

- Para armónicos con *swell*, el único indicador cuya correspondencia supera el 95% es el estadístico de quinto orden (97.48%), con un error cuadrático medio de  $2.94 \cdot 10^{-3}$ , tal y como refleja la figura 40. En consecuencia, el conjunto mínimo de indicadores necesario para detectar armónicos con *swell* sería: *skewness*, *kurtosis*, estadístico de sexto orden, factor de cresta, SNR y THD.

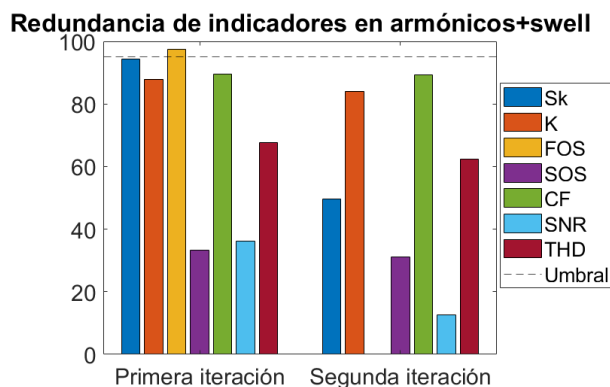


Figura 40. Porcentaje de predicción de cada indicador mediante redes de regresión para armónicos con *swell*.

La tabla 4 resume la información obtenida de este análisis, mostrando para cada tipo de evento qué indicadores son necesarios y cuáles pueden calcularse a partir de los demás, especificando el coeficiente de correspondencia y el error cuadrático medio asumido.

Tabla 4. Conjuntos mínimos de indicadores por evento e indicadores calculados.

Evento	Conjunto mínimo de indicadores	Indicador redundante	Correspondencia (%)	Error cuadrático medio
<i>Flickers</i>	Sk, FOS, SOS, CF, SNR, THD	K	99.74	$8.48 \cdot 10^{-6}$
Armónicos	Sk, FOS, SOS, CF, SNR, THD	K	98.09	$2.41 \cdot 10^{-4}$
Interrupciones	Sk, FOS, SOS, CF, SNR, THD	K	99.55	$3.81 \cdot 10^{-4}$
<i>Notches</i>	SOS, CF, SNR, THD	Sk	99.49	$1.30 \cdot 10^{-5}$
		K	99.38	$9.0 \cdot 10^{-6}$
		FOS	99.21	$6.44 \cdot 10^{-6}$
<i>Sags</i>	Sk, K, SOS, CF, SNR, THD	FOS	97.27	$2.24 \cdot 10^{-4}$
<i>Spikes</i>	SOS, SNR, THD	Sk	96.13	$2.41 \cdot 10^{-4}$
		K	96.93	$2.44 \cdot 10^{-5}$
		FOS	99.14	$2.43 \cdot 10^{-4}$
		CF	96.10	$5.06 \cdot 10^{-4}$
<i>Swells</i>	K, FOS, SOS, CF, SNR, THD	Sk	95.71	$1.42 \cdot 10^{-3}$
Transitorios impulsivos	Sk, K, FOS, SOS, SNR, THD	CF	95.16	$8.39 \cdot 10^{-6}$
Transitorios oscilatorios	Sk, SOS, CF, SNR, THD	K	98.57	$9.67 \cdot 10^{-4}$
		FOS	99.68	$3.53 \cdot 10^{-4}$
Armónicos con <i>sag</i>	Sk, K, SOS, CF, SNR, THD	FOS	97.19	$1.06 \cdot 10^{-4}$
Armónicos con <i>swell</i>	Sk, K, SOS, CF, SNR, THD	FOS	97.48	$2.94 \cdot 10^{-3}$

Tras el estudio de redundancia en todos los eventos disponibles en la base de datos #1, se concluye que, aunque en todos los casos al menos un indicador puede calcularse a partir de los demás, no existe ningún indicador cuya presencia sea genéricamente redundante en todos los tipos de eventos. Por lo tanto, y con el fin de alcanzar una herramienta visual que funcione para multitud de eventos de calidad de suministro, se conservan todos los indicadores.

### 3.3. Herramientas de visualización multidimensional

Para el desarrollo de la investigación, debía implementarse una herramienta de visualización que cumpliera varios requisitos: para empezar, debe permitir la visualización al mismo tiempo de los siete indicadores, y, asimismo, facilitar realmente la detección de eventos de la calidad de suministro sin necesidad de un grueso de conocimientos técnicos en la materia. Se contempla el uso de distintos gráficos, explicados a continuación. Para ejemplificarlos, se ha usado para todos ellos la misma señal con un *sag* procedente de la base de datos #1, mostrada en la figura 41, y los gráficos se han normalizado de forma que todos los posibles valores para los indicadores queden distribuidos en un rango entre  $-1$  y  $1$ , siendo cero su valor nominal o comportamiento adecuado, mayor a  $80$  dB y menor al  $8\%$ , para SNR y THD, respectivamente.

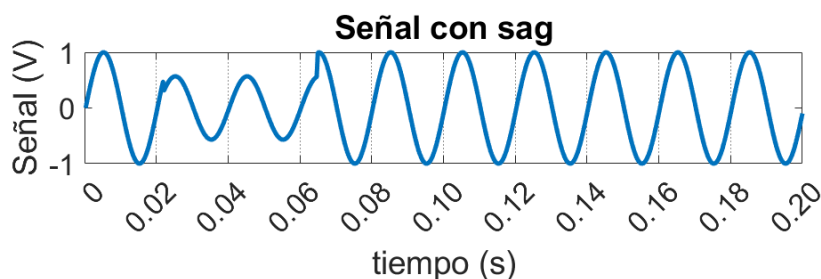


Figura 41. Señal con *sag* usada para ejemplificar las herramientas de visualización multidimensional.

- Diagramas de caja o gráficos de caja y bigotes (*Boxplots*). Esta herramienta representada en la figura 42 y anteriormente en las figuras 17 y 18 muestra la distribución de un conjunto de datos a través de sus cuartiles. Cada diagrama consiste en un rectángulo o “caja” que abarca desde el primer hasta el tercer cuartil (en azul en la figura 42), con la mediana marcada como una línea entre ambos extremos (línea roja en la figura 42). Los “bigotes” se extienden desde la caja, y marcan los valores máximos y mínimos dentro de un rango definido (líneas negras en las figuras 17 y 18, por la propia distribución de los datos no se muestran en la figura 42). Fuera de los rangos de los bigotes y la caja, se muestran los valores atípicos o *outliers* como puntos individuales (puntos rojos en la figura 42). Son gráficos habituales para mostrar la distribución de datos en el ámbito de la calidad de suministro, usado en estudios como [116], [124].

Se obtendría, por tanto, un diagrama de caja por señal, tomándose como muestras los valores obtenidos de cada indicador por ciclo. Para elaborar estos gráficos, todos los grupos de valores (en este caso, cada grupo está formado por los

valores obtenidos por indicador) deben contener la misma cantidad de elementos; sin embargo, al medirse los estadísticos de orden superior y el factor de cresta por ciclo, y SNR y THD por señal o cada 10 ciclos, respectivamente, se crea un desbalance para estos diagramas. Para remediarlo, el valor obtenido para SNR y THD se aplica 10 veces, de forma que, al ser el mismo valor, no falsea la información mostrada, pero permite la creación de los gráficos. Este procedimiento se emplea con el objetivo de simplificar tanto la representación como el análisis del comportamiento de los indicadores.

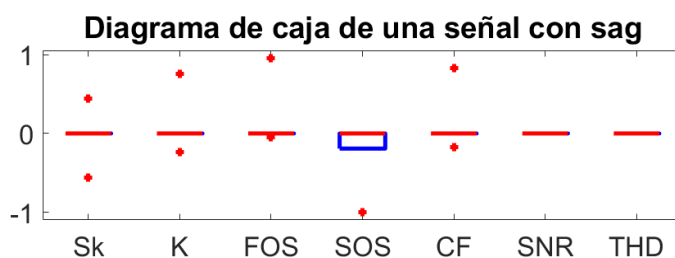


Figura 42. Ejemplo de diagrama de caja aplicado a una señal con *sag*.

- Mapas de calor (*Heatmaps*). Los mapas de calor son representaciones visuales en las que los datos contenidos en una matriz numérica pasan a ser una matriz de diferentes colores. Cada celda del mapa corresponde a un valor en los datos, y el color de la celda indica la magnitud del valor, utilizando para ello una escala de colores que iría de “frío a caliente”, es decir, de menor a mayor, como ejemplifica la figura 43.

Tal y como ocurría con los diagramas de caja, estos gráficos precisan de conjuntos de datos con el mismo número de elementos, por lo que los valores únicos de SNR y THD son aplicados 10 veces, una por ciclo.

Respecto al diagrama de caja, presenta la ventaja de desglosar el comportamiento por ciclo, permitiendo así localizar más fácilmente los eventos dentro de la señal. En el caso de la señal con *sag* estudiada, gracias al mapa de calor se puede determinar que el hundimiento de la tensión se da entre los ciclos #2 y #4. No obstante, la escala de color, al ser común para todos los indicadores, puede ocultar información: en el diagrama de caja (figura 42), se aprecian dos *outliers* para el estadístico de quinto orden, sin embargo, sólo una de las celdas de este estadístico cambia de color. Asimismo, los mapas de calor funcionan bien para conjuntos pequeños de datos, pero si se amplía este número de ciclos, considerando

por ejemplo que en la base de datos #2 hay señales de hasta 10.000 ciclos, se pierde el fin principal de facilitar la captación de información de la señal.

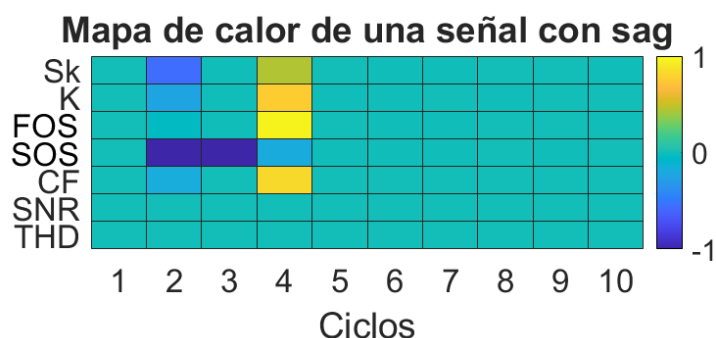


Figura 43. Ejemplo de mapa de calor aplicado a una señal con *sag*.

- Gráficos de radar o de araña (*Radar charts*). Estos diagramas permiten la comparación de múltiples variables en un solo gráfico. Cada eje del gráfico representa una variable diferente, y los valores adquiridos para estas variables se conectan entre sí formando un polígono, como muestra la figura 44.

A diferencia de los diagramas anteriores, cada gráfico de radar muestra un único valor por indicador, generándose, por tanto, un gráfico con cada ciclo de señal (el valor de SNR y THD se muestra como un valor constante en cada radar), lo que por una parte es positivo porque implica que la interpretación de la información es independiente del número de ciclos de la señal, pero por otra parte genera mayor carga computacional, debiendo obtenerse mínimo 10 gráficos por señal en lugar de un único gráfico como es el caso de los diagramas de caja o los mapas de calor.

Asimismo, y como sucede con los mapas de calor, los gráficos radar aventajan a los gráficos de caja y bigotes permitiendo detectar, a través de los patrones poligonales obtenidos, durante qué ciclos se está produciendo un evento de la calidad de suministro. Además, al tener cada eje su propio sistema de escala, esta no perjudica la visualización de variaciones del valor de los indicadores respecto a sus valores nominales u óptimos.

### Gráficos de radar de una señal con sag

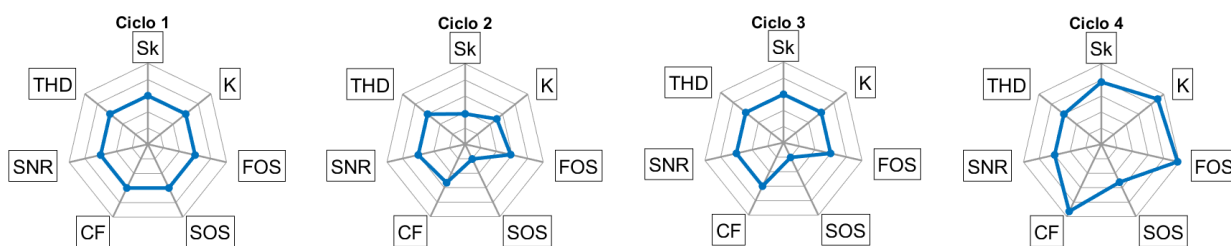


Figura 44. Ejemplo de gráficos de radar aplicados a los cuatro primeros ciclos de una señal con *sag*.

- Diagramas de dispersión (*Scatter plots*). Los diagramas de dispersión son gráficos bidimensionales que muestran la relación entre dos variables mediante puntos de medida. Cada uno de esos puntos representa un par de valores de las dos variables, que representan los ejes x e y del gráfico, como ya se mostró en el anterior subapartado con las figuras 19-29 para los eventos de la base de datos #1 y en la figura 45 a continuación para la señal con *sag* de la figura 41.

Para la obtención de los diagramas de dispersión, se utiliza el conjunto de valores por señal, por lo que el número de gráficos es independiente del número de ciclos de la señal. Ahora bien, puesto que deben representarse por pares los 7 indicadores seleccionados para la calidad de suministro, por cada señal deben graficarse 21 diagramas, lo que dificulta extraer información visual fácilmente. Sumado a eso, esta herramienta visual no posibilita identificar en qué ciclos tiene lugar el evento de la calidad de suministro, lo que sí permite el uso de gráficos de radar o mapas de calor.

### Diagramas de dispersión de una señal con sag

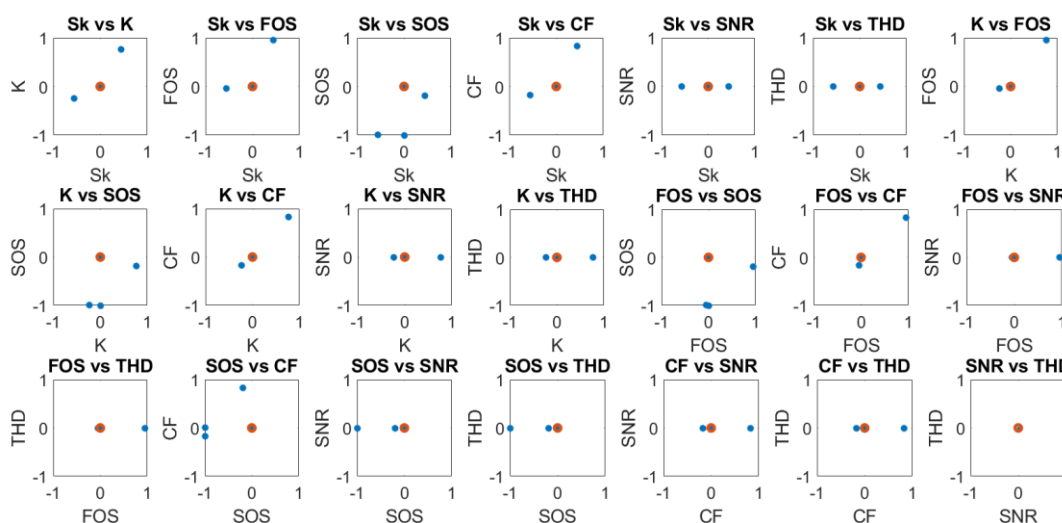


Figura 45. Ejemplo de diagramas de dispersión aplicados a una señal con *sag*.

Además de las representaciones gráficas ya analizadas, conviene destacar los antecedentes desarrollados en el seno del grupo de investigación PAIDI-TIC-168, en el que se enmarca esta tesis doctoral. En la tesis de José María Sierra Fernández (2017), titulada “*Técnicas y procedimientos de medida basados en la Kurtosis Espectral. Una aplicación en el análisis de la calidad de la energía eléctrica*” [102], se abordó el uso de representaciones tanto en el dominio temporal como frecuencial para la caracterización de la calidad del suministro mediante el análisis de la *kurtosis* espectral. Posteriormente, en la tesis de Olivia Florencias Oliveros (2019), “*Instrumental Techniques for Power Quality Monitoring*” [96], se emplearon diagramas de dispersión bidimensionales para el estudio de la trayectoria de los eventos, dando lugar asimismo al desarrollo de una patente en la que se recogían representaciones basadas en huellas estadísticas y en la persistencia de la medida como forma de sintetizar y visualizar la información.

Estos trabajos suponen antecedentes valiosos para la presente investigación, y constituyen un punto de partida clave en el uso de herramientas visuales aplicadas al estudio de la calidad del suministro eléctrico. No obstante, dado el enfoque multidimensional que se persigue en esta tesis, basado en la integración de siete indicadores simultáneos, se ha considerado necesario explorar estrategias de visualización que permitan representar de forma conjunta esta mayor complejidad. En este contexto, se decide el uso de gráficos de radar para la creación de una herramienta de monitoreo de la calidad del suministro. Asimismo, y como comparativa, se añaden también los gráficos de caja y bigotes, ya que estos, como se ha comentado, son usados habitualmente para estudiar distintos aspectos en el ámbito de la calidad de suministro eléctrico.

### **3.4. Diseño del gráfico de radar**

Una vez decididos los indicadores y las herramientas de visualización, deben establecerse las condiciones de diseño de esta herramienta.

De forma general, *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden y factor de cresta van a ser medidos por ciclo de señal, SNR, por señal, y THD, cada 10 ciclos. Ahora bien, para evitar que las señales estudiadas deban estar restringidas a tener un número de ciclos múltiplo de 10, siempre que el número de ciclos sea igual o superior a 10, se decide lo siguiente respecto a la medición de THD:

- Si el número de ciclos (N) de la señal es múltiplo de 10, se obtendrán N/10 valores de THD.
- Si el número de ciclos (N) de la señal, siendo superior a 10 ciclos, no es múltiplo de 10, se obtendrán la parte entera de N/10, más 1. Esto es, si, por ejemplo, una señal está formada por 25 ciclos, se calcularán tres valores de THD: los primeros dos valores corresponderán a los 20 primeros ciclos de señal, y el tercer valor se obtendrá a partir de los 10 últimos ciclos de la señal. De esta manera, si bien se procesan dos veces cierto número de ciclos (5 ciclos para este ejemplo), lo que implicaría información redundante, se asegura que no se pierda información de la señal que sí se despreciaría si se decidiera no estudiar el THD de este último grupo de ciclos inferior a diez.

Una vez concretada la ventana de medición para cada indicador, se establecen varias directrices para el diseño del gráfico de radar:

1. Las ecuaciones que rigen cada eje del radar deben permitir, en la medida de lo posible, la correcta visualización de eventos que impliquen menor variación respecto a los valores nominales, pero al mismo tiempo deben también evitar las fluctuaciones procedentes del ruido gaussiano.
2. El radar debe estar diseñado para procesar valores atípicos significativamente superiores al promedio sin que implique errores o una desconfiguración de la herramienta.
3. Para ciclos libres de eventos y ruido, en los que los indicadores adquieren sus valores nominales, debe dibujarse un heptágono regular equidistante a los extremos y al centro del radar, como se ilustra en el ciclo #1 de la figura 44.

En cuanto a la primera pauta, es fundamental conocer por tanto los márgenes de variación de cada indicador frente a las distintas situaciones de eventos y ruido, objetivo para el que se emplea la base de datos #1. Tras analizar todas las señales en presencia de ruido blanco, con SNR que varía de 30 dB hasta 70 dB, se obtienen los márgenes de variación máximos respecto al valor nominal u óptimo para cada indicador mostrados en la figura 46. En este gráfico, los márgenes variación correspondientes a las señales con SNR de 70 dB se han omitido, ya que, al ser del orden de  $10^{-4}$ , no se apreciaban correctamente y se han considerado por tanto despreciables. A partir de estos datos, si bien no puede afirmarse que los estadísticos de orden superior sean totalmente inmunes al ruido

gaussiano, sí es evidente que resultan menos afectados por el ruido blanco en comparación con indicadores tradicionales, como el factor de cresta, especialmente en el caso del estadístico de quinto orden.

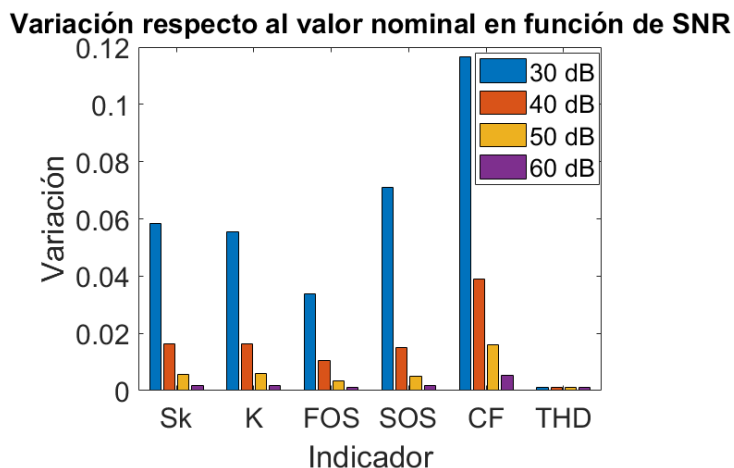


Figura 46. Variación de los indicadores respecto al valor nominal según el nivel de ruido de la señal eléctrica.

Se van a estudiar, por tanto, para los eventos disponibles, los valores máximos y mínimos adquiridos por cada indicador, mostrados en las tablas de la 5 a la 10, para *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden, factor de cresta y THD, respectivamente. En la última columna de las tablas 5-9, titulada “En ruido”, se incluye en qué porcentaje de las señales, para cada tipo de evento, el valor del indicador varía dentro del rango de variación de ruido de 30 dB (caso más desfavorable estudiado), y, por lo tanto, las variaciones del indicador podrían confundirse con ruido en señales reales. Para la tabla 10, correspondiente a THD, sin embargo, esta columna ha sido reemplazada por “Sup. límite”, e indica el porcentaje de señales por tipo de evento en el que se supera el límite del 8% establecido para la detección de armónicos.

Capítulo 3. Conceptualización y diseño de herramientas de visualización multidimensional

Tabla 5. Valores máximos y mínimos por evento para *skewness*.

<b>Skewness</b>			
<b>Evento</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>En ruido</b>
Ruido de 30 dB	0.0280	-0.0305	100%
Armónicos	$2.20 \cdot 10^{-15}$	$-3.68 \cdot 10^{-15}$	100%
A. + sag	6.5793	-4.3966	26%
A. + swell	0.3146	-0.3148	24%
Flicker	0.0109	-0.0108	100%
Interrupción	5.5257	-3.0603	2%
Notch	0.0761	-0.0314	86%
Sag	1.3445	-1.3455	16%
Spike	0.1122	-0.0523	61%
Swell	0.3014	-0.3735	21%
Tran. impulsivo	0.0691	-0.0674	79%
Tran. oscilatorio	0.2210	-0.3581	18%

Tabla 6. Valores máximos y mínimos por evento para *kurtosis*.

<b>Kurtosis</b>			
<b>Evento</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>En ruido</b>
Ruido de 30 dB	1.5303	1.4747	100%
Armónicos	1.4294	1.2057	0%
A. + sag	49.7214	1.2105	0%
A. + swell	1.6252	1.2157	0%
Flicker	1.6167	1.5256	1%
Interrupción	39.7971	1.5000	3%
Notch	1.5685	1.4903	85%
Sag	4.9619	1.4415	25%
Spike	1.6676	1.4404	54%
Swell	1.8400	1.4421	39%
Tran. impulsivo	1.5889	1.4741	74%
Tran. oscilatorio	2.2839	1.4503	8%

Tabla 7. Valores máximos y mínimos por evento para el estadístico de quinto orden.

<b>Estadístico de quinto orden</b>			
<b>Evento</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>En ruido</b>
Ruido de 30 dB	0.0167	-0.0171	100%
Armónicos	$1.50 \cdot 10^{-15}$	$-2.15 \cdot 10^{-15}$	100%
A. + sag	0.0962	-0.1218	45%
A. + swell	1.2691	-1.0077	15%
Flicker	0.0220	-0.0224	98%
Interrupción	0.1360	-0.1398	17%
Notch	0.0349	-0.0149	88%
Sag	0.0912	-0.0747	25%
Spike	0.1329	-0.0274	55%
Swell	0.7917	-1.0120	10%
Tran. impulsivo	0.0302	-0.0309	80%
Tran. oscilatorio	0.3688	-0.4685	13%

Tabla 8. Valores máximos y mínimos por evento para el estadístico de sexto orden.

<b>Estadístico de sexto orden</b>			
<b>Evento</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>En ruido</b>
Ruido de 30 dB	0.3552	0.2842	100%
Armónicos	0.2952	0.1987	2.22%
A. + sag	0.2825	$3.79 \cdot 10^{-12}$	0%
A. + swell	14.0690	0.2022	0%
Flicker	0.4085	0.3340	28%
Interrupción	0.3237	$5.02 \cdot 10^{-22}$	0%
Notch	0.3145	0.2708	96%
Sag	0.3161	$8.12 \cdot 10^{-7}$	0%
Spike	0.5521	0.3126	68%
Swell	10.5220	0.3125	1%
Tran. impulsivo	0.3126	0.2282	77%
Tran. oscilatorio	1.8865	0.3095	11%

Tabla 9. Valores máximos y mínimos por evento para el factor de cresta.

Factor de cresta			
Evento	Máximo	Mínimo	En ruido
Ruido de 30 dB	1.5236	1.4069	100%
Armónicos	1.4653	1.2414	3.81%
A. + sag	7.5752	1.2455	0%
A. + swell	2.0743	1.2472	0%
Flicker	1.6791	1.4859	0%
Interrupción	7.1679	1.4142	8%
Notch	1.4505	1.4114	100%
Sag	3.5277	1.3828	28%
Spike	1.9422	1.3874	28%
Swell	2.0475	1.3763	24%
Tran. impulsivo	1.4918	1.4142	100%
Tran. oscilatorio	2.3093	1.3908	3%

Tabla 10. Valores máximos y mínimos por evento para THD.

Distorsión armónica total – THD			
Evento	Máximo	Mínimo	Sup. límite
Ruido de 30 dB	1.3870	0.4803	0%
Armónicos	21.9676	7.0977	97.5%
A. + sag	29.7038	8.2794	100%
A. + swell	21.2368	7.9233	99%
Flicker	11.5963	$5.23 \cdot 10^{-4}$	4%
Interrupción	183.6795	$4.96 \cdot 10^{-4}$	47%
Notch	7.9466	0.8905	0%
Sag	30.2600	$4.86 \cdot 10^{-4}$	22%
Spike	7.5844	0.7013	0%
Swell	17.9514	$5.15 \cdot 10^{-4}$	10%
Tran. impulsivo	14.1782	$5.11 \cdot 10^{-4}$	3%
Tran. oscilatorio	19.8193	$5.19 \cdot 10^{-4}$	3%

Una vez revisados estos datos, se extraen las siguientes conclusiones:

- Respecto a la *skewness*, el rango de variación frente a armónicos y *flicker* queda contenido dentro del rango de variación frente a ruido de 30 dB en la totalidad de los casos, es decir, la variación provocada por ruido puede ser superior a la provocada por estos eventos y, por tanto, opacar su detección a través de este estadístico. Asimismo, los *notches*, transitorios impulsivos y *spikes*, si bien presentan un rango de variación máxima superior, en su mayoría (86%, 79% y 61%, respectivamente) devuelven valores de *skewness* dentro del rango de variación del ruido de 30 dB.
- La *kurtosis*, sin embargo, permite la diferenciación de armónicos y *flickers* frente al ruido. No obstante, flaquea nuevamente en la detección de *notches*, transitorios impulsivos y *spikes* usado de forma individual.
- El estadístico de quinto orden presenta comportamientos similares a la *skewness*, aunque con mejor detección de eventos de tipo *swell*, tanto simples como complejos.

- El estadístico de sexto orden permite la detección precisa de interrupciones, *sag* y *swell*, tanto simples como complejos. De hecho, el valor mínimo de este indicador tanto para interrupciones como para *sag* es cero, casuística no observada en el resto de los indicadores bajo ningún evento. Sin embargo, es posible que los eventos de *notch*, transitorios impulsivos y *spikes* puedan pasar desapercibidos como ruido.
- El factor de cresta, además de permitir diferenciar armónicos (simples y complejos) y *flicker* de ruido, facilita la detección de los transitorios oscilatorios por encima del resto de indicadores.
- Respecto al THD, su sistema de calibración es diferente al resto de indicadores. En este caso, y para seguir la tercera directriz para el diseño del gráfico de radar, donde se dice que los valores óptimos permanecen en el centro del radar formando un heptágono regular, los valores que sean inferiores al 8% estarán situados en el centro del eje correspondiente al THD, independientemente de su valor. Teniendo esto en cuenta, y sabiendo que el rango máximo de variación de THD frente a ruido gaussiano no alcanza en ningún caso el 8%, resulta más interesante estudiar en la última columna de la tabla 10 qué porcentaje de las señales puede detectarse erróneamente como armónico en lugar de como ruido (puesto que el ruido, tal y como se está diseñando la herramienta, no va a afectar a THD en ningún caso). Dicho esto, se puede concluir que THD permite una detección de mínimo el 97.5% de eventos armónicos simples y complejos, mientras que existe una probabilidad considerable de falso positivo para interrupciones y *sags* (47% y 22%, respectivamente).

Si bien con la primera directriz para el diseño de los gráficos de radar se busca despreciar la información referente al ruido gaussiano sin opacar con ello información de los eventos, se ha comprobado a través de estos datos que no es posible en todos los casos. Evaluando en qué porcentaje de señales puede confundirse el evento en virtud de los rangos de variación con ruido gaussiano de forma conjunta con estos indicadores (en lugar de individualmente como se ha estado comentando hasta el momento), se concluye que, en condiciones de SNR de 30 dB, el 74% de los *notches*, el 55% de los transitorios impulsivos y el 24% de los *spikes* pueden confundirse con ruido gaussiano. En condiciones de SNR de 40 dB, verbigracia, estos porcentajes se reducirían al 5%, 19% y 4%, respectivamente.

Como punto de partida para establecer los límites de cada eje en el gráfico de radar, y siguiendo las citadas directrices, se decide que la variación máxima por ruido de 30 dB represente hasta el 10% del eje. Es decir, se calcula la diferencia entre los valores máximos y mínimos observados en cada indicador bajo la influencia del ruido respecto al valor nominal. El límite del eje se define decuplando el valor mayor de estas diferencias. Este límite del eje será superior o inferior según si la mayor variación respecto al valor nominal corresponde al valor máximo o al mínimo. De acuerdo con la tercera directriz, el valor nominal debe quedar centrado en dicho eje, lo que implica que el otro límite del eje será determinado aplicando la misma distancia desde el valor nominal hacia el sentido opuesto del límite de eje previamente establecido.

Con el fin de evitar posibles desajustes y errores de la herramienta, se establece, además, que aquellos valores que superen los límites de estos ejes serán ajustados al valor del límite más cercano. Este sesgo garantiza la correcta visualización de los valores y evita que valores atípicamente altos o bajos de los indicadores comprometan la capacidad de detección visual de eventos con variaciones más reducidas respecto al valor nominal. Por ejemplo, para interrupciones, la *kurtosis* llega a alcanzar un valor máximo de 39.8, mientras que para la mayoría de los eventos el valor máximo no supera 2.

Bajo estas premisas, se obtiene la primera versión del gráfico radar, ejemplificado en la figura 47, cuyos límites superior e inferior por eje quedan reflejados en la tabla 11. En cada radar, se muestran dos siluetas de heptágonos: en línea roja discontinua, se visualiza el funcionamiento óptimo de la señal eléctrica, que corresponde a los valores nominales para *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden y factor de cresta, a 8%, para THD, y a 80 dB, para SNR; en línea azul continua, una segunda silueta refleja el estado real del ciclo de señal analizado. En este ejemplo concreto de la figura 47, el heptágono azul representa los valores alcanzados por ruido gaussiano con mayor diferencia del valor nominal para cada indicador.

**Ejemplo de radar versión 1, con SNR = 30 dB**

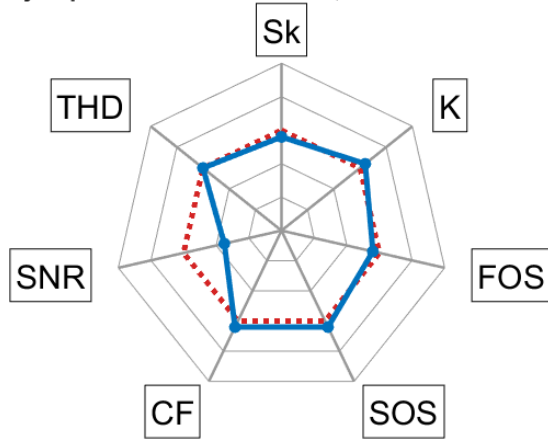


Figura 47. Primera versión de radar con los límites de los ejes mostrados en la tabla 11.

Tabla 11. Límites superiores e inferiores de cada eje de la primera versión del gráfico radar.

Eje	Límite superior	Límite inferior
<i>Skewness</i>	0.3050	-0.3050
<i>Kurtosis</i>	1.8030	1.1970
Estadístico de quinto orden	0.1710	-0.1710
Estadístico de sexto orden	0.7395	-0.1145
Factor de cresta	2.5082	0.3202
THD	16	0
SNR	160	0

Tras la revisión de esta primera versión con los eventos de la base de datos #1, se detecta que, si bien es válida para los ejes de *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, factor de cresta y SNR, existen algunos aspectos a pulir para el estadístico de sexto orden y THD:

- Tal y como se observó anteriormente, el valor mínimo del estadístico de sexto orden para interrupciones y *sags* es cero. Este valor, con los límites actuales, queda en un punto intermedio entre el valor nominal y el límite inferior del eje. Sin embargo, y considerando que el estadístico de sexto orden no alcanza valores negativos en ningún caso estudiado, visualmente resulta mucho más interesante y esclarecedor que el límite inferior de este eje sea cero. Ello implicaría que, siguiendo una relación lineal, el límite superior sea 0.625; no obstante, ese límite y su correspondiente sesgo no permiten visualizar toda la información que ofrece este indicador de los eventos de tipo *swell*, en los que el valor del estadístico de sexto orden varía desde 0.5536 (*swell* de 1.1 por unidad o 110%) hasta 10.6288 (*swell* de 1.8 por unidad o 180%), en función de la magnitud del evento. Para cumplir con estas tres condiciones de límite inferior cero, valor medio 0.3125 y límite superior 10.6288, se propone el uso de una función alternativa no lineal que rijas el comportamiento del eje correspondiente al estadístico de sexto orden. Considerando el comportamiento deseado, se opta por la función logarítmica de la ecuación 10, donde  $SOS_{eje}$  es el valor que va a representarse en el eje y  $SOS_{real}$  es el valor medido para el estadístico de sexto orden en ese ciclo.

$$SOS_{eje} = a \cdot \log_b(SOS_{real} + c) \quad (10)$$

Los valores  $a$ ,  $b$  y  $c$  se obtienen a partir de las condiciones de comportamiento, que se resumen en:

- Si  $SOS_{real}$  vale cero, entonces  $SOS_{eje}$  vale cero.
- Si  $SOS_{real}$  vale 0.3125, entonces  $SOS_{eje}$  vale uno.
- Si  $SOS_{real}$  vale 10.6288, entonces  $SOS_{eje}$  vale dos.

Estableciéndose por tanto los límites entre 0 y 2, y quedando entonces la ecuación 11 para regir el comportamiento del eje del estadístico de sexto orden:

$$SOS_{eje} = \log_{33.01216}(102.4389 \cdot SOS_{real} + 1) \quad (11)$$

- De forma similar, el valor medio en el eje de THD debe ser 8%; sin embargo, para eventos armónicos de tercer, quinto y séptimo orden (armónicos contenidos en la base de datos #1), THD oscila entre el 7.0977% y el 21.9676%, por lo que el límite superior de 16% no permitiría mostrar con la herramienta el espectro total de condiciones de los armónicos estudiados. Para solventar esta cuestión, se plantea la ecuación logarítmica 12, donde  $THD_{eje}$  es el valor mostrado en el eje del gráfico radar y  $THD_{real}$  es el valor que se ha medido cada diez ciclos en la señal, y que ha sido obtenida a partir de las siguientes consideraciones:
  - Si  $THD_{real}$  vale cero, entonces  $THD_{eje}$  vale cero.
  - Si  $THD_{real}$  vale ocho, entonces  $THD_{eje}$  vale uno.
  - Si  $THD_{real}$  vale 21.9676, entonces  $THD_{eje}$  vale dos.

$$THD_{eje} = \log_{1.745964}(0.0932455 \cdot THD_{real} + 1) \quad (12)$$

Además de esto, para SNR se ha observado que la aparición de distintos eventos puede alterar la percepción de ruido gaussiano en MATLAB, es decir, el *software* puede considerar que existe presencia de ruido peyorando con ello el valor de SNR cuando realmente se trata de otro evento que altera la forma de onda. Como medida preventiva, se obtendrá el SNR correspondiente a la señal completa y a los 10 primeros ciclos, y el mayor de ambos valores será tomado como el SNR de la señal.

Una vez aplicados estos cambios, queda definido el diseño del gráfico de radar. A modo de resumen, las ecuaciones, límites y condicionantes que rigen el comportamiento de cada eje quedan recogidos en la tabla 12 a continuación.

Tabla 12. Criterios de diseño de los ejes del gráfico radar: ecuaciones, límites y condicionantes.

Eje	Ecuación	Límites del eje	Condicionantes
<b>Skewness</b>	$Sk_{eje} = Sk_{real}$ (13)	Superior: 0.3050	· Si $Sk_{real}$ es mayor de 0.3050, entonces $Sk_{eje} = 0.3050$ .
		Inferior: -0.3050	· Si $Sk_{real}$ es menor de -0.3050, entonces $Sk_{eje} = -0.3050$ .
<b>Kurtosis</b>	$K_{eje} = K_{real}$ (14)	Superior: 1.8030	· Si $K_{real}$ es mayor de 1.8030, entonces $K_{eje} = 1.8030$ .
		Inferior: 1.1970	· Si $K_{real}$ es menor de 1.1970, entonces $K_{eje} = 1.1970$ .
<b>Estadístico de quinto orden</b>	$FOS_{eje} = FOS_{real}$ (15)	Superior: 0.1710	· Si $FOS_{real}$ es mayor de 0.1710, entonces $FOS_{eje} = 0.1710$ .
		Inferior: -0.1710	· Si $FOS_{real}$ es menor de -0.1710, entonces $FOS_{eje} = -0.1710$ .
<b>Estadístico de sexto orden</b>	$SOS_{eje} = \log_{33.01216}(102.4389 \cdot SOS_{real} + 1)$ (11)	Superior: 2	· Si $SOS_{real}$ es mayor de 10.6288, entonces $SOS_{eje} = 2$ .
		Inferior: 0	
<b>Factor de cresta</b>	$CF_{eje} = CF_{real}$ (16)	Superior: 2.5082	· Si $CF_{real}$ es mayor de 2.5082, entonces $CF_{eje} = 2.5082$ .
		Inferior: 0.3202	· Si $CF_{real}$ es menor de 0.3202, entonces $CF_{eje} = 0.3202$ .
<b>Distorsión armónica total – THD</b>	$THD_{eje} = \log_{1.745964}(0.0932455 \cdot THD_{real} + 1)$ (12)	Superior: 2	· Si $THD_{real}$ es mayor de 21.9676, entonces $THD_{eje} = 2$ .
		Inferior: 0	· Si $THD_{real}$ es menor de 8, entonces $THD_{eje} = 1$ .
<b>Relación señal-ruido – SNR</b>	$SNR_{eje} = SNR_{real}$ (17)	Superior: 160	· Si $SNR_{real}$ es mayor de 80, entonces $SNR_{eje} = 80$ .
		Inferior: 0	· Si $SNR_{real}$ es menor de 0, entonces $SNR_{eje} = 0$ . · $SNR_{real}$ es el mayor del SNR para toda la señal y el SNR de los 10 primeros ciclos.

### 3.5. Diseño del diagrama de caja

En el apartado 3.3 ya se ha comentado el principio de funcionamiento basado en los cuartiles del conjunto de datos de los diagramas de caja o *boxplots*. Tradicionalmente, estos gráficos distribuyen la información de la siguiente forma: el porcentaje de los datos se divide equitativamente entre el bigote inferior y el comienzo de la caja, es decir el primer cuartil, entre ese primer cuartil y la mediana, entre la mediana y el tercer cuartil (final de la caja), y, finalmente, entre ese tercer cuartil y el bigote superior, albergando por tanto cada uno de esos rangos el 25% de la información, mientras que los valores que se encuentren fuera de estos se consideran valores atípicos o *outliers*.

Sin embargo, para el análisis de señales eléctricas orientado al estudio de la calidad del suministro, se va a alterar la representación gráfica habitual de los diagramas de caja. Para ello, se establecen unos valores fijos máximos y mínimos para cada indicador, de forma que aquellos valores que sobresalgan de este rango, aun siendo parte de la caja o bigotes del diagrama, sean marcados como *outliers*, e implicando dichos valores atípicos la presencia de un evento de la calidad de suministro, tal y como ejemplifica la figura 48, formando lo que se va a nombrar como diagrama de caja adaptado.

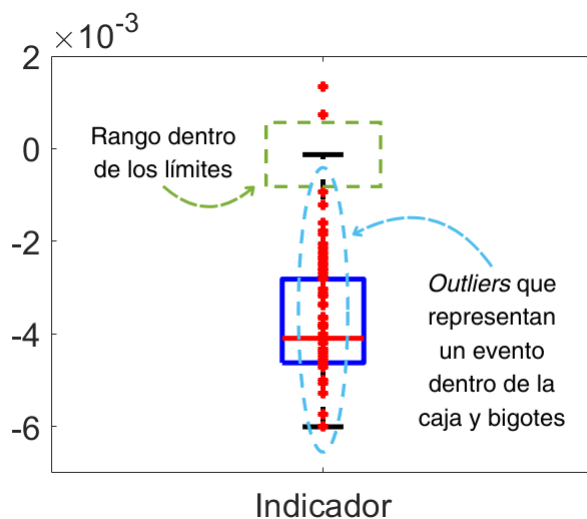


Figura 48. Ejemplo de diagrama de caja adaptado.

Dichos valores máximos y mínimos corresponderán a las variaciones máximas en los indicadores debidas al ruido de 30 dB (tablas de la 5 a la 9) en el caso de los estadísticos de orden superior y el factor de cresta, a valores de 160 y 80 dB para SNR, respectivamente, y a valores de 8 y 0 para el THD como máximo y mínimo. Todos estos valores quedan recogidos en la tabla 13, si bien debe considerarse que los máximos y mínimos

mostrados ya han sido normalizados para que los valores en el diagrama de caja no superen en ningún caso el rango  $\pm 1$ , en base a los valores máximos alcanzados en las tablas de la 5 a la 10 y siguiendo las ecuaciones de la 18 a la 24, derivadas de estos valores y planteadas en la tabla 14.

Tabla 13. Rango de valores establecido para considerar que no se detectan eventos en el diagrama de caja por indicador.

Indicador	Límite inferior	Límite superior
<i>Skewness</i>	-0.0037032	0.0040380
<i>Kurtosis</i>	-0.00047580	0.00063428
Estadístico de quinto orden	-0.011355	0.012694
Estadístico de sexto orden	-0.0018553	0.0019040
Factor de cresta	-0.0018659	0.017055
SNR	0	1
THD	0	0.0435541

Tabla 14. Ecuaciones que rigen la normalización de los diagramas de caja.

Indicador	Ecuación
<i>Skewness</i>	$Sk_{boxplot} = \frac{Sk_{real}}{6.5793}$ (18)
<i>Kurtosis</i>	$K_{boxplot} = \frac{K_{real} - 1.5}{48.2214}$ (19)
Estadístico de quinto orden	$FOS_{boxplot} = \frac{FOS_{real}}{1.2691}$ (20)
Estadístico de sexto orden	$SOS_{boxplot} = \frac{SOS_{real} - 0.3125}{13.7565}$ (21)
Factor de cresta	$CF_{boxplot} = \frac{CF_{real} - 1.4142}{6.161}$ (22)
SNR	$SNR_{boxplot} = \frac{SNR_{real} - 80}{80}$ (23)
THD	$THD_{boxplot} = \frac{THD_{real}}{183.6795}$ (24)

En base a las ecuaciones de normalización y los valores fijados para decidir a partir de qué rango de valores se representan los valores atípicos para el estudio de la calidad del suministro de señales eléctricas, en la figura 49 se muestra un ejemplo de un diagrama de caja adaptado con todos los indicadores.

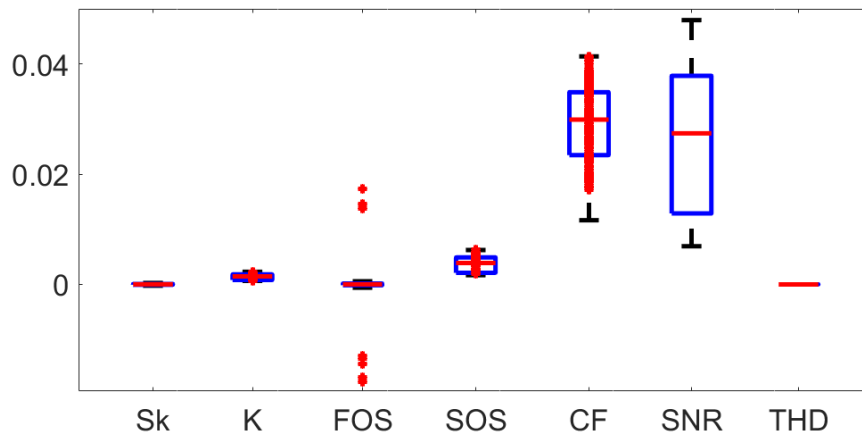


Figura 49. Diagrama de caja adaptado correspondiente al conjunto de valores por ciclo de señales con *flicker*.

Capítulo 4.  
Análisis de datos  
a través de  
gráficos radar y  
diagramas de caja

#### 4. Análisis de datos a través de gráficos radar y diagramas de caja

Tras definir las condiciones de diseño y funcionamiento de los gráficos de radar, resulta necesario dictaminar a qué tipo de evento equivale cada posible silueta representada en la herramienta. Por ello, se estudia, inicialmente, el comportamiento de cada indicador de forma individual y en conjunto frente a los eventos disponibles en señales sintéticas, y, posteriormente, se visualizan estos mismos valores en el gráfico de radar, obteniendo así patrones de comportamiento por evento.

Para analizar las señales eléctricas, se distinguen tres posibles estados que pueden presentarse en la forma de onda:

- El estado I se corresponde al funcionamiento ideal (en señales sintéticas sin ruido) u óptimo (en señales reales o con ruido) de la señal, sin presencia de eventos.
- Los estados II y III sí implican ambos la presencia de un evento. Sin embargo, que un ciclo de señal se encuentre bajo estado II representa que se produce una inestabilidad en los indicadores debida al evento, mientras que, bajo un estado III, los indicadores, pese a estar alterados por el evento, reflejan cierto tipo de estabilidad.

