



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**CARACTERIZACIÓN DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS
EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. ARCO ELÉCTRICO.**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MASTER EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA

PRESENTA:

LORENA MIRANDA SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ

CO-DIRECTOR:

DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO

SINODALES:

**DR. PEDRO ANTONIO MÁRQUEZ AGUILAR
DR. MIGUEL BASURTO PENSADO
MTRO. EDUARDO MORALES GONZÁLEZ (INEEL)**

CUERNAVACA, MORELOS.

DICIEMBRE 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Sustentabilidad Energética



Cuernavaca, Morelos, a 05 de octubre de 2021.

DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
ENCARGADO DE DESPACHO
DE LA DIRECCIÓN DEL CIICAp
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: Caracterización de perturbaciones eléctricas en sistemas fotovoltaicos. Arco eléctrico., que presenta la alumna **Lorena Miranda Sánchez**, para obtener el título de **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. PEDRO ANTONIO MÁRQUEZ AGUILAR		
DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO		
MTRO. EDUARDO MORALES GONZÁLEZ		
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO		
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ		

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

JJEA*MLGE/nmc.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

MIGUEL ANGEL BASURTO PENSADO | Fecha:2021-11-10 10:11:36 | Firmante

eODLHaaTozPRa7MlrF139v1KXhmnGEex+cKrozLX9uOzg5YGi2Jttk0k01cAWuVToTJYcNX4LvpOgVyz3JS13emFzCBvCKyPEnsr93gURw8HphZ5O7VUKqdnAz3vil6Z3LzWcYXM0H3bcJLfesD/p99oMa7yMS4pMV7rsW2QWC81LULwA28g79a1CMal2SQLHdvaAskXIKcs1u7nCGZMK3b8dQ0zHWffrfeDx40JLsRyvj1fsL3yc+pwXPJpdNKYo4MXBsBpEv4gXSqDjGMUj8WNVNRDq/IFNvRHL69kirizEadeR+NGvZdA+oWrNIBJiaYGrEDG1WOnZxUTrwoX/ww==

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2021-11-10 10:13:32 | Firmante

WhfzwxjDjGBedFzep8T17NNi6PLOVTWZj7Uj/o4w5EMuMcaP1MHuONqzwKee0kK9W00K4Qap3w7me+dqTHdyY1crVUjcfQdQ3c758YaeY9HfVIs9b0YLwRV/2J7tr9I4o5BGPO9beNZQ1Cq0/VWw2pLONdvsq3aG4qyWThJDxividxH/nNTiUcT96oufi5MKBgK4UR7MOio3LuqnuEOa4ySd89dZtQOm04rpxfjR+TDJGkz4Ylp/MzNnvfkCAEgKvLqH8z0UBvHDDJ1Xze2MOTKau4pprh00Srxj1S5jQiDo7pLj7UYpkaV8Ha9FdLrv3sK6UrpACwxZkWP50z52w==

EDUARDO MORALES GONZALEZ | Fecha:2021-11-10 11:05:38 | Firmante

Ikie+L9NZ7ccGu63JksXr5Ucjhg2DbnWaQwHM4WGP+MtH941INUhQNx5ZUoYno2kVregN9lu+tfJfo821+KIIPVbv400XAWcRNUR+MVM9QXRxFu96Yus+4KiP1DIHy/ARmx/sheoWpQACBPihEFvoM92oATRU6hYQvb6DLjOFf1aGA6UsMLBnfXSmaq98GjMno/kTebH1BrDGVPgY4Ag3Jfvr87CHqf32mdc9oHPm+flbixq1o/yXel3rIKDBvR14NX2IlgYvslhzhmHncPHd4GTVqb3vTRVsPF53qdeqDvZS1zzLm1TR60mMhnWqUps2qkQi3+Epa7Dv1L5WovQsA==

PEDRO ANTONIO MARQUEZ AGUILAR | Fecha:2021-11-10 12:42:52 | Firmante

nTgrQ2ABJSHMimNtwYwY6/8N1nvsx9/WdIjqdyQv1hK/oNIU/sM+NiO4snFvQO6NQYqGBHoCvuc0hpLH1Ze0bTjU5vv6XcWVLLJDX/vrmw9FeCiEEwtLgWRt9IvfcchiwTZ+wZoFPR++95jvFj118JEkCpwr2g8a4/P+Z4u8bsy+3qOJCfmmLSoY7FD4bYCUJru7mmRYNIN1Xj1rScwvvh/vN7UY6aMqeZgDt6ns72XIZ50xd0ZBkujg4tUvk5+DUpOD8NPNiFalUGZEP1x12f/Am+uc+FGe66/FknjLlztPki2HWITINNz4/zwgFc2fzwQzwWU11Fvs4emF3hw7w==