Para cada señal eléctrica estudiada, se van a distinguir y especificar los distintos estados que se presenten. Asimismo, cabe añadir que no tienen que presentarse necesariamente los tres estados en cada señal. Si, por ejemplo, se trata de una señal sin eventos, indudablemente la señal funcionará bajo estado I todo el tiempo. Por otro lado, si el evento se mantiene durante toda la señal, podrá localizarse el estado II, el III, o ambos, pero no el estado I.

Para determinar el uso de cada base de datos, se establece lo siguiente:

- Primero, la base de datos #1 o base de datos *Machlev*, que cuenta con mayor número de tipos de eventos sintéticos preclasificados, será utilizada para extraer los patrones de comportamiento de cada indicador y como primera puesta a prueba del diseño de los gráficos radar y los diagramas de caja adaptados.
- Una vez identificados los patrones de comportamiento, los gráficos radar y los diagramas de caja adaptados se aplicarán a la base de datos #2 o base de datos Preclasificados simples de eventos sintéticos preclasificados, como un primer paso en la verificación de ambas herramientas al estudiar eventos sin ruido generados en condiciones distintas a las de la base de datos #1.

- Tras el análisis de ambas bases de datos sintéticas, la base de datos #3 o base de datos IEEE Dataport se utilizará para comprobar el funcionamiento de los gráficos radar y los diagramas de caja adaptados frente a señales reales, aprovechando la ventaja de que los eventos disponibles, *sags* y transitorios impulsivos, están preclasificados.
- Finalmente, la base de datos #4 o base de datos PAIDI-TIC-168 permitirá probar la detección de eventos con ambas herramientas en señales donde la presencia de eventos es desconocida.

#### 4.1. Estudio de la evolución de los indicadores con señales sintéticas

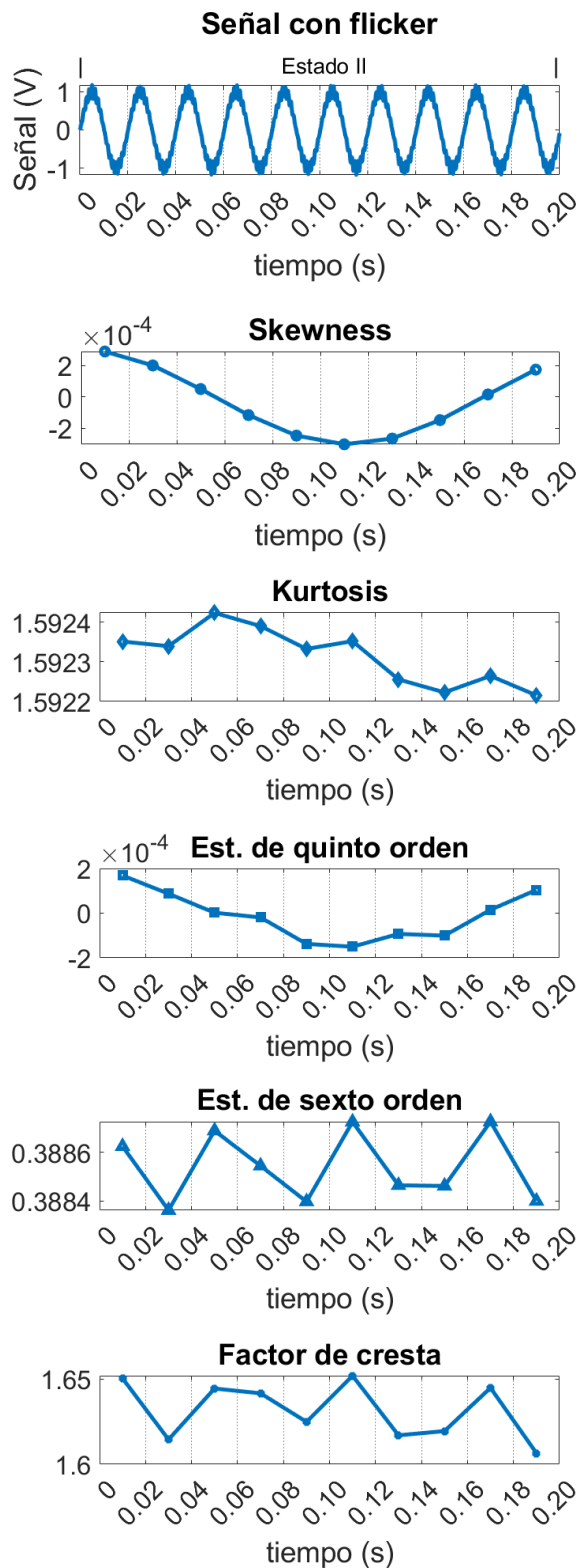
En este apartado, se va a seleccionar una señal para cada evento de la base de datos #1, procurando en cada caso que dicha señal muestre el evento de forma completa y clara para su estudio. Partiendo de esa base, las siguientes páginas ilustran, de la figura 50 a la 60, la variación ciclo a ciclo de *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden y factor de cresta, y, una vez por señal (puesto que se tratan de señales de 10 ciclos de duración), THD y SNR. En todos los ejemplos, las señales están medidas a 50 Hz, con frecuencia de muestreo de 3.2 kHz y duración de 10 ciclos (0.2 segundos). Además, al tratarse de señales sintéticas programadas sin ruido, el valor de SNR es de 120 dB.

- La **figura 50** muestra la evolución de los indicadores frente a una señal con *flicker*. Una vez observados los casos de *flicker* disponibles en la base de datos #1, se concluye que, durante toda la duración de la señal, se produce una variación ciclo a ciclo de los estadísticos de orden superior y el factor de cresta, lo que implica que no se alcanza ninguna estabilidad y, por tanto, que sólo se detecta el estado II. Sin embargo, pueden distinguirse dos tipos de comportamiento en los indicadores: mientras que los valores de *skewness* y estadístico de quinto orden oscilan continuamente alrededor del valor nominal (0), en sentido tanto positivo como negativo, para *kurtosis*, estadístico de sexto orden y factor de cresta los valores variantes adquiridos son en todos los casos superiores a los valores nominales (de 1.5, 0.3125 y 1.4142, respectivamente). El valor de THD, por norma general, es inferior al 1%, si bien se detecta erróneamente distorsión armónica (THD superior al 8%) en el 4% de las señales con *flicker*.

- La **figura 51** aporta un ejemplo de una señal de 50 Hz con una **interrupción** de 6 ciclos de duración. En este caso sí pueden observarse los tres posibles estados de la señal: estado I en los ciclos #1, #8, #9 y #10, estado II en los ciclos #2 y #7, y estado III en los ciclos del #3 al #6. Durante el estado I, se obtiene el valor nominal al calcular los estadísticos de orden superior y el factor de cresta. En el estado II, todos estos indicadores varían respecto al valor nominal: para todos los casos contemplados, la *kurtosis* y el factor de cresta devuelven un valor superior al nominal, el valor de la *skewness* y el estadístico de quinto orden puede ser tanto inferior como superior al valor nominal, y el estadístico de sexto orden devuelve un valor inferior al nominal. Durante el estado III, *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden y factor de cresta se estabilizan nuevamente en el valor nominal, no obstante, el estadístico de sexto orden se estabiliza en cero, implicando así una posible relación proporcional entre la amplitud de la forma de onda y el valor de este estadístico. Mientras que en este ejemplo el valor de THD es inferior al 1%, este indicador varía enormemente entre señales con interrupción, siendo hasta del 47% la detección errónea de distorsión armónica (THD superior al 8%).
- La **figura 52** ejemplifica una señal de 50 Hz con **notch**. Para todas las señales con *notch* estudiadas, se observa que para los estadísticos de orden superior y el factor de cresta se obtiene un valor distinto al nominal y constante durante todos los ciclos, por lo que la señal se encuentra, por tanto, en estado III. Dicho valor constante puede ser tanto superior como inferior al nominal para todos los indicadores, sin que exista correlación entre ellos; es decir, no se observa ninguna relación, ya sea directa o inversa, en la que, en el conjunto de señales disponibles, si un indicador es superior o inferior al valor nominal, algún otro indicador lo sea en la misma dirección o en la opuesta. Para las señales con *notch* estudiadas, el valor de THD varía entre el 1 y el 7%, no alcanzando en ningún caso el 8% establecido para que se considere presencia armónica en la señal.
- La **figura 53** presenta una señal de 50 Hz con un **sag** que se mantiene durante 3 ciclos (del #2 al #4). En las señales con este tipo de evento, los indicadores presentan un comportamiento similar al mostrado con interrupciones: durante del ciclos en estado I, se obtienen los valores nominales de los estadísticos de orden superior y el factor de cresta; al comienzo y fin del evento (ciclos #2 y #4), estos mismos indica-

dores presentan un valor distinto, para luego establecerse nuevamente en el valor nominal en el caso de *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden y factor de cresta, y continuar el descenso en el caso del estadístico de sexto orden, en el estado III. Si bien en el ejemplo de la figura 53 el estadístico de sexto orden bajo el estado III desciende a valores próximos a cero (0.0105), este valor no se alcanza necesariamente en todos los eventos de tipo *sag*, a diferencia de las señales con interrupción, en las que se da que el estadístico de sexto orden sí es cero en estado III. En base a las señales estudiadas de la base de datos #1, dicho valor mínimo del estadístico de sexto orden para *sags* oscila entre 0 y 0.1661, en función del porcentaje de reducción de la amplitud de onda provocada por el *sag*, de forma que un valor de 0 en el estadístico de sexto orden corresponde a una reducción de al menos el 65%. El *sag* mostrado en la figura 53, por ejemplo, supone una reducción del 43% de la amplitud de la señal una vez se establece el evento en el estado III. Aun así, a través del valor adquirido por el estadístico de sexto orden en estado III puede diferenciarse entre un *sag* y una interrupción, puesto que, en base de los datos adquiridos tras el estudio de la base de datos #1, se concluye que los valores inferiores a  $3.12 \cdot 10^{-7}$  (en adelante, valor diferenciador) corresponden a una interrupción, mientras que los valores superiores a este reflejan un *sag*. Respecto a la distorsión armónica total, o THD, si bien en líneas generales mantiene su valor entre el 0 y el 6%, en el 22% de las señales se detecta erróneamente presencia armónica.

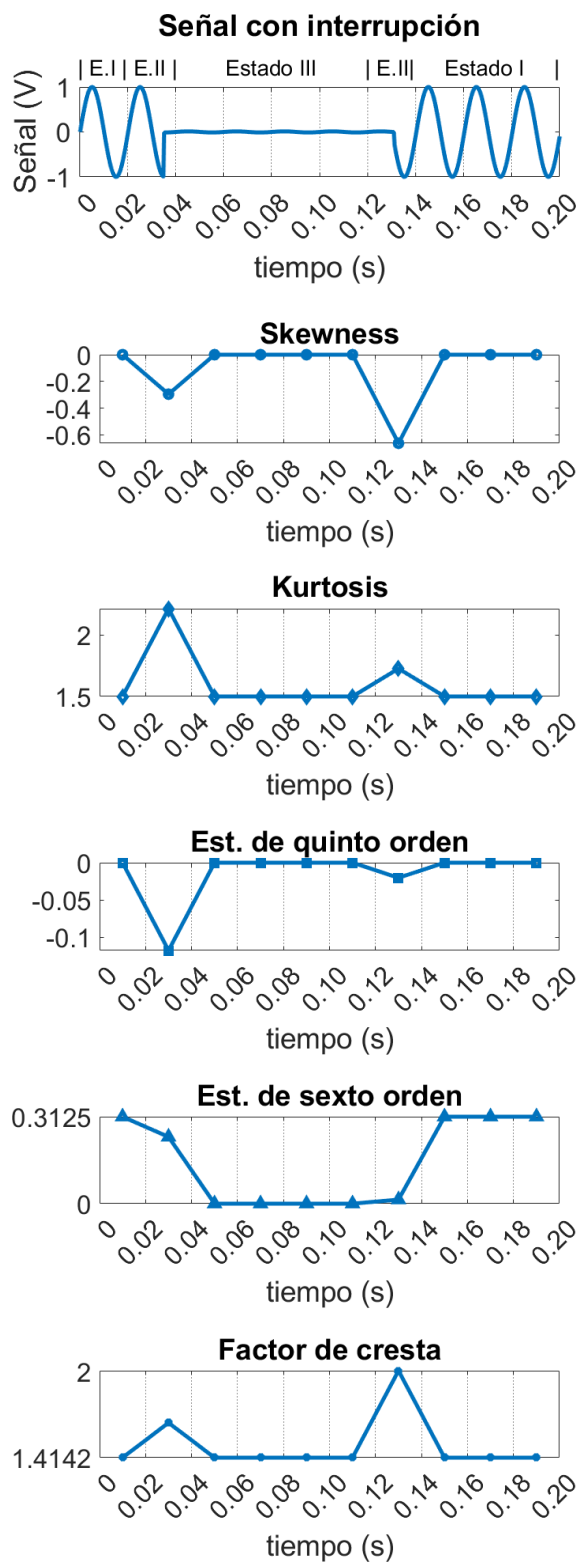
- La **figura 54** aporta un ejemplo de una señal de 50 Hz con presencia de *spike*. De forma similar a las señales con *notch*, cuyo ejemplo se muestra en la figura 52, se observa una variación respecto al valor nominal en los estadísticos de orden superior y el factor de cresta, pero constante durante los ciclos de la señal. Si bien en el ejemplo de *spike* mostrado se obtiene para todos los indicadores un valor superior al nominal, para *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden y factor de cresta el valor adquirido puede ser tanto superior como inferior al nominal, si bien para el estadístico de sexto orden se ha obtenido en todos los casos estudiados de la base de datos #1 un valor superior al nominal del indicador. Asimismo, no se ha identificado ninguna relación entre los indicadores respecto a superar o no el valor nominal de estos. Por su parte, el valor de THD oscila para todas las señales estudiadas entre el 1 y el 7%, no detectándose por tanto presencia armónica superior al límite establecido.



**SNR = 120 dB**

**THD =  $5.23 \cdot 10^{-4} \%$**

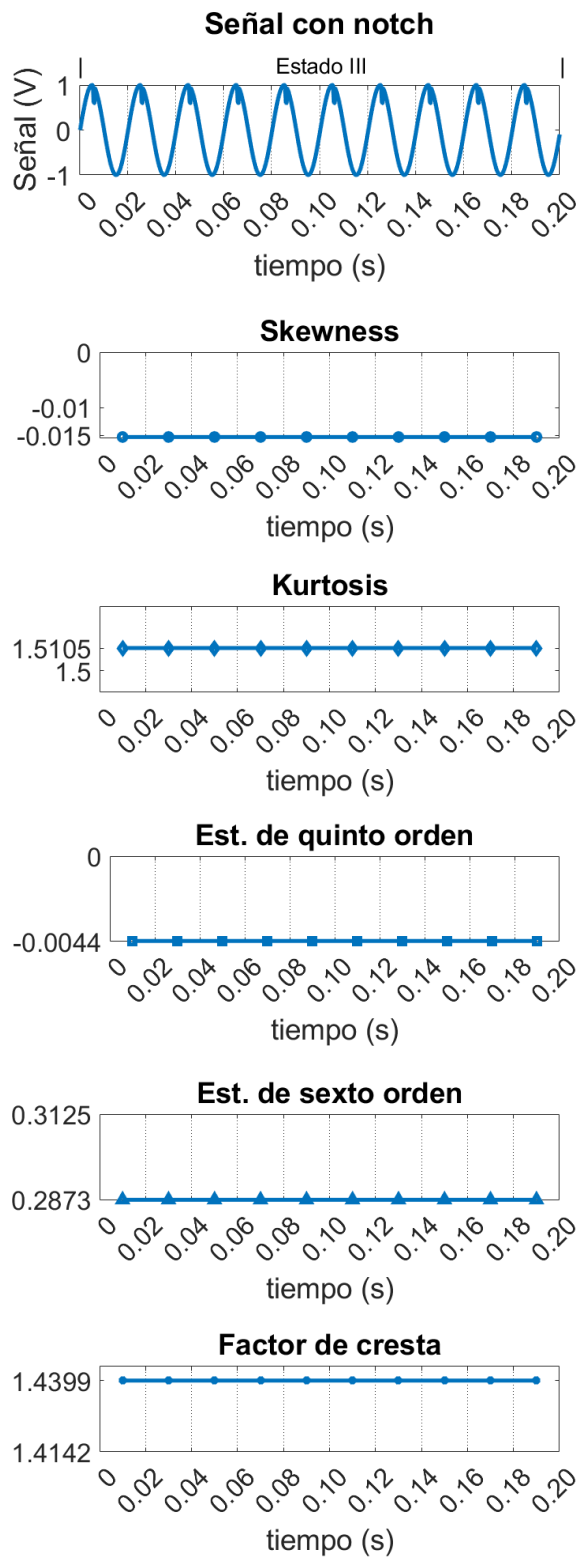
Figura 50. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un *flicker*.



**SNR = 120 dB**

**THD = 0.696 %**

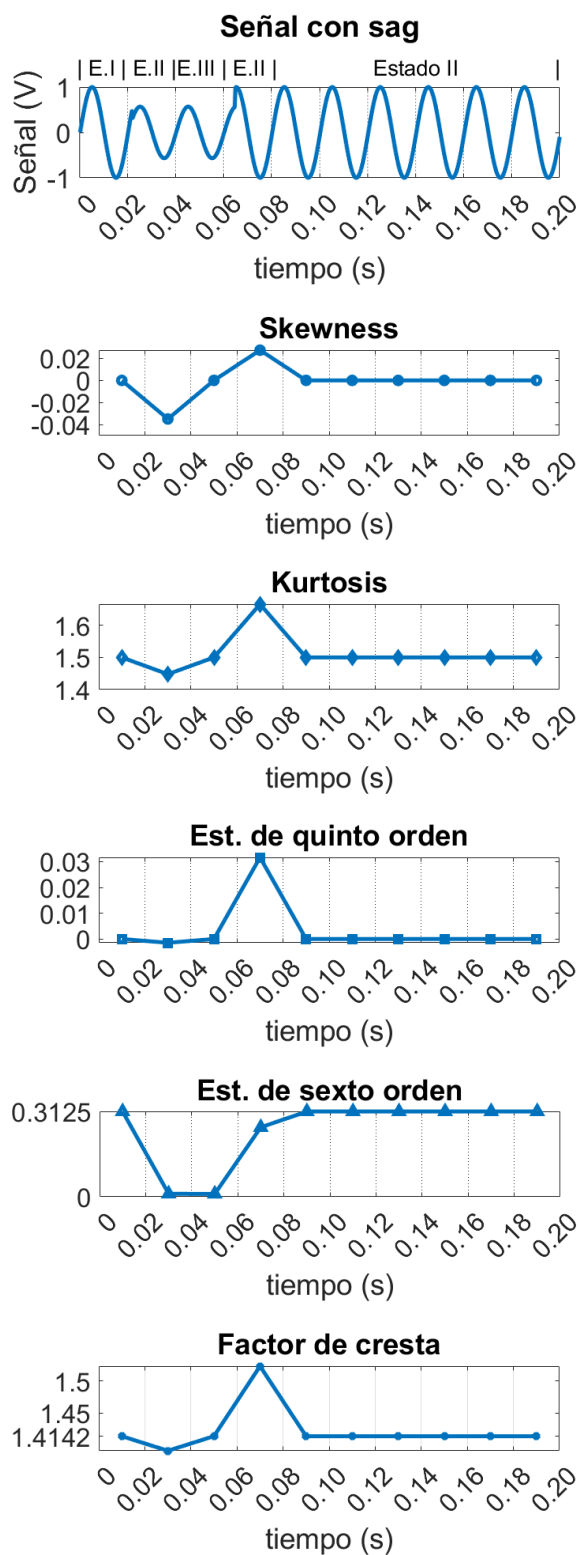
Figura 51. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a una interrupción.



**SNR = 120 dB**

**THD = 5.02 %**

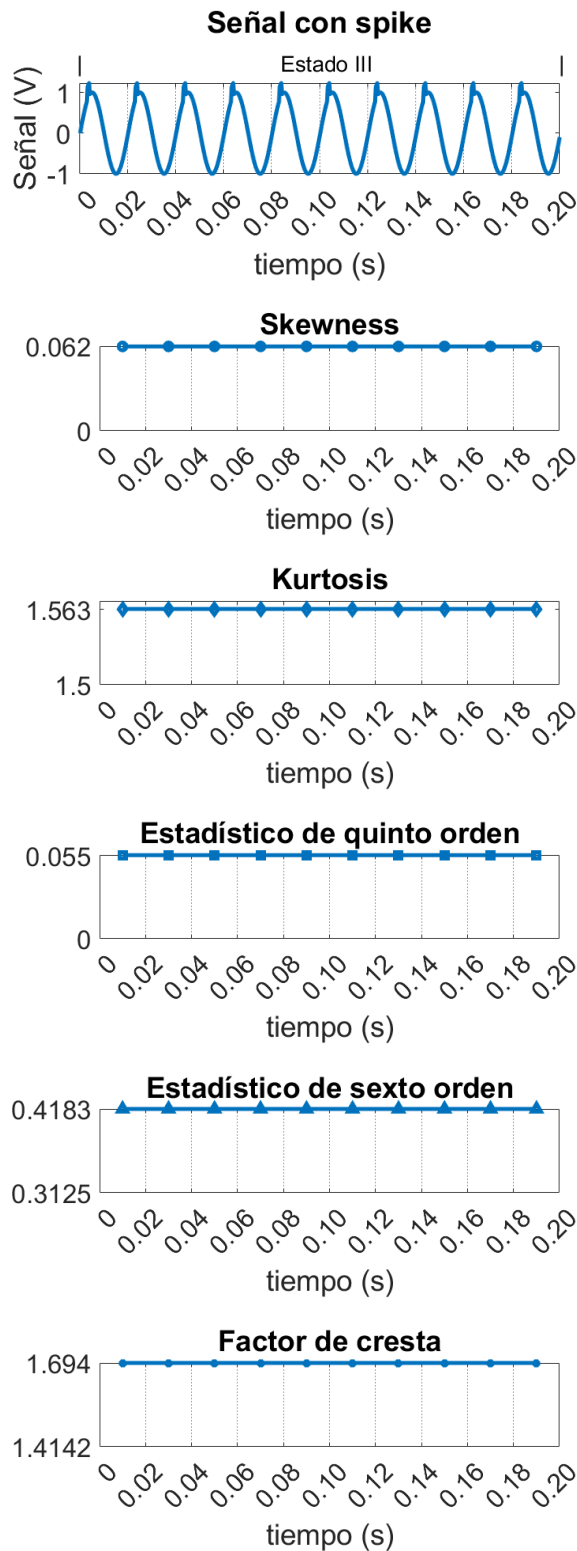
Figura 52. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un *notch*.



**SNR = 120 dB**

**THD = 1.30 %**

Figura 53. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un *sag*.



**SNR = 120 dB**

**THD = 5.98 %**

Figura 54. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un *spike*.

- La **figura 55** muestra la evolución de los indicadores en una señal a 50 Hz con la presencia de un *swell* de 7 ciclos de duración (ciclos del #3 al #9). Estudiando el comportamiento de los indicadores frente a los posibles estados de la señal, se observan similitudes con otras variaciones de corta duración del RMS (esto es, *sags* o interrupciones): desde un estado I inicial en el que se obtienen los valores nominales, se produce una transición al estado II reflejada en valores atípicos para *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden y factor de cresta, para posteriormente, en un estado III estable dentro del evento, volver a sus valores nominales. Este valor atípico cobrado por dichos indicadores recibirá en adelante el nombre de “valor transicional”. El estadístico de sexto orden, si bien para *sag* e interrupción decrecía respecto al valor nominal durante el evento, bajo estados II y III de *swells* aumenta su valor entre 0.5536 y 10.6288, para un aumento de la amplitud de la forma de onda desde el 10% al 80%, respectivamente, reforzando la hipótesis planteada de una posible relación directamente proporcional entre el valor del estadístico de sexto orden y la amplitud de la señal. Pese a que en el ejemplo mostrado se obtiene un THD cercano al 0%, y, en general, el valor obtenido en señales de *swell* oscila entre el 0% y el 5%, en el 10% de los casos estudiados se detecta erróneamente presencia armónica (es decir, se alcanza un valor de THD superior al 8%).
- La **figura 56** ejemplifica una señal de 50 Hz afectada por un **transitorio impulsivo**, que tiene lugar en el octavo ciclo, creando por propia definición una inestabilidad en la señal eléctrica y quedando, por tanto, dicho ciclo bajo estado II, reflejado además por valores atípicos en los estadísticos de orden superior y factor de cresta. Los valores adquiridos por *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden y estadístico de sexto orden pueden ser tanto superiores como inferiores al valor nominal, aunque sin que exista una relación entre los mismos, mientras que para el factor de cresta se obtiene siempre un valor superior al nominal durante el estado II en todas las señales con transitorios impulsivos de la base de datos #1. El valor de THD tiende a ser cercano al 0%, si bien en el 3% de los casos estudiados se supera el 8%, detectando con ello erróneamente presencia armónica.

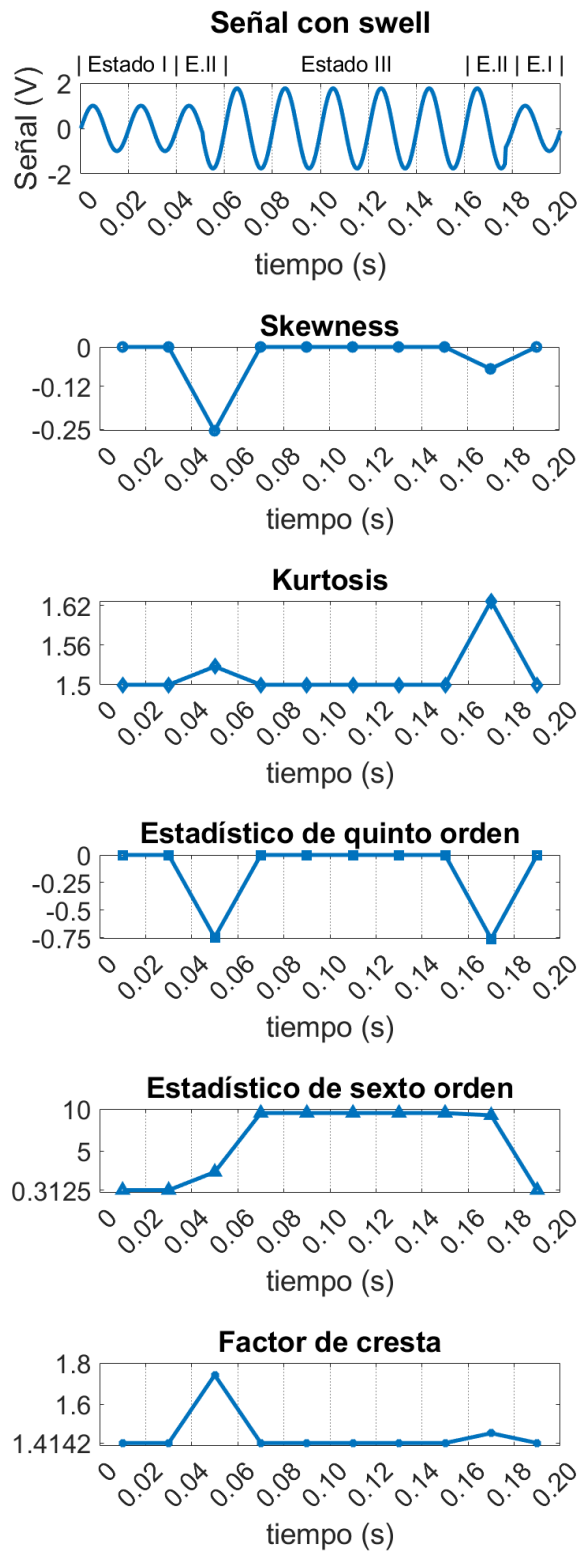


Figura 55. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un *swell*.

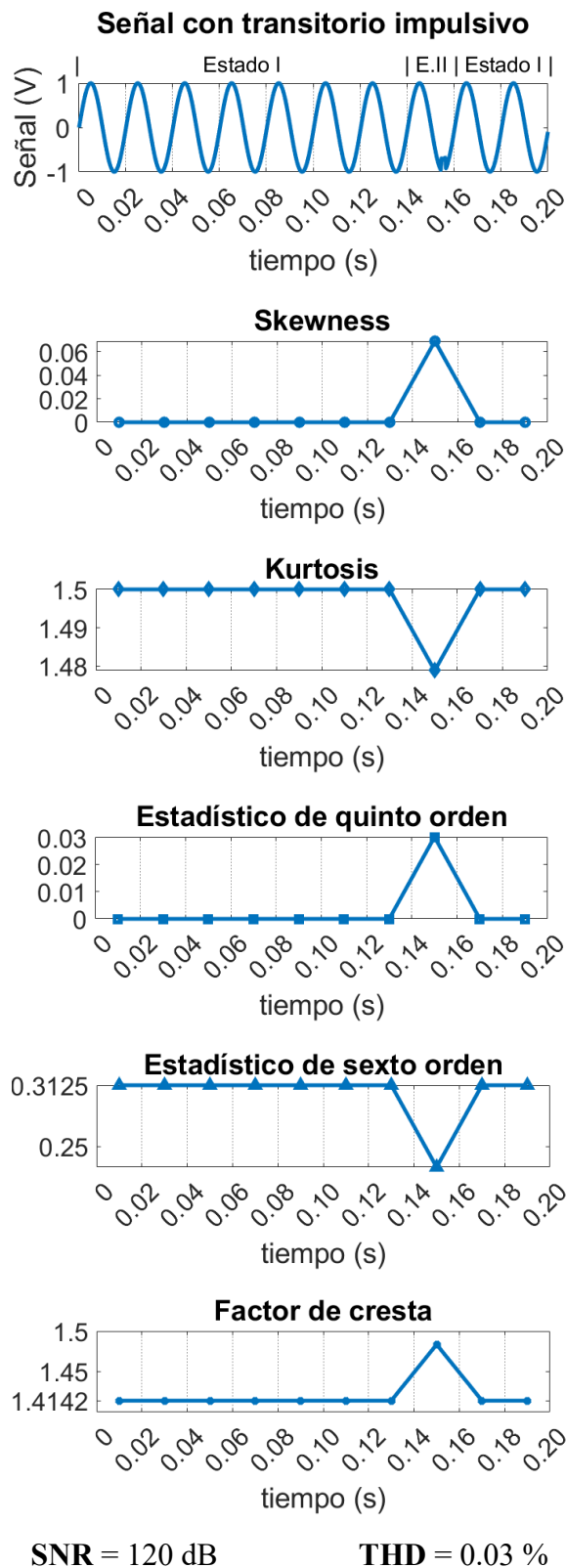


Figura 56. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un transitorio impulsivo.

- La **figura 57** presenta una señal de 50 Hz con un **transitorio oscilatorio** localizado en los ciclos #3, #4 y #5. Durante un evento transitorio, por propia definición, no llega a alcanzarse estabilidad en ningún momento, por lo tanto, dichos ciclos funcionan bajo un estado II. Esta inestabilidad se observa asimismo en los valores adquiridos por los indicadores durante el evento transitorio, puesto que para los ciclos del #3 al #5 se obtienen valores dispares y diferentes entre sí y al valor nominal, que pueden ser tanto superiores a este último como inferiores, si bien para el estadístico de sexto orden y el factor de cresta es mucho más frecuente que se supere el valor nominal que lo contrario, tal y como ocurre en el 95.61% y el 92.11% de los valores en estado II obtenidos, respectivamente. Asimismo, no se ha detectado una relación directa ni inversa en el valor adquirido por los indicadores. Respecto al THD, pese a que de forma general se mantiene entre el 0% y el 2% para transitorios oscilatorios considerando las señales disponibles en la base de datos #1, en el 3% de los casos se obtiene un valor atípico que supera el 8% induciendo con ello una detección errónea de presencia armónica.
- La **figura 58** muestra un ejemplo de una señal de 50 Hz con **distorsión armónica** de tercer, quinto y séptimo orden. Puesto que dicha distorsión es constante durante la señal eléctrica, esta se encuentra en estado III todo el tiempo. En base a todas las señales con armónicos disponibles en la base de datos #1, se concluye que, ante este tipo de eventos, la *skewness* y el estadístico de quinto orden no se ven afectados, obteniéndose por tanto el valor nominal de ambos. Para la *kurtosis*, el estadístico de sexto orden y el factor de cresta, sin embargo, los valores son inferiores a los nominales de cada indicador. Finalmente, el valor de THD en general es superior al 8%, si bien en el 2.54% de los casos se obtienen valores inferiores pero cercanos a este.
- La **figura 59** aporta un ejemplo de una señal de 50 Hz que presenta **armónicos con sag**. Como puede observarse, y de forma común a todas las señales disponibles de estas características, se mantiene el patrón seguido en las señales con eventos de variación corta de RMS (interrupciones, *sags* y *swells*) de pasar de un estado estable antes de la perturbación a la aparición de una inestabilidad con la entrada del evento y nuevamente estabilidad dentro de la perturbación. Sin embargo, ante la presencia de armónicos durante toda la señal, la estabilidad inicial corresponde a un estado III caracterizado por distorsión armónica en lugar de un estado I, y la segunda estabili-

dad es fruto de la combinación de armónicos y el *sag* ya estabilizado, reconociéndose en estas señales complejas por tanto dos tipos de estado III, que en la figura 58 son diferenciados como estado IIIa (correspondiente al funcionamiento de la señal bajo armónicos) y estado IIIb (correspondiente al funcionamiento de la señal bajo un *sag* estabilizado y presencia armónica). Para la *skewness* y el estadístico de quinto orden, ambos indicadores inmunes a armónicos, bajo ambos estados IIIa y IIIb se obtiene el valor nominal. Respecto a la *kurtosis* y el factor de cresta, el valor de ambos en los estados IIIa y IIIb es inferior al nominal en todos los casos, tal y como ocurría en la figura 58 para las señales con armónicos. Bajo el estado IIIa, el estadístico de sexto orden es inferior al valor nominal debido a los armónicos, descendiendo aún más en el estado IIIb por la reducción de amplitud debida al *sag*. Como era de esperar, el valor de THD supera en todos los casos el 8% y, por tanto, se detecta la presencia armónica en las señales.

- La **figura 60** muestra una señal de 50 Hz con **armónicos y un *swell***. De forma análoga a las señales con armónicos y *sags*, se identifican dos tipos de estado III (IIIa y IIIb) además del estado II de transición con la aparición del *swell*. Ambos estados III afectan a la *kurtosis* y el factor de cresta, disminuyendo su valor respecto al nominal, pero no influyen en la *skewness* y el estadístico de quinto orden. El estadístico de sexto orden disminuye respecto al valor nominal en el estado IIIa debido a la componente armónica, pero aumenta en el estado IIIb por el *swell*. Finalmente, el valor de THD detecta en el 99% de los casos disponibles en la base de datos #1 la presencia de armónicos.

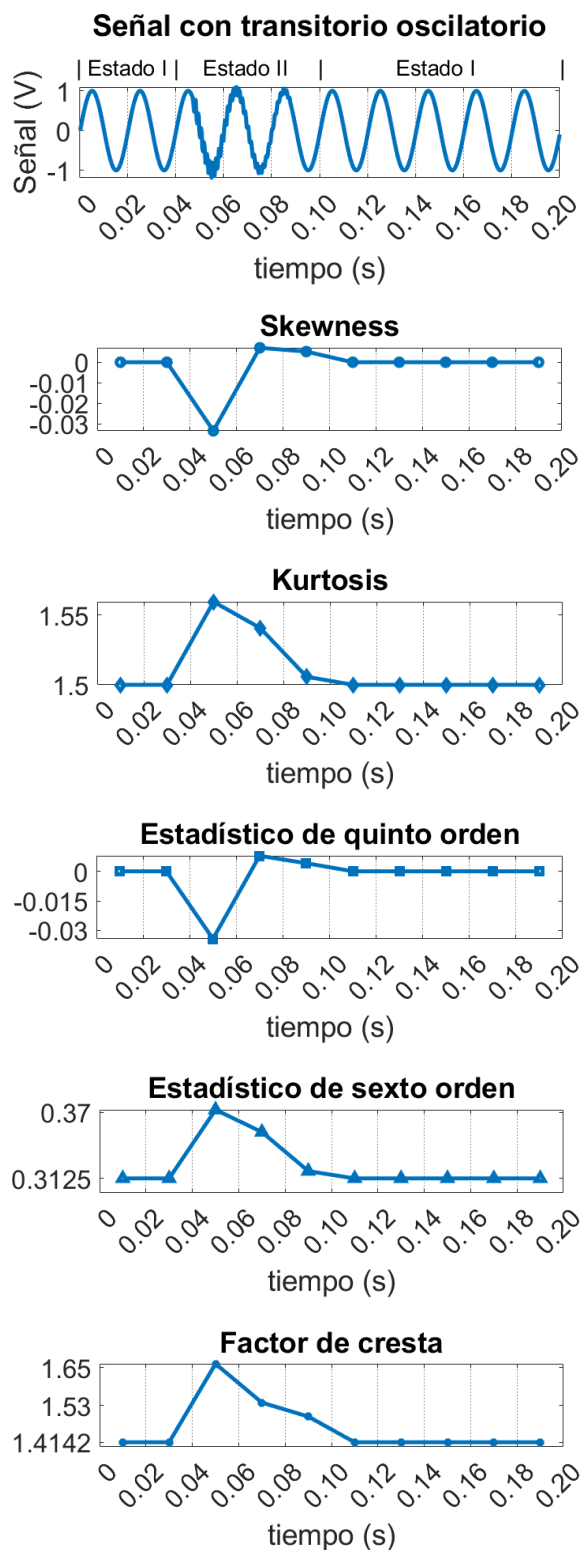
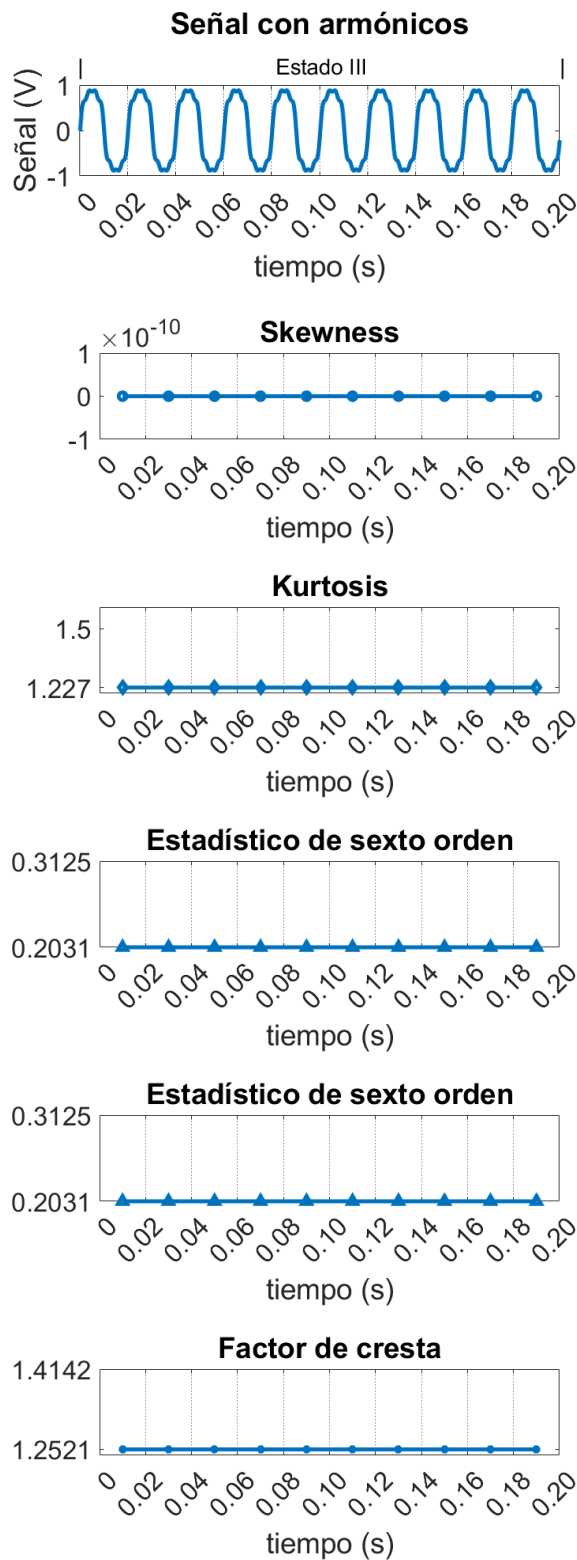


Figura 57. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un transitorio oscilatorio.



**SNR = 120 dB**

**THD = 17.05 %**

Figura 58. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a armónicos.

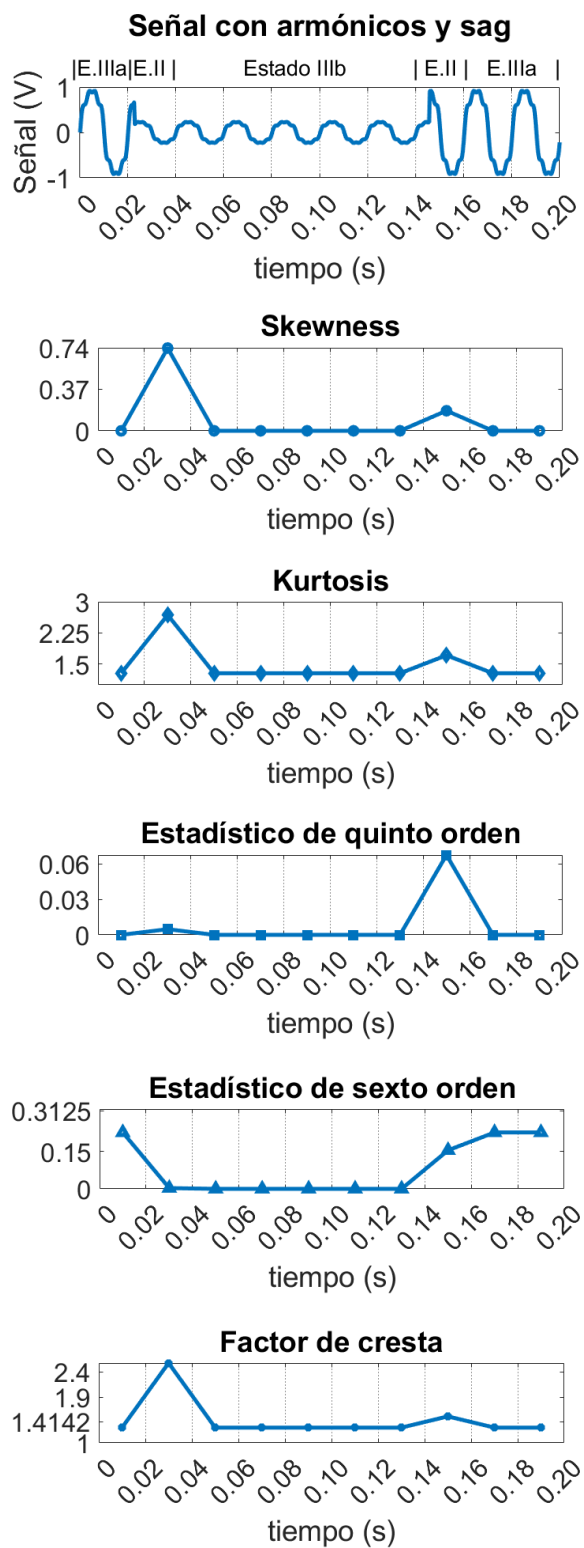
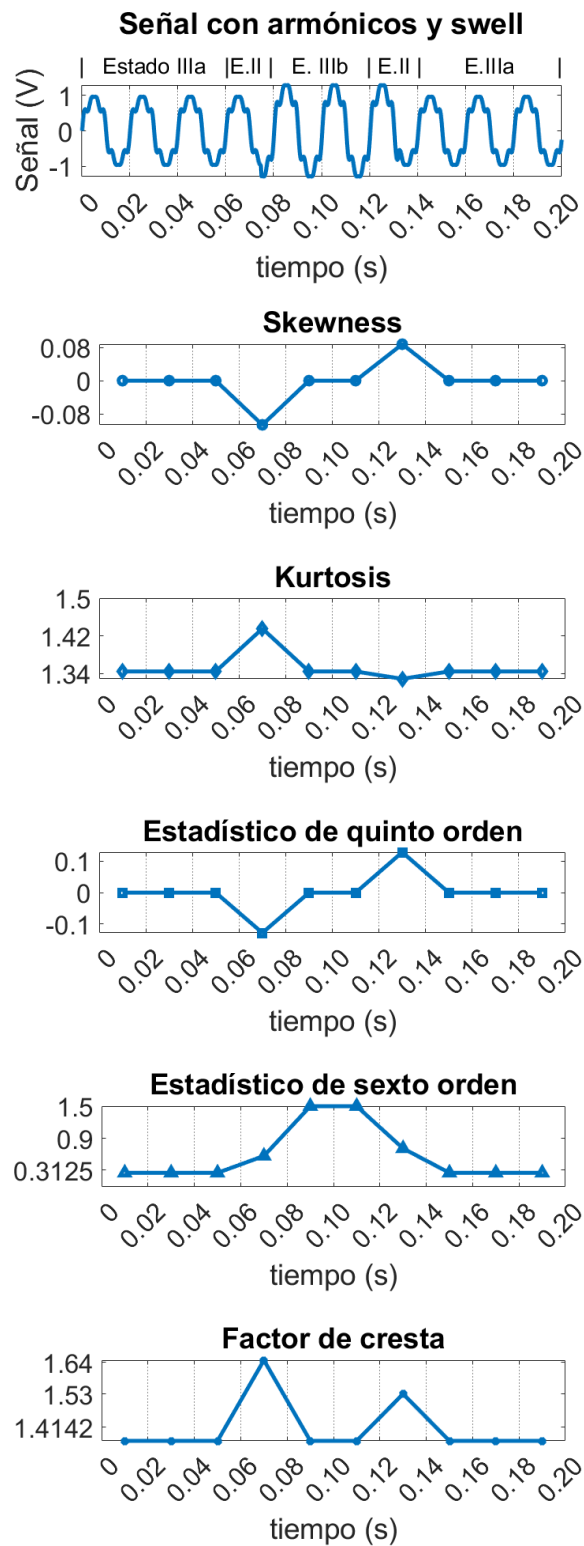


Figura 59. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un *sag* con armónicos.



**SNR = 120 dB**

**THD = 16.79 %**

Figura 60. Progresión ciclo a ciclo de los indicadores frente a un *swell* con armónicos.

#### 4.1.1. Patrones de gráficos radar por evento y estado

El estudio individualizado de la evolución de cada uno de los indicadores durante los distintos eventos considerados permite concretar por tanto patrones de comportamiento específicos por tipo de evento y estado en situaciones sin ruido.

Cabe aclarar que, puesto que el estado I corresponde a los ciclos de funcionamiento de la señal eléctrica carentes de eventos, con la señal operando de forma óptima, la silueta volcada en el gráfico radar es común a todas las señales estudiadas sin ruido, en forma de heptágono regular cuyos vértices se sitúan en el punto medio de cada eje. Es por ello por lo que, en las figuras de la 61 a la 71 a continuación, en las que se muestran un radar por tipo de estado para las señales estudiadas previamente en las figuras 50 – 60, se omite el gráfico radar correspondiente al estado I, puesto que la silueta en rojo con líneas discontinuas que acompaña cada uno de los gráficos de radar, ilustrando el comportamiento óptimo de la señal, representa en sí mismo el estado I de la señal.

En estos gráficos radar asimismo se han incluido, para cada eje de indicador, un valor máximo (mostrado como un romboide en color morado) y un valor mínimo (mostrado como un cuadrado en color verde) que corresponden a los valores máximos y mínimos, respectivamente, alcanzados por cada indicador para ese tipo de estado y evento tras el análisis completo de la base de datos #1. Cabe destacar que, para evitar posibles errores de interpretación, los valores atípicos para THD con los que se detectaba presencia armónica erróneamente han sido omitidos. Los valores de SNR máximos y mínimos mostrados son, además, comunes a todos los patrones de comportamiento mostrados, de 30 dB y 80 dB, respectivamente.

Aunque en el subapartado anterior se ha analizado detalladamente el comportamiento de los indicadores frente a los posibles estados de cada tipo de evento, la visualización conjunta de los valores a través de los gráficos tipo radar permite estimar la magnitud del evento en base a las diferencias entre el valor nominal de los indicadores (heptágono rojo discontinuo) y el valor obtenido. Asimismo, va a analizarse brevemente cada patrón de comportamiento obtenido por evento:

- **Flickers:** la figura 61 muestra un patrón de comportamiento promedio de un ciclo bajo un evento de *flicker*, correspondiente al ciclo #10 de la señal mostrada a la izquierda. El patrón para estado II (único estado posible en las señales con *flicker* estudiadas) se caracteriza por variaciones muy leves en *skewness* (en senti-

do positivo y negativo respecto al valor nominal) y estadístico de sexto orden (en sentido positivo), variaciones leves en *kurtosis* (en sentido positivo), estadístico de quinto orden (en sentido positivo y negativo) y factor de cresta (en sentido positivo), y valores de THD dentro de la norma.

- **Interrupciones:** la figura 62 muestra dos patrones de comportamiento promedio, para los estados II y III de un ciclo (ciclos #7 y #3, respectivamente) bajo la influencia de una interrupción. El patrón para el estado II se caracteriza por variaciones bruscas, en sentido positivo y negativo, para *skewness* y estadístico de quinto orden, variaciones bruscas en sentido generalmente (aunque no forzosa-mente) positivo para *kurtosis* y factor de cresta, variaciones bruscas en sentido negativo para el estadístico de sexto orden, y valores de THD dentro de la norma. El patrón para el estado III se caracteriza por *skewness*, *kurtosis*, estadístico de sexto orden y factor de cresta en su valor nominal, el estadístico de sexto orden en cero, y valores de THD dentro de la norma. Como puede apreciarse en la ausencia de valores máximos y mínimos en los citados ejes del gráfico radar para el estado III, en condiciones libres de ruido, el patrón de comportamiento no tiene margen de oscilación, siendo exactamente el mismo para todos los estados III de interrupciones estudiados.
- **Notches:** la figura 63 muestra un patrón de comportamiento promedio de un ciclo bajo un evento de *notch*, correspondiente al ciclo #1 de la señal mostrada a la izquierda. El patrón para estado III se caracteriza por variaciones muy leves en estadístico de sexto orden y factor de cresta, ambas en sentido generalmente positivo, variaciones leves en *skewness*, *kurtosis* y estadístico de quinto orden en sentido generalmente positivo, y valores de THD dentro de la norma.
- **Sags:** la figura 64 muestra dos patrones de comportamiento promedio, para los estados II y III de un ciclo (ciclos #4 y #3, respectivamente) bajo un *sag*. El patrón para el estado II se caracteriza por variaciones bruscas para *skewness* y estadístico de quinto orden en sentido tanto negativo como positivo, variaciones bruscas en sentido generalmente positivo para *kurtosis* y necesariamente positivo para factor de cresta, variaciones en sentido negativo para estadístico de sexto orden, y valores de THD dentro de la norma. El patrón para el estado III se caracteriza por valores nominales para *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden y factor de cresta, valores en sentido negativo para el estadístico de sexto orden, y valores de THD dentro de la norma.

- **Spikes:** la figura 65 muestra un patrón de comportamiento promedio de un ciclo bajo un evento de *spike*, correspondiente al ciclo #1 de la señal mostrada a la izquierda. El patrón para estado III se caracteriza por variaciones muy leves en sentido generalmente positivo para el estadístico de sexto orden, variaciones notables en sentido positivo para el factor de cresta, variaciones notables en sentido tanto positivo como negativo para *skewness*, *kurtosis* y estadístico de quinto orden, y valores de THD dentro de la norma.
- **Swells:** la figura 66 muestra dos patrones de comportamiento promedio, para los estados II y III de un ciclo (ciclos #3 y #5, respectivamente) bajo un *swell*. El patrón para el estado II se caracteriza por variaciones notables en sentido positivo para el factor de cresta, variaciones bruscas en sentido generalmente positivo para *kurtosis* y necesariamente positivo para el estadístico de sexto orden, variaciones bruscas en sentido tanto negativo como positivo para *skewness* y estadístico de quinto orden, y valores de THD dentro de la norma.
- **Transitorios impulsivos:** la figura 67 muestra un patrón de comportamiento promedio de un ciclo bajo un evento de transitorio impulsivo, correspondiente al ciclo #8 de la señal mostrada a la izquierda. El patrón para estado II se caracteriza por variaciones muy leves en sentido positivo para el factor de cresta y en sentido tanto positivo como negativo para el estadístico de sexto orden, variaciones leves en sentido tanto positivo como negativo para la *skewness*, *kurtosis* y el estadístico de quinto orden, y valores de THD dentro de la norma.
- **Transitorios oscilatorios:** la figura 68 muestra un patrón de comportamiento promedio de un ciclo bajo un evento de transitorio oscilatorio, correspondiente al ciclo #3 de la señal mostrada a la izquierda. El patrón para el estado II se caracteriza por variaciones notables en sentido generalmente positivo para el estadístico de sexto orden y el factor de cresta, variaciones bruscas en sentido generalmente positivo para la *kurtosis*, variaciones bruscas en sentido tanto negativo como positivo para la *skewness* y el estadístico de quinto orden, y valores de THD dentro de la norma.
- **Armónicos:** la figura 69 muestra un patrón de comportamiento promedio de un ciclo bajo armónicos, correspondiente al ciclo #1 de la señal mostrada a la izquierda. El patrón para el estado III se caracteriza por ausencia de variación para la *skewness* y el estadístico de quinto orden, variaciones muy leves en sentido

negativo para el estadístico de sexto orden, variaciones leves en sentido negativo para el factor de cresta, variaciones notables en sentido negativo para la *kurtosis*, y valores de THD por encima de lo estipulado por la norma (8%).

- **Armónicos con *sag*:** la figura 70 muestra tres patrones de comportamiento promedio, para los estados II y IIIa y IIIb de un ciclo (ciclos #8, #1 y #4, respectivamente) bajo un evento complejo, en el que se combinan armónicos con un *sag*. El patrón para el estado II se caracteriza por variaciones bruscas en sentido tanto positivo como negativo para la *skewness*, la *kurtosis* y el estadístico de quinto orden, variaciones bruscas en sentido generalmente positivo para el factor de cresta, y variaciones bruscas en sentido negativo para el estadístico de sexto orden. El patrón del estado IIIa, correspondiente al patrón de estado III en armónicos, se caracteriza por ausencia de variación para la *skewness* y el estadístico de quinto orden, variaciones muy leves en sentido negativo para el estadístico de sexto orden, variaciones leves en sentido negativo para el factor de cresta, y variaciones notables en sentido negativo para la *kurtosis*. El patrón del estado IIIb se caracteriza por ausencia de variación para la *skewness* y el estadístico de quinto orden, variación leve en sentido negativo para el factor de cresta, variaciones notables en sentido negativo para la *kurtosis*, y variaciones bruscas en sentido negativo para el estadístico de sexto orden. Sendos tipos de estado, II, IIIa y IIIb presentan valores de THD por encima de lo estipulado por la norma (8%).
- **Armónicos con *swell*:** la figura 71 muestra tres patrones de comportamiento promedio, para los estados II y IIIa y IIIb de un ciclo (ciclos #7, #1 y #5, respectivamente) bajo un evento complejo, en el que se combinan armónicos con un *swell*. El patrón para el estado II se caracteriza por variaciones notables en sentido generalmente positivo para el factor de cresta, variaciones bruscas en sentido tanto positivo como negativo para la *skewness*, la *kurtosis* y el estadístico de quinto orden, y variaciones bruscas en sentido positivo para el estadístico de sexto orden. El patrón del estado IIIa, correspondiente al patrón de estado III en armónicos, se caracteriza por ausencia de variación para la *skewness* y el estadístico de quinto orden, variaciones muy leves en sentido negativo para el estadístico de sexto orden, variaciones leves en sentido negativo para el factor de cresta, y variaciones notables en sentido negativo para la *kurtosis*. El patrón del estado IIIb se caracteriza por ausencia de variación para la *skewness* y el estadístico de

quinto orden, variación leve en sentido negativo para el factor de cresta, variaciones notables en sentido negativo para la *kurtosis*, y variaciones bruscas en sentido positivo para el estadístico de sexto orden. Sendos tipos de estado, II, IIIa y IIIb presentan valores de THD por encima de lo estipulado por la norma (8%).

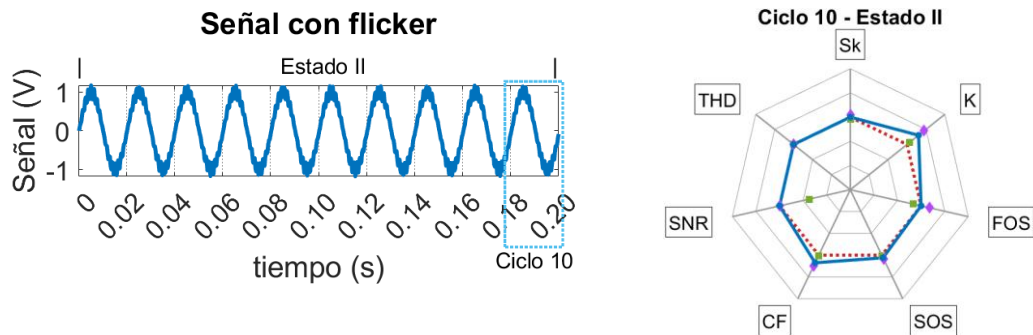


Figura 61. Gráficos radar por estado frente a un *flicker*.

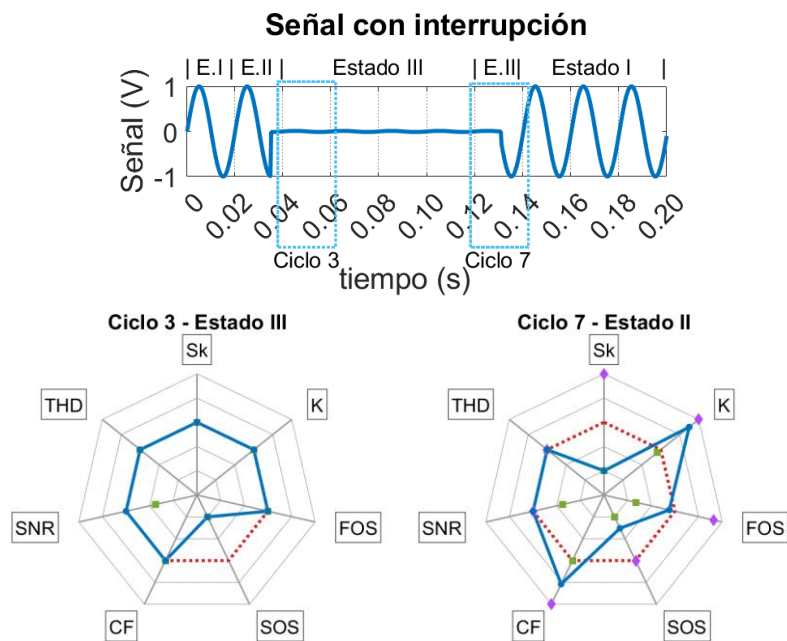


Figura 62. Gráficos radar por estado frente a una interrupción.

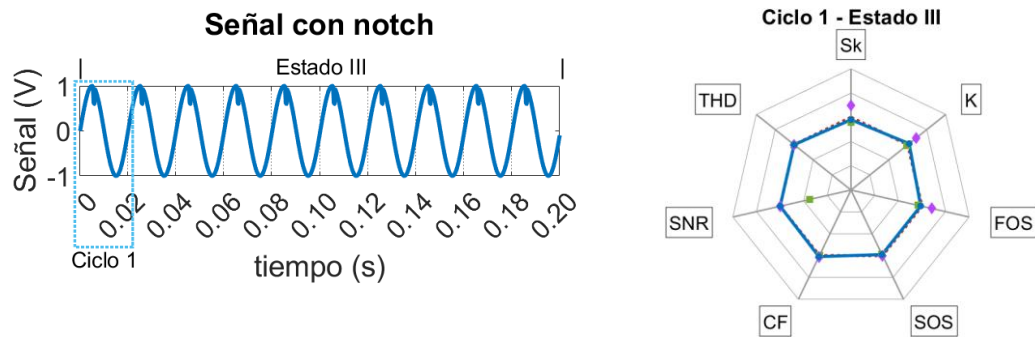


Figura 63. Gráficos radar por estado frente a un *notch*.

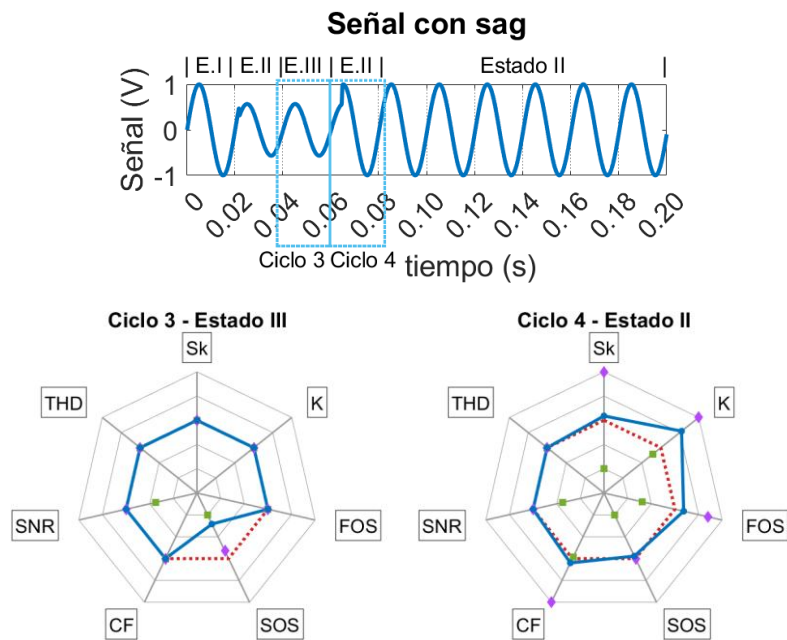


Figura 64. Gráficos radar por estado frente a un *sag*.

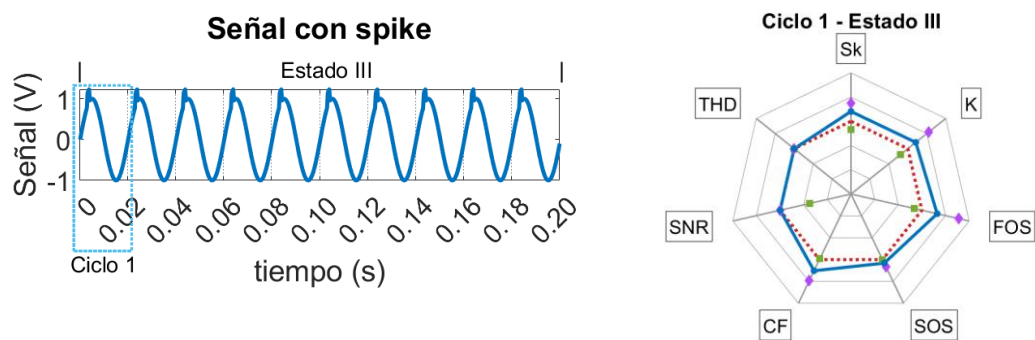
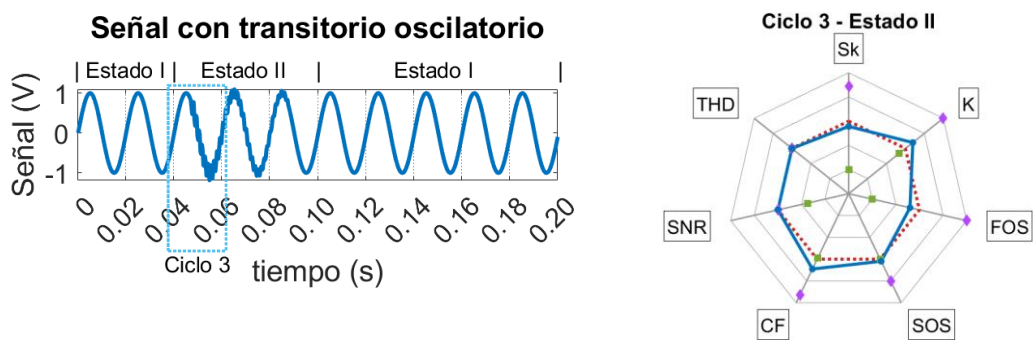
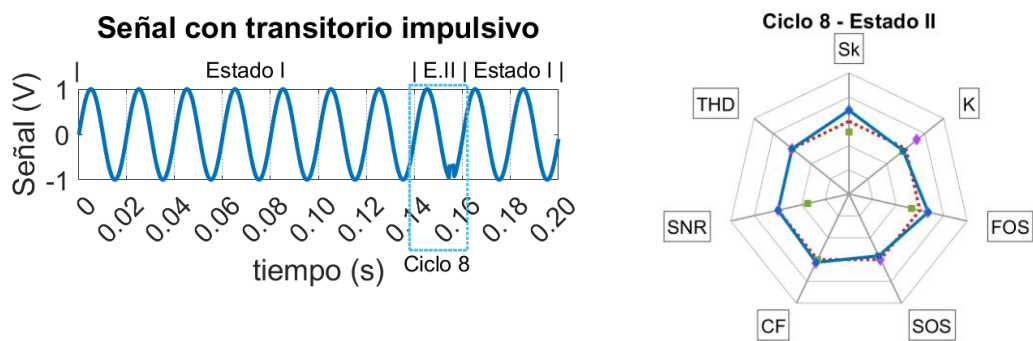
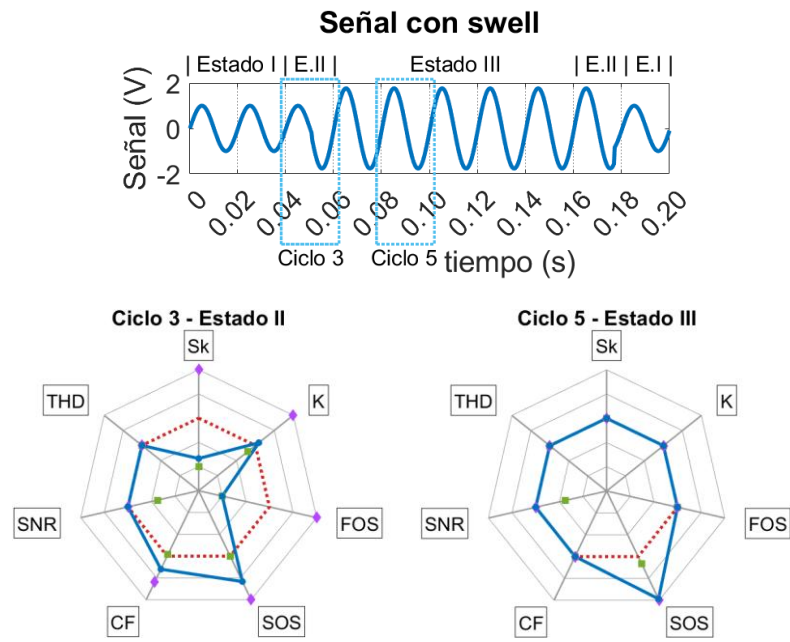


Figura 65. Gráficos radar por estado frente a un *spike*.



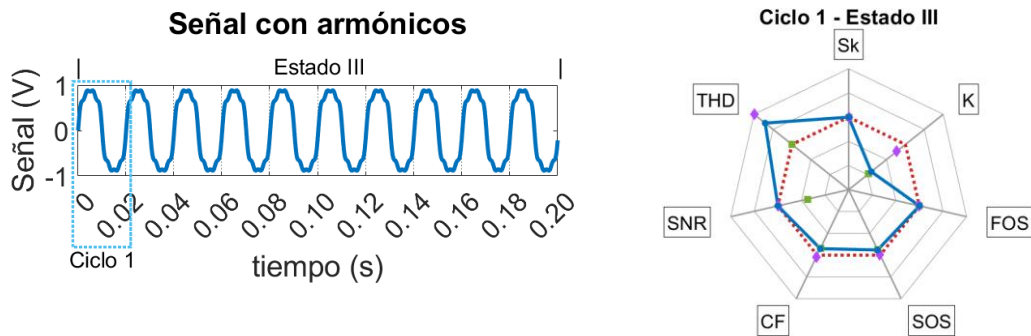


Figura 69. Gráficos radar por estado frente a armónicos.

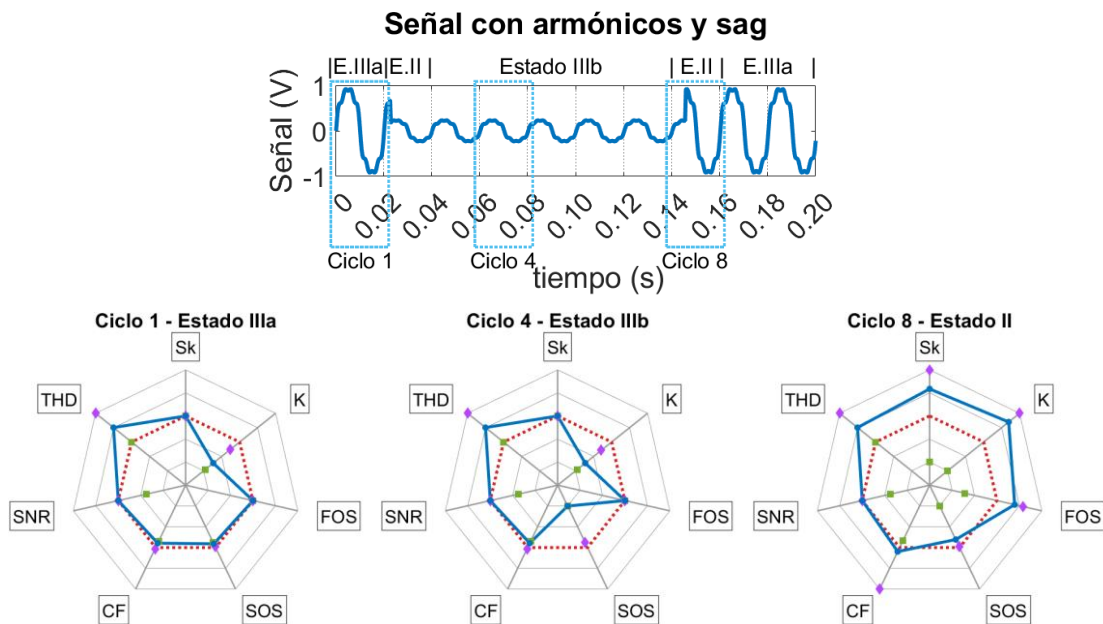


Figura 70. Gráficos radar por estado frente a armónicos con *sag*.

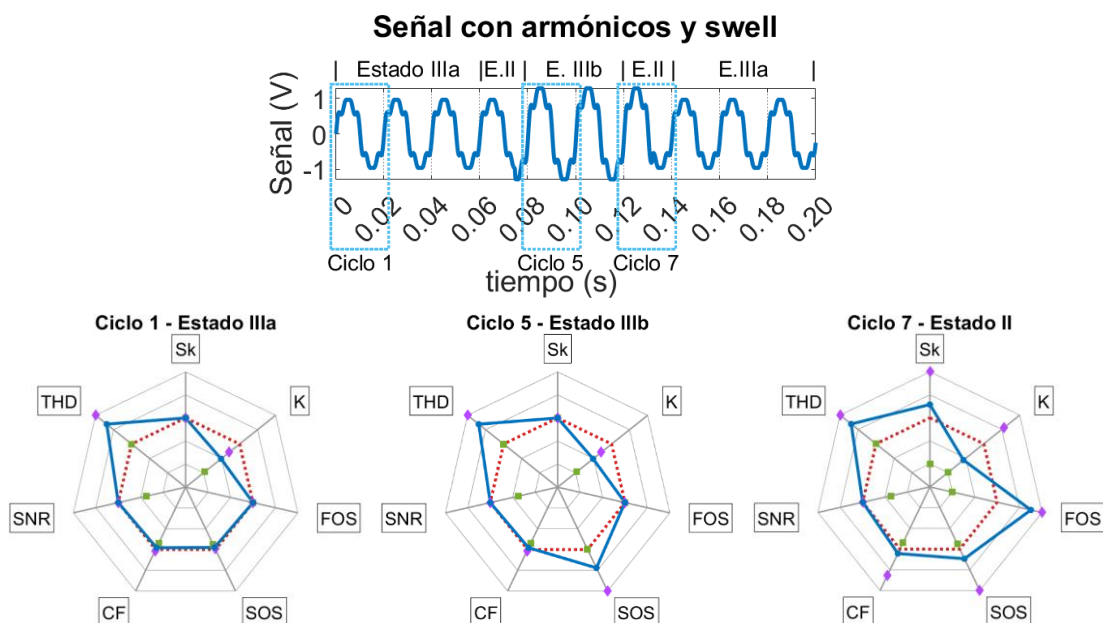


Figura 71. Gráficos radar por estado frente a armónicos con *swell*.

#### 4.1.2. Indicador global de la calidad de suministro

De forma cuantitativa y equivalente al gráfico radar, se pretende obtener un indicador global de la calidad de suministro combinación de los indicadores individuales estudiados: *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden, factor de cresta, THD y SNR.

Para ello, y con el objetivo de que la influencia de cada indicador individual en el indicador global sea equitativa, se ha establecido como referencia la ecuación 25, mediante la cual, para cada indicador individual  $i$ , se obtiene un valor fraccionado del indicador global de la calidad de suministro ( $EDA PQ_i$ ), siendo  $VR_i$  el valor real adquirido por el indicador individual en el eje,  $VN_i$  su valor nominal, y  $máximo_i$  y  $mínimo_i$  los valores máximos y mínimos, respectivamente, del eje correspondiente a dicho indicador en el gráfico radar.

$$EDA PQ_i = \frac{|VR_i - VN_i|}{máximo_i - mínimo_i} \quad (25)$$

La suma de los valores fraccionados del indicador global conforma, por tanto, el indicador global de la calidad de suministro (ecuación 26), donde  $n$  representa el número de indicadores individuales empleados para el desarrollo del indicador global de la calidad de suministro. En base a los indicadores individuales seleccionados en el ámbito de esta tesis,  $n$  sería 7.

$$EDA PQ_{global} = \sum_{i=1}^{n=7} EDA PQ_i \quad (26)$$

Ahora bien, puesto que para el estadístico de sexto orden y la distorsión armónica total o THD el eje en el gráfico radar sigue una relación logarítmica en lugar de lineal como es el caso de los demás indicadores individuales, la ecuación 25 varía ligeramente para estos dos indicadores, siendo VN entonces el valor nominal en el eje; es decir, para ambos casos, VN sería 1.

La conjunción de los indicadores individuales siguiendo las ecuaciones 25 y 26 devuelve, por tanto, la expresión 27 para el cálculo de un indicador global de la calidad de suministro, medido por ciclo:

$$\begin{aligned}
 EDA PQ_{global} = & \frac{|Sk_{eje}|}{0.3050 - (-0.3050)} + \frac{|K_{eje} - 1.5|}{1.8030 - 1.1970} + \frac{|FOS_{eje}|}{0.1710 - (-0.1710)} \\
 & + \frac{|SOS_{eje} - 1|}{2 - 0} + \frac{|CF_{eje} - 1.4142|}{2.5082 - 0.3202} + \frac{|THD_{eje} - 1|}{2 - 0} + \frac{|SNR_{eje} - 80|}{160 - 0}
 \end{aligned} \quad (27)$$

Que, de forma reducida, quedaría:

$$\begin{aligned}
 EDA PQ_{gl.} = & \frac{|Sk_{eje}|}{0.610} + \frac{|K_{eje} - 1.5|}{0.606} + \frac{|FOS_{eje}|}{0.342} + \frac{|SOS_{eje} - 1|}{2} + \frac{|CF_{eje} - 1.4142|}{2.188} \\
 & + \frac{|THD_{eje} - 1|}{2} + \frac{|SNR_{eje} - 80|}{160}
 \end{aligned} \quad (28)$$

A este indicador global aplican los mismos condicionantes establecidos para el gráfico radar, es decir:

- Si el valor de la *skewness* es mayor de 0.3050, entonces  $Sk_{eje} = 0.3050$ .
- Si el valor de la *skewness* es menor de  $-0.3050$ , entonces  $Sk_{eje} = -0.3050$ .
- Si el valor de la *kurtosis* es mayor de 1.8030, entonces  $K_{eje} = 1.8030$ .
- Si el valor de la *kurtosis* es menor de 1.1970, entonces  $K_{eje} = 1.1970$ .
- Si el valor del estadístico de quinto orden es mayor de 0.1710, entonces  $FOS_{eje} = 0.1710$ .
- Si el valor del estadístico de quinto orden es menor de  $-0.1710$ , entonces  $FOS_{eje} = -0.1710$ .
- Si el valor del estadístico de sexto orden es mayor de 10.6288, entonces  $SOS_{eje} = 2$ .
- Si el valor del factor de cresta es mayor de 2.5082, entonces  $CF_{eje} = 2.5082$ .
- Si el valor del factor de cresta es menor de 0.3202, entonces  $CF_{eje} = 0.3202$ .
- Si el valor de THD es mayor de 21.9676, entonces  $THD_{eje} = 2$ .
- Si el valor de THD es menor de 8, entonces  $THD_{eje} = 1$ .
- Si el valor de SNR es mayor de 80, entonces  $SNR_{eje} = 80$ .
- Si el valor de SNR es menor de 0, entonces  $SNR_{eje} = 0$ .
- El valor de SNR es el mayor del SNR para toda la señal y el SNR de los 10 primeros ciclos.

Obteniéndose valores del indicador global entre 0 y 3.5, y siendo los valores máximos y mínimos por evento los recogidos en la tabla 15 a continuación para la base de datos #1. En las señales con eventos se ha omitido el valor del indicador global para el estado I.

Este indicador, conjunción de los estadísticos de orden superior e indicadores tradicionales, permite obtener una versión cuantitativa equivalente al gráfico radar que, si bien no facilita distinguir el tipo de evento presente en la señal, sí funciona como filtro para localizar ciclos de señal en los que los indicadores individuales varían más respecto a sus valores nominales u óptimos. Por este motivo, en adelante se incorpora el valor del indicador global de la calidad de suministro por ciclo en el análisis de señales.

Tabla 15. Valores máximos y mínimos por evento para el indicador global de la calidad de suministro.

<i>Tipo de evento</i>	<i>EDA PQ<sub>global</sub></i>	<i>EDA PQ<sub>global</sub></i>
	<i>máximo</i>	<i>mínimo</i>
<i>Ruido – 30 dB</i>	0.0585	0.0038
<i>Flicker</i>	0.4891	0.1009
<i>Interrupción</i>	2.5000	0.0574
<i>Notch</i>	0.2630	0.0147
<i>Sag</i>	2.2552	0.0625
<i>Spike</i>	1.1320	0.0511
<i>Swell</i>	2.3939	0.0716
<i>Transitorio impulsivo</i>	0.4953	0.0066
<i>Transitorio oscilatorio</i>	2.2189	0.0059
<i>Armónicos</i>	1.1106	0.1317
<i>Armónicos con sag</i>	2.4192	0.2015
<i>Armónicos con swell</i>	2.0183	0.2116

#### 4.1.3. Comprobación de diagramas de caja frente a la base de datos *Machlev*

De la figura 72 a la 82, se analizan los *boxplots* obtenidos para cada tipo de evento de la base de datos *Machlev*, siendo los valores atípicos o *outliers* indicadores de la presencia del evento y permitiendo así determinar qué indicador o indicadores son los más adecuados para detectar cada tipo de perturbación de la calidad de suministro eléctrico. Nótese que aquellos valores de THD que implicaban la detección errónea de armónicos en eventos como *sags* o interrupciones también se muestran como valores atípicos de este indicador; además, al tratarse de una base de datos de eventos sintéticos sin ruido, los valores de SNR se mantienen dentro de un rango considerado apropiado y, por tanto, en el que no figuran valores atípicos. Aun así, únicamente para esta base de datos, se ha aplicado un coeficiente que reduce el valor promedio del indicador a 90 dB en lugar de

120 dB, asegurando de este modo que la variación y valores atípicos de los otros indicadores puedan apreciarse fácilmente en eventos como los *notches*.

- Los indicadores con mayor facilidad para detectar eventos de *flicker*, tal y como reflejan los valores atípicos de los diagramas de caja de la figura 72, son el factor de cresta y el estadístico de sexto orden, seguidos de la *kurtosis*. Por el contrario, y ante la falta de *outliers*, se puede concluir que la *skewness* no permite diferenciar una señal con *flicker* de una señal con ruido de 30 dB (puesto que esta ha sido la referencia tomada para delimitar cuándo un valor es considerado atípico en los diagramas de caja adaptados). En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 100% de *flickers*.

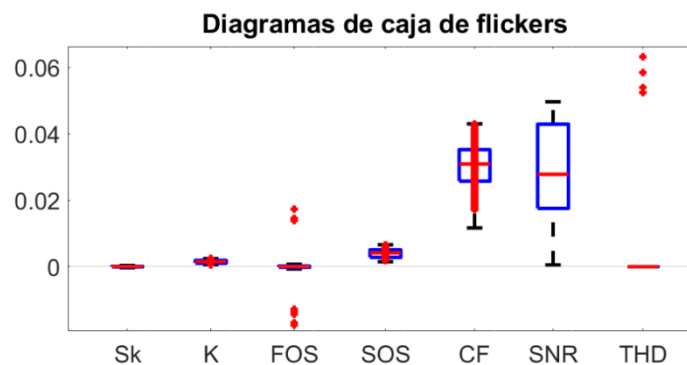


Figura 72. Diagramas de caja adaptados para las señales con *flicker* de la base de datos #1.

- Los valores atípicos de la *skewness*, la *kurtosis*, el estadístico de quinto orden y el factor de cresta que, en base al estudio previo de los indicadores y a la ausencia de caja y bigotes en los diagramas con la mediana en cero, pueden vincularse a los valores transicionales adquiridos por cada uno de ellos, junto con los *outliers* del estadístico de sexto orden, definen la presencia de una **interrupción**, como ilustra la figura 73. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 100% de las interrupciones.

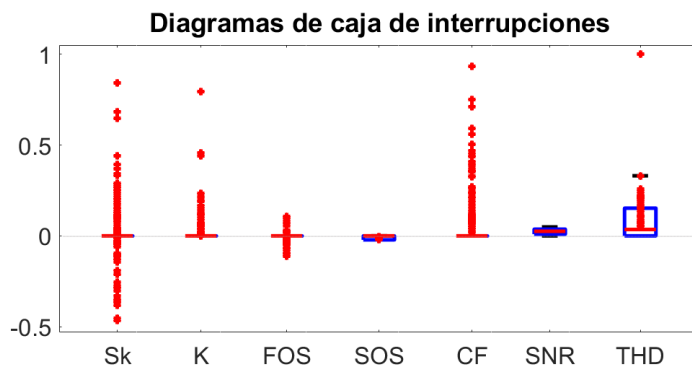


Figura 73. Diagramas de caja adaptados para las señales con interrupción de la base de datos #1.

- Para la detección de *notches*, tal y como refleja la figura 74, son más apropiados la *skewness* y el estadístico de quinto orden. No obstante, en base a la caja del diagrama desprovista de valores atípicos, puede concluirse que al menos un 50% de los eventos no son diferenciados del ruido de 30 dB tomando de referencia los valores de la *skewness*. Para el estadístico de quinto orden, el porcentaje de *notches* no detectados supera el 75%, si se tiene en cuenta que no se presentan valores atípicos desde el principio del bigote inferior hasta superado el tercer cuartil. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 27% de los *notches*.

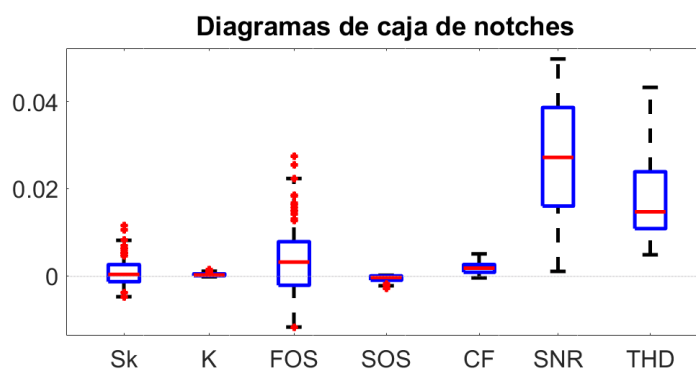


Figura 74. Diagramas de caja adaptados para las señales con *notch* de la base de datos #1.

- Con un comportamiento muy similar al adquirido en señales con interrupciones, la *skewness*, la *kurtosis*, el estadístico de quinto orden y el factor de cresta como valores transicionales, junto con el estadístico de sexto orden informan a través de los valores atípicos de la presencia de *sags* en la figura 75. En estos diagramas vuelve a destacar la ausencia de cajas y bigotes para los indicadores con valores transicionales, debido a que la gran mayoría de valores por ciclo recogidos pertenecen a los es-

tados I o III de la señal, siendo por tanto el valor nominal. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 100% de los *sags*.

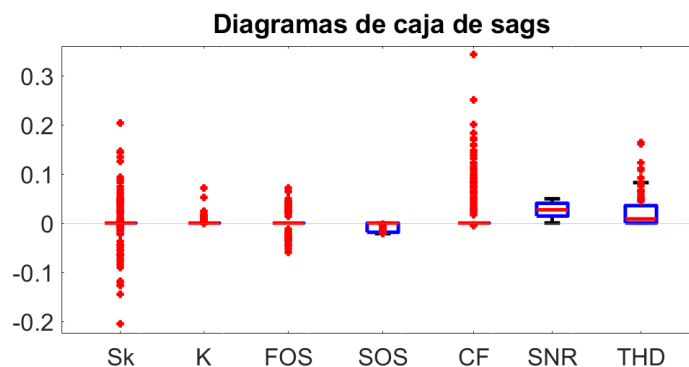


Figura 75. Diagramas de caja adaptados para las señales con *sag* de la base de datos #1.

- Frente a eventos de tipo *spike*, se ha comprobado a través de los diagramas de caja adaptados de la figura 76 que tanto los estadísticos de orden superior como el factor de cresta son adecuados para la detección del evento, si bien cabe señalar que, en base a los cuartiles, más de un 25% de los eventos no podrán diferenciarse de ruido de 30 dB a través de la *skewness*, porcentaje aún mayor, entre el 25% y el 50%, en el caso del estadístico de quinto orden. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 68% de los *spikes*.

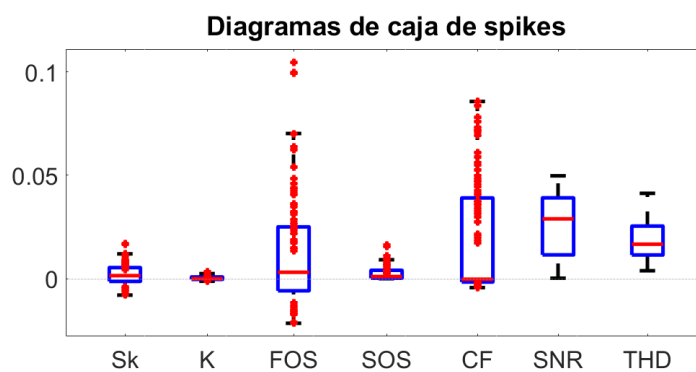


Figura 76. Diagramas de caja adaptados para las señales con *spike* de la base de datos #1.

- De forma similar a las interrupciones y los *sags*, los *swells* son detectables a través de los valores atípicos de los estadísticos de orden superior y el factor de cresta en la figura 77, destacando especialmente la variación respecto al valor nominal en el estadístico de quinto orden y el estadístico de sexto orden. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 100% de los *swells*.

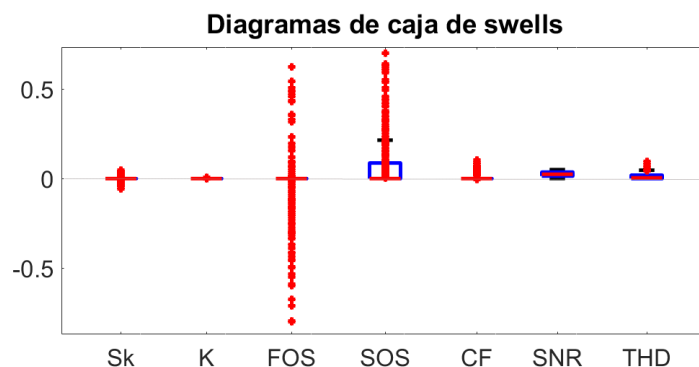


Figura 77. Diagramas de caja adaptados para las señales con *swell* de la base de datos #1.

- Los indicadores con mayor facilidad para detectar transitorios impulsivos, tal y como reflejan los valores atípicos de los diagramas de caja de la figura 78, son la *kurtosis*, la *skewness* y los estadísticos de quinto y sexto orden, siendo más notable en los tres últimos la existencia de un rango de valores en el que se omiten los valores atípicos por poder corresponder a las oscilaciones características de señales con ruido a 30 dB. De hecho, dicho rango impide diferenciar valores del factor de cresta debidos a transitorios impulsivos de la variación por ruido de 30 dB, en base a la ausencia de valores atípicos para este indicador. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 46% de los transitorios impulsivos.

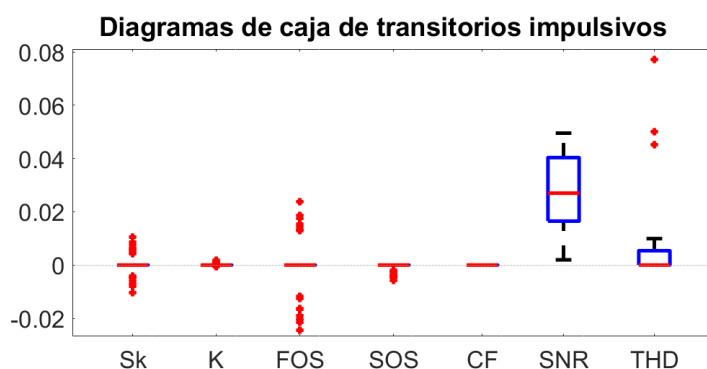


Figura 78. Diagramas de caja adaptados para las señales con transitorio impulsivo de la base de datos #1.

- Pese a que la distribución de valores para los transitorios oscilatorios, tal y como ilustra la figura 79, se asemeja al comportamiento frente a transitorios impulsivos, en el primer tipo de evento pueden apreciarse, especialmente en el estadístico de quinto orden, un número mayor de valores atípicos. Este aumento de *outliers* es debido, por una parte, a que la variación respecto al valor nominal en los transitorios oscilatorios es generalmente mayor que en los transitorios impulsivos y por tanto es menos probable que los valores permanezcan en el rango de variación por ruido de

30 dB, idea que se ve reforzada además por la presencia de valores atípicos para el factor de cresta; por otra parte, la duración de los transitorios oscilatorios es habitualmente mayor a un ciclo, obteniéndose por tanto mayor número de valores transicionales. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 98% de los transitorios oscilatorios.

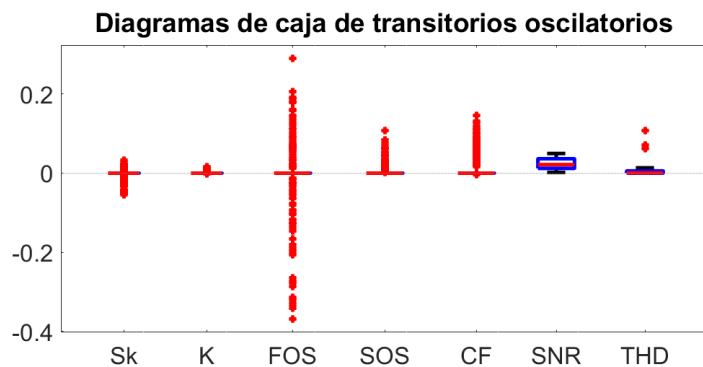


Figura 79. Diagramas de caja adaptados para las señales con transitorio oscilatorio de la base de datos #1.

- Los valores atípicos en THD y factor de cresta, así como la desviación respecto a cero de la mediana en la *kurtosis* y el estadístico de sexto orden, y la ausencia de *outliers* en la *skewness* y el estadístico de quinto orden, denotan la presencia de armónicos en las señales analizadas en la figura 80, si bien puede apreciarse a la altura del bigote inferior del diagrama de caja de THD un percentil en el que los valores adquiridos por el indicador forman parte del rango de comportamiento adecuado, inferior al 8%. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 100% de los armónicos.

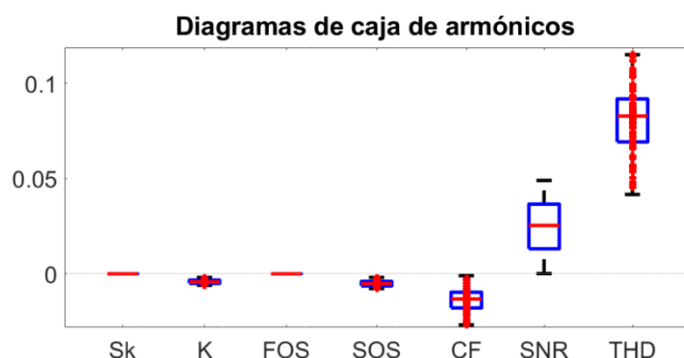


Figura 80. Diagramas de caja adaptados para las señales con armónicos de la base de datos #1.

- La detección de armónicos con *sag* mediante diagramas de caja, tal y como refleja la figura 81, requiere de la conjunción de todos los indicadores: los valores atípicos

en THD y en el rango de caja y bigotes del factor de cresta, así como la desviación de la mediana por debajo de cero en la *kurtosis* y el estadístico de sexto orden, reflejan la presencia de armónicos, como ya se apreció en la figura 80. A esto debe sumarse la presencia clara de valores transicionales para la *skewness* y el estadístico de sexto orden, ambos indicadores inmunes a los armónicos, además de los valores atípicos positivos fuera del rango de la caja y bigotes para la *kurtosis* y el factor de cresta. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 100% de los armónicos con *sag*.