DIEGO SEURET JIMENEZ | Fecha:2021-11-11 14:32:38 | Firmante

KUyW8VGrxGQG7GTuqQF1GQ+vP5nxV611mgpf+styU5WVvKE9bucGezeOSF/HxlwqpehoRd92ZFBRIgeIvsFQ7B7WThwv22TMXjWs7WB9A/FfeObZNASj0iMGvFaZmy5Vm5WXRg3hUq6npERFzP0RC/hg7JMq+KEkNb6ulFDpw8UOU2DU5cJ2f1RKqGNAn1XeFXf+1rGZa/w4SSXyblmD9RFkbcGnUMRNEL9owHS1H6Y3XLs83o0B6vTnf98LRqvM5zRTiO9NdsxE24RB2OCA82DthyNm3IApnyVf17V6bn4U/btdY7cuhpcoVha983Yj4vVFUNKLPwrv1O5fyffaw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



y2FDg5PzT

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/XPq8R0vu8zMhk2oRmzZ4PSvsligz13Oj>



Dedico ésta tesis

A mis padres, por confiar y creer en mí siempre, por darme el espacio para crecer libre con mis propias ideas y sentimientos, y al mismo tiempo por influir en todo lo que soy ahora como persona y profesionista. Por su amor incondicional, los admiro más que a nadie y muchísimo más los amo sin ustedes ésto no sería posible. Tal vez sin saberlo me educarón para ver más allá de mi entorno. ¡Lo lograrón!

A mi compañero de vida Ulises Galván con quién deseo continuar realizando proyectos toda mi vida; gracias por todo tu amor, paciencia, apoyo y por ser la fuente innagotable de inspiración que me ha impulsado a lograr todo lo que está en mi cabeza.

A mis hermanos y sobrinos que me han hecho reír, cantar, correr, asustarme, preocuparme y hasta llorar algunas veces, pero que siempre están ahí para mí cuando los necesito, y me han dado las pequeñas alegrías que iluminan mi ser; deseo verlos crecer felices y lograr sus propias metas.

A la familia de mi esposo quiénes ahora son mi familia, por acogerme de la manera que lo han hecho. Gracias por toda su confianza, su enseñanza y apoyo.

A mis amigos por su amistad, compañía y apoyo para darlo todo siempre.

A todas las personas que son importantes en mi vida y no he mencionado en esta tesis.

Finalmente a la memoria de las personas importantes que he perdido y que también son parte de esta historia, espero que al final de mi vida pueda volver a verlos...

Resumen

El crecimiento acelerado de la industria fotovoltaica se debe en parte a las políticas favorables de energía limpia, las mejoras tecnológicas y la dramática reducción de costos de los módulos fotovoltaicos (FV) [1]. La investigación en materia de seguridad eléctrica en los sistemas fotovoltaicos, está relacionada con prevención y extinción de incendios [103], [104], [105], [106] en edificios con sistemas fotovoltaicos, abarcando desde las condiciones de fabricación, uso y de instalación de generadores fotovoltaicos [107], [108], [109], [110], [111], [122], [123], [124]. Recientemente con énfasis en detectores de arco eléctrico [14], [57], [112] esto se debe a la alta peligrosidad para los usuarios y para los propios sistemas, es considerada un área de tecnología que presenta un desafío para continuar con la adopción generalizada de las energías limpias y en especial la fotovoltaica.

La presente tesis realiza la caracterización de señales de arco eléctrico obtenidas en una configuración horizontal, creando el fenómeno del arco con electrodos de hierro y cobre. Se parte con la comparación en comportamiento de una señal de arco eléctrico simulada, utilizando la herramienta Simulink de Matlab y una señal de arco obtenida en condiciones ideales. La caracterización de las señales de arco se plantea en cinco aspectos: Ocurrencia, bloqueo del nivel de directa, material del electrodo, temperatura y existencia de singularidad; obteniendo información cualitativa y cuantitativa. El criterio de correlación Wavelet y el Exponente de Lipschitz refleja el comportamiento de un aparente punto singular en la señal de arco, criterio útil para futuros trabajos de detección de arco eléctrico. Finalmente, el procesamiento de la señal de arco eléctrico se redujo al uso de wavelet diádicas hasta ahora conocidas (Coiflet, Symlet y Daubechies). No tiene sentido el uso de la transformada rápida de Fourier ya que la señal estudiada no es determinista. Se propone la utilización de una nueva Wavelet, llamada Wavelet Seuret-Trutie (WST) recientemente desarrollada por el equipo de investigación de procesamiento de señales. Dicha wavelet está diseñada para el estudio de fenómenos similares a un arco eléctrico (señal estocástica y no estacionaria). Esta investigación prueba su funcionamiento y alcance comparándola con una wavelet de características similares, la wavelet de Haar.