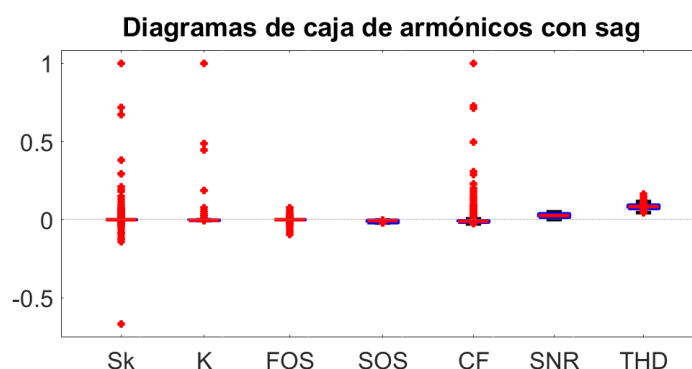


Figura 81. Diagramas de caja adaptados para las señales con armónicos con *sag* de la base de datos #1.

- Frente a armónicos con *swell*, se ha comprobado a través de los diagramas de caja adaptados de la figura 82 que, aunque todos los indicadores colaboran en la detección del evento tal y como ocurre con los armónicos con *sag*, sí varía la importancia de cada uno de ellos en la detección. Para armónicos con *swell*, si bien THD y los valores del factor de cresta dentro de caja y bigotes denotan la presencia armónica, sobresalen por número y magnitud los valores atípicos positivos del estadístico de sexto orden, claro reflejo de un aumento de la amplitud de la forma de onda, y los valores atípicos debidos a valores transicionales para el estadístico de quinto orden, seguidos de la *skewness* y el factor de cresta. En total, mediante los *outliers* en al menos un indicador por señal, se detectan el 100% de los armónicos con *swell*.

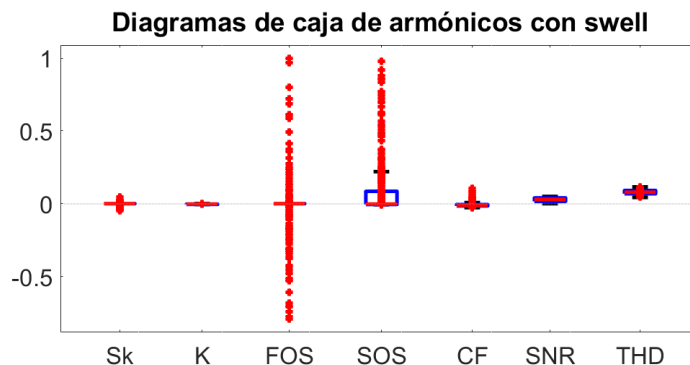


Figura 82. Diagramas de caja adaptados para las señales con armónicos con *swell* de la base de datos #1.

Ahora bien, los porcentajes de detección mostrados no implican clasificación. Es decir, que se detecten el 100% de, por ejemplo, armónicos con *swell*, significa que en el 100% de esas señales se ha obtenido un *outlier*, detectándose con ello un evento. En algunos casos específicos, el diagrama de caja refleja de qué evento en particular se trata, pero no es una cualidad a esperar de todos los diagramas de caja por señal.

#### 4.2. Aplicación de los patrones de comportamiento a otras señales sintéticas

En este apartado, se examinan las capacidades de los gráficos radar, el indicador global de la calidad de suministro y los diagramas de caja adaptados al ser aplicados a otras señales sintéticas, mediante el análisis de la base de datos #2. En los gráficos radar, además, se mantienen los valores máximos y mínimos por evento y estado como referencia.

Por cada tipo de evento disponible en la base de datos #2, se ilustran la evolución ciclo a ciclo mediante gráficos radar y los diagramas de caja adaptados por señal de dos señales con la presencia de dicho evento, así como los diagramas de caja adaptados que incluyen todos los valores recogidos por tipo de evento. De esta forma, se obtienen cinco figuras por cada tipo de evento disponible, a saber, transitorios impulsivos, interrupciones, *sags* y *swells*. Sin embargo, el uso de THD como indicador requiere que la señal analizada cuente con al menos 10 ciclos, por lo que las señales con transitorios impulsivos de 0.1 segundos de duración (5 ciclos en señales de 50 Hz) deben ser descartadas.

Para decidir qué señales de las disponibles se muestran para cada evento, se han seguido dos criterios:

- Primero, siempre y cuando las señales cumplan con la duración mínima requerida por la herramienta, se eligen con preferencia señales de menor duración, ya que, de esta forma, se evita en la medida de lo posible tener que omitir ciclos de la señal, pudiendo mostrarse de forma completa tal y como figura en la base de datos.
- Segundo, dentro de las señales con menor duración, se prioriza la elección de aquellas con menor número de ciclos en estado II. Esta elección se basa en que, mientras que los ciclos bajo los estados I y III son estables y únicos en señales sin ruido bajo eventos de variaciones de corta duración del RMS, por lo que es suficiente con mostrar un ciclo de cada uno de estos estados, los ciclos bajo estado II son generalmente diferentes entre sí. Con la elección de señales con menor número de ciclos en estado II, se consiguen mostrar todos los gráficos radar correspondientes al estado II sin sobrecargar la información visual incluida para cada señal.

En base a ese criterio, para las interrupciones y los *sags* se han elegido las señales de 0.3 segundos (15 ciclos) de duración mostradas en las figuras 83, 84, 86 y 87. En las señales con *swell* de 4 segundos de duración, sin embargo, ha sido necesario omitir fragmentos de la señal, descartando para ello ciclos bajo estado I y III en el caso de la señal con *swell* #1 en la figura 89, y ciclos bajo estado I para la señal con *swell* #2 en la figura 90, hasta reducir ambas señales a 15 ciclos, mejorando así la visualización de la forma de onda. Como ya se ha explicado, para estas señales sintéticas sin ruido, los estados I y III son únicos para toda la señal, por lo que en ningún caso este acortamiento induce a pérdida de información relevante para el análisis de la calidad de suministro.

En las figuras 83 y 84 se presenta la evolución mediante gráficos radar de las señales con interrupción #1 y #2, seleccionadas de la base de datos #2, con reducciones de amplitud de onda del 99% y 91%, respectivamente. En ambos casos, se han incluido en los gráficos radar los valores máximos y mínimos por evento y estado de cada indicador. Tras analizar ambas señales, así como el resto de las interrupciones que componen la base de datos Preclasificados simples, se concluye que todos los gráficos radar operan dentro de los límites establecidos para cada evento y estado. No obstante, se observa que las transiciones (es decir, los ciclos en estado II) son generalmente más prolongadas en la base de datos #2, con duraciones de entre 1 y 3 ciclos, en comparación con la base de datos *Machlev*. Esta característica no afecta, sin embargo, a la correcta detección del

estado II en los gráficos radar, pero sí conlleva que algunas transiciones sean menos abruptas y provoquen por ello menor alteración en los indicadores.

En relación con el indicador global de la calidad de suministro para interrupciones:

- Para el estado I, los valores son despreciables ( $1.86 \cdot 10^{-6}$ ), siempre que la señal no contenga ruido gaussiano ( $\text{SNR} > 80 \text{ dB}$ ) ni valores de THD superiores al 8%.
- Para el estado III, se obtiene un valor uniforme de 0.5 para todos los ciclos, lo cual es coherente, debido a que el estadístico de sexto orden es cero en interrupciones en todos los casos, y no hay desviaciones respecto al comportamiento nominal en este estado en los demás indicadores.
- Para el estado II, sí se observan variaciones significativas en el indicador global, con valores que oscilan entre 0.0003 y 2.2793.

### Señal con interrupción 1 - Base de datos #2

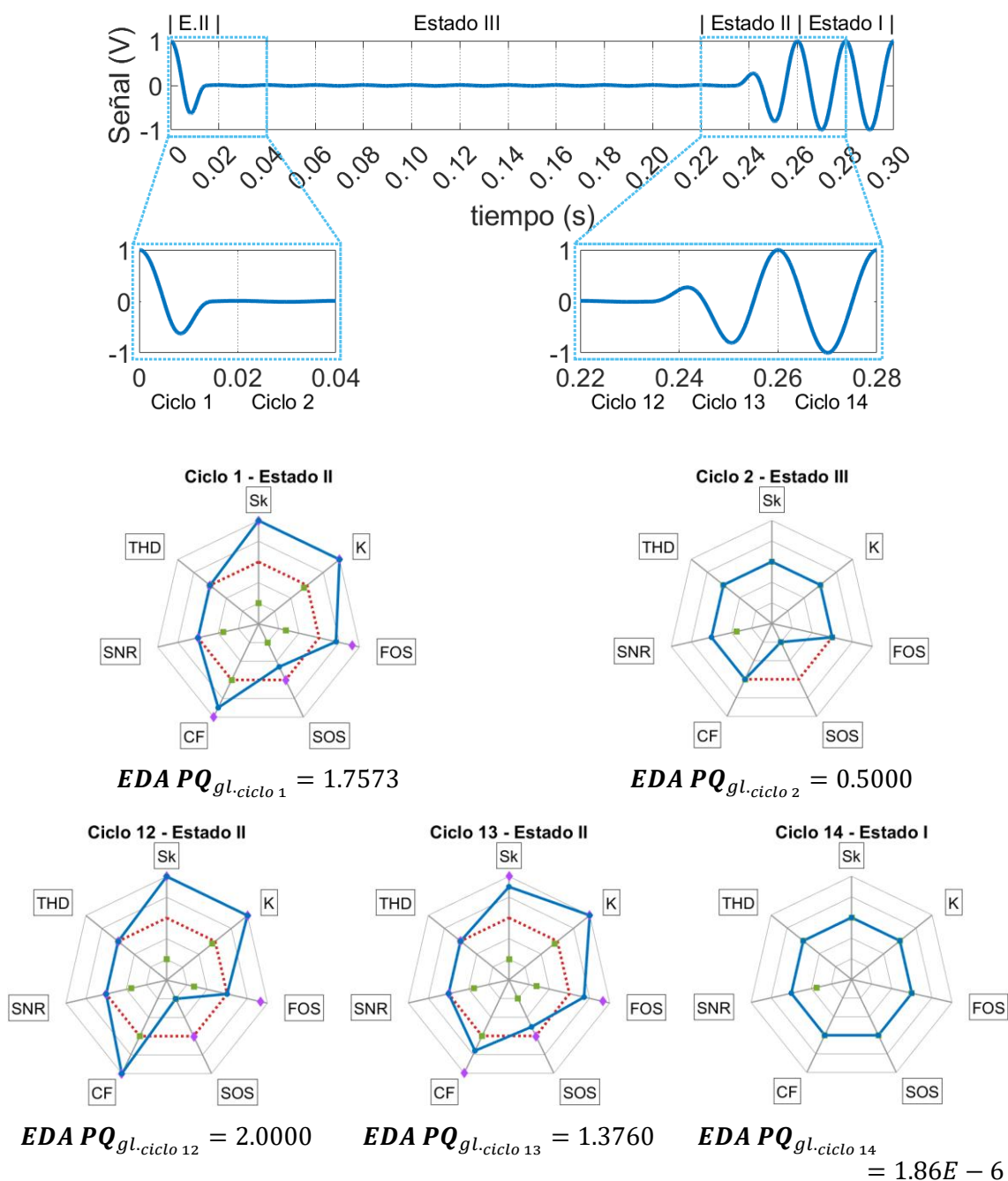


Figura 83. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con interrupción #1 de la base de datos Preclasificados simples.

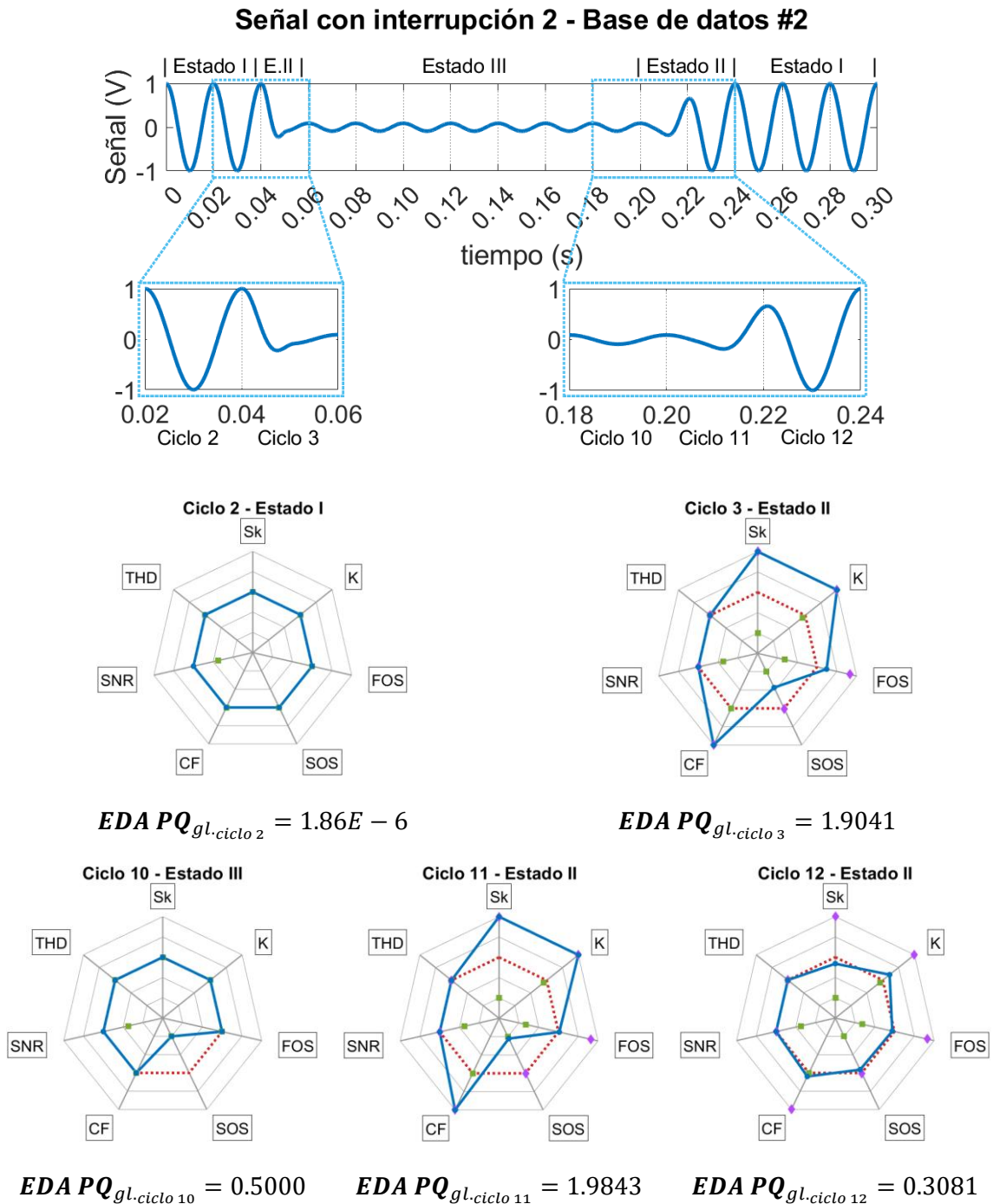


Figura 84. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con interrupción #2 de la base de datos Preclasificados simples.

En la figura 85, los diagramas de caja adaptados correspondientes a las señales de interrupción #1 y #2 reflejan comportamientos similares a los observados en el análisis de la base de datos *Machlev*. En ambos conjuntos de diagramas, los valores atípicos de la *skewness*, la *kurtosis*, el estadístico de quinto orden y el factor de cresta, junto con la ausencia de caja y bigotes en los diagramas de dichos indicadores, evidencian la presencia de valores transicionales propios del estado II. Asimismo, los valores negativos en el

estadístico de sexto orden reflejan de una disminución en la amplitud de la forma de onda.

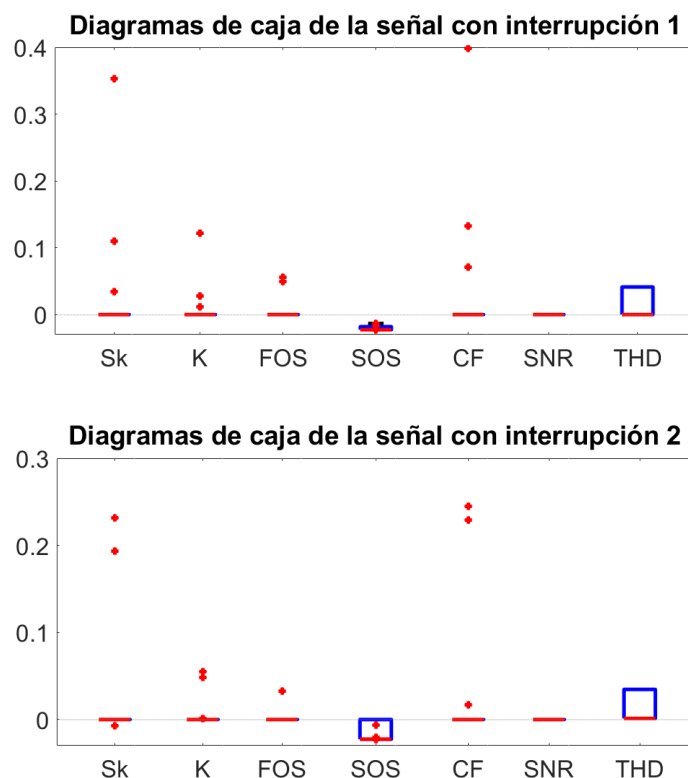


Figura 85. Diagramas de caja de las señales con interrupción de la base de datos Preclasificados simples.

Las figuras 86 y 87 muestran los gráficos radar correspondientes a las dos señales con *sag* #1 y #2, seleccionadas de la base de datos #2, con reducciones de amplitud de onda del 66% y 44%, respectivamente. El análisis de estas señales, junto con las 565 señales adicionales con *sag* de la base de datos Preclasificados simples, concluye que los indicadores permanecen dentro de los límites establecidos en los patrones de comportamiento de los gráficos radar, sin necesidad de ajustar, por tanto, dichos umbrales.

Respecto al indicador global de la calidad de suministro para *sags*, en estado I se obtienen nuevamente valores cercanos a cero; sin embargo, a diferencia de las señales con interrupciones, tanto en los estados II como en los estados III para *sags* sí existe un rango de valores del indicador global, que será de entre 0.0004 y 2.2543 para estado II, y entre 0.0866 y 0.8587 para estado III.

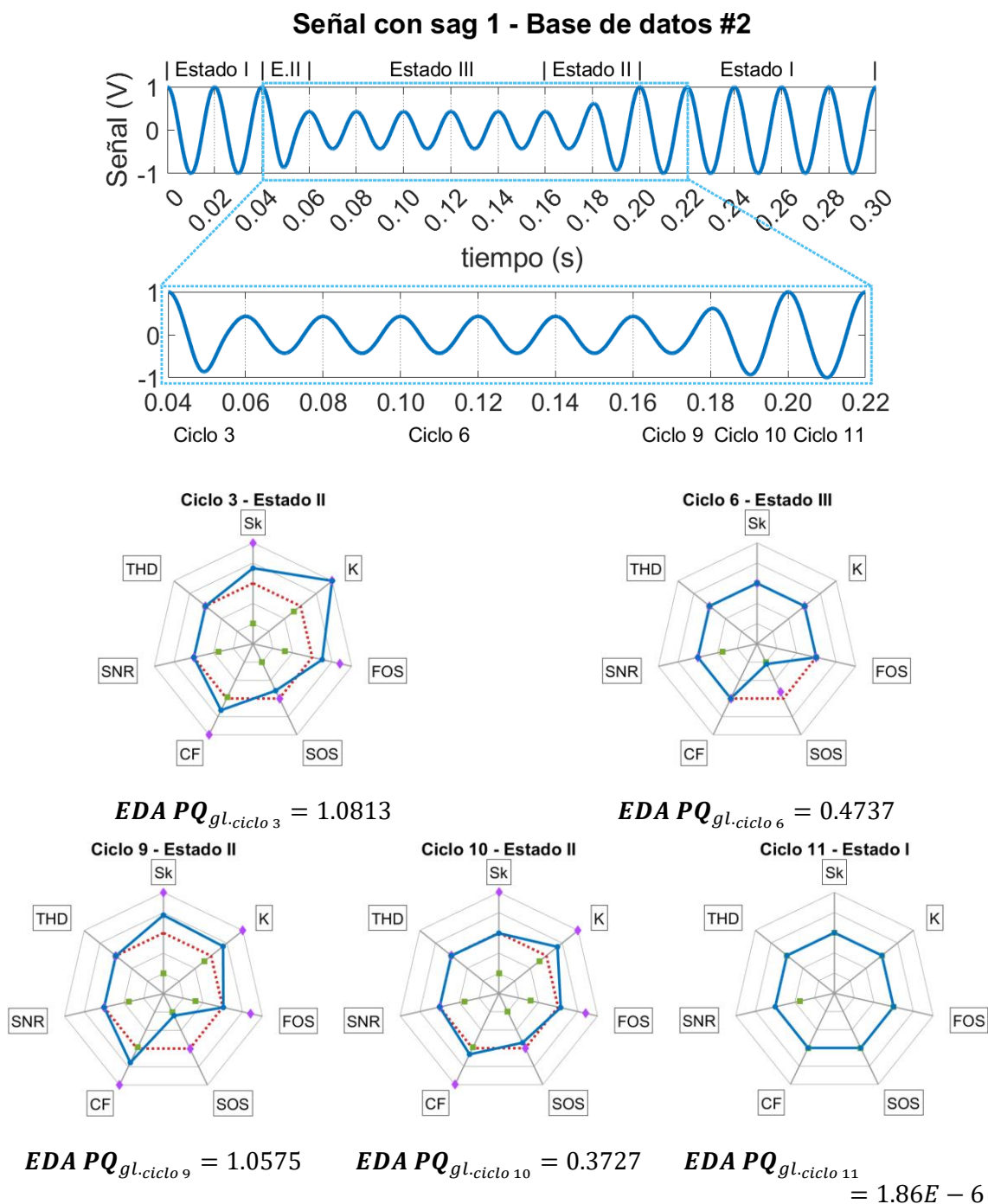


Figura 86. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con *sag* #1 de la base de datos Preclasificados simples.

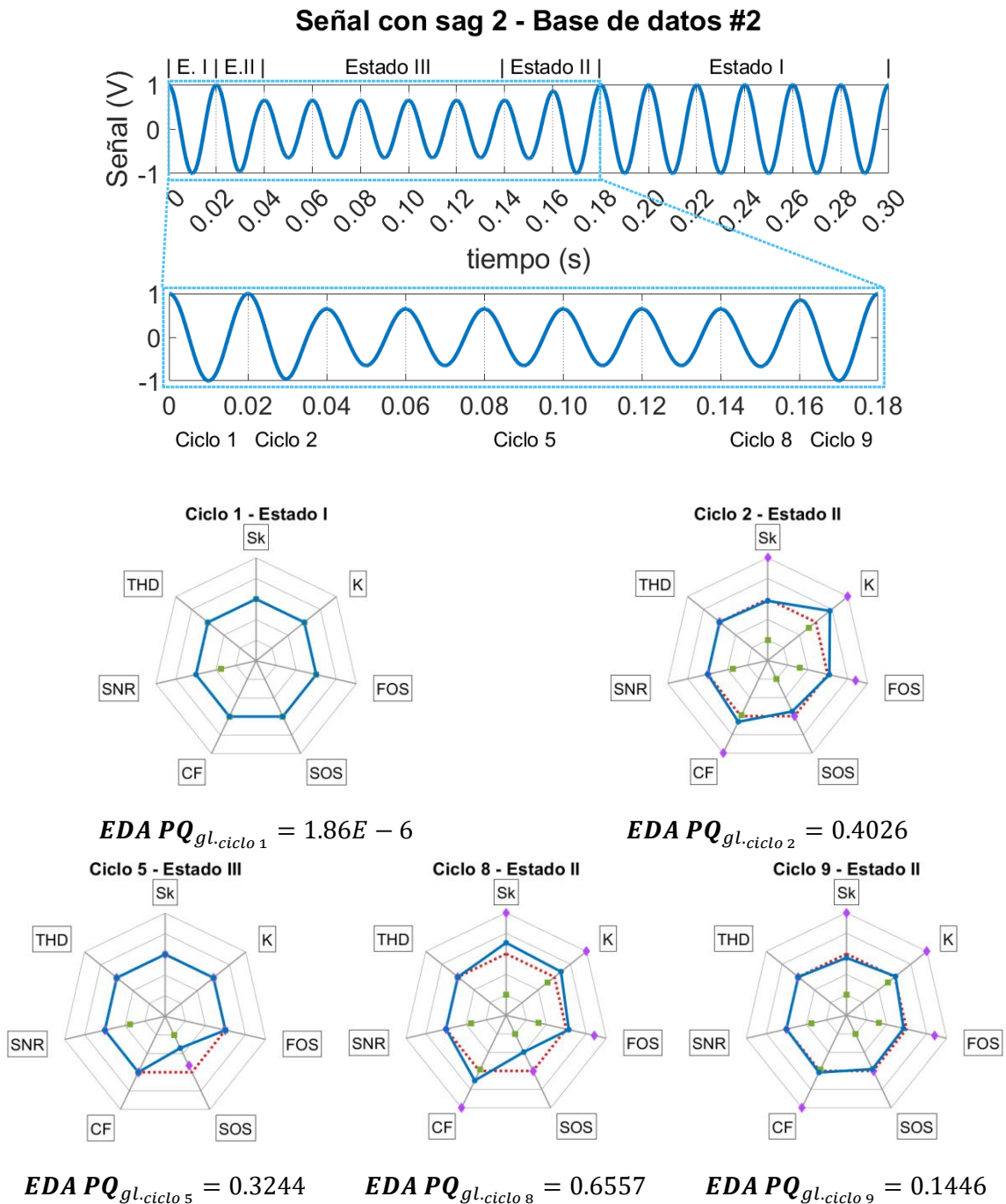


Figura 87. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con *sag* #2 de la base de datos Preclasificados simples.

En los diagramas de caja adaptados de la figura 88 (señales con *sag* #1 y #2), los indicadores no reflejan completamente los valores transicionales mediante *outliers*. Por ejemplo, en la señal con *sag* #1, el factor de cresta presenta tres valores atípicos (correspondientes a los tres ciclos en estado II), mientras que el estadístico de quinto orden solo muestra uno, y la *skewness* y la *kurtosis* solo registran dos. En la señal #2, ningún indicador muestra los tres valores transicionales esperados, ya que la *skewness*, la *kurto-*

sis y el factor de cresta proporcionan dos valores atípicos, y en el caso del estadístico de quinto orden, no hay ninguno. No obstante, los valores atípicos detectados, junto con la caja por debajo de cero del estadístico de sexto orden, caracterizan la presencia de eventos de *sag* o interrupción.

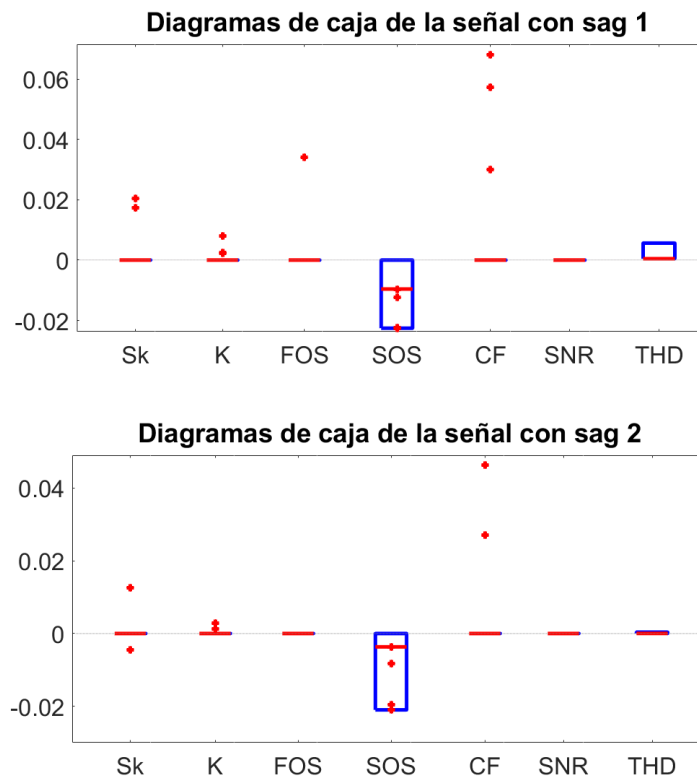


Figura 88. Diagramas de caja de las señales con *sags* de la base de datos Preclasificados simples.

En las figuras 89 y 90 se presentan las dos señales con *swell* #1 y #2, seleccionadas de la base de datos #2, ambas con un aumento de amplitud del 10%. El análisis de todas las señales con *swell* confirma que los indicadores también permanecen dentro de los límites establecidos en los patrones de comportamiento de los gráficos radar para cada estado.

Respecto al indicador global de la calidad de suministro, para *swells* se mantienen los valores observados anteriormente en estado I, y se producen variaciones en los estados II con valores que serán de entre 0.0002 y 0.1436. Al tener todas las señales de *swell* el mismo porcentaje de aumento de la amplitud (lo que implica el mismo valor del estadístico de sexto orden), el valor para el estado III es de 0.0799 en todos los casos.

**Señal con swell 1 - Base de datos #2**

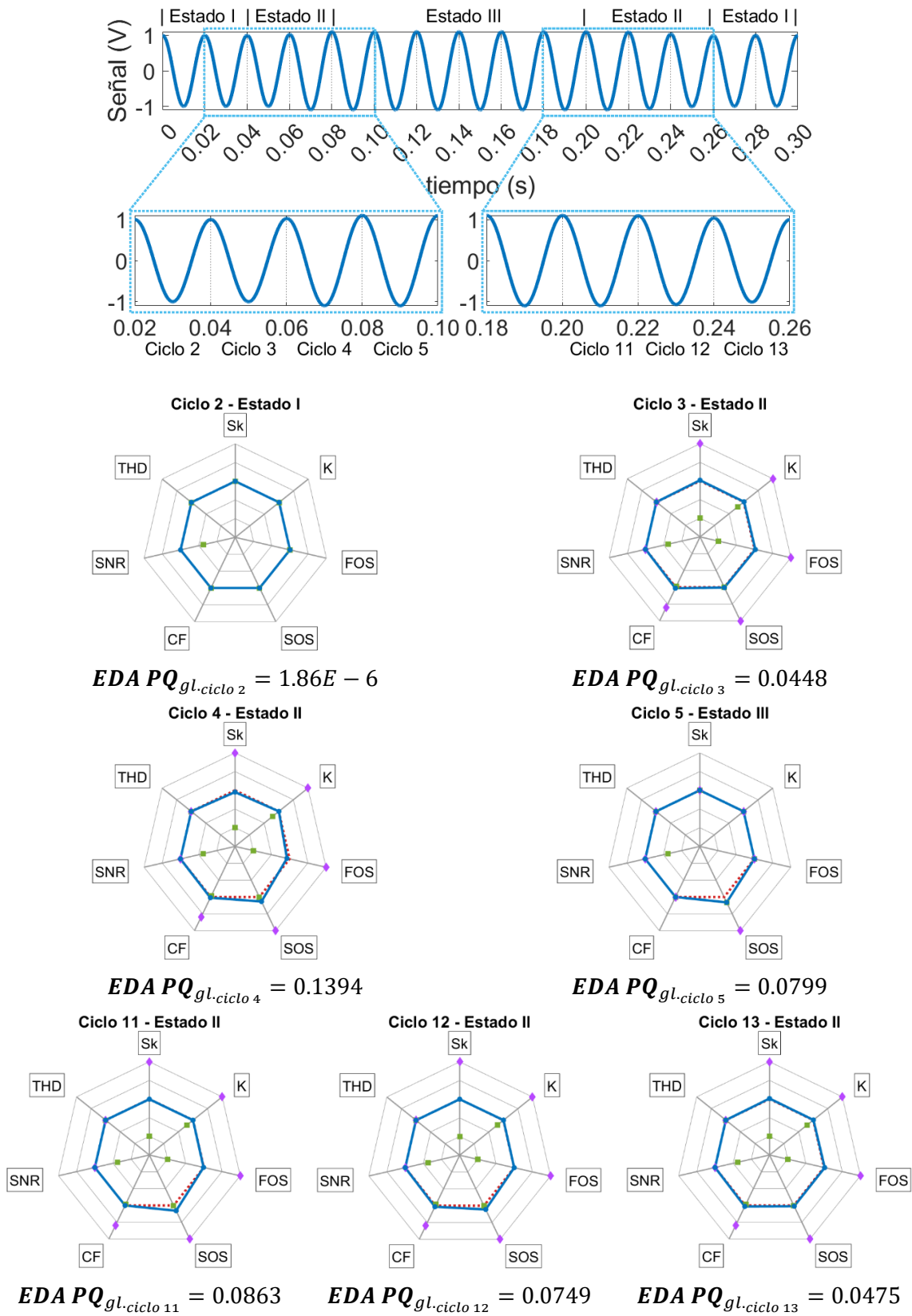


Figura 89. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con *swell* #1 de la base de datos Preclasificados simples.

### Señal con swell 2 - Base de datos #2

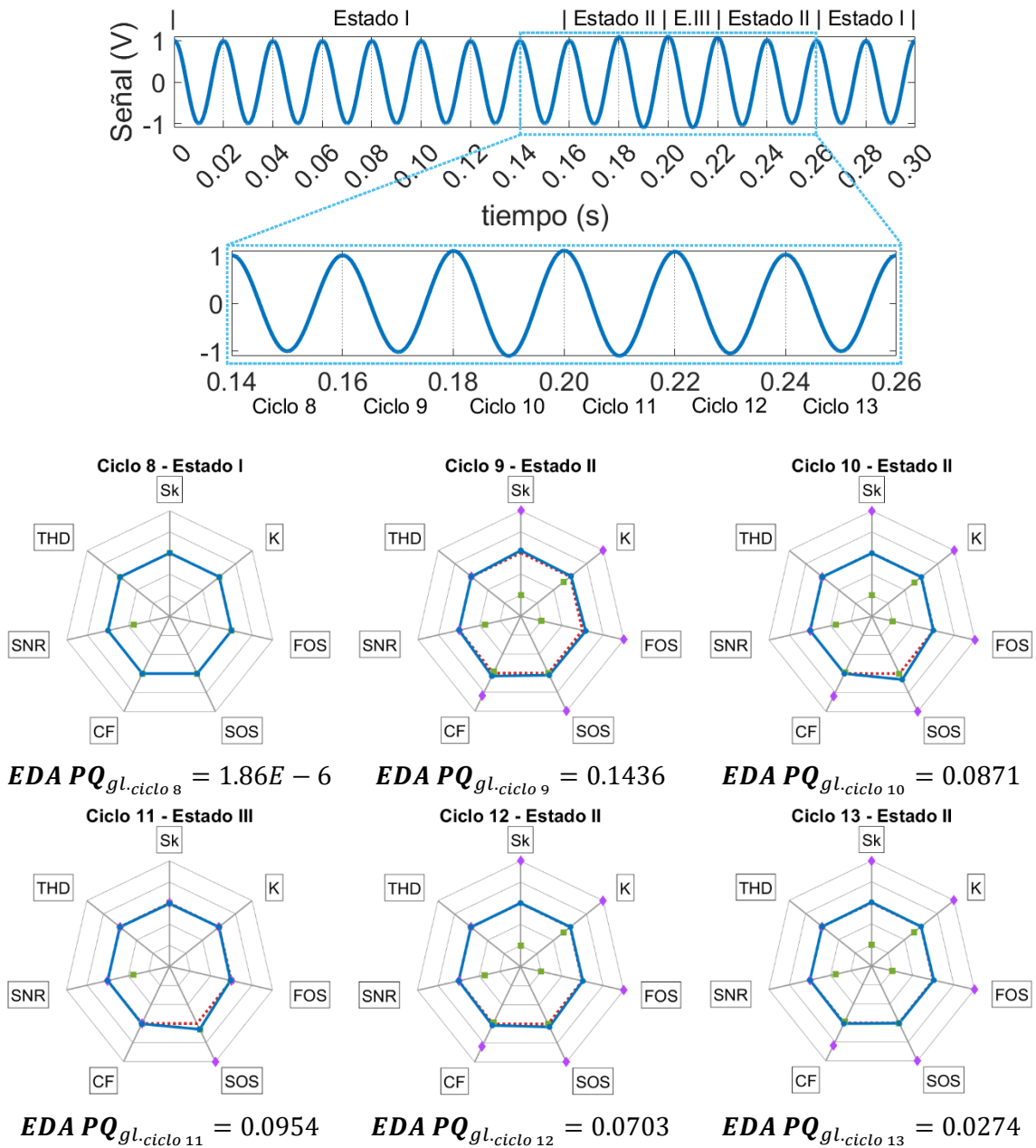


Figura 90. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal con *swell* #2 de la base de datos Preclasificados simples.

En los diagramas de caja correspondientes a estas señales, mostrados en la figura 91, únicamente el estadístico de sexto orden presenta valores atípicos que permiten identificar *swells*. La ausencia de valores transicionales en otros indicadores podría deberse a la baja magnitud del evento (ya que se considera que existe un *swell* una vez que el aumento de amplitud de la forma de onda es igual o superior al 10%) y a las transiciones más prolongadas, que suavizan los cambios de estado. Aunque los gráficos radar evi-

dencias alteraciones, estas no son lo suficientemente significativas como para diferenciarse de las variaciones causadas por ruido gaussiano de 30 dB.

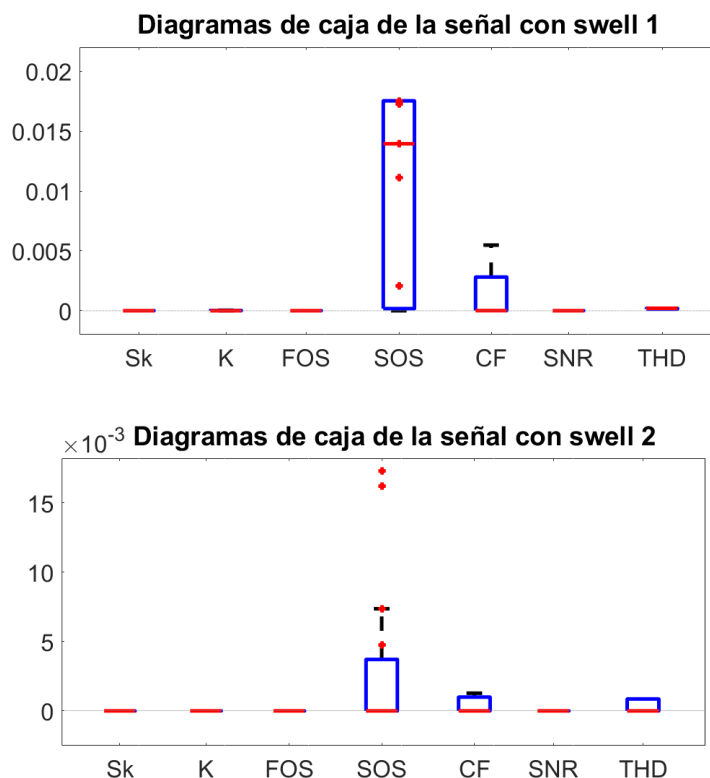


Figura 91. Diagramas de caja de las señales con *swells* de la base de datos Preclasificados simples.

Finalmente, se han recopilado los valores adquiridos por los indicadores en todas las señales por cada tipo de evento, obteniéndose con ello los diagramas de la figura 92 para interrupciones, la figura 93 para *sags*, y la figura 94 para *swells*. Los resultados reflejan:

- En interrupciones y *sags*, los valores atípicos fuera del rango de la caja y bigotes (siendo estos además inapreciables en el gráfico) en la *skewness*, la *kurtosis*, el estadístico de quinto orden y el factor de cresta confirman la presencia de valores transicionales asociados al estado II. Asimismo, los valores negativos en el estadístico de sexto orden reflejan la reducción de amplitud, confirmando eventos de interrupción o sag con una tasa de detección del 100%, teniendo en cuenta que se considera que se ha detectado un evento cuando se presenta al menos un valor atípico que realmente corresponda a un evento en uno de los indicadores. Finalmente, cabe destacar que los valores atípicos negativos de SNR en señales de interrupciones y *sags* son falsos positivos generados por el impacto de eventos en las mediciones de ruido. Este fenómeno ya se discutió en el Capítulo 3 y

afecta principalmente a señales de menor duración en las que el evento tiene lugar total o parcialmente durante los primeros diez ciclos de señal. En la base de datos #2, los falsos positivos se concentran principalmente en las señales de 15 ciclos de duración.

- En los diagramas de caja de los *swells* de la figura 94, no obstante, los valores de SNR muestran un comportamiento óptimo. Sin embargo, al igual que en la figura 91, los indicadores con valores transicionales no presentan valores atípicos, y el estadístico de sexto orden carece de caja y bigotes, mostrando únicamente *outliers* por encima de cero. Esto implica que, aunque se detecta la presencia de un evento en todas las señales con *swell*, el diagrama de caja adaptado no permite identificar específicamente el evento como un *swell*.

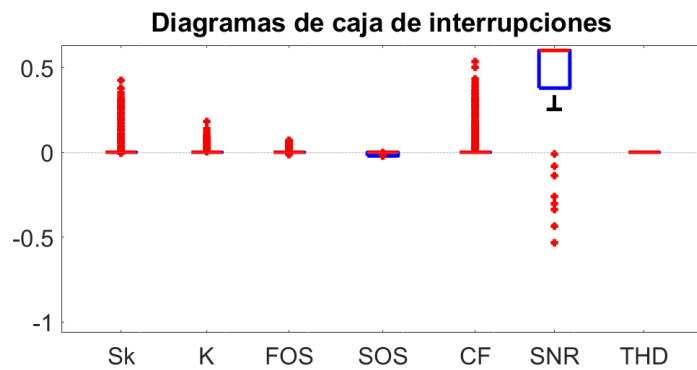


Figura 92. Diagramas de caja adaptados para las señales con interrupciones de la base de datos Preclasificados simples.

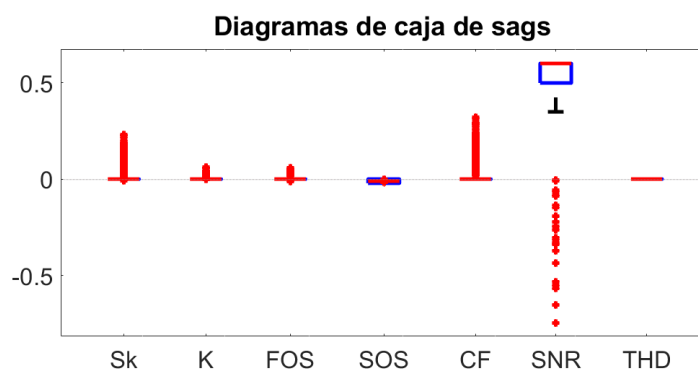


Figura 93. Diagramas de caja adaptados para las señales con *sags* de la base de datos Preclasificados simples.

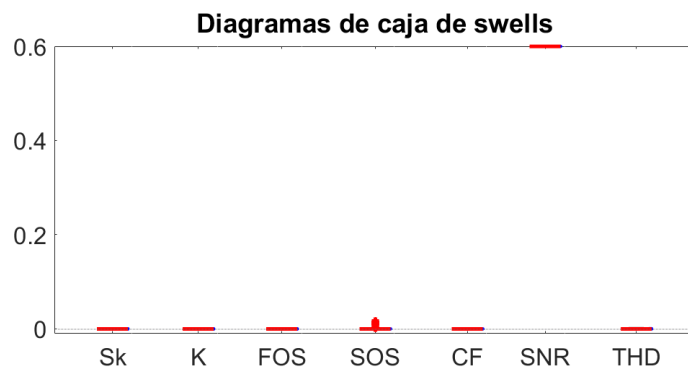


Figura 94. Diagramas de caja adaptados para las señales con *swells* de la base de datos Preclasificados simples.

### 4.3. Aplicación de los patrones de comportamiento a señales reales

En este apartado se verifica el funcionamiento de las herramientas desarrolladas utilizando dos bases de datos con señales reales: la base de datos IEEE DataPort (base de datos #3) y la base de datos PAIDI-TIC-168 (base de datos #4). Dado que la base de datos #3 contiene eventos preclasificados de *sags* y transitorios impulsivos, se empleará en primer lugar como prueba de las herramientas en señales reales, ya que, en teoría, se dispone de una expectativa previa respecto a los resultados a esperar del proceso de análisis de la calidad del suministro a través de los gráficos radar, el indicador global de la calidad de suministro y los diagramas de caja.

#### 4.3.1. Análisis de la base de datos IEEE DataPort

Para ilustrar el análisis de señales, se seleccionaron dos señales representativas para cada tipo de evento. De estas señales se incluyen los gráficos radar, indicadores globales y diagramas de caja, y ambas coinciden en que las perturbaciones observadas en las formas de onda presentan comportamientos similares a los estudiados en señales sintéticas. Sin embargo, y especialmente en el caso del conjunto de señales con *sags*, se han identificado señales que no cumplen con esa premisa, denominadas en este trabajo como “señales anómalas”. En ellas, el *sag* aparece acompañado de algún otro evento, bien como dos eventos simples consecutivos, bien como un evento complejo, como se verá más adelante.

El criterio para la selección de señales de ejemplo de la base de datos ha sido el siguiente:

- Para las señales con transitorios impulsivos, se seleccionan aquellas en las que el evento es más apreciable a simple vista en la forma de onda.
- Para las señales con *sags*, aquellas cuyo evento tenga menor duración. Téngase en cuenta que se tratan de señales de 1 segundo, es decir, 50 ciclos, por lo que resulta necesario omitir ciclos de la señal para que la visualización de la forma de onda sea más efectiva. Considerando esto, se prioriza la eliminación de ciclos en estado I, que aportan información menos substancial en el análisis de señales eléctricas. Los eventos cortos garantizan que no sea necesario omitir ciclos en estado III para mostrar el evento completo.
- Para las señales anómalas, puesto que cada una cuenta con una particularidad específica, se han decidido mostrar todas ellas, procurando únicamente omitir ciclos en estado I en su visualización.

Es importante especificar que, para el trazado de los diagramas de caja correspondientes a cada señal mostrada, se han empleado la totalidad de ciclos de las señales, no únicamente el fragmento mostrado como ejemplo.

Inicialmente, se analizan las señales reales con transitorios impulsivos de las figuras 95 y 96, que en la base de datos son nombradas como “Real signal impulsive event 2011-10-26\_18\_02\_39” y “Real signal impulsive event 2011-11-07\_10\_10\_06”. En ambos casos, se muestran dos radares de ciclos en estado I, con la intención de reflejar la acción del ruido en los indicadores. Cabe destacar que en estas señales el ruido gaussiano es de aproximadamente 39 dB (específicamente, se obtienen valores entre 36 y 41 dB, siendo 39 dB el valor promedio para toda la base de datos) por lo que, en teoría, la variación de los indicadores debería estar dentro de los límites de variación de 30 dB que se obtuvieron con señales sintéticas.

Estos niveles de ruido, asimismo, provocan que el valor del indicador global de la calidad de suministro en estado I aumente considerablemente frente a las bases de datos anteriores: mientras que en las bases de datos sintéticas #1 y #2 se obtiene un valor ínfimo (del orden de  $10^{-6}$ ) en estado I, en las señales reales de la base de datos #3 el valor del indicador global de la calidad de suministro oscila entre 0.2520 y 0.3099. Este aumento se debe, principalmente, al valor obtenido por señal de SNR, que pasa de ser superior a 80 dB a un valor ligeramente inferior a 40 dB. Siguiendo la ecuación 28, ya solo la variación respecto al comportamiento óptimo de SNR supondría un valor mínimo del indicador global de 0.25, a lo que debe añadirse la oscilación respecto al valor

nominal que provoca el ruido en los demás indicadores. Respecto al estado II, el indicador de la calidad de suministro varía entre 0.2648 y 0.4832. Aun así, entre distintas señales en un mismo set puede haber discrepancias en el indicador global: en la señal #1 (figura 95) la variación por ruido es mayor que en la señal #2 (figura 96), hecho que también se refleja en los valores de SNR de ambas señales (tabla 16), aumentando con ello de forma directa (por el valor de SNR) e indirecta (por la variación de los otros indicadores respecto al nominal) el valor del indicador global en la señal #1.

No obstante, la principal diferencia entre ambas señales radica en el grado de apreciación de las variaciones de los indicadores en el estado II. En la primera señal, el evento es más tenue, tanto visualmente en la forma de onda como en los valores de los indicadores (véase tabla 16) y de los indicadores globales, lo que provoca que el gráfico radar que caracteriza el estado II se diluya entre los ciclos correspondientes al estado I. En contraste, en la segunda señal, la presencia del evento es claramente distinguible.

En particular, en la primera señal se registra el valor máximo del indicador global de la calidad de suministro en el ciclo #46, en estado I, en lugar de en el ciclo #43 (estado II), donde ocurre el evento. Esto se debe a que la variación causada por el ruido supera a la producida por el transitorio impulsivo, un fenómeno posible ya analizado en el apartado 3.4 del capítulo anterior (tablas 5 a 9). En este análisis, se observó que en torno al 55% de los transitorios impulsivos permanecen dentro de los límites del ruido de 30 dB. De hecho, en el conjunto de señales con transitorios impulsivos de la base de datos #3, únicamente en el 21.43% de los casos coincide el ciclo con mayor índice global de calidad de suministro, y, por tanto, con mayor alteración de los indicadores respecto a su valor nominal, con el evento. La segunda señal de transitorios impulsivos pertenece claramente a este porcentaje. A pesar de ello, todos los valores adquiridos por los indicadores durante los transitorios impulsivos quedan dentro de los límites establecidos en los patrones de comportamiento de los gráficos radar.

En la figura 97, los diagramas de caja correspondientes a ambas señales muestran que, efectivamente, para la primera señal la oscilación de los indicadores debida al evento permanece en los límites de la oscilación estimada por el ruido, sin que se presente ningún valor atípico en los estadísticos de orden superior. Esto contrasta con la segunda señal, en la que los indicadores sí presentan un *outlier*.

Además, en ambas señales se observa un valor atípico cercano a la mediana en el factor de cresta. Sin embargo, dado que es el indicador más susceptible al ruido gaussiano, se interpreta que dicho *outlier* probablemente sea causado por el ruido más que por el propio evento, considerando además que en todos los gráficos radar mostrados para estas dos señales se aprecia una ligera desviación negativa entre el valor registrado por el indicador y su valor nominal, remarcado en la silueta ideal discontinua de cada radar.

En términos globales, a través de los diagramas de caja se detectan el 4.76% de los transitorios impulsivos de la base de datos #3, considerando que, en señales reales, los valores atípicos en SNR no se tienen en cuenta para considerar la detección de un evento.

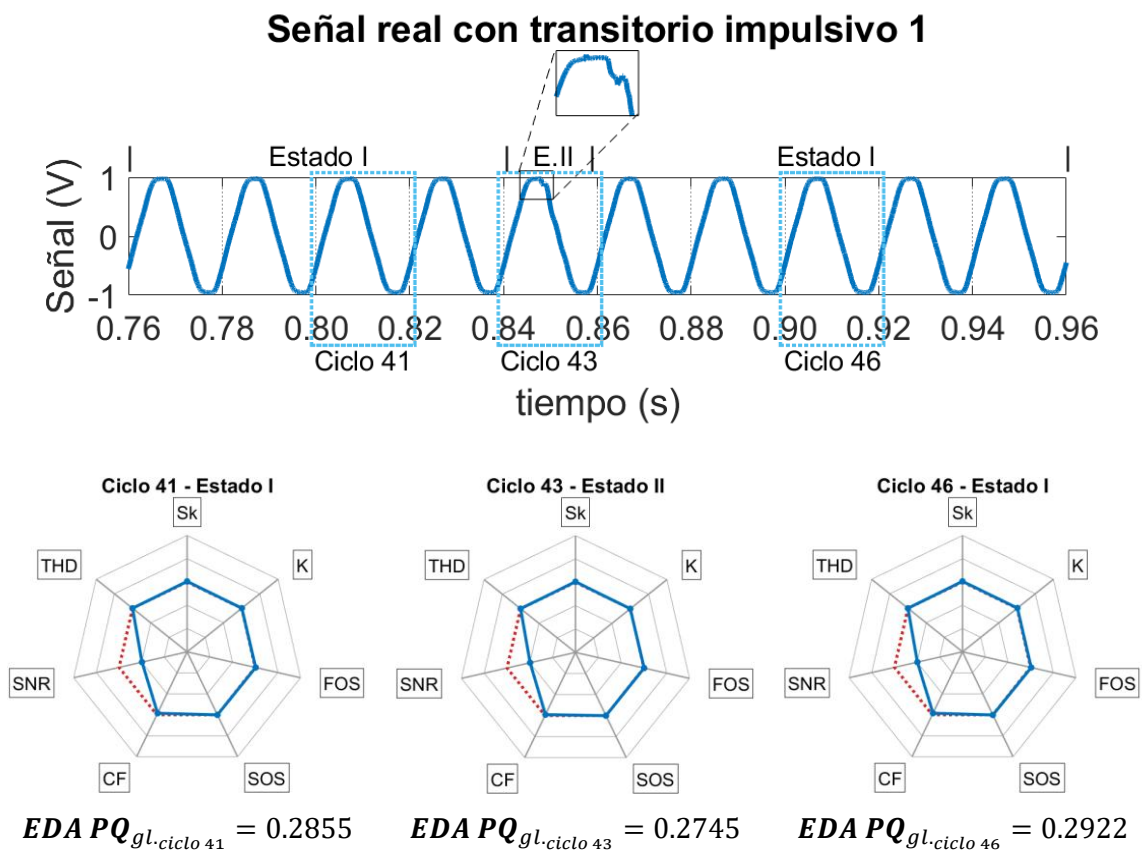


Figura 95. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con transitorio impulsivo #1 de la base de datos IEEE DataPort.

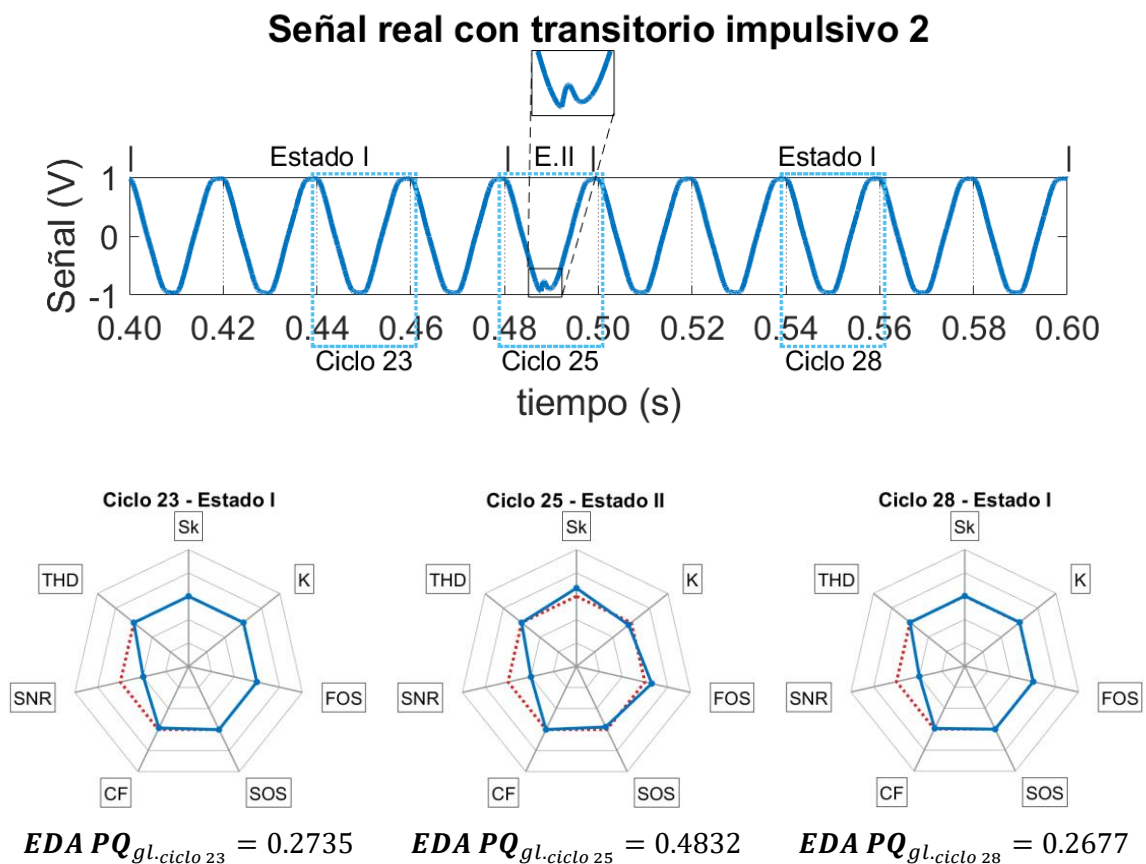


Figura 96. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con transitorio impulsivo #2 de la base de datos IEEE DataPort.

Tabla 16. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con transitorios impulsivos #1 y #2.

Señal	Ciclo	Indicador						
		Sk	K	FOS	SOS	CF	SNR	THD
Señal real con transitorio impulsivo #1	41	0.0037	1.5013	0.0018	0.3140	1.3735	39.5626	3.5847
	43	0.0039	1.4994	0.0009	0.3150	1.3912	39.5626	3.5847
	46	0.0042	1.5026	0.0023	0.3171	1.3722	39.5626	3.5847
Señal real con transitorio impulsivo #2	23	0.0002	1.5012	8.00E-5	0.3145	1.3737	39.7314	4.3406
	25	0.0536	1.4770	0.0256	0.2501	1.4141	39.7314	4.3406
	28	0.0013	1.5012	0.0008	0.3144	1.3949	39.7314	4.3406

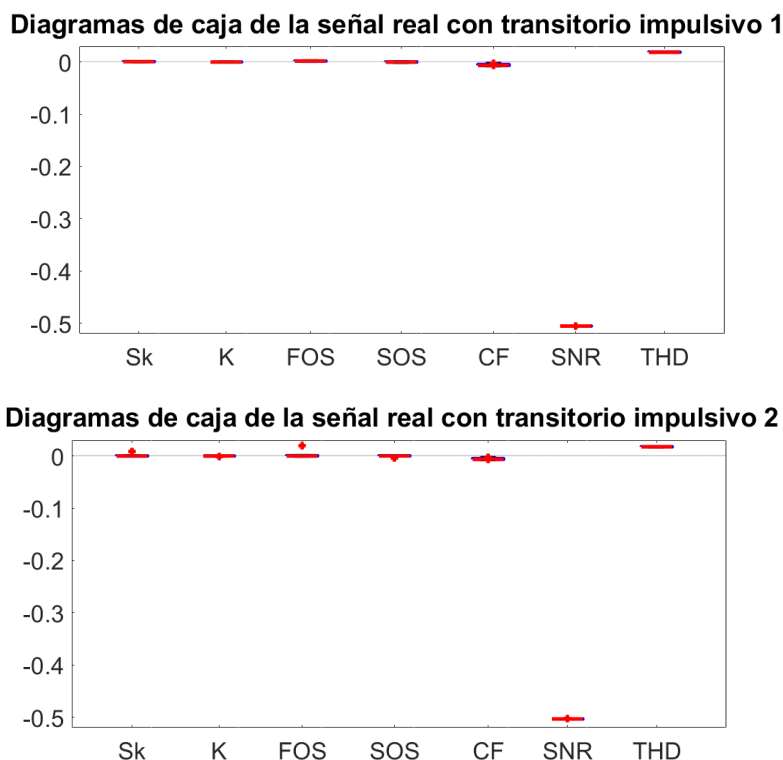


Figura 97. Diagramas de caja adaptados para las señales reales con transitorio impulsivo #1 y #2 de la base de datos IEEE DataPort.

Las señales con *sag* seleccionadas como ejemplo se muestran en las figuras 98 y 99. En estas señales, identificadas en la base de datos como “Real signal Sag 80-71\_\_2011-11-05\_12\_43\_26” y “Real signal Sag 80-71\_\_00\_09\_56”, la amplitud de la onda se reduce hasta en un 81% y 85%, respectivamente. Al igual que en las señales con transitorios impulsivos, el ruido gaussiano para todos los *sags* de la base de datos #3 se estima, mediante el SNR, en un promedio de 39 dB. Específicamente, y como se detalla en la tabla 17, el SNR para la señal real con *sag* #1 es de 39.5804, y para la señal real con *sag* #2, de 39.7026, lo que establecería un indicador global mínimo de 0.2526 y 0.2519 para los ciclos de las señales #1 y #2, respectivamente.

De forma general, para todas las señales con *sag* de la base de datos IEEE DataPort, el indicador global de la calidad de suministro oscila entre 0.2635 y 0.3293 para el estado I, entre 0.3395 y 2.1293 para el estado II, y entre 0.3479 y 1.6175 para el estado III. A pesar de las diferencias significativas en los rangos de valores del indicador global respecto a la base de datos *Machlev*, los valores de los indicadores se mantienen dentro de los límites establecidos por evento y estado, cumpliendo así con los patrones de comportamiento definidos.

Revisando ambas señales con *sags*, se observa que los valores del indicador global son mayores en estados II y III que en estado I, lo que indica que la variación provocada por el evento supera a la causada por el ruido. Un aspecto notable de la señal #2 es que, en ambos ciclos en estado III (ciclos #24 y #25), el valor de la *kurtosis* es inferior al valor nominal, lo cual puede deberse, bien a la presencia de armónicos, bien a la propia variación provocada por el ruido. Sin embargo, considerando que el valor de THD se encuentra dentro del rango de comportamiento óptimo, se concluye que dicha variación es atribuible al ruido.

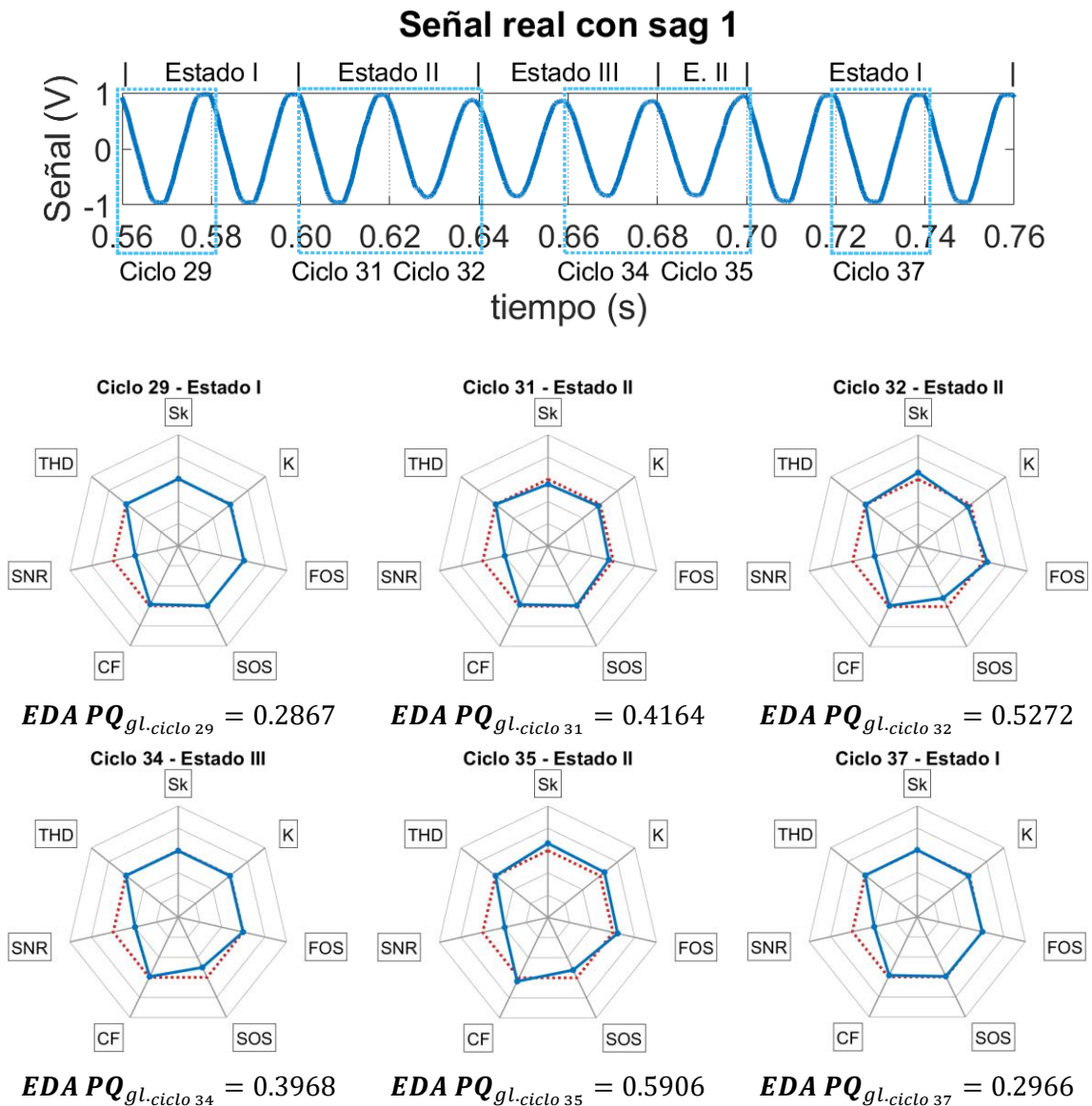


Figura 98. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con *sag* #1 de la base de datos IEEE DataPort.

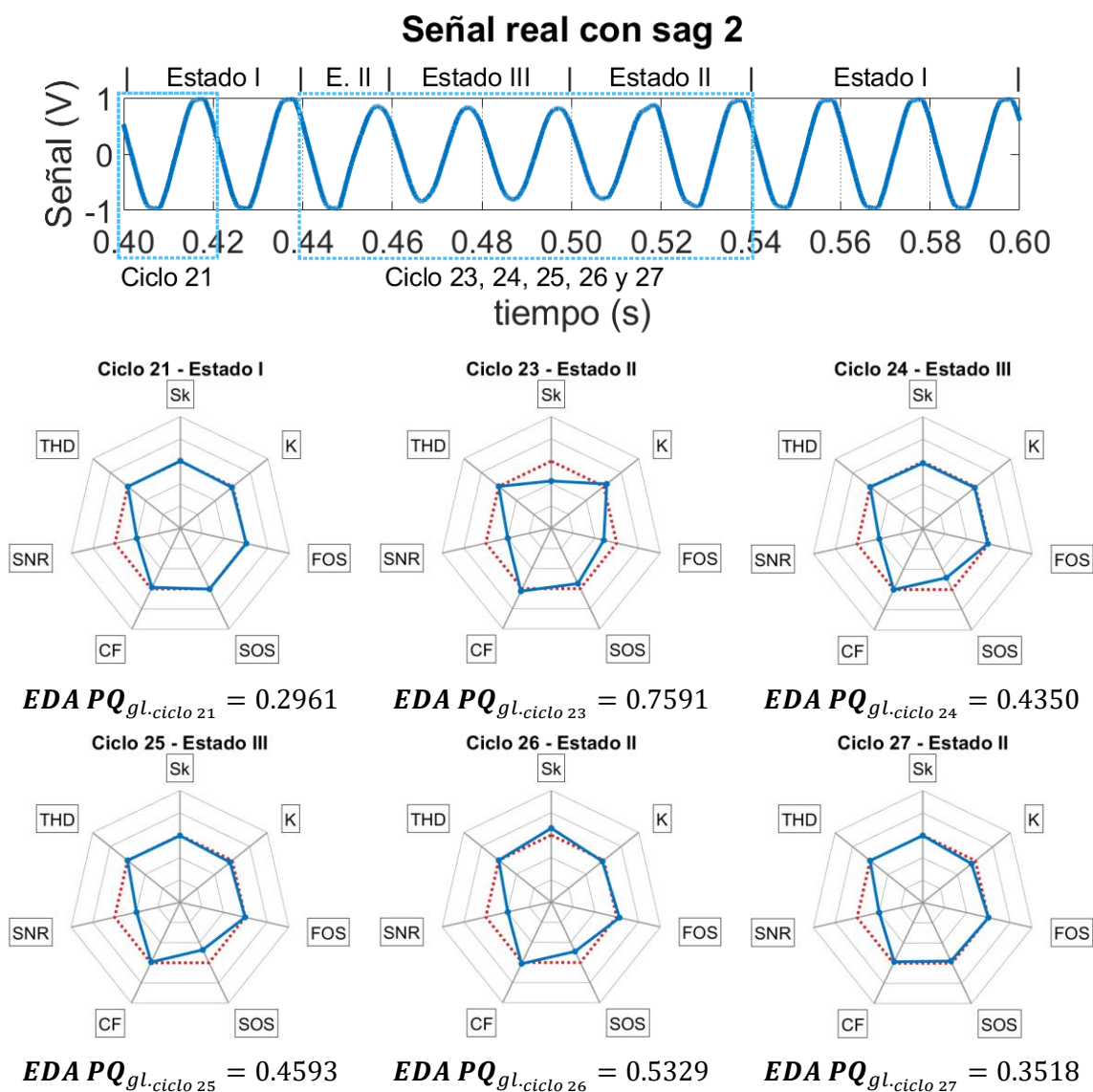


Figura 99. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con *sag* #2 de la base de datos IEEE DataPort.

Tabla 17. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con *sags* #1 y #2.

Señal	Ciclo	Indicador						
		Sk	K	FOS	SOS	CF	SNR	THD
Señal real con <i>sag</i> #1	29	0.0020	1.4960	0.0013	0.3112	1.3707	39.5804	2.9655
	31	-0.0344	1.4820	-0.0173	0.2971	1.3700	39.5804	3.9878
	32	0.0464	1.4753	0.0143	0.1440	1.3922	39.5804	3.9878
	34	-0.0024	1.4972	-0.0007	0.1258	1.3932	39.5804	3.9878
	35	0.0497	1.5382	0.0181	0.1548	1.5109	39.5804	3.9878
	37	0.0020	1.4938	0.0008	0.2958	1.3695	39.5804	3.9878
Señal real con <i>sag</i> #2	21	0.0030	1.4916	0.0017	0.3168	1.3735	39.7026	2.8213
	23	-0.1352	1.5265	-0.0504	0.1984	1.4846	39.7026	2.8213
	24	-0.0098	1.4927	-0.0027	0.1057	1.4153	39.7026	2.8213
	25	-0.0026	1.4806	-0.0007	0.0951	1.3954	39.7026	2.8213
	26	0.0470	1.4885	0.0110	0.1138	1.4489	39.7026	2.8213
	27	-0.0008	1.4672	0.0004	0.2581	1.3769	39.7026	2.8213

Los diagramas de caja correspondientes a estas señales, presentados en la figura 100, muestran valores atípicos en *skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden, factor de cresta y SNR para ambas señales con *sag*. En total, se detectan mediante los diagramas de caja el 100% de los *sags*. Sin embargo, la limitada variación de los indicadores respecto a sus valores nominales, en comparación con la variación observada en el SNR, reduce las cajas y bigotes del resto de indicadores a una línea sobre la mediana. Esto, combinado con la baja proporción de ciclos afectados por el evento frente al total de ciclos de las señales (de 0.08 y 0.1 para las señales #1 y #2, respectivamente) dificulta establecer con seguridad una vinculación clara del evento con un *sag* en los diagramas mostrados.

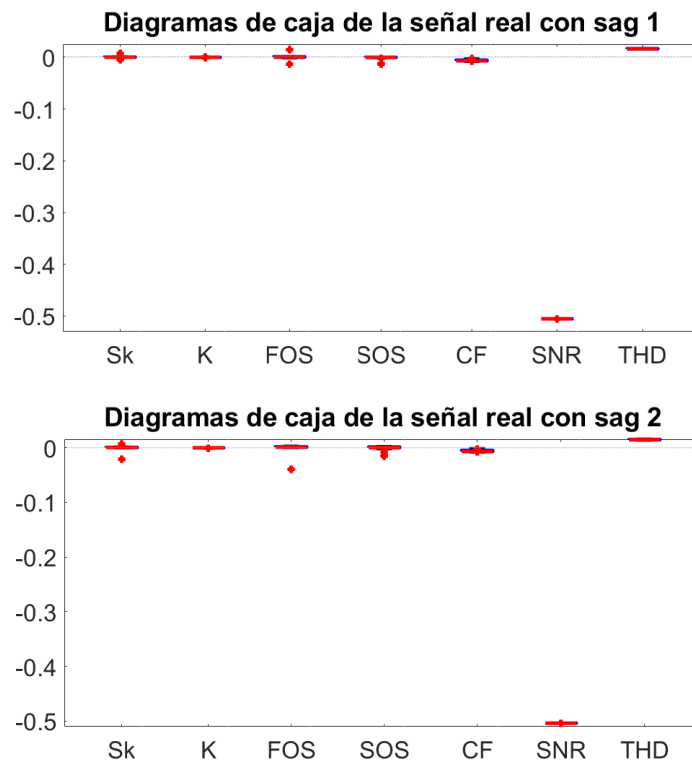


Figura 100. Diagramas de caja adaptados para las señales reales con *sags* #1 y #2 de la base de datos IEEE DataPort.

En las figuras 101, 103 y 104 se presenta la evolución mediante gráficos radar de tres señales del conjunto de datos de *sags* de la base de datos #3 que destacan por contener eventos con particularidades específicas:

- En la señal de la figura 101, los gráficos radar detectan un transitorio impulsivo en el ciclo #25, varios ciclos antes del inicio de un *sag* entre los ciclos #30 y #33, en el

que la amplitud de la forma de onda se reduce hasta un 80%. Esta señal se denomina como “señal real con *sag* e impulsivo”.

- En las señales de las figuras 103 y 104, se observa un fenómeno de evento complejo compuesto por dos *sags*. Si bien este tipo de evento no se contempla en las bases de datos sintéticas, el comportamiento esperable sería el siguiente: partiendo de una señal en estado I, se presentan uno o más ciclos de transición en estado II con el inicio del primer *sag*, Posteriormente, al alcanzarse el estado III (denominado aquí IIIa), ocurre una segunda transición que introduce un nuevo *sag* sobre el primero, cuyo estado estable se denomina IIIb. Este comportamiento es coherente con el patrón esperado para los estados I, II y III de señales con *sag*.

En la señal real con *sag* e impulsivo (figura 101), se cumple, para ambos eventos, que los valores adquiridos por los indicadores permanecen dentro de los límites establecidos para cada evento y estado y, por lo tanto, se cumple el patrón de comportamiento esperable para ambos eventos, como se detalla en la tabla 18. En cuanto al indicador global de la calidad de suministro, sus valores oscilan entre 0.2888 y 0.3427 para el estado I, entre 0.3845 y 0.6272 para el estado II, y el único valor registrado en estado III es de 0.4221. En el diagrama de caja correspondiente a esta señal, en la figura 102, el evento es detectado a través de los valores atípicos en los estadísticos de orden superior y el factor de cresta, mientras que el nivel de SNR concuerda con el nivel de ruido de la señal.

En la señal con *sags* complejos #1, el primer *sag* provoca una reducción de la amplitud de la onda de hasta un 88%, mientras que el segundo *sag* reduce la amplitud hasta un 79%. En la señal con *sags* complejos #2, las reducciones de amplitud alcanzan hasta un 87% en el primer *sag* y un 85% en el segundo. Ambas señales, presentadas en las figuras 103 y 104, muestran un comportamiento coherente con el esperado teóricamente. En los cuatro estados localizados en ambas señales (I, II, IIIa y IIIb), los valores se mantienen dentro de los límites establecidos por tipo de estado, como se observa en la tabla 18. Para ambas señales, el indicador global de la calidad de suministro varía entre 0.2762 y 0.3559 en estado I, entre 0.3445 y 0.5313 en estado II, entre 0.3734 y 0.4053 para el estado IIIa y entre 0.4792 y 0.4987 para el estado IIIb de la señal real con *sags* complejos #1, y entre 0.3546 y 0.3878 para el estado IIIa y 0.3780 y 0.3809 para el estado IIIb de la señal real con *sags* complejos #2. En la figura 105, además, los diagramas de caja de ambas señales muestran que el evento se detecta a través de los valores atípicos de

*skewness*, *kurtosis*, estadístico de sexto orden y factor de cresta para la primera señal, y a través de *skewness*, estadísticos de quinto y sexto orden y factor de cresta para la segunda.

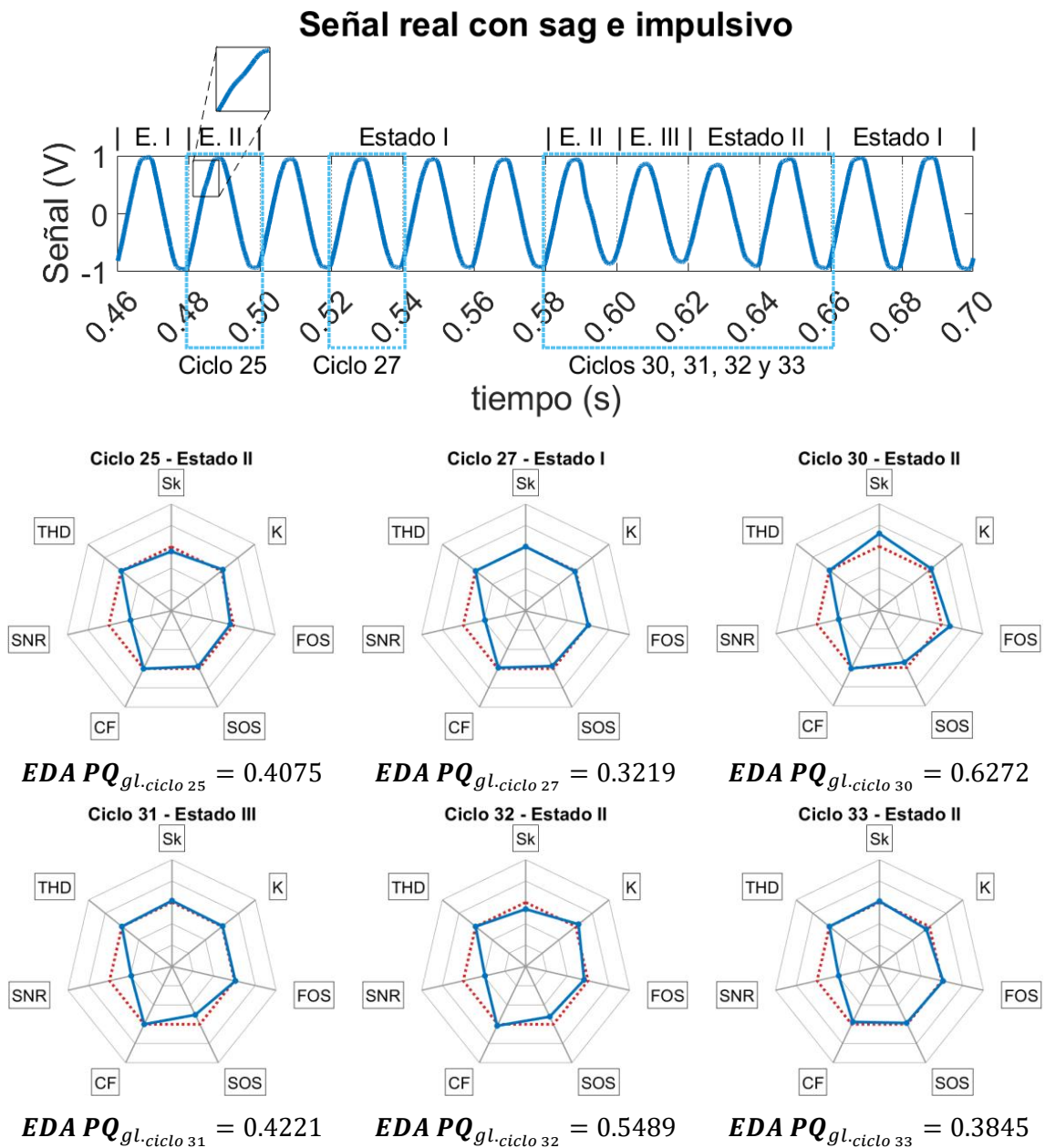


Figura 101. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con *sag* e impulsivo de la base de datos IEEE DataPort.

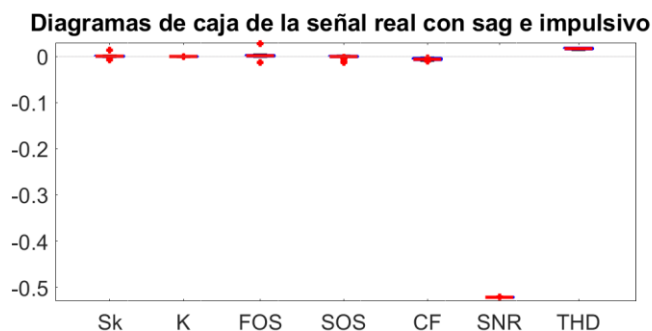


Figura 102. Diagrama de caja adaptado de la señal real con *sag* e impulsivo de la base de datos IEEE DataPort.

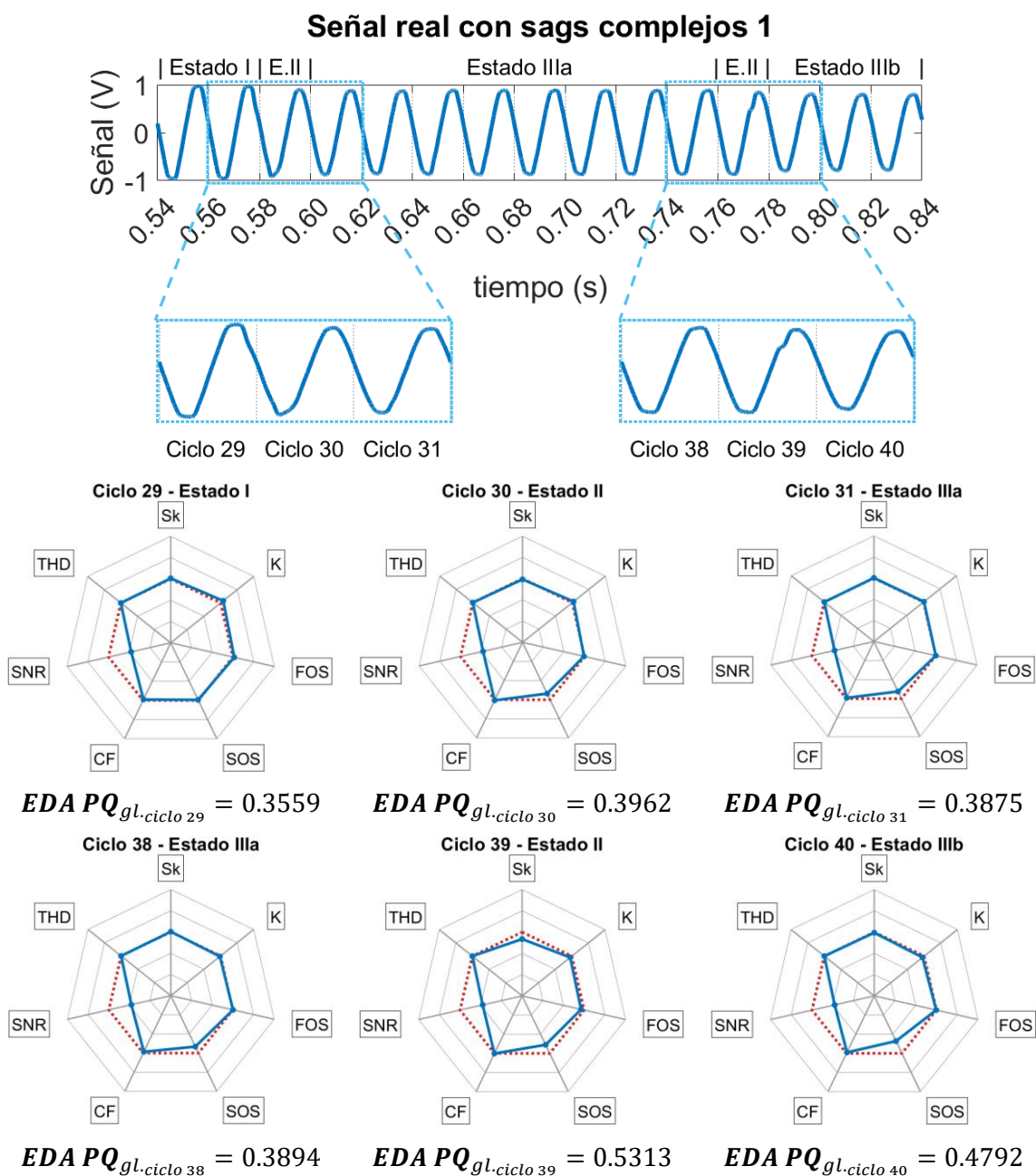


Figura 103. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con *sags* complejos #1 de la base de datos IEEE DataPort.

### Señal real con sags complejos 2

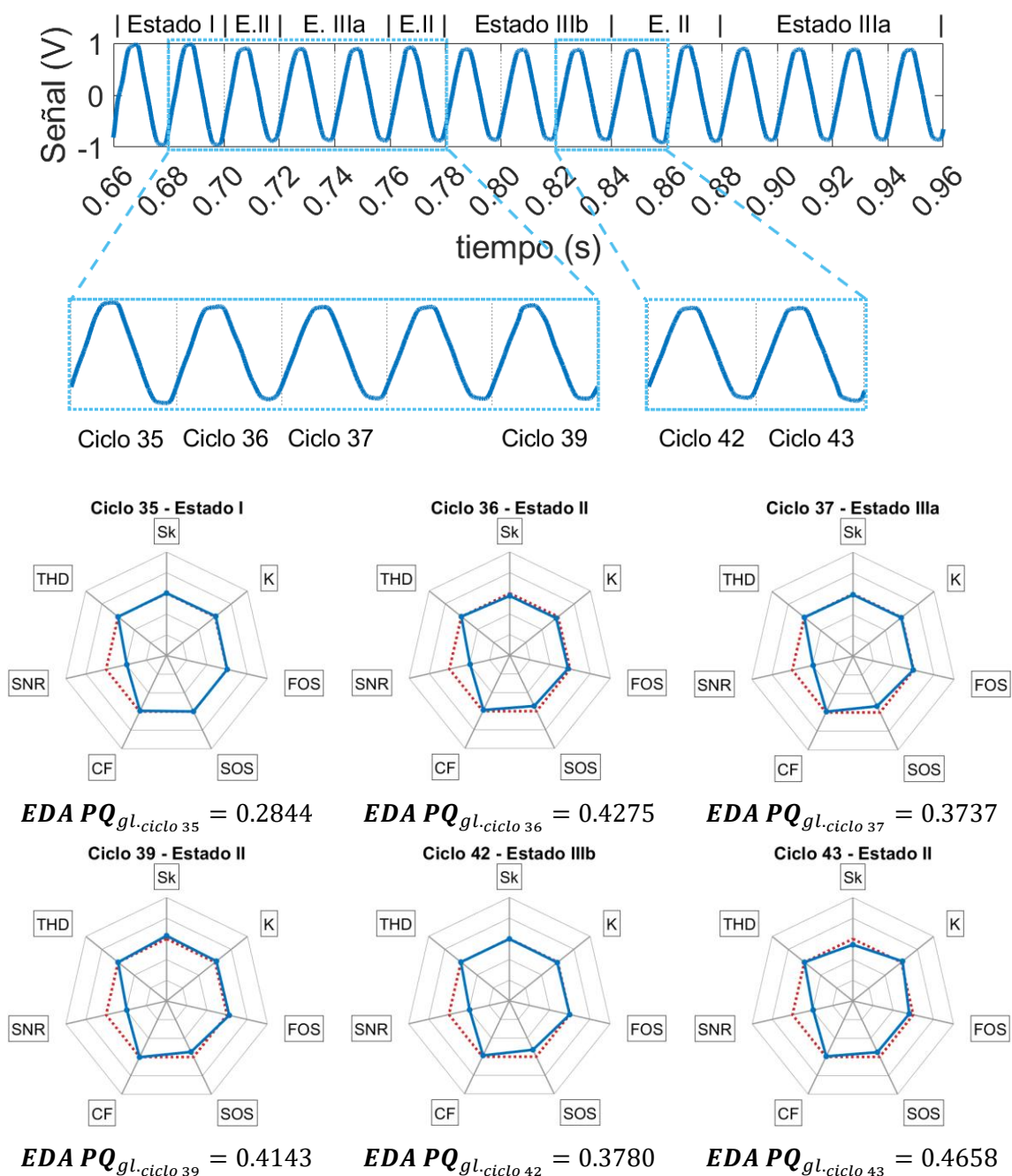


Figura 104. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal real con sags complejos #2 de la base de datos IEEE DataPort.

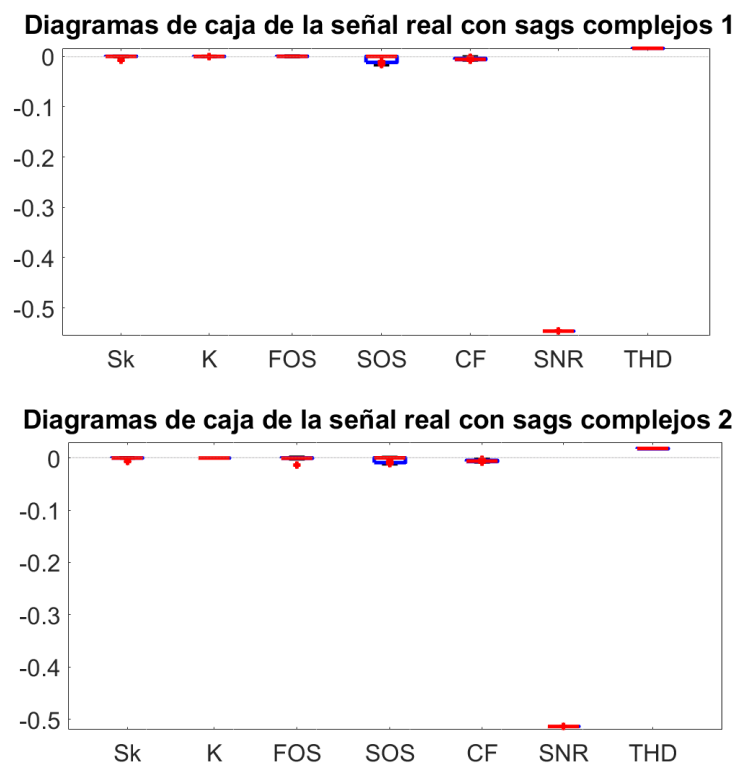


Figura 105. Diagrama de caja adaptado de las señales reales con *sags* complejos #1 y #2 de la base de datos IEEE DataPort.

Tabla 18. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con *sag* e impulsivo, *sags* complejos #1 y #2.

Señal	Ciclo	Indicador						
		Sk	K	FOS	SOS	CF	SNR	THD
Señal real con <i>sag</i> e impulsivo	25	-0.0329	1.5138	-0.0140	0.2540	1.4152	38.2818	2.8024
	27	0.0012	1.4935	0.0010	0.2446	1.3884	38.2818	2.8024
	30	0.0916	1.5191	0.0353	0.1901	1.4437	38.2818	2.8024
	31	0.0124	1.5047	0.0037	0.1271	1.4146	38.2818	3.6200
	32	-0.0482	1.5260	-0.0163	0.1520	1.4585	38.2818	3.6200
	33	0.0088	1.4710	0.0051	0.2775	1.3481	38.2818	3.6200
Señal real con <i>sags</i> complejos #1	29	0.0040	1.5247	0.0057	0.2962	1.3891	36.3166	2.9627
	30	-0.0054	1.5122	-0.0022	0.1747	1.4316	36.3166	2.9627
	31	0.0021	1.5039	0.0002	0.1574	1.3915	36.3166	2.5852
	38	0.0021	1.4940	0.0008	0.1689	1.3782	36.3166	2.5852
	39	-0.0500	1.4850	-0.0128	0.1376	1.4193	36.3166	2.5852
Señal real con <i>sags</i> complejos #2	40	-0.0042	1.4852	-0.0009	0.0956	1.3869	36.3166	2.5852
	35	0.0024	1.5062	0.0008	0.3095	1.3931	38.8836	3.7564
	36	-0.0190	1.4816	-0.0085	0.1891	1.3815	38.8836	3.7564
	37	-0.0063	1.4961	-0.0019	0.1701	1.3898	38.8836	3.7564
	39	0.0235	1.5126	0.0094	0.1902	1.4192	38.8836	3.7564
	42	-0.0013	1.4950	-0.0004	0.1585	1.3782	38.8836	2.6898
43	-0.0427	1.5117	-0.0169	0.1975	1.3991	38.8836	2.6898	

### 4.3.2. Análisis de la base de datos PAIDI-TIC-168

Se han seleccionado tres lotes de señales correspondientes a un tramo de una hora, cada una con una duración de un segundo, resultando en un total de 10.800 señales provenientes de la base de datos #4. Estas señales corresponden a los días 16 de junio de 2021, de 16:00 a 17:00, al 3 de junio de 2024, de 12:00 a 13:00, y al 5 de septiembre de 2024, de 14:00 a 15:00.

Para cada señal, se ha calculado el indicador global de la calidad de suministro por ciclo. Los valores obtenidos se han agrupado en tramos horarios de cinco minutos en la tabla 19, y se han calculado, para cada tramo, los valores máximo, mínimo y promedio del indicador global. Las señales que presentaron una variación superior al 10% respecto al valor promedio fueron clasificadas como señales con valores atípicos y seleccionadas para un análisis en mayor profundidad. Este límite del 10% corresponde al umbral máximo de variación por ruido, según el diseño de los gráficos radar en el apartado 3.4.

En el caso de localizar en un tramo horario alguna(s) señal(es) con valores atípicos, se incluye el número de señales del tramo que cumplen esta premisa. Además, en la tabla 19 se evalúa la detección de eventos mediante los valores atípicos en los diagramas de caja, excluyendo para este cálculo los valores atípicos correspondientes al SNR debido a que, al tratarse de señales reales en las que el ruido es inherente, siempre habrá detección de, al menos, un valor atípico correspondiente a dicho indicador, independientemente de si hay presencia de un evento o no en la señal.

Tabla 19. Análisis a partir del indicador global de tramos horarios de señales de la base de datos #4.

Fecha	Tramo horario	EDA PQ <sub>global</sub> mínimo	EDA PQ <sub>global</sub> máximo	EDA PQ <sub>global</sub> promedio	¿Algún valor atípico de EDA PQ <sub>global</sub> ?	Outliers en <i>box-</i> <i>plots</i>
16 de junio de 2021	16:00:00 – 16:04:59	0.2776	0.3044	0.2837	No	Sí
	16:05:00 – 16:09:59	0.2773	0.2994	0.2838	No	Sí
	16:10:00 – 16:14:59	0.2768	0.3089	0.2844	No	Sí
	16:15:00 – 16:19:59	0.2775	0.3099	0.2864	No	Sí
	16:20:00 – 16:24:59	0.2801	0.3074	0.2851	No	Sí
	16:25:00 – 16:29:59	0.2772	0.3051	0.2851	No	Sí
	16:30:00 – 16:34:59	0.2793	0.3106	0.2866	No	Sí
	16:35:00 – 16:39:59	0.2774	0.2995	0.2846	No	Sí
	16:40:00 – 16:44:59	0.2707	1.2327	0.2844	Sí (1)	Sí
	16:45:00 – 16:49:59	0.2723	0.3108	0.2827	No	Sí
	16:50:00 – 16:54:59	0.2725	0.3023	0.2805	No	Sí
16:55:00 – 16:59:59	0.2779	0.3094	0.2858	No	Sí	

Tabla 19. Análisis a partir del indicador global de tramos horarios de señales de la base de datos #4 (cont.).

Fecha	Tramo horario	EDA PQ <sub>global</sub> mínimo	EDA PQ <sub>global</sub> máximo	EDA PQ <sub>global</sub> promedio	¿Algún valor atípico de EDA PQ <sub>global</sub> ?	<i>Outliers</i> en <i>box-</i> <i>plots</i>
3 de junio de 2024	12:00:00 – 12:04:59	0.2940	0.3676	0.3037	Sí (1)	Sí
	12:05:00 – 12:09:59	0.2952	0.3150	0.3041	No	Sí
	12:10:00 – 12:14:59	0.2982	0.3172	0.3048	No	Sí
	12:15:00 – 12:19:59	0.2932	0.3117	0.3010	No	Sí
	12:20:00 – 12:24:59	0.2870	0.3078	0.2978	No	Sí
	12:25:00 – 12:29:59	0.2872	0.3066	0.2969	No	Sí
	12:30:00 – 12:34:59	0.2907	0.3184	0.2973	No	Sí
	12:35:00 – 12:39:59	0.2923	0.3112	0.2987	No	Sí
	12:40:00 – 12:44:59	0.2901	0.9348	0.2982	Sí (2)	Sí
	12:45:00 – 12:49:59	0.2868	0.4699	0.2958	Sí (3)	Sí
	12:50:00 – 12:54:59	0.2875	0.3231	0.2946	No	Sí
12:55:00 – 12:59:59	0.2882	0.6147	0.2964	Sí (1)	Sí	
5 de sep- tiem- bre de 2024	14:00:00 – 14:04:59	0.3143	0.3380	0.3263	No	Sí
	14:05:00 – 14:09:59	0.3071	0.3455	0.3221	No	Sí
	14:10:00 – 14:14:59	0.3047	0.8229	0.3202	Sí (3)	Sí
	14:15:00 – 14:19:59	0.3063	0.3380	0.3175	No	Sí
	14:20:00 – 14:24:59	0.3087	0.3318	0.3178	No	Sí
	14:25:00 – 14:29:59	0.3100	0.3309	0.3186	No	Sí
	14:30:00 – 14:34:59	0.3090	0.3345	0.3175	No	Sí
	14:35:00 – 14:39:59	0.3075	0.3241	0.3151	No	Sí
	14:40:00 – 14:44:59	0.3079	0.3286	0.3142	No	Sí
	14:45:00 – 14:49:59	0.3073	0.3217	0.3135	No	Sí
14:50:00 – 14:54:59	0.3080	0.3245	0.3158	No	Sí	
14:55:00 – 14:59:59	0.3115	0.3307	0.3185	No	Sí	

En total, mediante el indicador global de la calidad de suministro se seleccionaron las señales registradas a las 16:41:03 del día 16 de junio de 2021, a las 12:00:22, 12:41:16, 12:44:52, 12:47:56, 12:48:36, 12:49:06 y 12:59:25 del día 3 de junio de 2024, y las señales correspondientes a las 14:12:35, 14:12:36 y 14:12:37 del 5 de septiembre de 2024, analizándose, por tanto, 11 señales en total, agrupadas en función del tipo de evento localizado.

Las figuras de la 106 a la 110 contienen señales en las que se ha localizado un transitorio impulsivo. En todas estas señales, los gráficos radar reflejan patrones de comportamiento que cumplen los límites establecidos, tal y como se detalla en la tabla 20. Además, el indicador global de la calidad del suministro alcanza su valor máximo en el ciclo que contiene el evento, lo cual es coherente con el criterio utilizado para seleccionar las señales analizadas: la búsqueda de valores que se destaquen respecto al promedio de la señal. Sin embargo, este hecho implica que algunos transitorios impulsivos podrían no

ser detectados, puesto que la variación que producen en los indicadores se registra dentro del umbral de variación por ruido promedio (en este caso, 35,59 dB), que equivaldría en estas cinco señales a valores del indicador global entre 0.2956 y 0.3329 para el estado I. Esto sugiere que estos eventos transitorios, aunque presentes, resultan menos significativos en términos de posibles daños eléctricos, dado que los equipos están diseñados para tolerar adecuadamente las oscilaciones provocadas por el ruido inherente a una red eléctrica real.

En la figura 111, se muestran los diagramas de caja correspondientes a estas señales con transitorios impulsivos. En estos casos, los eventos son identificados a través de los valores atípicos, bien únicamente a través del factor de cresta, como es el caso de las señales de las 12:00:22 del 03/06/2024 y de las 14:12:36 del 05/09/2024, bien a través de *outliers* en algún estadístico de orden superior y el factor de cresta.

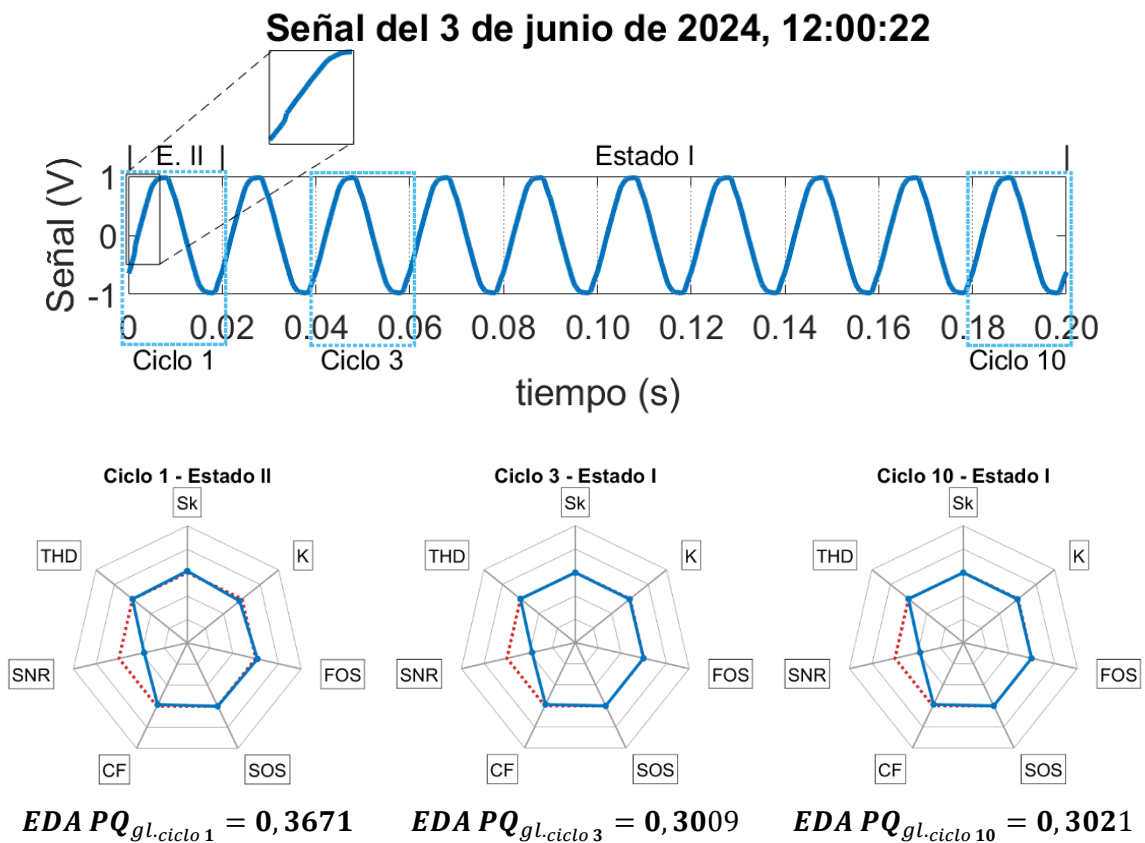


Figura 106. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:00:22 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

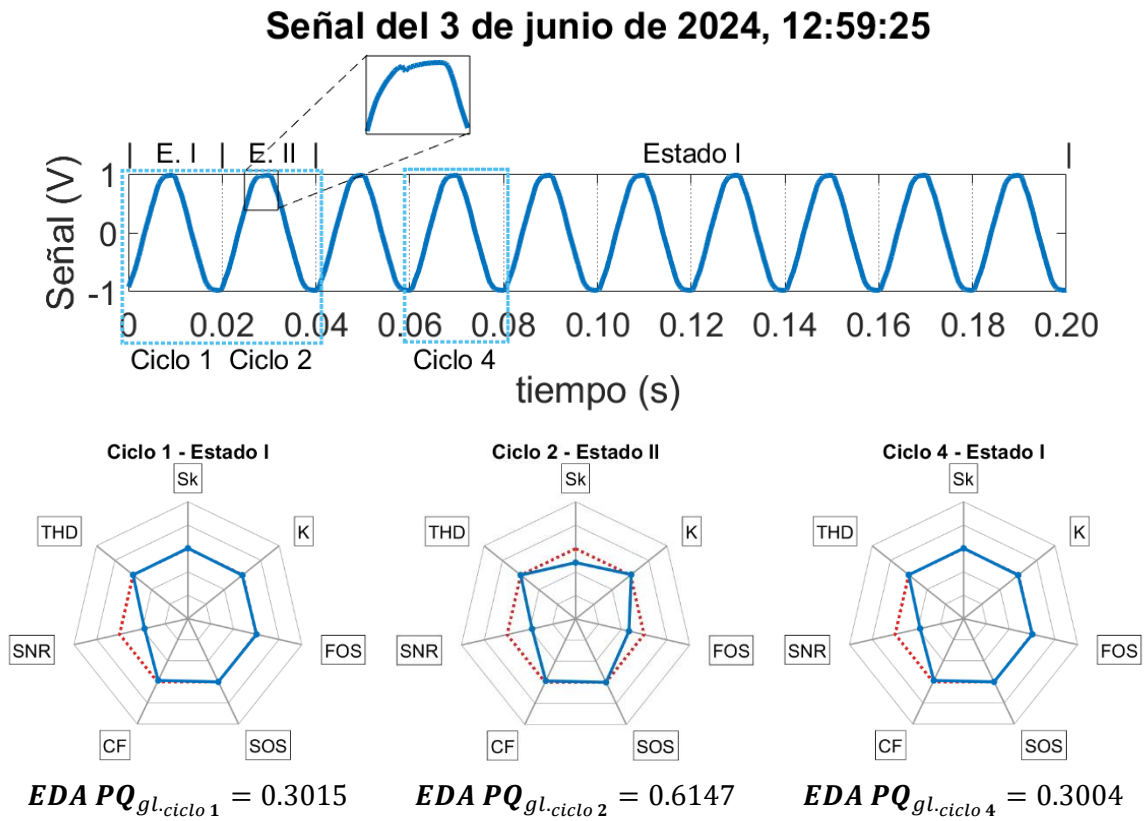


Figura 107. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:59:25 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

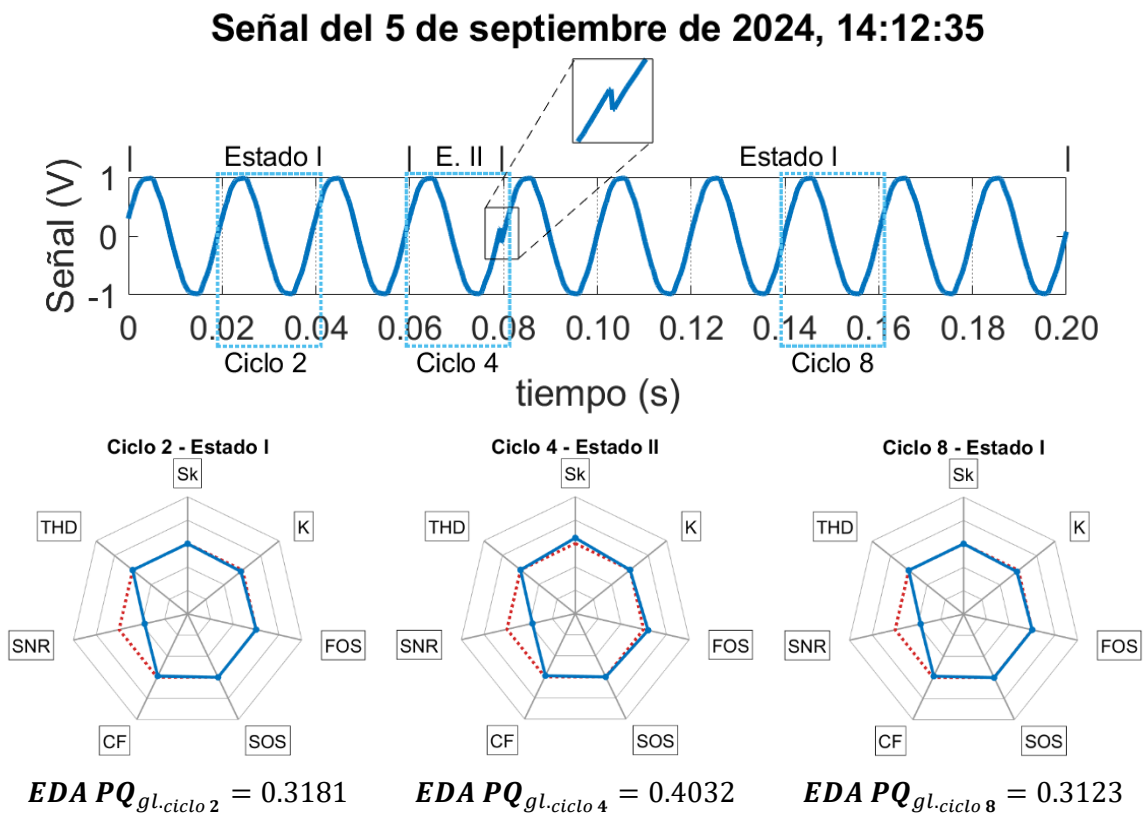


Figura 108. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 14:12:35 del 05/09/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

### Señal del 5 de septiembre de 2024, 14:12:36

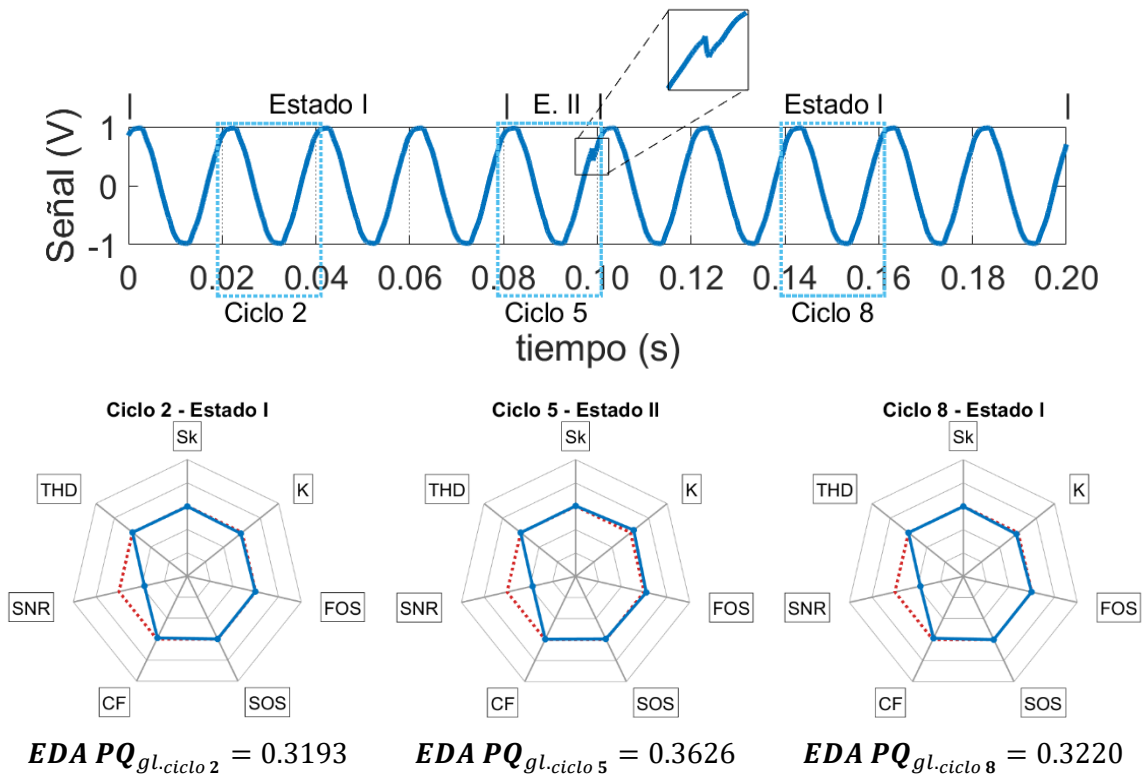


Figura 109. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 14:12:36 del 05/09/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

### Señal del 5 de septiembre de 2024, 14:12:37

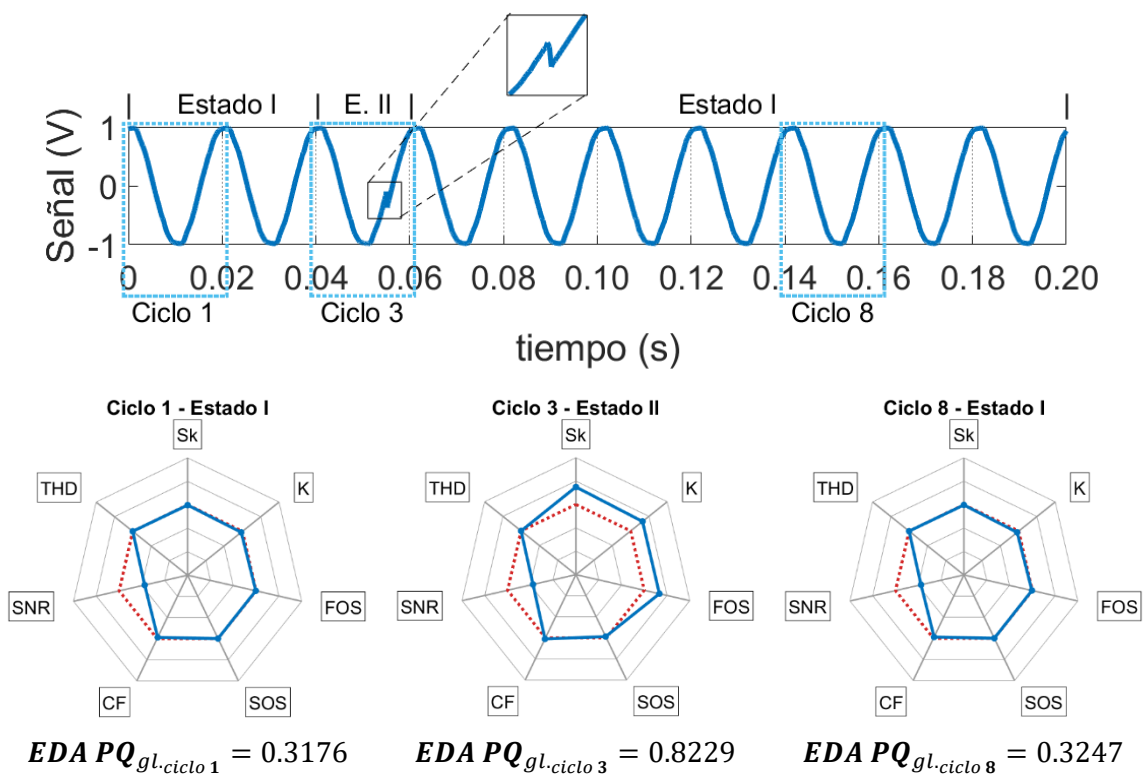


Figura 110. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 14:12:37 del 05/09/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

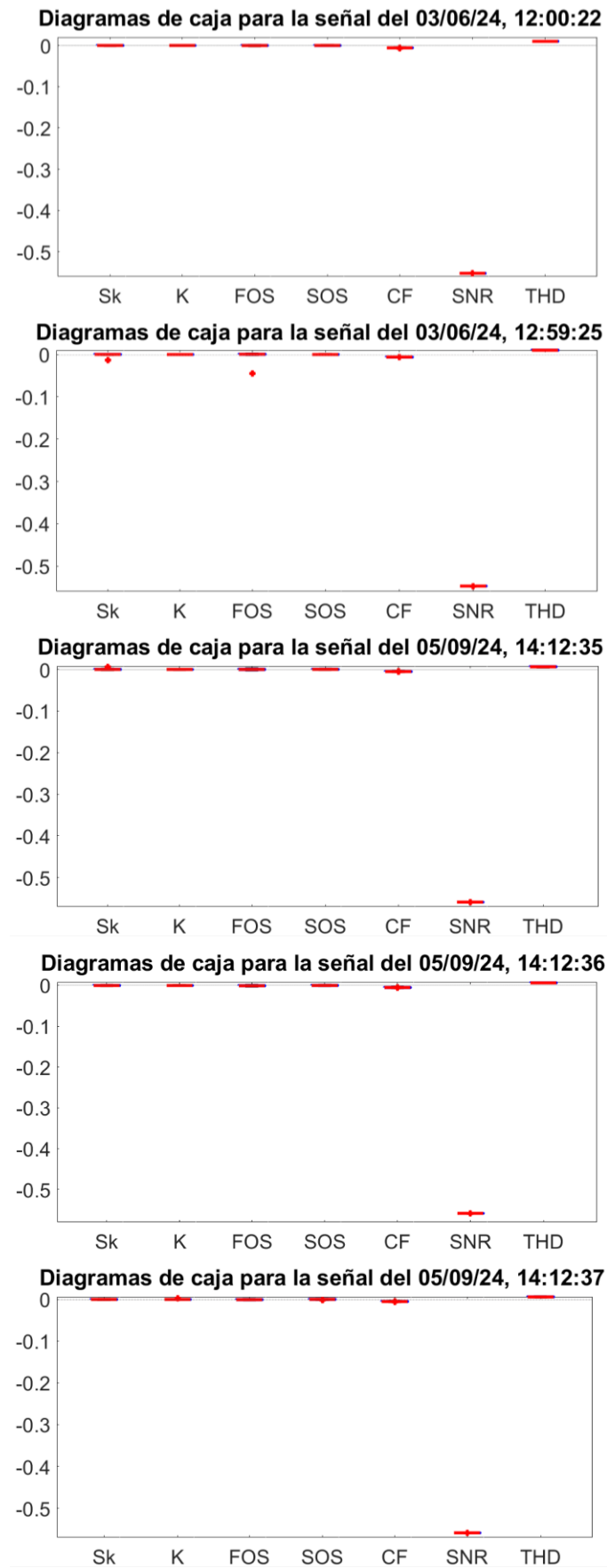


Figura 111. Diagrama de caja adaptado de las señales de las reales con transitorios impulsivos de la base de datos PAIDI-TIC-168.

Tabla 20. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales transitorios impulsivos de la base de datos PAIDI-TIC-168.

Señal	Ciclo	Indicador						
		Sk	K	FOS	SOS	CF	SNR	THD
Señal de las 12:00:22 del 03/06/2024	1	0.0106	1.4795	0.0070	0.3146	1.3725	35.8254	1.8442
	3	-0.0008	1.4964	-0.0004	0.3136	1.3783	35.8254	1.8442
	10	-0.0008	1.4957	-0.0003	0.3134	1.3777	35.8254	1.8442
Señal de las 12:59:25 del 03/06/2024	1	0.0016	1.4969	0.0010	0.3125	1.3767	36.2172	1.8615
	2	-0.0909	1.5060	-0.0565	0.3123	1.3771	36.2172	1.8615
	4	0.0015	1.4974	0.0009	0.3120	1.3771	36.2172	1.8615
Señal de las 14:12:35 del 05/09/2024	2	-0.0003	1.4864	0.0001	0.3124	1.3811	35.2807	2.5970
	4	0.0365	1.4997	0.0169	0.3131	1.3839	35.2807	2.5970
	8	0.0003	1.4904	0.0004	0.3147	1.3829	35.2807	2.5970
Señal de las 14:12:36 del 05/09/2024	2	-0.0019	1.4895	-0.0012	0.3081	1.3828	35.3375	5.9093
	5	0.0028	1.5266	0.0082	0.2969	1.4058	35.3375	5.9093
	8	-0.0010	1.4858	-0.0005	0.3144	1.3800	35.3375	5.9093
Señal de las 14:12:37 del 05/09/2024	1	-0.0018	1.4899	-0.0011	0.3104	1.3826	35.2770	1.0643
	3	0.1142	1.5981	0.0569	0.2798	1.4418	35.2770	1.0643
	8	-0.0021	1.4868	-0.0013	0.3106	1.3808	35.2770	1.0643

En las figuras de la 112 a la 114 se presentan las señales de la base de datos #4 en las que se han localizado *sags*. Individualmente, cada señal se caracteriza por:

- En la señal registrada a las 16:41:03 del 16 de junio de 2021, mostrada en la figura 112, se localiza un evento complejo compuesto por dos *sags*. El primero de ellos, en el que se reduce la amplitud hasta en un 78%, se desarrolla entre el tercer y el noveno ciclo, mientras que el segundo *sag*, con una reducción de la amplitud de hasta un 25%, tiene lugar entre los ciclos #6 y #9. En ambos casos, los gráficos radar reflejan comportamientos consistentes con los patrones de comportamiento establecidos, obteniéndose valores del indicador global de la calidad de suministro que oscilan entre 0.3057 y 0.3448 para el estado I, 0.4116 y 1.2368 para el estado II, 0.4698 y 0.4934 para el estado IIIa, y 0.8591, el único valor obtenido para el estado IIIb.
- En la señal registrada a las 12:41:16 del 3 de junio de 2024, en la figura 113, se presenta un *sag* con reducción de la amplitud de la forma de onda de hasta un 78% en-

tre los ciclos #4 y #7. En este caso, no se alcanza la estabilidad del *sag* durante un ciclo completo, de modo que el evento se desarrolla completamente en estado II, hecho que confirman los gráficos radar. A pesar de esta particularidad, los valores adquiridos por los indicadores durante el evento permanecen en los límites establecidos con la base de datos #1, como verifican los valores de la tabla 21. Para esta señal en su totalidad, se obtienen valores para el indicador global de la calidad de suministro entre 0.2944 y 0.3242 para el estado I, y entre 0.3978 y 0.9247 para el estado II.

- La figura 114 muestra la evolución de la señal registrada a las 12:44:52 del 3 de junio de 2024. Esta señal combina un *sag* con una reducción de la amplitud de hasta un 87% en el ciclo #4 y la presencia de armónicos, lo cual se refleja en los valores por debajo del nominal para la *kurtosis* y el valor de THD por encima del 8%. Mientras que los armónicos se diluyen en torno al ciclo #10, la recuperación del *sag* es más gradual, estabilizándose totalmente la señal alrededor del ciclo #20.

Debido a esta evolución prolongada, incluir la duración total del evento supondría peyorar la visualización de la combinación *sag* + armónicos en la forma de onda. Por ello, los gráficos radar se emplean para mostrar cómo, progresivamente, los valores de los indicadores se estabilizan acercándose al valor nominal. Este comportamiento de algunos *sags*, caracterizado por un comienzo abrupto y seguido por una recuperación paulatina, en los que rara vez se estabiliza el evento, también se ha observado en la base de datos IEEE DataPort, por lo que se concluye que es relativamente habitual para *sags* reales. En cualquier caso, los gráficos radar muestran correctamente la evolución del evento, cuyo comportamiento devuelve valores en los indicadores dentro de los patrones establecidos, y la cual puede corroborarse a través del indicador global, cuyo valor oscila entre 0.3157 y 0.3179 para el estado I, y 0.3513 y 0.8717 para el estado II.

Los diagramas de caja mostrados en la figura 115 corresponden a estas señales con *sags*. En los tres casos, los valores atípicos tanto en los estadísticos de orden superior como en el factor de cresta resaltan la presencia de un evento. Además, el *outlier* sobre la mediana en el SNR delata la presencia de un ruido gaussiano promedio de 37.14 dB, aunque este valor atípico no se considera un detector de eventos en estas señales.

### Señal del 16 de junio de 2021, 16:41:03

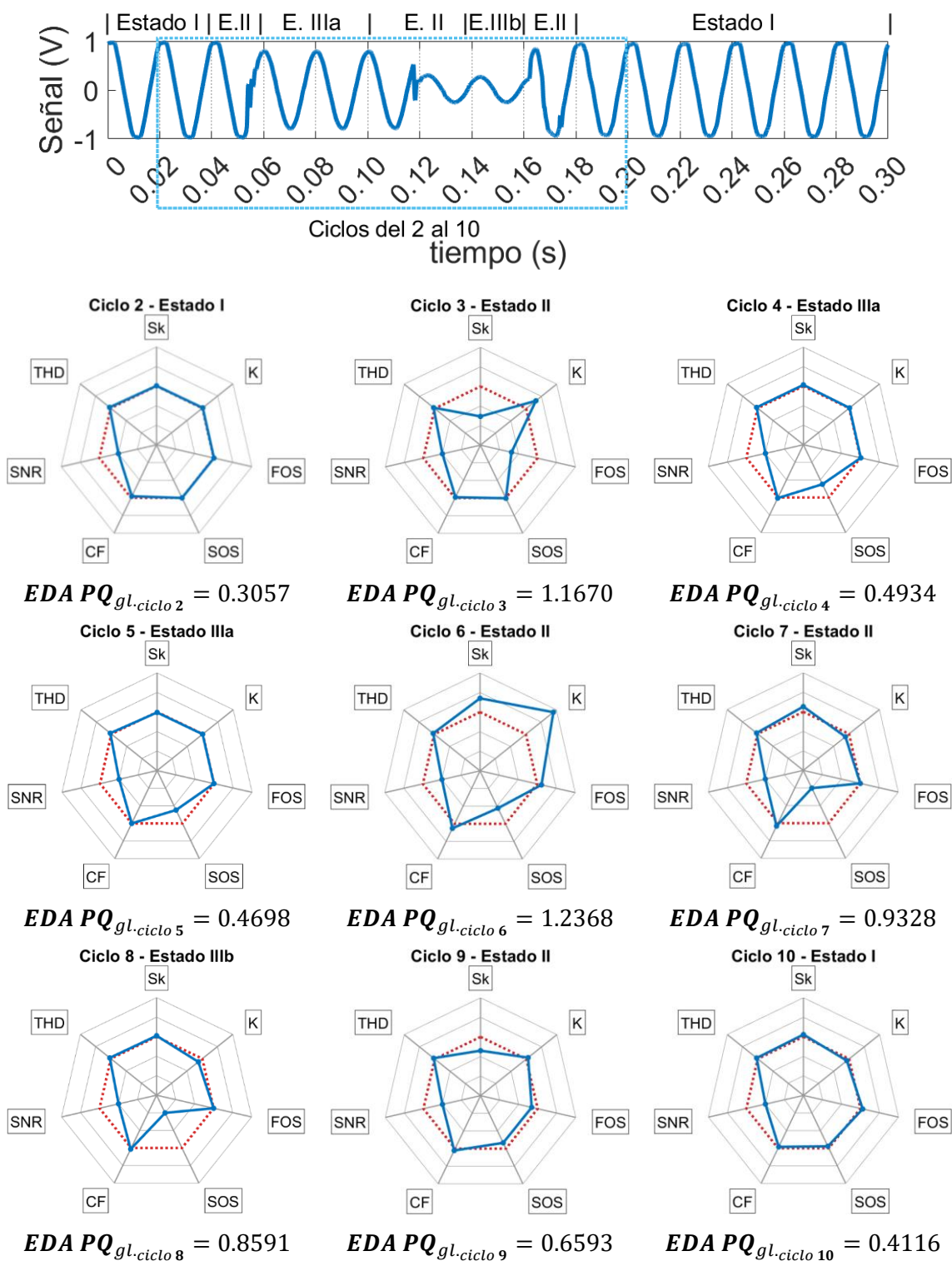


Figura 112. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 16:41:03 del 16/06/2021 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

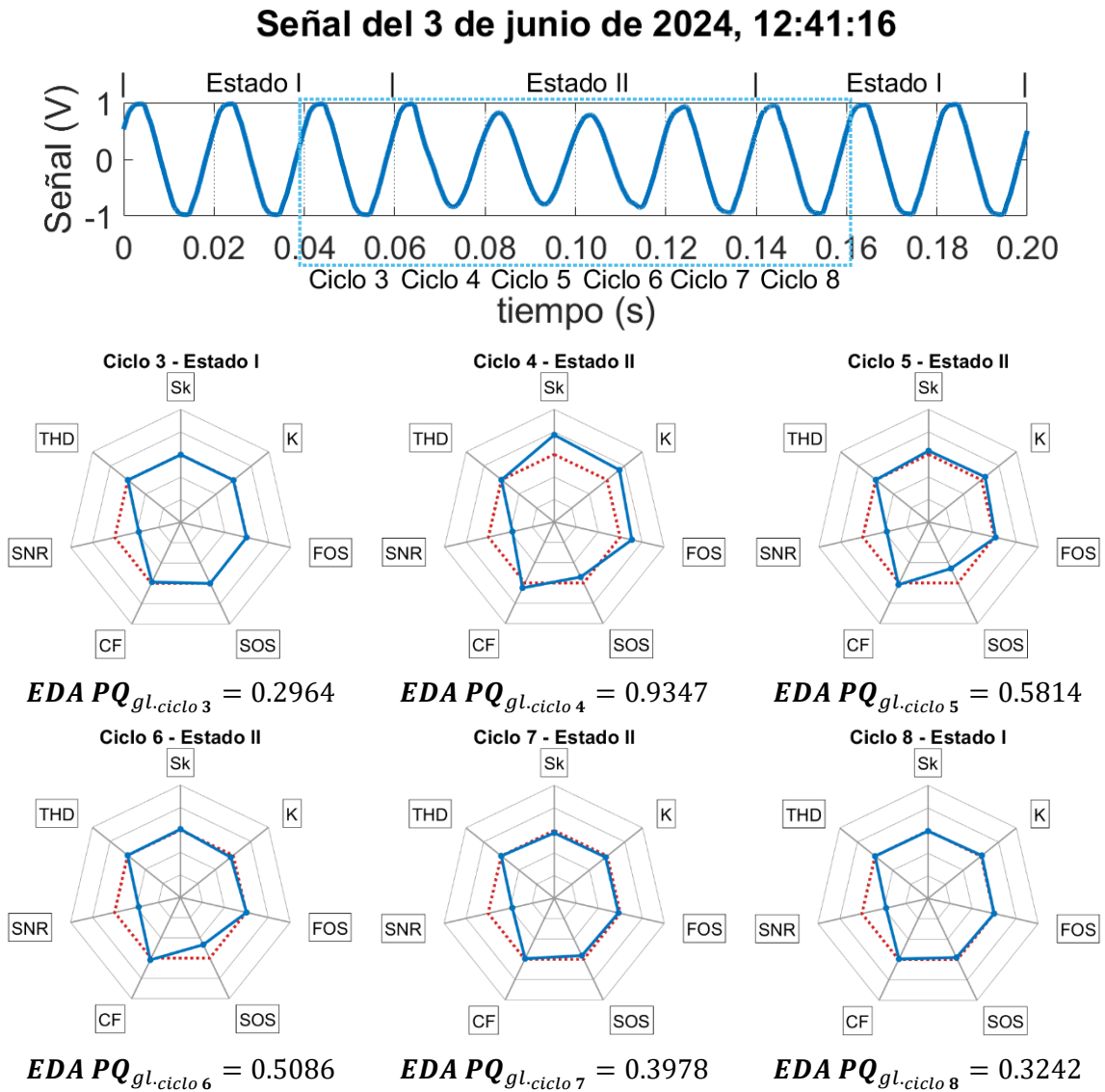


Figura 113. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:41:16 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

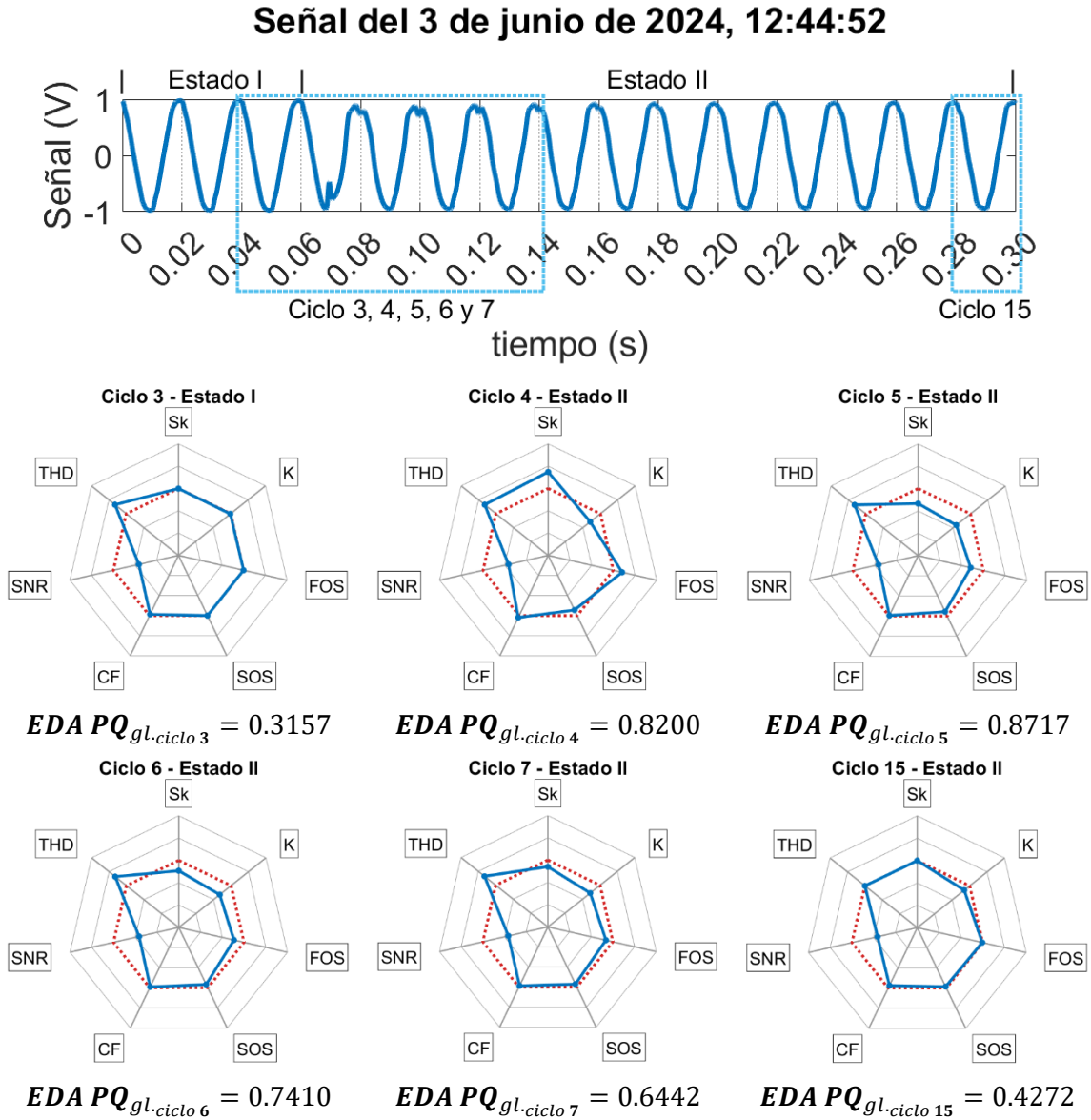


Figura 114. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:44:52 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

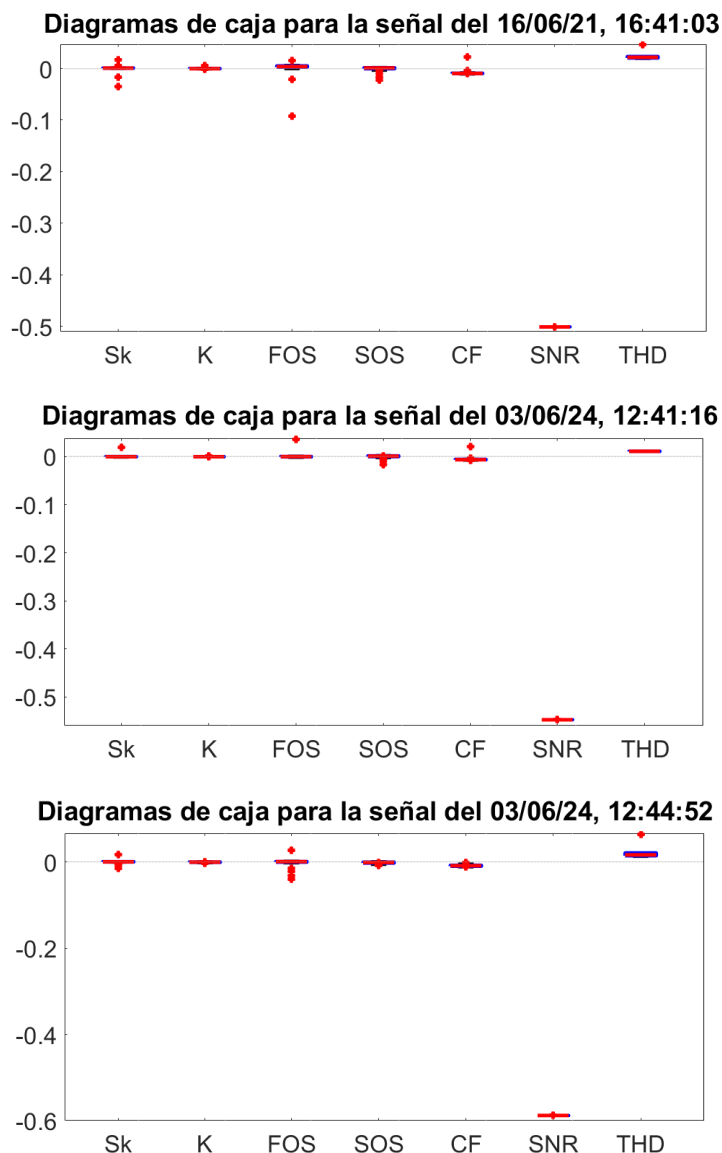


Figura 115. Diagrama de caja adaptado de las señales de las reales con *sags* de la base de datos PAIDI-TIC-168.

Tabla 21. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con *sag* de la base de datos PAIDI-TIC-168.

Señal	Ciclo	Indicador						
		Sk	K	FOS	SOS	CF	SNR	THD
Señal de las 16:41:03 del 16/06/2021	2	0.0019	1.5041	0.0013	0.3158	1.3648	39.9332	8.3703
	3	-0.2336	1.5965	-0.1168	0.3205	1.3882	39.9332	8.3703
	4	0.0101	1.5039	0.0017	0.0765	1.4338	39.9332	8.3703
	5	-0.0037	1.4979	-0.0007	0.0757	1.4135	39.9332	8.3703
	6	0.1075	1.7730	0.0193	0.0591	1.5561	39.9332	8.3703
	7	0.0410	1.4645	4.16E-5	1.46E-4	1.5039	39.9332	8.3703
	8	0.0071	1.4607	5.55E-6	9.39E-5	1.4491	39.9332	8.3703
	9	-0.1069	1.5175	-0.0269	0.1723	1.4730	39.9332	8.3703
	10	0.0176	1.4772	0.0101	0.2556	1.3706	39.9332	8.3703

Tabla 21. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con *sag* de la base de datos PAIDI-TIC-168 (cont.).

Señal	Ciclo	Indicador						
		Sk	K	FOS	SOS	CF	SNR	THD
Señal de las 12:41:16 del 03/06/2024	3	-0.0010	1.4983	-0.0005	0.3141	1.3794	36.1822	2.8127
	4	0.1320	1.6067	0.0459	0.1831	1.5469	36.1822	2.8127
	5	0.0246	1.5321	0.0048	0.0829	1.4628	36.1822	2.8127
	6	0.0055	1.4791	0.0010	0.0911	1.4628	36.1822	2.8127
	7	-0.0166	1.4864	-0.0071	0.2249	1.3964	36.1822	2.8127
	8	-0.0027	1.5070	0.0003	0.2603	1.3965	36.1822	2.8127
Señal de las 12:44:52 del 03/06/2024	3	-0.0003	1.4973	-0.0001	0.3110	1.3794	36.2961	11.6955
	4	0.1132	1.4117	0.0347	0.1882	1.4655	36.2961	11.6955
	5	-0.1018	1.3767	-0.0501	0.2110	1.3993	36.2961	11.6955
	6	-0.0707	1.4016	-0.0393	0.2309	1.3876	36.2961	11.6955
	7	-0.0457	1.4146	-0.0276	0.2388	1.3781	36.2961	11.6955
	15	-0.0004	1.4525	-0.0014	0.2734	1.3452	36.2961	3.7617

Las señales representadas en las figuras de la 116 a la 118 muestran un tipo de perturbación de la red eléctrica que no ha sido abordado directamente en las bases de datos anteriores: desequilibrios de la tensión con disminuciones de la amplitud. Un desequilibrio de la tensión se produce cuando se reduce o aumenta la amplitud de la forma de onda, pero el porcentaje de variación es inferior al necesario para catalogar dicho evento como un *sag* o un *swell*. Por lo tanto, aunque no se clasifiquen como tales, los desequilibrios de tensión pueden presentar un comportamiento similar al de esos eventos. Este tipo de desequilibrio está cobrando relevancia debido a su creciente presencia en redes eléctricas actuales, como resultado de factores como la alta penetración de generación distribuida conectada de forma aleatoria y asimétrica – por ejemplo, instalaciones fotovoltaicas residenciales o la carga no equilibrada de vehículos eléctricos [125].

Las señales correspondientes a las 12:47:56 (figura 116), a las 12:48:36 (figura 117) y a las 12:49:06 (figura 118), todas del 3 de junio de 2024, evidencian reducciones de la amplitud de hasta un 94%, 92% y 95%, respectivamente. En sendas señales, se observa un comportamiento similar al de la señal registradas a las 12:44:52 del mismo día, 3 de junio de 2024, identificada como un *sag* real: los eventos tienen un comienzo abrupto y transiciones prolongadas hasta alcanzar el estado I. En realidad, en ninguna de estas señales se alcanza un ciclo completo en el que se estabilice el evento, localizándose por tanto meramente ciclos en estado I y estado II, para los que se estiman valores del indicador global de entre 0.2863 y 0.3235, en el caso del estado I, y entre 0.3378 y 0.5045,

para el estado II. La tabla 22 resume todos los valores de los indicadores obtenidos a partir de los gráficos radar correspondientes.

La figura 119 muestra los diagramas de caja asociados a estas señales. A través de los valores atípicos en *kurtosis*, estadístico de sexto orden y factor de cresta para la señal de las 12:47:56, y de los *outliers* en todos los estadísticos de orden superior y el factor de cresta, para las señales restantes, se confirma la presencia de un evento.

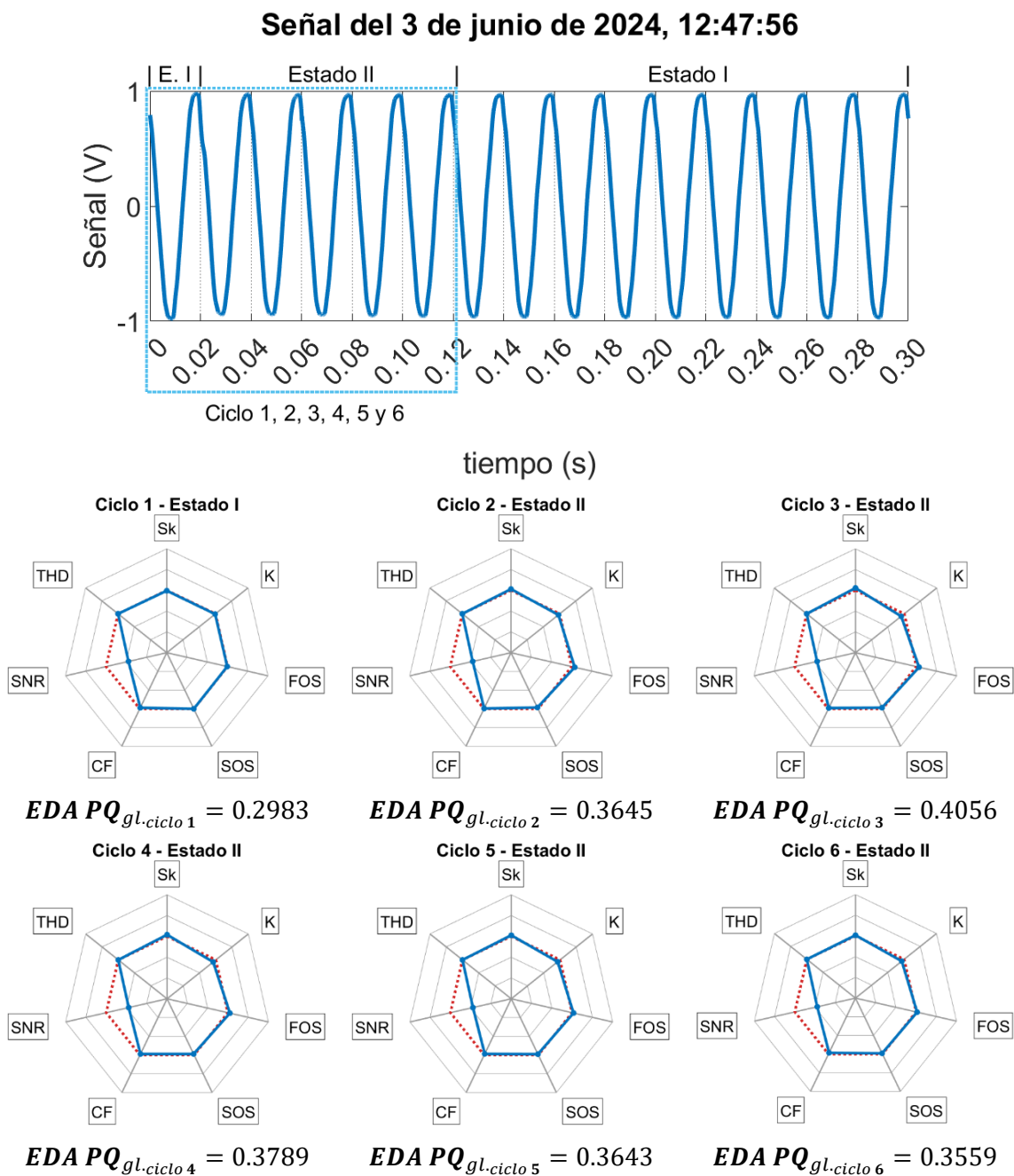


Figura 116. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:47:56 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

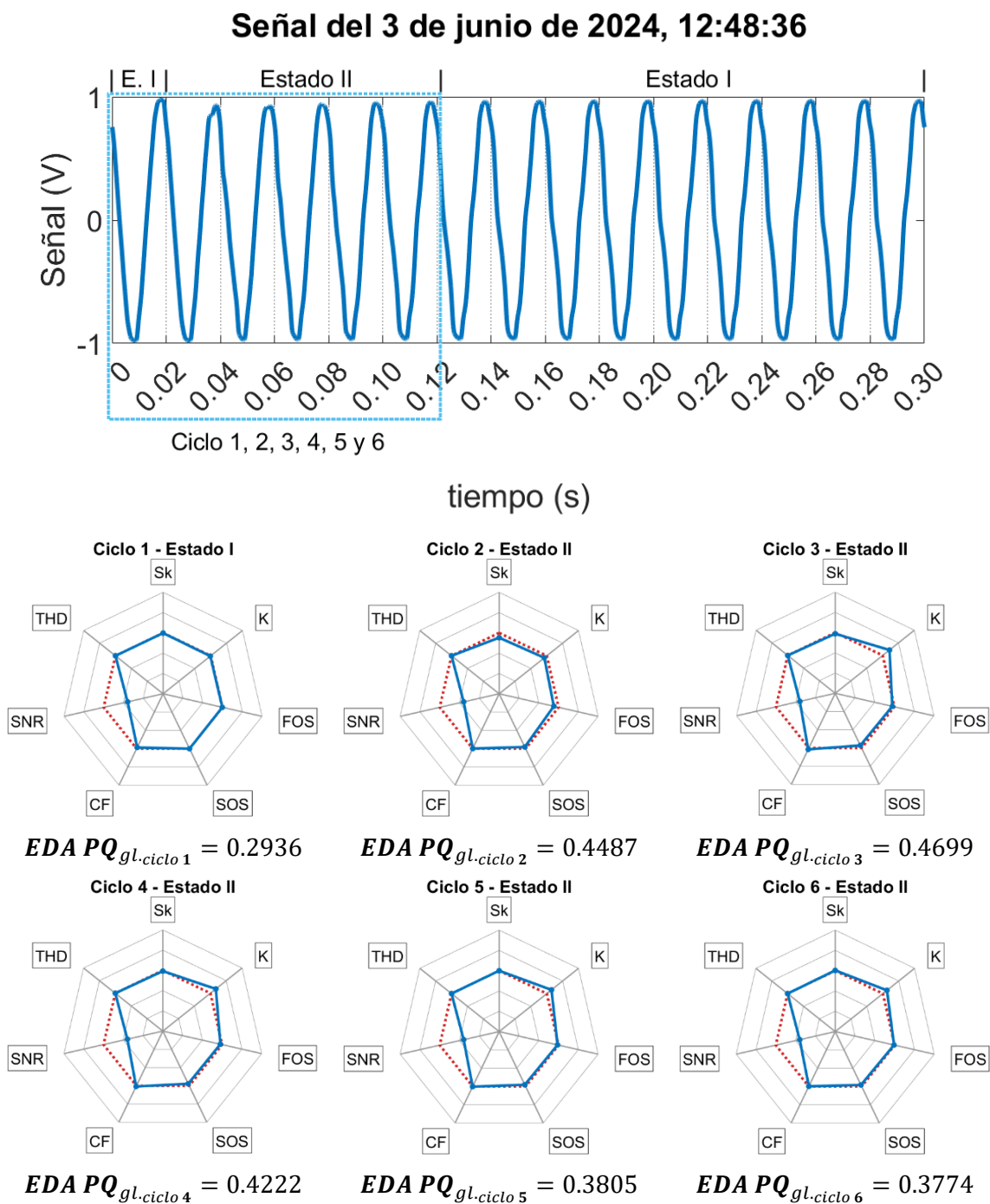


Figura 117. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:48:36 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

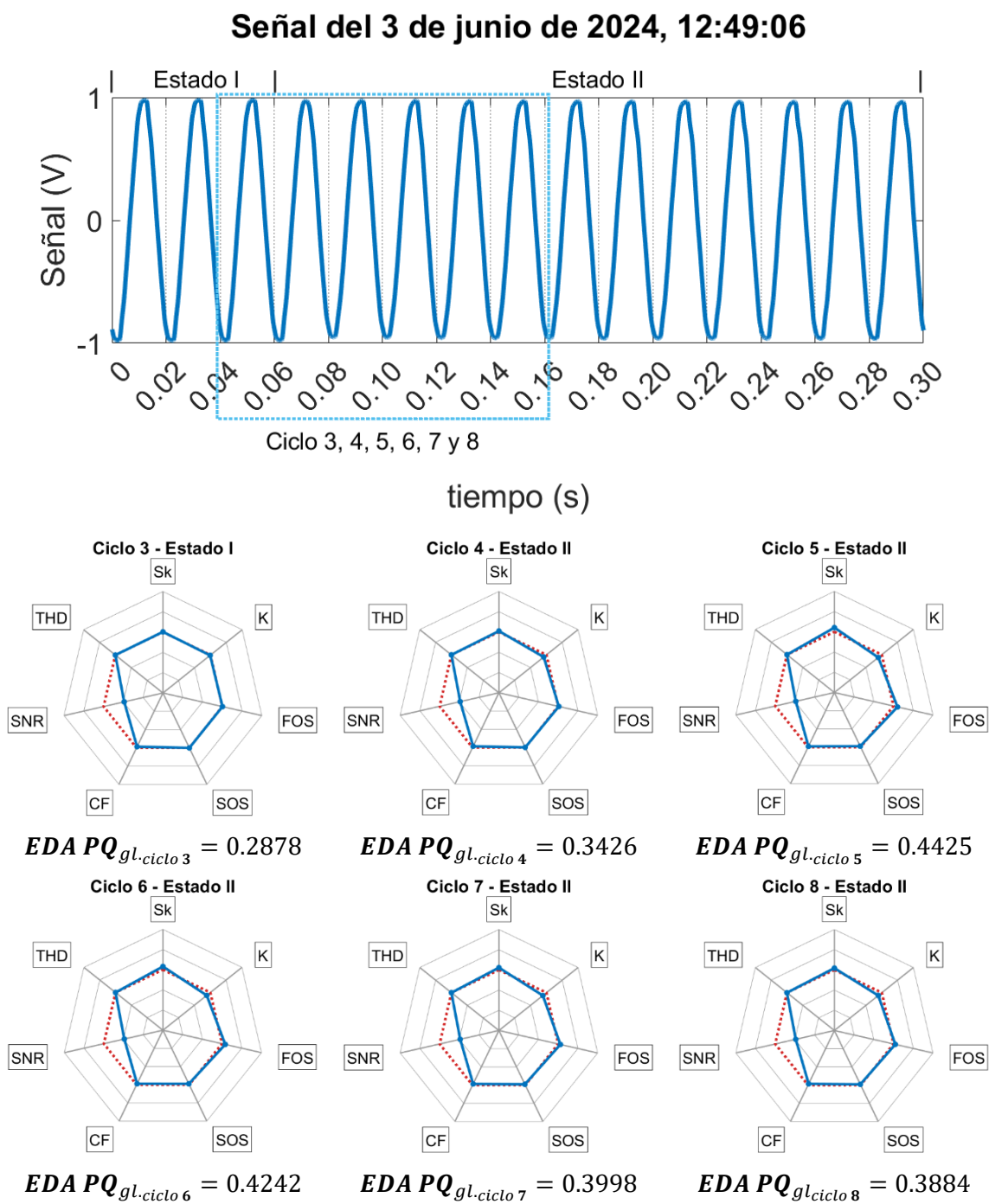


Figura 118. Gráficos radar e indicadores globales de la calidad de suministro de la señal de las 12:49:06 del 03/06/2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

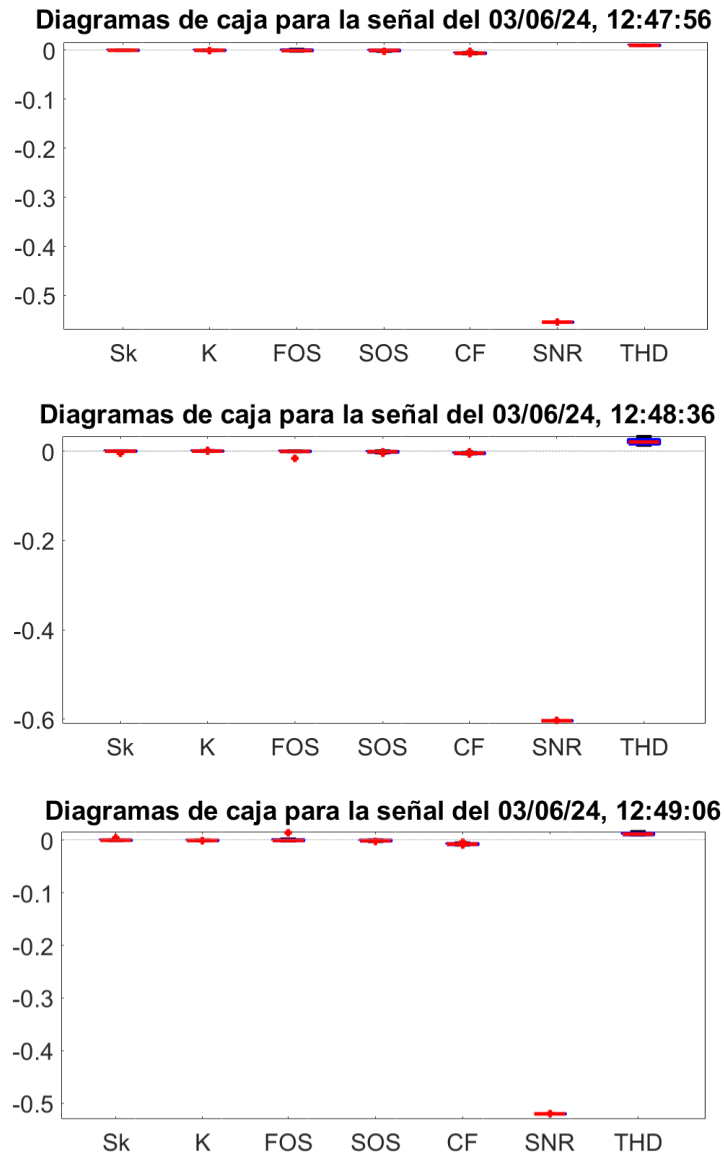


Figura 119. Diagrama de caja adaptado de las señales de las reales con desequilibrios de la tensión de la base de datos PAIDI-TIC-168.

Tabla 22. Valores adquiridos por cada indicador en las señales reales con desequilibrios de la tensión de la base de datos PAIDI-TIC-168.

Señal	Ciclo	Indicador						
		Sk	K	FOS	SOS	CF	SNR	THD
Señal de las 12:47:56 del 03/06/2024	1	-0.0028	1.4967	-0.0012	0.3105	1.3805	36.9585	1.7906
	2	0.0095	1.4878	0.0127	0.2737	1.4025	36.9585	1.7906
	3	0.0173	1.4714	0.0116	0.2785	1.3880	36.9585	1.7906
	4	0.0121	1.4754	0.0086	0.2816	1.3829	36.9585	2.0626
	5	0.0081	1.4776	0.0061	0.2867	1.3800	36.9585	2.0626
	6	0.0054	1.4784	0.0043	0.2902	1.3765	36.9585	2.0626
Señal de las 12:48:36 del 03/06/2024	1	-0.0013	1.4959	-0.0007	0.3135	1.3798	37.4066	1.7759
	2	-0.0360	1.4766	-0.0205	0.2646	1.4116	37.4066	1.7759
	3	-0.0086	1.5649	-0.0092	0.2418	1.4562	37.4066	1.7759
	4	-0.0053	1.5522	-0.0077	0.2543	1.4340	37.4066	1.7759
	5	-0.0001	1.5449	-0.0044	0.2640	1.4202	37.4066	1.7759
	6	0.0023	1.5392	-0.0027	0.2694	1.4093	37.4066	2.3868
Señal de las 12:49:06 del 03/06/2024	3	0.0016	1.4966	0.0010	0.3141	1.3795	38.3840	2.5129
	4	0.0070	1.4741	0.0029	0.3071	1.3763	38.3840	2.5129
	5	0.0317	1.4666	0.0172	0.2836	1.3890	38.3840	2.5129
	6	0.0244	1.4653	0.0139	0.2857	1.3845	38.3840	2.5129
	7	0.0166	1.4657	0.0097	0.2880	1.3787	38.3840	2.5129
	8	0.0130	1.4661	0.0078	0.2894	1.3757	38.3840	2.5129

Un aspecto adicional que surge del análisis de esta base de datos y que requiere de un estudio más profundo es la detección de falsos positivos en los valores atípicos de los diagramas de caja. La tabla 19 ha mostrado que, en todos los tramos horarios, se han detectado señales con valores atípicos, que pueden corresponder a eventos, contradiciendo la localización de eventos determinada mediante del indicador global de la calidad de suministro.

Este comportamiento ha llevado a examinar la aparición de valores atípicos por señal, revelando que se producen *outliers* (excluyendo los valores atípicos del SNR) en todas las señales. Sin embargo, este resultado no coincide con la realidad de dichas señales eléctricas. Esto implica que la variación por ruido de al menos uno de los indicadores supera la estimada mediante las señales sintéticas de la base de datos *Machlev*.

Para cuantificar este fenómeno, se han recopilado las variaciones por ruido en estado I en la tabla 23 para las bases de datos #1 y #4. Al comparar ambas, se observa que los valores del factor de cresta en señales reales son, en todos los casos, inferiores a los límites considerados inicialmente.

Tabla 23. Comparativa de variación de los indicadores frente a ruido de las bases de datos *Machlev* y PAIDI-TIC-168.

Indicador	Base de datos <i>Machlev</i>		Base de datos PAIDI-TIC-168		¿Es necesario modificar los límites de <i>outliers</i> ?
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
<i>Skewness</i>	-0.0305	0.0280	-0.0084	0.0072	No
<i>Kurtosis</i>	1.4747	1.5303	1.4807	1.5078	No
Estadístico de quinto orden	-0.0171	0.0167	-0.0048	0.0042	No
Estadístico de sexto orden	0.2842	0.3552	0.2853	0.3471	No
Factor de cresta	1.4069	1.5236	1.3526	1.4042	<b>Sí</b>
THD	0.4803	1.3870	0.8867	4.4324	No <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pese a que se supera el valor máximo, en THD un valor atípico implica un THD superior al 8%, cifra que no se alcanza en ningún caso.

Como confirmación de este extremo, se seleccionó una señal de la base de datos #4 en la que, según el valor del indicador global, no hay eventos presentes. Los diagramas de caja correspondientes, mostrados en la figura 120 excluyendo el SNR, confirman que, efectivamente, los valores atípicos que dictaminan una falsa detección de eventos se asocian exclusivamente al factor de cresta.

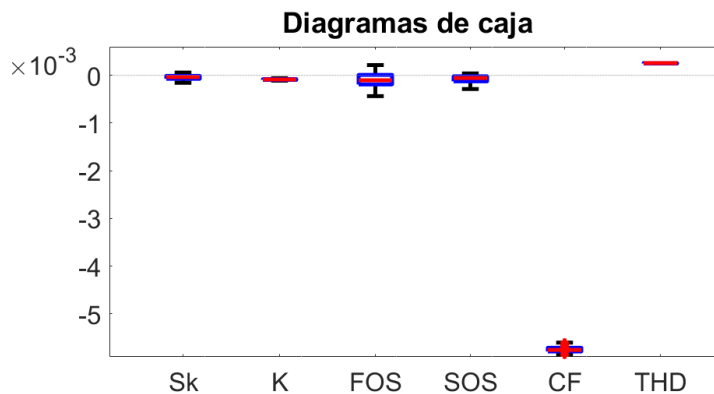
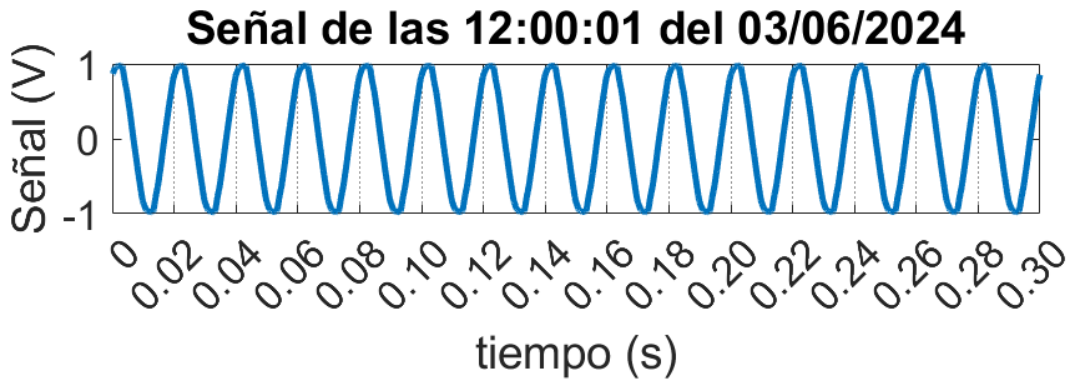


Figura 120. Diagrama de caja adaptado de la señal real sin eventos de las 12:00:01 del 3 de junio de 2024 de la base de datos PAIDI-TIC-168.

Para abordar esta problemática, se decidió ajustar los límites a partir de los cuales se trazan valores atípicos para el factor de cresta, por lo que: si, inicialmente el límite inferior era de  $-0.0018659$ , el nuevo límite es  $-0.0099984$ , manteniendo  $0.017055$  como el límite superior (valores obtenidos tras aplicar la ecuación 22). Este ajuste reduciría la tasa de falsos positivos en la base de datos #4, aunque a costa de peyorar la tasa de detección de eventos como los *spikes* en señales de otras bases de datos, tal y como detalla la tabla 24. Es importante señalar que, para estipular la tasa de detección en la base de datos #4, se consideran únicamente las señales en las que se han localizado eventos a través del indicador global.

Tabla 24. Tasa de detección de eventos y falsos positivos de los diagramas de caja adaptados con nuevos límites por tipo de evento y base de datos.

Base de datos	Tipo de evento/Lote de señales	Nº de señales	Tasa de detección (%)	Tasa de falsos positivos
Base de datos Machlev	<i>Flicker</i>	100	<b>100</b>	No aplica
	Interrupciones	100	<b>100</b>	No aplica
	<i>Notches</i>	100	<b>27</b>	No aplica
	<i>Sags</i>	100	<b>100</b>	No aplica
	<i>Spikes</i>	100	<b>62</b>	No aplica
	<i>Swells</i>	100	<b>100</b>	No aplica
	Transitorios impulsivos	100	<b>46</b>	No aplica
	Transitorios oscilatorios	100	<b>98</b>	No aplica
	Armónicos	315	<b>100</b>	No aplica
	Armónicos con <i>sag</i>	100	<b>100</b>	No aplica
	Armónicos con <i>swell</i>	100	<b>100</b>	No aplica
Base de datos Preclasificados simples	Interrupciones	63	<b>100</b>	No aplica
	<i>Sags</i>	567	<b>100</b>	No aplica
	<i>Swells</i>	4	<b>100</b>	No aplica
Base de datos IEEE DataPort	Transitorios impulsivos	42	<b>4.76</b>	No aplica
	<i>Sags</i>	26	<b>100</b>	No aplica
Base de datos PAIDI-TIC-168	16/06/21 → 16:00:00 – 16:04:59	300	No aplica	0.00
	16/06/21 → 16:05:00 – 16:09:59	300	No aplica	0.00
	16/06/21 → 16:10:00 – 16:14:59	300	No aplica	0.00
	16/06/21 → 16:15:00 – 16:19:59	300	No aplica	0.00
	16/06/21 → 16:20:00 – 16:24:59	300	No aplica	0.00
	16/06/21 → 16:25:00 – 16:29:59	300	No aplica	0.00

Capítulo 4. Análisis de datos a través de gráficos radar y diagramas de caja

Tabla 24. Tasa de detección de eventos y falsos positivos de los diagramas de caja adaptados con nuevos límites por tipo de evento y base de datos (cont.).

Base de datos	Tipo de evento/Lote de señales	Nº de señales	Tasa de detección (%)	Tasa de falsos positivos
Base de datos PAIDI-TIC-168	16/06/21 → 16:30:00 – 16:34:59	300	No aplica	0.00
	16/06/21 → 16:35:00 – 16:39:59	300	No aplica	0.00
	16/06/21 → 16:40:00 – 16:44:59	300	<b>100</b>	0.00
	16/06/21 → 16:45:00 – 16:49:59	300	No aplica	0.00
	16/06/21 → 16:50:00 – 16:54:59	300	No aplica	0.00
	16/06/21 → 16:55:00 – 16:59:59	300	No aplica	0.00
	03/06/24 → 12:00:00 – 12:04:59	300	<b>0.00</b>	0.00
	03/06/24 → 12:05:00 – 12:09:59	300	No aplica	0.00
	03/06/24 → 12:10:00 – 12:14:59	300	No aplica	0.00
	03/06/24 → 12:15:00 – 12:19:59	300	No aplica	0.00
	03/06/24 → 12:20:00 – 12:24:59	300	No aplica	0.00
	03/06/24 → 12:25:00 – 12:29:59	300	No aplica	0.00
	03/06/24 → 12:30:00 – 12:34:59	300	No aplica	0.00
	03/06/24 → 12:35:00 – 12:39:59	300	No aplica	0.00
	03/06/24 → 12:40:00 – 12:44:59	300	<b>100</b>	0.00
	03/06/24 → 12:45:00 – 12:49:59	300	<b>100</b>	0.00
	03/06/24 → 12:50:00 – 12:54:59	300	No aplica	0.00
	03/06/24 → 12:55:00 – 12:59:59	300	<b>100</b>	0.00
	05/09/24 → 14:00:00 – 14:04:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:05:00 – 14:09:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:10:00 – 14:14:59	300	<b>66.67</b>	0.00
	05/09/24 → 14:15:00 – 14:19:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:20:00 – 14:24:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:25:00 – 14:29:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:30:00 – 14:34:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:35:00 – 14:39:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:40:00 – 14:44:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:45:00 – 14:49:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:50:00 – 14:54:59	300	No aplica	0.00
	05/09/24 → 14:55:00 – 14:59:59	300	No aplica	0.00

# Capítulo 5. Árbol de decisiones

## 5. Árbol de decisiones

Mediante el análisis de las cuatro bases de datos disponibles, el gráfico radar y el indicador global de la calidad de suministro han demostrado su valía para el análisis y detección de eventos de la calidad de suministro en señales eléctricas, con detección del 100% en señales sintéticas preclasificadas, 100% en señales reales con *sags* y 21.43% en señales reales con transitorios impulsivos, superando la detección de eventos con herramientas tradicionales como los diagramas de caja en transitorios impulsivos, de los que sólo se localizaron el 4.76%, así como mejorando la localización de eventos en señales sin clasificar. Sin embargo, y pese a que los patrones de comportamiento de los gráficos radar permiten intuir en algunos casos qué tipo de evento ha sido localizado, resulta interesante para el análisis la incorporación de una técnica de inteligencia artificial que de forma automática clasifique los eventos localizados en la señal.

Es por ello por lo que se decide desarrollar un árbol de decisiones complementario a las herramientas propuestas, ya que se trata de una técnica de inteligencia artificial con una implementación sencilla, eficiente para aplicaciones a tiempo real y robusta frente al ruido [126].

### 5.1. Diseño del árbol de decisiones. Sentencias y orden.

En base a los comportamientos observados en los indicadores para la base de datos *Machlev*, se establecen una serie de sentencias para el árbol de decisiones, mostradas a continuación. El orden de aparición de estas ha sido objeto de estudio, seleccionándose finalmente, a base de prueba y error, aquel que optimizara la clasificación de los eventos. Para ello, se han seguido dos criterios:

- **Criterio 1: Relación de mejora.** Cada vez que se efectúa un cambio en el orden de las sentencias del árbol de decisiones, se calcula la tasa de correcta clasificación con todas las señales de la base de datos *Machlev*. Habitualmente, los cambios en el orden afectan de forma positiva a la clasificación de algunos eventos, pero a cambio peyoran la tasa de clasificación exitosa de otros eventos. En ese caso, se compara el porcentaje de mejora de la detección con el porcentaje de pérdida de clasificación, y si el balance resulta positivo, se integra dicho cambio en el algoritmo. Por ejemplo, si efectuando un cambio, se mejora la detección de *notches* en un 5% empeorando la detección de *sags* en un 1%, la relación de mejora es positiva (5 a 1) y, por lo tanto, se aplica el cambio de orden.

- **Criterio 2: Frecuencia del evento.** En caso de que la relación de mejora no sea diferenciadora, porque el balance global de mejora de clasificación frente al empeoramiento sea el mismo, se prioriza mejorar la detección de aquel evento cuya aparición sea más frecuente en la red eléctrica. Volviendo al ejemplo anterior, si efectuando un cambio en el orden de las sentencias se mejorase la tasa de detección de *notches* en un 1%, perjudicando con ello también en un 1% la detección de *sags*, entonces el cambio no se efectuaría, puesto que los eventos de *sags* son los más frecuentes en señales reales, tal y como respalda la revisión bibliográfica inicial y como se ha confirmado con el análisis de las bases de datos #3 y #4.

En base a estos criterios, las sentencias del árbol de decisiones se han establecido en el siguiente orden:

SENTENCIA 1: ¿Los valores de los estadísticos de orden superior y del factor de cresta varían ciclo a ciclo, tanto respecto al valor nominal como a los valores anteriores y posteriores del indicador?

SÍ: El algoritmo devuelve el mensaje “Se ha detectado un *flicker*”.

NO: Se continúa con la Sentencia 2.

Siguiendo los comportamientos obtenidos por evento de la base de datos *Machlev*, los *flickers* son los únicos eventos que implican una variación ciclo a ciclo de los indicadores, adquiriendo valores distintos al nominal.

SENTENCIA 2: ¿Las variaciones respecto al valor nominal de los estadísticos de orden superior y el factor de cresta son periódicas?

SÍ: Se continúa con la Sentencia 3.

NO: Se continúa con la Sentencia 4.

Eventos de la base de datos como *notches* o *spikes* tienen la particularidad de que el evento se repite de forma periódica, ciclo a ciclo, con la misma magnitud, lo que conlleva a que los indicadores permanezcan en un estado III constante, con valores en los estadísticos de orden superior y el factor de cresta distintos al nominal.

SENTENCIA 3: ¿Es el valor medio de la señal por semiciclo mayor que el valor nominal?

SÍ: El algoritmo devuelve el mensaje “Se ha detectado un *spike*”.

NO: El algoritmo devuelve el mensaje “Se ha detectado un *notch*”.

Para el desarrollo de esta sentencia, a través de la que se distingue entre *spike* y *notch*, intervienen varios factores:

- Para empezar, ambos eventos comparten un comportamiento similar: generan una alteración instantánea en la señal, que se repite en el mismo punto exacto de la forma de onda durante todos los ciclos.
- Dado que el punto del ciclo donde ocurre el evento es constante, cada ciclo puede dividirse en dos semiciclos para su análisis, en lugar de estudiar el ciclo completo. Esto permite identificar en qué semiciclo se encuentra el evento, ya que sólo el semiciclo sin perturbaciones devolverá valores nominales. Sin embargo, es necesario determinar si los valores nominales de los indicadores por semiciclo coinciden con los del ciclo completo.

Tras realizar análisis comparativos, se observa que, si bien algunos de los estadísticos de orden superior mantienen su valor nominal en ciertas situaciones, el factor de cresta es el único indicador que siempre conserva su valor nominal de 1.4142, independientemente del punto de inicio del semiciclo en la forma de onda. Por lo tanto, en el semiciclo que contiene el evento, el valor del factor de cresta distará del nominal, lo que permite localizar la perturbación.

- Una vez localizado el semiciclo con el evento, se comparan los valores medios de la forma de onda entre ambos semiciclos. Si el valor medio del semiciclo con evento es inferior al del semiciclo sin evento, el evento detectado es un *notch*; en caso contrario, se ha detectado un *spike*.

SENTENCIA 4: ¿Los estadísticos de orden superior y el factor de cresta difieren de sus valores nominales durante los mismos ciclos?

SÍ: Se continúa con la Sentencia 5.

NO: Se continúa con la Sentencia 6.

Una vez descartado que el posible evento se trate de *flicker*, *notch* o *spike*, en caso de que efectivamente se haya localizado un evento en la señal, este podría ser una variación del RMS (interrupción, *sag* o *swell*), armónicos, simples o complejos, o transitorios. En el caso de los armónicos, se ha comprobado que la *skewness* y el estadístico de quinto orden no se ven alterados, por lo que los indicadores medidos por ciclo (*skewness*, *kurtosis*, estadístico de quinto orden, estadístico de sexto orden y factor de cresta) no presentan el mismo número de ciclos con valores distintos al nominal. Asimismo, para eventos con variaciones del RMS, durante los ciclos en estado III el sexto orden es el único de estos indicadores que dista del valor nominal. Por lo tanto, los únicos eventos en los que los indicadores medidos por ciclo varían durante los mismos ciclos, son los transitorios.

SENTENCIA 5: ¿La variación de los estadísticos de orden superior y el factor de cresta respecto al valor nominal dura únicamente un ciclo?

SÍ: El algoritmo devuelve el mensaje “Se ha detectado un transitorio impulsivo”.

NO: El algoritmo devuelve el mensaje “Se ha detectado un transitorio oscilatorio”.

Puesto que a esta sentencia solo se accede si previamente se ha comprobado que los indicadores medidos por ciclo varían durante los mismos ciclos, y por lo tanto se trata de eventos transitorios, en esta sentencia se establece una diferenciación en función de la duración, en ciclos, del evento: si el evento dura más de un ciclo, indudablemente se trata de un transitorio oscilatorio, mientras que, si la duración es de solo un ciclo, se considera que el evento es un transitorio impulsivo.

SENTENCIA 6: ¿Presentan la *skewness*, la *kurtosis*, el estadístico de quinto orden y el factor de cresta valores transicionales?

SÍ: Se continúa con la Sentencia 7.

NO: Se continúa con la Sentencia 8.

En esta sentencia, se comprueba si el comportamiento de los citados estadísticos corresponde al de eventos con variación del RMS, presentando variaciones respecto al valor nominal en estado II y volviendo al funcionamiento nominal durante el estado III. En

esta sentencia no se considerarían eventos complejos de armónicos con *sag* o armónicos con *swell*, puesto que, durante los estados IIIa y IIIb, la *kurtosis* y el factor de cresta varían del valor nominal debido a la presencia armónica.

SENTENCIA 7: En algún ciclo, ¿es el estadístico de sexto orden superior al valor nominal?

SÍ: El algoritmo devuelve el mensaje “Se ha detectado un *swell*”.

NO: Se continúa con la Sentencia 9.

Una vez concluida la presencia de valores transicionales, el estadístico de sexto orden es el mejor indicador para diferenciar entre eventos con variación del RMS, pudiendo tratarse de un *swell*, en caso de que se supere el valor nominal en el estado III, o de un *sag* o interrupción, en el caso de que se obtenga un valor inferior al nominal en dicho estado.

SENTENCIA 8: ¿Los indicadores permanecen siempre en sus valores nominales?

SÍ: El algoritmo devuelve el mensaje “No se ha detectado ningún evento”.

NO: Se continúa con la Sentencia 10.

Con esta sentencia, se concluyen qué señales funcionan en su totalidad bajo estado I y, por lo tanto, no contienen eventos de la calidad de suministro.

SENTENCIA 9: En algún ciclo, ¿el valor del estadístico de sexto orden es mayor que el valor diferenciador?

SÍ: El algoritmo devuelve el mensaje “Se ha detectado un *sag*”.

NO: El algoritmo devuelve el mensaje “Se ha detectado una interrupción”.

Puesto que a esta sentencia se llega una vez confirmada la presencia de valores transicionales y descartados los *swells*, los eventos posibles son *sag* e interrupción. El valor diferenciador, tal y como se definió en el capítulo 4, es un valor límite que permite distinguir, en estado III, entre ambos eventos: si el valor obtenido en el estadístico de sexto

orden es superior al valor diferenciador, el evento es un *sag*, en caso contrario, se trata de una interrupción.

SENTENCIA 10: ¿El valor del THD es superior al 8%?

SÍ: Se continúa con la Sentencia 11.

NO: El algoritmo devuelve el mensaje “Se ha detectado un evento de tipo desconocido”.

Esta sentencia se alcanza si se descarta la presencia de valores transicionales, pero hay indicadores que varían de su valor nominal. Serviría, por tanto, para clasificar eventos con armónicos, ya sean simples o complejos. En el caso de que no se detecte THD por encima del 8%, el comportamiento del evento no coincidiría con ninguno de los patrones establecidos, por lo que se clasifica como “evento de tipo desconocido”.

SENTENCIA 11: ¿Los valores de la *skewness* y el estadístico de quinto orden se mantienen toda la señal en el valor nominal?

SÍ: El algoritmo devuelve el mensaje “Se han detectado armónicos”.

NO: Se continúa con la Sentencia 12.

Como han demostrado los análisis, la *skewness* y el estadístico de quinto orden son inmunes a los armónicos. Por lo tanto, variaciones respecto al valor nominal de estos estadísticos implica que el evento detectado (que, por la sentencia anterior, supone presencia armónica con THD mayor al 8%) es complejo y formado por la combinación de armónicos y otro evento. Si no existen dichas variaciones, entonces se considera que el evento detectado son armónicos simples.

SENTENCIA 12: ¿El valor del estadístico de sexto orden en estado IIIb supera el valor promedio del estadístico en la señal?

SÍ: El algoritmo devuelve el mensaje “Se han detectado armónicos con *swell*”.

NO: El algoritmo devuelve el mensaje “Se han detectado armónicos con *sag*”.

Una vez de alcanza esta sentencia, se concluye que el evento es una yuxtaposición de armónicos con un evento de variación del RMS, ya sea *sag* o *swell*. Para el segundo caso, durante el estado IIIb el estadístico de sexto orden alcanzará su valor máximo. Por lo tanto, si se compara el valor del estadístico en estado IIIb con el promedio de todos los valores obtenidos por ciclo del estadístico de sexto orden, el valor durante el estado IIIb será indudablemente mayor, con lo que se confirmaría la presencia de un *swell*. En el caso contrario, el evento sería un *sag*.

El esquema del árbol de decisiones que recoge todas estas sentencias se muestra en la figura 121. En él, además, se ejemplifica el recorrido necesario para clasificar tres eventos: un *swell* con armónicos, cuya ruta se ha marcado en rojo, un transitorio oscilatorio, marcado en azul, y un *notch*, marcado en verde. Las señales correspondientes, de la base de datos #1, se muestran en las figuras 122, 123 y 124, donde se detallan también el valor de los indicadores por ciclo.

Para los armónicos con *swell*, en la figura 122, los indicadores no varían en cada ciclo (respuesta “No” a la sentencia 1) y, ante la presencia de estados distintos (II, IIIa y IIIb) las variaciones de estos no son periódicas (respuesta “No” a la sentencia 2). Puesto que la *skewness* y el estadístico de quinto orden son inmunes a los armónicos, en estados IIIa y IIIb conservan el valor nominal, pero la *kurtosis*, el factor de cresta y el estadístico de sexto orden difieren de su valor nominal durante toda la señal, no mostrando con ello el comportamiento asociado a los valores transicionales (respuesta “No” a las sentencias 4, 6 y 8). Ante la presencia armónica, el valor de THD supera el 8% (respuesta “Sí” a la sentencia 10) y, por el *swell*, los valores de la *skewness* y el estadístico de quinto orden varían del valor nominal en estado II (respuesta “No” a la sentencia 11). Finalmente, el valor del estadístico de sexto orden supera el promedio de la señal durante el estado IIIb (respuesta “Sí” a la sentencia 12).

Para el transitorio oscilatorio, en la figura 123, los indicadores no varían en cada ciclo (respuesta “No” a la sentencia 1) y, ante la presencia de estados I y II, las variaciones de estos no son periódicas (respuesta “No” a la sentencia 2). En este caso, los indicadores sí varían durante el mismo número de ciclos (respuesta “Sí” a la sentencia 4): cuatro, específicamente (respuesta “No” a la sentencia 5).

Para el *notch*, en la figura 124, los indicadores no varían en cada ciclo (respuesta “No” a la sentencia 1). En este caso, las variaciones sí son periódicas, estando todos los ciclos

de señal en estado III (respuesta “Sí” a la sentencia 2). Finalmente, el valor medio de la señal en cada primer semiciclo es inferior al valor medio del segundo semiciclo, en el que el factor de cresta coincide con su valor nominal (respuesta “No” a la sentencia 3).

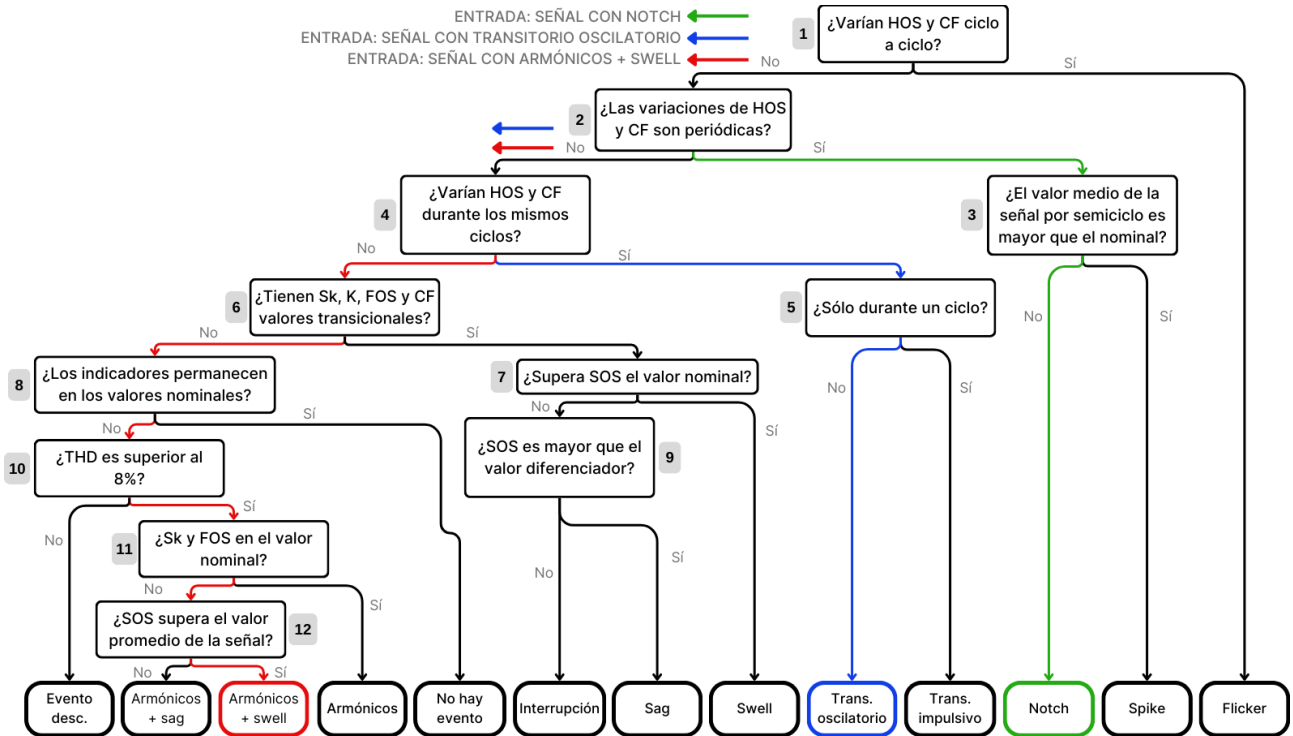


Figura 121. Esquema del árbol de decisiones para la clasificación de eventos de la calidad del suministro eléctrico.

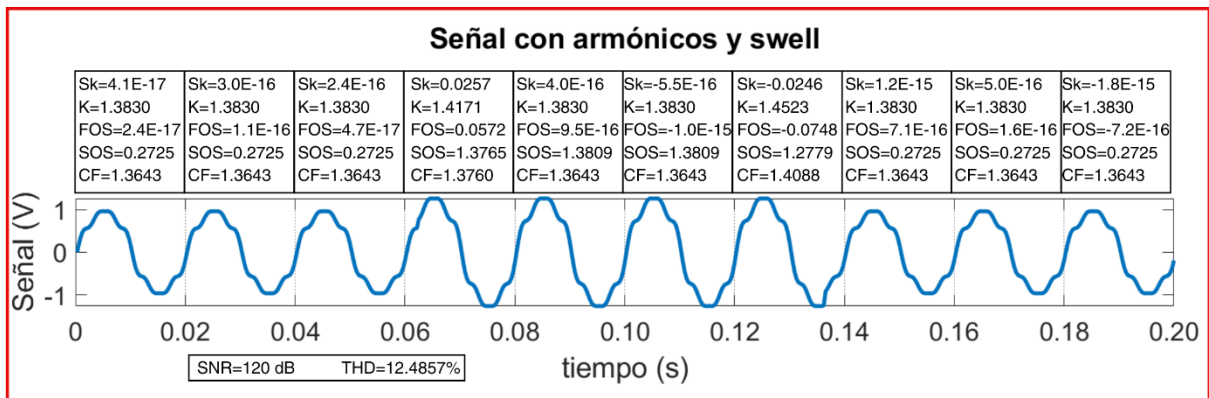


Figura 122. Evento de armónico con *swell* incluido en la figura 121 (en rojo).

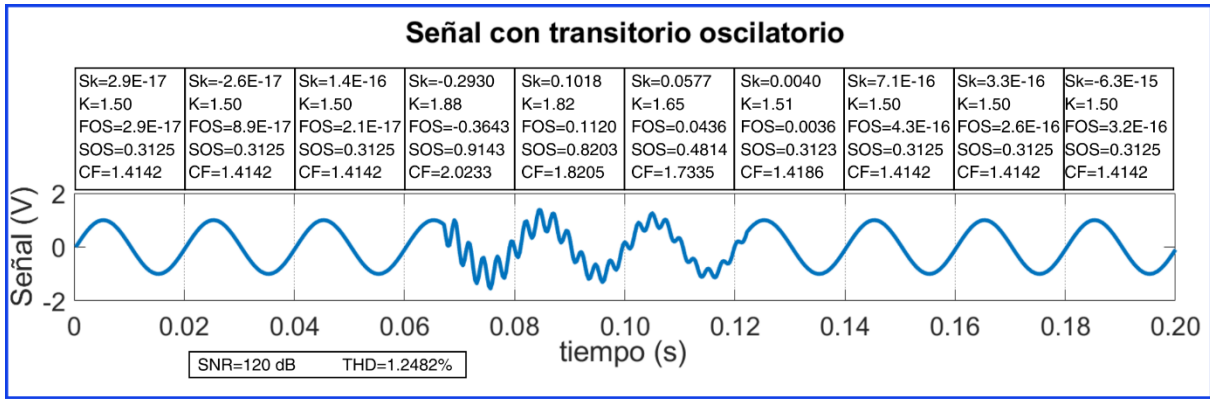


Figura 123. Evento de transitorio oscilatorio incluido en la figura 121 (en azul).

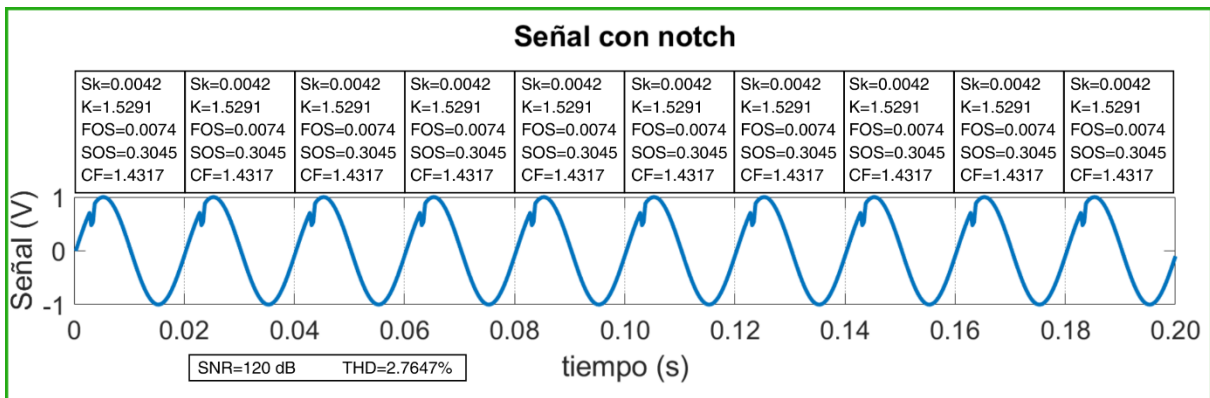


Figura 124. Evento de *notch* incluido en la figura 121 (en verde).

## 5.2. Validación del árbol de decisiones

Una vez diseñado el árbol de decisiones, se procesan todas las señales sintéticas contenidas en las bases de datos #1 y #2. En la tabla 25 se muestra el porcentaje de detección para cada tipo de evento y para cada base de datos tanto individual como conjuntamente. Tras analizar todas las señales con eventos de ambas bases de datos, se concluye que el 100% de los eventos son detectados, ya que en ningún caso el algoritmo informa de la no detección de eventos. Además, se alcanzan tasas de éxito en la clasificación de perturbaciones de entre el 90% y el 100%.

También se ha enfatizado como una columna independiente en la tabla 25 el porcentaje de señales categorizadas como “evento desconocido”, representando esta categoría un comportamiento inesperado en las señales que no se ajusta a los patrones de comportamiento establecidos. Dentro de esta categoría se encontrarían también aquellas señales que, llegada a la sentencia 10, no cumplan el requisito mínimo de 10 ciclos.

Para comprobar la velocidad computacional del algoritmo, se ha obtenido para cada conjunto de datos el tiempo de ejecución cada 1000 puntos de medición de señal. Mientras que el tiempo promedio de ejecución de las señales en la base de datos #1 es de 1.20 segundos cada 1000 puntos de medida, dicho valor desciende hasta 0.36 segundos para la base de datos #2.

Tabla 25. Precisión del árbol de decisiones en la clasificación de eventos de la calidad del suministro.

<b>Evento</b>	<b>Tasa de éxito en la base de datos #1 (%)</b>	<b>Tasa de éxito en la base de datos #2 (%)</b>	<b>Tasa de éxito en ambas bases de datos (%)</b>	<b>Tasa de clasificación como “evento desconocido”</b>
<i>Flickers</i>	100.00	--	100.00	0.00
Armónicos	100.00	--	100.00	0.00
Transitorios impulsivos	99.00	96.25	97.78	2.22
Interrupción	91.00	90.48	90.80	5.00
<i>Notches</i>	90.00	--	90.00	0.00
Transitorios oscilatorios	90.00	--	90.00	0.00
<i>Sags</i>	94.87	91.20	91.90	7.29
<i>Spikes</i>	98.00	--	98.00	0.00
<i>Swells</i>	91.00	100.00	91.35	0.00
Armónicos con <i>sag</i>	98.00	--	98.00	0.00
Armónicos con <i>swell</i>	100.00	--	100.00	0.00
Sin eventos	100.00	--	100.00	0.00

Capítulo 6.  
Discusión y  
conclusiones

## 6. Discusión y conclusiones

En este capítulo se presentan los aspectos más relevantes derivados del desarrollo de esta investigación. La discusión se centra en analizar críticamente los resultados obtenidos, evaluando sus implicaciones, beneficios y limitaciones en el contexto del análisis de la calidad del suministro eléctrico. Este análisis permite comparar las contribuciones realizadas en relación con los métodos tradicionales y destacar las áreas donde se aportan soluciones innovadoras.

Posteriormente, las conclusiones sintetizan los principales hallazgos de la tesis, subrayando su impacto en el ámbito de la calidad del suministro eléctrico y planteando posibles aplicaciones prácticas. Asimismo, se proponen líneas de investigación futuras que permitan extender y mejorar las metodologías presentadas en este trabajo.

### 6.1. Discusión

El presente trabajo propone un enfoque integral para el análisis de la calidad del suministro eléctrico, desarrollando herramientas visuales e indicadores globales que amplían las capacidades de los métodos tradicionales. Los resultados obtenidos evidencian tanto los beneficios como las limitaciones del sistema propuesto, considerando su desempeño en señales sintéticas y reales.

Por una parte, los patrones de comportamiento de los gráficos radar y el indicador global de la calidad del suministro permiten detectar (no así clasificar) en el 100% de las señales sintéticas la presencia de un evento. Sin embargo, en señales reales, donde la distorsión y el ruido de 40 dB son factores significativos, la tasa de detección de eventos mantiene un 100% para *sags* y desciende a 21.43% para transitorios impulsivos de la base de datos #3, porcentaje que aumenta al 29.79% si se consideran todos los transitorios impulsivos reales, provenientes de las bases de datos #3 y #4. A pesar de esta variabilidad, los resultados obtenidos siguen siendo superiores a los de métodos tradicionales como los diagramas de caja, en lo que la tasa de detección de transitorios impulsivos es meramente del 4.76%, destacando entonces la superioridad del sistema propuesto para la detección de eventos híbridos y no lineales. Además, el uso de gráficos radar permite localizar el ciclo de la señal donde ocurre o comienza/acaba el evento, siempre que la señal dure al menos 10 ciclos, ofreciendo por tanto una precisión temporal de 0.02 segundos.

Ahora bien, esa frecuencia de análisis (1 ciclo cada 0.02 segundos) únicamente es funcional en un análisis de la señal eléctrica a posteriori, y no en una medición a tiempo real, puesto que, desde el punto de vista cognitivo, resulta excesiva e incluso contraproducente para el usuario u operador de red. Por ello, cuando se estudia la herramienta con un enfoque de monitoreo de la calidad de suministro a tiempo real, resultaría más práctico trabajar con generación de gráficos de frecuencias en torno a 1 radar cada dos segundos, analizándose para ello 100 ciclos de señal y mostrándose finalmente el ciclo más alterado de esa ventana temporal. De esta forma, se lograría una visualización comprensible y útil para el usuario sin renunciar a la capacidad de respuesta casi en tiempo real. Además, este ajuste de la herramienta sería totalmente compatible con almacenar toda la información obtenida de la señal ciclo a ciclo, tanto para el análisis detallado de cada radar de forma off-line, como para la generación de alertas para el operador especificando, por ejemplo, cuántos ciclos se han visto alterados por un posible evento.

Un aspecto relevante de esta investigación es la incorporación de un árbol de decisiones que complementa las herramientas visuales al proporcionar un sistema cuantitativo para clasificar eventos. Este enfoque supera las limitaciones de los métodos puramente visuales, como los diagramas de caja y, en algunos estados y eventos específicos, incluso los gráficos radar, que, aunque útiles para identificar la presencia de eventos, en ocasiones no facilitan la diferenciación entre ellos mediante una simple observación. El árbol de decisiones diseñado, sin embargo, permite clasificar eventos con una tasa de éxito que oscila entre el 90% y el 100%. En investigaciones futuras, la incorporación de bases de datos reales con mayor diversidad de tipos de evento y rangos de ruido gaussiano permitiría integrar la clasificación de eventos reales de la calidad del suministro, construyendo el algoritmo a partir del valor del SNR medido para la señal y decretando, a partir de este, los umbrales de variación de los indicadores que determinan la presencia de un evento o mero ruido.

Pese a las alteraciones inducidas por el ruido y la distorsión, los patrones de comportamiento de los gráficos radar permanecen distinguibles. Esto reafirma la robustez del sistema desarrollado, especialmente en escenarios marcados por cargas no lineales y comportamientos no gaussianos. Una posible mejora para optimizar la simplicidad del sistema podría ser la incorporación de un sistema de códigos de color en los gráficos

radar, donde el área del heptágono cambie a rojo al detectar un evento, permitiendo con ello una identificación rápida y visual.

Finalmente, la combinación de estadísticos de orden superior, incluyendo el quinto y sexto orden, menos habituales para el estudio de la calidad del suministro, y junto con indicadores tradicionales como el factor de cresta y el THD, ha demostrado ser clave para caracterizar eventos complejos. Este enfoque no solo amplía el conocimiento existente en el ámbito de la *power quality*, respecto a estos indicadores, sino que también destaca su utilidad en el análisis de perturbaciones de la calidad del suministro.

## 6.2. Conclusiones

Esta tesis doctoral parte de la hipótesis inicial de que, por un lado, un usuario de la red – como puede ser un operador de planta – no debería necesitar conocimientos elevados y de terminología específica en el ámbito de la calidad de suministro para evaluar y conocer correctamente el estado de la red eléctrica; y, por otro, una herramienta visual adecuada puede ayudar a paliar dicha ausencia de conocimientos específicos.

En este sentido, se propone un conjunto de indicadores mínimo para el análisis de la calidad del suministro eléctrico que, combinados ante determinados tipos de evento y aplicados a ciertas herramientas visuales innovadoras, constituye una alternativa eficaz para representar visualmente el estado de la red. Este enfoque resulta especialmente útil en redes eléctricas con alta penetración de energías renovables, como la fotovoltaica o la eólica, donde la intermitencia y variabilidad de la generación puede provocar fenómenos abruptos, como alteraciones de la frecuencia en la red, y que pueden conllevar a la aparición de eventos complejos o incluso la desconexión de la propia red. Para ello, se ha desarrollado y validado un enfoque completo y multidimensional para el análisis de la calidad del suministro eléctrico, acompañando el conjunto de indicadores propuesto de la creación de un indicador global de la calidad del suministro y técnicas de inteligencia artificial. Estas herramientas han demostrado ser altamente efectivas en la detección y clasificación de eventos eléctricos en señales tanto sintéticas como reales, superando las capacidades de los métodos tradicionales.

En el estado del arte [127], se ha concluido que los estadísticos de orden superior, cuya investigación es incipiente, especialmente en el caso de estadísticos de quinto orden en

adelante, denotan menor sensibilidad al ruido que otros indicadores más tradicionales como el factor de cresta. Esta afirmación se ha validado durante el diseño del gráfico radar (Apartado 3.4).

Entre los resultados más relevantes, se destaca que las herramientas desarrolladas lograron detectar y analizar eventos sintéticos con una precisión del 100%, y eventos reales con precisiones del 100% para *sags*, tanto simples como complejos, y del 29.79% en transitorios impulsivos, puesto que estos eventos podían pasar desapercibidos entre el ruido de la señal. Aun así, estas cifras demuestran su potencial para ser aplicado en redes eléctricas reales, caracterizadas por cargas no lineales y comportamientos complejos, tal y como se ha demostrado con la detección de eventos complejos de *sags* con armónicos y *sags* con *sags*. Además, estas herramientas han demostrado un rendimiento superior al de los diagramas de caja en la detección de eventos como transitorios impulsivos, tanto reales como sintéticos, *notches*, transitorios oscilatorios y *spikes*. En concreto, y pese a que los diagramas de caja han sido adaptados para focalizar la detección de eventos, las tasas de detección son un 54% más altas para los transitorios impulsivos sintéticos, un 19.15% más altas para los transitorios impulsivos reales, un 73% para los *notches*, un 2% para los transitorios oscilatorios, y un 38% para los *spikes*. Estos datos han quedado expuestos en las publicaciones derivadas de la tesis [128], [129], [130].

El análisis detallado de los indicadores propuestos ha permitido establecer valores nominales para los estadísticos de quinto y sexto orden, demostrando la utilidad del sexto orden como indicador clave para detectar eventos de variación de RMS, como interrupciones, *sags* y *swells*, y del quinto orden para localizar estados II en las señales con la ventaja de ser invariable ante armónicos, hecho que, combinado con la variación de la *kurtosis* y el THD ha facilitado la detección de eventos armónicos simples y complejos. Además, el factor de cresta, pese a haber demostrado ser más sensible e inestable frente al ruido que otros indicadores no tradicionales permite, en el árbol de decisiones, la diferenciación entre *notches* y *spikes* al ser el único indicador que cumple la condición de conservar su valor nominal para medio ciclo de la señal independientemente del punto de comienzo del medio ciclo, tal y como se expone en [131].

Finalmente, el uso de sendas herramientas – gráficos radar, indicador global y árbol de decisiones – ha permitido distinguir y clasificar eventos eléctricos, tarea que los diagramas de caja no logran realizar con igual eficacia. Con las herramientas propuestas, no solo se facilita la interpretación de los resultados, sino que también se abren nuevas

posibilidades para el monitoreo en tiempo real de redes eléctricas, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas, que pueden abarcar desde la implementación de sistemas de vigilancia continua de la red en centros de control de compañías distribuidoras, hasta su integración en instrumentación con sistemas embebidos para la monitorización distribuida en campo. Además, el sistema de medición propuesto puede servir de soporte para operadores no expertos incorporando la generación de alertas inteligentes orientadas al mantenimiento predictivo, e incluso usarse como herramienta de auditoría de calidad del suministro en entornos regulados o industriales.

## Referencias

- [1] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, “¿Qué es el Protocolo de Kyoto?” Accessed: Aug. 19, 2024. [Online].
- [2] Comisión Europea, “Libro Verde: Estrategia europea para una energía sostenible, competitiva y segura,” 2006. Accessed: Aug. 19, 2024. [Online].
- [3] European Commission, “REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition,” 2022. Accessed: Aug. 19, 2024. [Online].
- [4] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Gobierno de España, “El comercio de derechos de emisión.” Accessed: Aug. 19, 2024. [Online].
- [5] S. Soeiro and M. Ferreira Dias, “Renewable energy community and the European energy market: main motivations,” *Heliyon*, vol. 6, no. 7, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04511.
- [6] C. Flytkjaer *et al.*, “Power Quality Trends in the Transition to Carbon-Free Electrical Energy System,” *CIGRE Science & Engineering*, vol. 17, pp. 21–29, Feb. 2020.
- [7] H. Liu, A. R. Khan, S. Aslam, A. K. Rasheed, and M. Mohsin, “Financial impact of energy efficiency and energy policies aimed at power sector reforms: mediating role of financing in the power sector,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 13, pp. 18891–18904, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11356-021-16882-z.
- [8] “UNE-EN 50160, Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución,” 2011. [Online].
- [9] “1159-2019 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,” 2019, *IEEE*. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486.
- [10] M. H. J. Bollen and I. Y. H. Gu, *Signal processing of Power Quality disturbances*. 2005. doi: 10.1002/0471931314.
- [11] N. R. Watson and A. Miller, “Power Quality Indices: A Review,” 2015. [Online].

- [12] *1250-2018 - IEEE Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems*. IEEE, 2018.
- [13] P. B. Demerval and J. E. O. Pessanha, “Monitoring and Simulation of Power Quality Problems: A Case Study,” in *2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*, IEEE, Apr. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/PEEIC.2018.8665626.
- [14] Z. Ullah *et al.*, “Digital Signal Processing for Power Quality Enhancement within Smart Grid,” in *3rd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021. doi: 10.1109/ICECCE52056.2021.9514211.
- [15] A. Khandelwal and P. Neema, “State of Art for Power Quality Issues in PV Grid Connected System,” in *International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE-2019) : proceedings : January 4-5, 2019, Agnel Charities’ Fr. C. Rodrigues Institute of Technology, Agnel Technical Education Complex, Sector 9-A, Vashi, Navi Mumbai - 400703 India.*, 2019.
- [16] L. Hernández-Callejo, S. Gallardo-Saavedra, and V. Alonso-Gómez, “A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance,” *Solar Energy*, vol. 188, pp. 426–440, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.06.017.
- [17] E. F. Fuchs and M. A. S. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Elsevier, 2015. doi: 10.1016/b978-0-12-800782-2.00001-4.
- [18] J. Arrillaga, N. R. Watson, and S. Chen, *Power system quality assessment*. Chichester [etc.]: John Wiley & Sons, 2000.
- [19] R. Kosara, F. Bendix, and H. Hauser, “Parallel Sets: Interactive Exploration and Visual Analysis of Categorical Data,” 2006.
- [20] R. Kosara, “Turning a Table into a Tree: Growing Parallel Sets into a Purposeful Project,” 2010. [Online].
- [21] S. Jamali, A. R. Farsa, and N. Ghaffarzadeh, “Identification of optimal features for fast and accurate classification of power quality disturbances,” *Measurement*, vol. 116, pp. 565–574, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.10.034.

- [22] P. K. Ray, A. Mohanty, and T. Panigrahi, “Power quality analysis in solar PV integrated microgrid using independent component analysis and support vector machine,” *Optik (Stuttg)*, vol. 180, pp. 691–698, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ijleo.2018.11.041.
- [23] M. Sahani and P. K. Dash, “FPGA-based online power quality disturbances monitoring using reduced-sample HHT and class-specific weighted RVFLN,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 15, no. 8, pp. 4614–4623, 2019, doi: 10.1109/TII.2019.2892873.
- [24] L. Samal, H. K. Palo, and B. N. Sahu, “Comparison of Classifiers for Power Quality Disturbances with Wavelet Statistical Analysis,” in *2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/CISPSSE49931.2020.9212300.
- [25] N. Wang, M. Sun, and X. Xi, “Identification of power quality disturbance characteristic based on deep learning,” *Electric Power Systems Research*, vol. 226, p. 109897, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109897.
- [26] G. S. Chawda *et al.*, “Comprehensive Review on Detection and Classification of Power Quality Disturbances in Utility Grid With Renewable Energy Penetration,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 146807–146830, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014732.
- [27] Rahul, “Review of Signal Processing Techniques and Machine Learning Algorithms for Power Quality Analysis,” Oct. 01, 2020, *Wiley-VCH Verlag*. doi: 10.1002/adts.202000118.
- [28] J.-J. González de-la-Rosa and M. Pérez-Donsión, “Special issue ‘analysis for power quality monitoring,’” 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en13030514.
- [29] C. K. Hemapriya, M. V. Suganyadevi, and C. Krishnakumar, “Detection and classification of multi-complex power quality events in a smart grid using Hilbert–Huang transform and support vector machine,” *Electrical Engineering*, vol. 102, no. 3, pp. 1681–1706, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00202-020-00987-8.

- [30] E. A. Nagata *et al.*, “Real-time voltage sag detection and classification for power quality diagnostics,” *Measurement (Lond)*, vol. 164, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108097.
- [31] L. A. Romero-Ramirez, D. A. Elvira-Ortiz, A. Y. Jaen-Cuellar, D. Morinigo-Sotelo, R. A. Osornio-Rios, and R. D. J. Romero-Troncoso, “Methodology based on higher-order statistics and genetic algorithms for the classification of power quality disturbances,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 20, pp. 4580–4592, Oct. 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0366.
- [32] X. Qu, K. Dong, J. Zhao, W. Liu, Z. Shi, and Y. Yu, “A novel identification and location method for transient power quality disturbance sources,” in *Proceedings of 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference, CIEEC 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 2021. doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510379.
- [33] D. K. Nishad, A. N. Tiwari, S. Khalid, S. Gupta, and A. Shukla, “AI based UPQC control technique for power quality optimization of railway transportation systems,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 17935, Aug. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-68575-5.
- [34] O. P. Mahela, A. G. Shaik, B. Khan, R. Mahla, and H. H. Alhelou, “Recognition of Complex Power Quality Disturbances Using S-Transform Based Ruled Decision Tree,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 173530–173547, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025190.
- [35] S. Naderian and A. Salemnia, “An implementation of S-transform and type-2 fuzzy kernel based support vector machine algorithm for power quality events classification,” *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 36, no. 6, pp. 5115–5124, 2019, doi: 10.3233/JIFS-152560.
- [36] P. Zhang, Q. Feng, R. Chen, D. Wang, and L. Ren, “Classification and Identification of Power Quality in Distribution Network,” in *2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy, ICPRE 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2020, pp. 533–537. doi: 10.1109/ICPRE51194.2020.9233147.

- [37] E. Ofori-Ntow Jnr, Y. Y. Ziggah, and S. Relvas, “Hybrid ensemble intelligent model based on wavelet transform, swarm intelligence and artificial neural network for electricity demand forecasting,” *Sustain Cities Soc*, vol. 66, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102679.
- [38] S. R. Kalluri, J. D. Kumar, S. R. K. Joga, V. Sudhakar, G. Jagadeesh, and D. V Kumar, “A Complex Multi Power Quality Disturbances detection and classification using MRA DWT and k-NN Classifier Technique,” in *2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, IEEE, Jan. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICONAT57137.2023.10080821.
- [39] R. S. Salles and P. F. Ribeiro, “The use of deep learning and 2-D wavelet scalograms for power quality disturbances classification,” *Electric Power Systems Research*, vol. 214, p. 108834, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108834.
- [40] S. H. Bhat, S. Saini, G. Kaur, R. Kumar, M. Mehra, and R. K. Chopra, “Detection, classification, and rating of electrical faults and power quality,” 2024, p. 020004. doi: 10.1063/5.0221585.
- [41] W. Qiu, Q. Tang, J. Liu, and W. Yao, “An Automatic Identification Framework for Complex Power Quality Disturbances Based on Multifusion Convolutional Neural Network,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 16, no. 5, pp. 3233–3241, May 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2920689.
- [42] S. Akkaya, E. Yükses, and H. M. Akgün, “A New Comparative Approach Based on Features of Subcomponents and Machine Learning Algorithms to Detect and Classify Power Quality Disturbances,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 52, no. 8, pp. 1269–1292, May 2024, doi: 10.1080/15325008.2023.2260375.
- [43] R. Kaushik, O. Prakash Mahela, and P. K. Bhatt, “Events Recognition and Power Quality Estimation in Distribution Network in the Presence of Solar PV Generation; Events Recognition and Power Quality Estimation in Distribution Network in the Presence of Solar PV Generation,” 2021, doi: 10.1109/CSNT.2021.55.
- [44] R. Y. C. Santos, E. D. Moreno, and C. A. Estombelo-Montesco, “SED-Bench: Benchmark for Simulated Electrical Disturbance,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 69, no. 7, pp. 3954–3961, 2020, doi: 10.1109/TIM.2019.2943989.

- [45] P. Hariramakrishnan and S. S. Kumar, “Transients detection using Artificial Neural Network based HS-transform,” in *2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC): 21-23 August 2019, SSN College of Engineering, Kalavakkam, Chennai, India.*, 2019.
- [46] M. Meena, O. P. Mahela, M. Kumar, and N. Kumar, “Detection and Classification of Complex Power Quality Disturbances Using Stockwell Transform and Rule Based Decision Tree,” in *2018 International Conference on Smart Electric Drives & Power System*, IEEE, 2018.
- [47] M. Meena, O. P. Mahela, M. Kumar, and N. Kumar, “Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using Stockwell Transform and Rule Based Decision Tree,” in *2018 International Conference on Smart Electric Drives & Power System*, IEEE, 2018.
- [48] N. M. Khoa and L. Van Dai, “Detection and classification of power quality disturbances in power system using modified-combination between the stockwell transform and decision tree methods,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 14, Jul. 2020, doi: 10.3390/en13143623.
- [49] R. Saini, O. P. Mahela, and D. Sharma, “An Algorithm Based on Hilbert Transform and Rule Based Decision Tree Classification of Power Quality Disturbances,” in *8th IEEE Power India International Conference : PIICON 2018 : December 10-12, 2018*, 2018.
- [50] Y.-J. Shin, E. J. Powers, M. Grady, and A. Arapostathis, “Power Quality Indices for Transient Disturbances,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 253–261, Jan. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.855444.
- [51] P. G. V. Axelberg, I. Y. H. Gu, and M. H. J. Bollen, “Support vector machine for classification of voltage disturbances,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1297–1303, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.900065.
- [52] E. G. Ribeiro, G. L. Dias, B. H. G. Barbosa, and D. D. Ferreira, “Real-time system for automatic classification of power quality disturbances,” in *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, IEEE Computer Society, Dec. 2016, pp. 908–913. doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783405.

- [53] Y. Shen, M. Abubakar, H. Liu, and F. Hussain, “Power Quality Disturbance Monitoring and Classification Based on Improved PCA and Convolution Neural Network for Wind-Grid Distribution Systems,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 7, p. 1280, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12071280.
- [54] K. Thirumala, S. Pal, T. Jain, and A. C. Umarikar, “A classification method for multiple power quality disturbances using EWT based adaptive filtering and multiclass SVM,” *Neurocomputing*, vol. 334, pp. 265–274, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.neucom.2019.01.038.
- [55] X. P. Zhang and Z. Yan, “Energy Quality: A Definition,” *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 7, pp. 430–440, 2020, doi: 10.1109/OAJPE.2020.3029767.
- [56] Y. Liu, T. Jin, M. A. Mohamed, and Q. Wang, “A Novel Three-Step Classification Approach Based on Time-Dependent Spectral Features for Complex Power Quality Disturbances,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 70, 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3050187.
- [57] D. Kumar, F. Zare, and A. Ghosh, “DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12230–12256, Jun. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2705914.
- [58] S. K. Panigrahi, S. Samal, G. Dei, D. K. Gupta, C. Jena, and P. K. Barik, “Harmonics analysis of solar photovoltaic wind energy-based hybrid system,” in *2021 2nd International Conference for Emerging Technology, INCET 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 2021. doi: 10.1109/INCET51464.2021.9456380.
- [59] A. V. Shalukho, I. A. Lipuzhin, and A. A. Voroshilov, “Power quality in microgrids with distributed generation,” in *Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2019, pp. 54–58. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877619.
- [60] M. Jasiński, J. Rezmer, T. Sikorski, and J. Szymańda, “Integration monitoring of on-grid photovoltaic system: Case study,” *Periodica polytechnica Electrical en-*

- gineering and computer science*, vol. 63, no. 2, pp. 99–105, 2019, doi: 10.3311/PPee.13423.
- [61] X. Liang, “Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 53, no. 2, pp. 855–866, Mar. 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2626253.
- [62] B. N. Ch. V. Chakravarthi and G. V. Siva Krishna Rao, “Impact of Power Quality Issues in Grid Connected Photovoltaic System,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2020, pp. 155–158. doi: 10.1109/ICECA49313.2020.9297618.
- [63] R. Cisneros-Magaña, A. Medina, and C. R. Fuerte-Esquivel, “Time-Domain Analysis of Power Quality Adverse Effects of Grid Interconnected Photovoltaic Generation,” in *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, IEEE, 2019.
- [64] A. N. Deshmukh and V. K. Chandrakar, “Power quality issues and their mitigation techniques in grid tied Solar Photovoltaic Systems-A review,” in *2021 International Conference on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jan. 2021. doi: 10.1109/ICCCI50826.2021.9402581.
- [65] A. Gupta, “Power quality evaluation of photovoltaic grid interfaced cascaded H-bridge nine-level multilevel inverter systems using D-STATCOM and UPQC,” *Energy*, vol. 238, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121707.
- [66] Y. Haitao *et al.*, “Usage and Application of Power Quality Monitor on Harmonic Measurement,” in *2018 IEEE 3rd International Conference on Integrated Circuits and Microsystems, ICICM 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2018, pp. 212–216. doi: 10.1109/ICAM.2018.8596427.
- [67] K. W. Kow, Y. W. Wong, R. K. Rajkumar, and R. K. Rajkumar, “A review on performance of artificial intelligence and conventional method in mitigating PV grid-tied related power quality events,” Apr. 01, 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2015.11.064.
- [68] S. V. S. Kumary, V. A. A. M. T. Oo, G. M. Shafiullah, and A. Stojcevski, “Modelling and power quality analysis of a grid-connected solar PV system,” in *2014*

- Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2014. doi: 10.1109/AUPEC.2014.6966605.
- [69] S. L. Mahaddalkar and V. N. Shet, “Comparative analysis of power quality using wavelets for real time implementation,” in *2016 IEEE 7th Power India International Conference, PIICON 2016*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2017. doi: 10.1109/POWERI.2016.8077166.
- [70] O. P. Mahela and A. G. Shaik, “Detection of power quality events associated with grid integration of 100kW solar PV plant,” in *International Conference on Energy Economics and Environment - 1st IEEE Uttar Pradesh Section Conference, UPCON-ICEEE 2015*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2015. doi: 10.1109/EnergyEconomics.2015.7235070.
- [71] O. P. Mahela, B. Khan, H. H. Alhelou, S. Tanwar, and S. Padmanaban, “Harmonic mitigation and power quality improvement in utility grid with solar energy penetration using distribution static compensator,” *IET Power Electronics*, vol. 14, no. 5, pp. 912–922, Apr. 2021, doi: 10.1049/pel2.12074.
- [72] F. P. Marafao, A. M. D. S. Alonso, F. A. S. Goncalves, D. I. Brandao, A. C. G. Martins, and H. K. Morales Paredes, “Trends and Constraints on Brazilian Photovoltaic Industry: Energy Policies, Interconnection Codes, and Equipment Certification,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 5, pp. 4017–4027, Sep. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2833422.
- [73] C. M. N. Mukundan, S. B. Q. Naqvi, Y. Singh, B. Singh, and P. Jayaprakash, “A Cascaded Generalized Integral Control for Multiobjective Grid-Connected Solar Energy Transfer System,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 12, pp. 12385–12395, Dec. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3048316.
- [74] J. C. Palomares-Salas, J. J. González De La Rosa, A. Agüera-Pérez, and J. M. Sierra-Fernandez, “Smart grids power quality analysis based in classification techniques and higher-order statistics: Proposal for photovoltaic systems,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2015, pp. 2955–2959. doi: 10.1109/ICIT.2015.7125534.

- [75] H. Ping, L. Dong, and Q. Xin, “Influence of Grid-connected Photovoltaic Systems on Power Quality,” *IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering : AUTEEE 2019 : November 22-24, 2019, Shenyang, China.*, 2019.
- [76] C. R. Rajesh, P. Meenalochini, S. K. Kannaiah, and A. Bindu, “A hybrid control topology for cascaded H-bridge multilevel inverter to improve the power quality of smart grid connected system: NBO-RERNN approach,” *Expert Syst Appl*, vol. 238, p. 122054, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.122054.
- [77] N. K. Rayaguru, S. Sekar, and S. S. Dash, “A Fuzzy Based Custom Power Device for Grid - PV System to Improve Power Quality,” in *International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE-2020) : (29-31, July 2020)*, 2020.
- [78] S. Rönnerberg and M. Bollen, “Power quality issues in the electric power system of the future,” *Electricity Journal*, vol. 29, no. 10, pp. 49–61, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.tej.2016.11.006.
- [79] X. Wei, “Research on Harmonic Detection System for Photovoltaic Power Grid Based on Artificial Intelligence,” in *2024 International Conference on Power Electronics and Artificial Intelligence*, New York, NY, USA: ACM, Jan. 2024, pp. 235–242. doi: 10.1145/3674225.3674270.
- [80] K. Moloi, Y. Hamam, and J. A. Jordaan, “Power Quality Assessment of A Wind Power-Integrated System into the Power Grid; Power Quality Assessment of A Wind Power-Integrated System into the Power Grid,” 2020.
- [81] M. K. Saini and R. K. Beniwal, “Detection and classification of power quality disturbances in wind-grid integrated system using fast time-time transform and small residual-extreme learning machine,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.1002/etep.2519.
- [82] H. Shao, R. Henriques, H. Morais, and E. Tedeschi, “Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 191, p. 114094, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114094.

- [83] R. K. Beniwal, M. K. Saini, A. Nayyar, B. Qureshi, and A. Aggarwal, “A Critical Analysis of Methodologies for Detection and Classification of Power Quality Events in Smart Grid,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 83507–83534, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3087016.
- [84] K. Deepak, R. K. Mandal, and V. Verma, “Improvement of power quality by using novel controller for hybrid renewable energy sources based microgrid,” *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 289–303, Jun. 2024, doi: 10.1515/ijeeps-2023-0020.
- [85] G. S. Elbasuony, S. H. E. Abdel Aleem, A. M. Ibrahim, and A. M. Sharaf, “A unified index for power quality evaluation in distributed generation systems,” *Energy*, vol. 149, pp. 607–622, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.088.
- [86] Y. Luo, K. Li, Y. Li, D. Cai, C. Zhao, and Q. Meng, “Three-Layer Bayesian Network for Classification of Complex Power Quality Disturbances,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 14, no. 9, pp. 3997–4006, Sep. 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2785321.
- [87] M. H. Nazari, M. Bagheri Sanjareh, M. B. Moradi, and S. H. Hosseinian, “Uniform price-based framework for enhancing power quality and reliability of microgrids using Shapley-value incentive allocation method,” *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 40, no. 3, pp. 4935–4955, Mar. 2021, doi: 10.3233/JIFS-201703.
- [88] P. K. Ray, S. R. Mohanty, and N. Kishor, “Disturbance detection in grid-connected distributed generation system using wavelet and S-transform,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 3, pp. 805–819, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2010.11.011.
- [89] N. M. Rodrigues, F. M. Janeiro, and P. M. Ramos, “Influence of Weather Conditions in Power Quality Events,” in *IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG): Online - Setúbal, Portugal, 08 - 10 July, 2020*, 2020.
- [90] K. Swarna, A. Vinayagam, S. Y. Khoo, and A. Stojcevski, “International Journal of Sustainable and Green Energy An Experimental Study to Investigate PQ Im-

- pacts in a Grid Connected PV System,” *International Journal of Sustainable and Green Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 46–58, 2016, doi: 10.11648/j.ijrse.20160504.11.
- [91] P. Khetarpal, N. Nagpal, M. S. Al-Numay, P. Siano, Y. Arya, and N. Kassawani, “Power Quality Disturbances Detection and Classification Based on Deep Convolution Auto-Encoder Networks,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 46026–46038, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3274732.
- [92] G. Singh, Y. Pal, and A. K. Dahiya, “Classification of Power Quality Disturbances using Linear Discriminant Analysis,” *Appl Soft Comput*, vol. 138, p. 110181, May 2023, doi: 10.1016/j.asoc.2023.110181.
- [93] I. Topaloglu, “Deep Learning Based a New Approach for Power Quality Disturbances Classification in Power Transmission System,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 77–88, Jan. 2023, doi: 10.1007/s42835-022-01177-1.
- [94] J. J. González De-La-Rosa *et al.*, “HOS and CBR measurement system for PQ assessment,” in *Proceeding of the International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU*, 2011, pp. 397–402. doi: 10.1109/EPQU.2011.6128802.
- [95] M. Zanoni, C. Chiappa, R. Chiumeo, L. Tenti, and H. Shadmehr, “Higher-Order Statistics for Voltage Dips Characterization on Italian MV Networks,” in *2020 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, IEEE, Sep. 2020, pp. 1–6. doi: 10.23919/AEIT50178.2020.9241206.
- [96] O. Florencias-Oliveros, “Instrumental Techniques for Power Quality Monitoring,” Higher Polytechnic School of Algeciras, Algeciras, Cadiz, 2019.
- [97] I. Y. H. Gu and E. Styvaktakis, “Bridge the gap: Signal processing for power quality applications,” Jul. 2003. doi: 10.1016/S0378-7796(03)00074-9.
- [98] N. C. F. Tse, J. Y. C. Chan, W. H. Lau, and L. L. Lai, “Hybrid wavelet and hilbert transform with frequency-shifting decomposition for power quality analysis,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 61, no. 12, pp. 3225–3233, 2012, doi: 10.1109/TIM.2012.2211474.

- [99] O. Poisson, P. Rioual, Y. Assef, and P. Bastard, “Advanced techniques for power quality analysis: A real case study,” in *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, IEEE Computer Society, 1998, pp. 376–381. doi: 10.1109/ICHQP.1998.759916.
- [100] M. H. Sazli, I. Koşalay, and G. Erdenesaikhan, “A brief review of power quality issues in smart grid and a simple user friendly software,” in *Proceedings - 2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair, ICSG 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2018, pp. 54–58. doi: 10.1109/SGCF.2018.8408941.
- [101] G. Crotti *et al.*, “Instrument Transformers for Power Quality Measurements: A Review of Literature and Standards,” in *AMPS 2021 - 2021 11th IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2021. doi: 10.1109/AMPS50177.2021.9586028.
- [102] J. M. Sierra Fernández, “Técnicas y procedimientos de medida basados en la Kurtosis Espectral. Una aplicación en el análisis de la calidad de la energía eléctrica,” Universidad de Cádiz, Algeciras, 2017.
- [103] M. G. Moreira, D. D. Ferreira, and C. A. Duque, “Interharmonic detection and identification based on higher-order statistics,” in *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, IEEE Computer Society, Dec. 2016, pp. 679–684. doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783431.
- [104] J. C. Palomares-Salas, J. J. González de la Rosa, A. Agüera-Pérez, and A. Moreno-Muñoz, “Intelligent Methods for Characterization of Electrical Power Quality Signals using Higher Order Statistical Features,” *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 8/2012, p. 236, 2012.
- [105] G. D. J. Martinez-Figueroa, D. Morinigo-Sotelo, A. L. Zorita-Lamadrid, L. Morales-Velazquez, and R. D. J. Romero-Troncoso, “FPGA-based smart sensor for detection and classification of power quality disturbances using higher order statistics,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 14259–14274, Jul. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2732726.

- [106] F. M. Arrabal-Campos, A. Alcayde, F. G. Montoya, J. Martinez-Lao, and R. Banos, “A MATLAB application for monitoring the operation and power quality of electrical machines,” in *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, IEEE Computer Society, Jun. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378877.
- [107] E. L. N. Carvalho *et al.*, “A Proposal for Quality Management System,” in *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Dubai: IEEE, 2020.
- [108] J. M. Guerrero-Rodríguez, C. Cobos-Sánchez, J. J. González-De-la-Rosa, and D. Sales-Lérida, “An embedded sensor node for the surveillance of power quality,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 8, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12081561.
- [109] M. Guo, W. Chen, Q. Jin, and Z. Yao, “Research on Online Detection Method of Power Quality Monitoring Device and System Design,” in *14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2019): 19-21 June 2019, Xi'an, China*, 2019.
- [110] D. Yuan, Y. Liu, M. Lan, T. Jin, and M. A. Mohamed, “A Novel Recognition Method for Complex Power Quality Disturbances Based on Visualization Trajectory Circle and Machine Vision,” *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 71, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3204985.
- [111] M. R. Alam, F. Bai, R. Yan, and T. K. Saha, “Classification and Visualization of Power Quality Disturbance-Events Using Space Vector Ellipse in Complex Plane,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 3, pp. 1380–1389, Jun. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3008003.
- [112] O. Florencias-Oliveros, J.-J. González-de-la-Rosa, A. Agüera-Pérez, and J.-C. Palomares-Salas, “Power quality event dynamics characterization via 2D trajectories using deviations of higher-order statistics,” *Measurement*, vol. 125, pp. 350–359, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.04.098.
- [113] O. Florencias-Oliveros, J.-J. Gonzalez-de-la-Rosa, J.-M. Sierra-Fernandez, A. Aguera-Perez, M.-J. Espinosa-Gavira, and J.-C. Palomares-Salas, “Site Characterization Index for Continuous Power Quality Monitoring Based on Higher-

- order Statistics,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 222–231, 2022, doi: 10.35833/MPCE.2020.000041.
- [114] J. Ventura, F. Martinez, L. Castro-Santos, A. Filgueira-Vizoso, A. Alcayde, and F. G. Montoya, “Characterisation of Electrical Power Systems Based on Electrical Curves and their properties,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 589–593, Jul. 2023, doi: 10.24084/repqj21.407.
- [115] V. Ignatova, D. Villard, and J. M. Hypolite, “Simple indicators for an effective Power Quality monitoring and analysis,” in *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC 2015 - Conference Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2015, pp. 1104–1108. doi: 10.1109/IEEEIC.2015.7165321.
- [116] C. Kattmann and S. Tenbohlen, “Visualization of power quality data,” in *2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2017. doi: 10.1109/PTC.2017.7981158.
- [117] O. Florencias-Oliveros, M. J. Espinosa-Gavira, J.-J. González de la Rosa, A. Agüera-Pérez, J. C. Palomares-Salas, and J. M. Sierra-Fernández, “Real-life Power Quality Sags,” May 11, 2017, *IEEE Dataport*. doi: 10.21227/H2K88D.
- [118] O. Florencias-Oliveros, M. J. Espinosa-Gavira, J. J. González-de-la-Rosa, A. Agüera-Pérez, J. C. Palomares-Salas, and J. M. Sierra-Fernández, “Real-life Power Quality Transients,” 2017. doi: 10.21227/H2Q30W.
- [119] R. Machlev, A. Chachkes, J. Belikov, Y. Beck, and Y. Levron, “Open source dataset generator for power quality disturbances with deep-learning reference classifiers,” *Electric Power Systems Research*, vol. 195, p. 107152, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107152.
- [120] V. Veena and A. A. Kurian, “Classification of power quality disturbances using time/frequency domain features,” in *2014 International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON)*, IEEE, Jan. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/EPSCICON.2014.6887497.
- [121] “UNE-EN 61000-4-7:2004 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida. Guía general relativa a las medidas de armóni-

- cos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas.,” 2004.
- [122] “UNE-EN 61000-4-30:2015 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro.,” 2015.
- [123] J. J. Tomic, M. D. Kusljevic, and V. V. Vujicic, “A New Power System Digital Harmonic Analyzer,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 772–780, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.893372.
- [124] Y. Han, Y. Feng, P. Yang, L. Xu, and A. S. Zalhaf, “An efficient algorithm for atomic decomposition of power quality disturbance signals using convolutional neural network,” *Electric Power Systems Research*, vol. 206, p. 107790, May 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.107790.
- [125] N. Kongtrakul, W. Wangdee, and S. Chantaraskul, “Comprehensive review and a novel technique on voltage unbalance compensation,” *IET Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 331–358, Aug. 2023, doi: 10.1049/stg2.12106.
- [126] J. E. Caicedo, D. Agudelo-Martínez, E. Rivas-Trujillo, and J. Meyer, “A systematic review of real-time detection and classification of power quality disturbances,” *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 8, no. 1, p. 3, Dec. 2023, doi: 10.1186/s41601-023-00277-y.
- [127] P. Remigio-Carmona *et al.*, “Current Status and Future Trends of Power Quality Analysis,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 7, p. 2328, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15072328.
- [128] P. Remigio-Carmona *et al.*, “Potential usages of EDA techniques for PQ analysis in modern instrumentation systems,” in *2022 12th IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, AMPS 2022 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/AMPS55790.2022.9978795.
- [129] P. Remigio-Carmona, O. Florencias-Oliveros, and J. J. González-de-la-Rosa, “A Graphical method for PQ assessment: EDA tools using traditional indices and Higher-order Statistics,” *RE&PQJ*, vol. 21, pp. 551–555, Jul. 2023, doi: 10.24084/repqj21.390.

- [130] J.-J. González-de-la-Rosa, O. Florencias-Oliveros, and P. Remigio-Carmona, “Strategy for Visual Measurement of Power Quality Based on Higher-Order Statistics and Exploratory Big Data Analysis,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 12, p. 6422, Jun. 2025, doi: 10.3390/app15126422.
- [131] P. Remigio-Carmona, O. Florencias-Oliveros, and J. J. González-de-la-Rosa, “Categorization Method of Power Supply Quality Events Using Rule-Based Decision Trees, Combining Traditional Indices With Higher-Order Statistics,” *Electron Lett*, vol. 61, no. 1, p. e70189, Jan. 2025, doi: 10.1049/ell2.70189.

## Publicaciones

- P. Remigio-Carmona *et al.*, “Current Status and Future Trends of Power Quality Analysis,” *Energies* (Basel), vol. 15, no. 7, p. 2328, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15072328.
- P. Remigio-Carmona *et al.*, “Potential usages of EDA techniques for PQ analysis in modern instrumentation systems,” in 2022 12th IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, AMPS 2022 - *Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/AMPS55790.2022.9978795.
- P. Remigio-Carmona, O. Florencias-Oliveros, and J. J. González-de-la-Rosa, “A Graphical method for PQ assessment: EDA tools using traditional indices and Higher-order Statistics,” *RE&PQJ*, vol. 21, pp. 551–555, Jul. 2023, doi: 10.24084/repqj21.390.
- P. Remigio-Carmona, O. Florencias-Oliveros, and J. J. González-de-la-Rosa, “Categorization Method of Power Supply Quality Events Using Rule-Based Decision Trees, Combining Traditional Indices With Higher-Order Statistics,” *Electronics Letters*, vol. 61, no. 1, p. e70189, Jan. 2025, doi: 10.1049/ell2.70189.
- J.-J. González-de-la-Rosa, O. Florencias-Oliveros, and P. Remigio-Carmona, “Strategy for Visual Measurement of Power Quality Based on Higher-Order Statistics and Exploratory Big Data Analysis,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 12, p. 6422, Jun. 2025, doi: 10.3390/app15126422.

Programa de Doctorado en Ingeniería Energética y Sostenible  
Escuela de Doctorado de la Universidad de Cádiz

**Tesis doctoral:** Técnicas de análisis exploratorio de datos y estrategias de visualización multidimensional del suministro eléctrico basadas en estadísticos de orden superior: indicadores globales para instrumentación moderna.

**Autora:** Paula Remigio Carmona.

**Directores:** Juan José González de la Rosa, Olivia Florencias Oliveros.

### **Fe de erratas:**

**Página 77, Figura 53:** El tipo de estado mostrado entre 0.08 y 0.20 segundos en la señal con *sag* corresponde a un estado **I**, aunque en la figura se indica erróneamente como estado **II**.

**Página 93, Figura 64:** Ídem.

Y para que así conste, firmo esta fe de erratas en Algeciras, a 30 de octubre de 2025.



Paula Remigio Carmona