Abstract

The accelerated growth of the photovoltaic industry is due in part to favorable clean energy policies, technological improvements and the dramatic cost reduction of photovoltaic (FV) modules [1]. Research on electrical safety in photovoltaic systems is related to the prevention and extinction of fires [103], [104], [105], [106] in buildings with photovoltaic systems, ranging from the conditions of manufacture, use and installation of photovoltaic generators [107], [108], [109], [110], [111], [122], [123], [124]. Recently, with an emphasis on electric arc detectors [14], [57], [112] this is due to the high danger for users and for the systems themselves, it is considered a technology area that presents a challenge to continue with the adoption widespread use of clean energies and especially photovoltaics.

This thesis performs the characterization of electric arc signals obtained in a horizontal configuration, creating the arc phenomenon with iron and copper electrodes. It starts with the comparison in behavior of a simulated electric arc signal, using Matlab's Simulink tool and an arc signal obtained under ideal conditions. The characterization of arc signals is presented in five aspects: Occurrence, blocking of the direct level, electrode material, temperature and existence of singularity; obtaining qualitative and quantitative information. The Wavelet correlation criterion and the Lipschitz Exponent reflect the behavior of an apparent singular point in the arc signal, a useful criterion for future electrical arc detection work. Finally, the processing of the electric arc signal was reduced to the use of dyadic wavelets known until now (Coiflet, Symlet and Daubechies). The use of the fast Fourier transform does not make sense since the studied signal is not deterministic. The use of a new Wavelet is proposed, called Wavelet Seuret-Trutie (WST) recently developed by the signal processing research team. Said wavelet is designed for the study of phenomena similar to an electric arc (stochastic and non-stationary signal). This research tests its performance and scope by comparing it with a wavelet with similar characteristics, the Haar wavelet.

Agradecimientos

La Maestría en Sustentabilidad Energética (MSE) está acreditada en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) de Conacyt.

Agradezco al Conacyt por el apoyo económico para la realización esta tesis de investigación durante el programa de estudio de la Maestría en Sustentabilidad Energética.

A la UAEM y al centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) por poner a disposición su infraestructura, equipo y programas de posgrado del área de Sustentabilidad Energética que complementan mi formación profesional.

Al Dr. Diego Seuret Jiménez, Investigador CIICAp-UAEM por permitirme ser su alumna, por compartir sus conocimientos, por el tiempo dedicado para aclarar cualquier duda que me surgiera, por sus consejos, sus discursos y por creer en mi en el desarrollo de éste trabajo. Gracias por ayudarme a crecer como investigadora, profesionista pero también como persona.

Al honorable comité revisor: Dr. José Antonio Marbán Salgado, Dr. Pedro Antonio Márquez Aguilar, Dr. Miguel Basurto Pensado y al Mtro. Eduardo Morales González; por el tiempo dedicado, por su apoyo intelectual, orientación, comprensión y contribución a éste trabajo de investigación, lo enriquecieron.

A la Mtra. Merle García por su apoyo y amistad brindadas durante mi estancia en el posgrado.

A mis compañeros y amigos durante ésta estancia y en especial a Eduardo Trutié por su apoyo intelectual, comprensión, paciencia, amistad y ánimo brindado para hacer posible éste trabajo.

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a las personas adecuadas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
PROBLEMÁTICA	15
JUSTIFICACIÓN	16
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	17
HIPÓTESIS	17
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS PARTICULARES	17
ALCANCE	18
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y MARCO CONCEPTUAL	19
1.1 ANTECEDENTES	19
1.2 MARCO CONCEPTUAL	21
1.2.1 Señal eléctrica	21
1.2.2 Representación gráfica de las señales eléctricas	21
1.2.3 Tipos de señales	23
1.2.4 Características básicas de una señal eléctrica	25
1.2.5 Ruido	26
1.2.6 Conversor de señal	28
1.2.7 Microprocesadores	29
1.2.8 Diagrama Bode	29
1.2.9 Circuito	30
1.2.10 Carga eléctrica	31
1.2.11 Campo eléctrico	31
1.2.12 Corriente eléctrica	31
1.2.13 Corriente continua	32
1.2.14 Corriente alterna	32
1.2.15 Voltaje	32
1.2.16 Resistencia eléctrica	33
1.2.17 Capacitancia eléctrica	33
1.2.18 Inductancia	36
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.	36
2.1 Teoría de sistemas y señales	36
2.2 Señales y sistemas	36
2.3 Clasificación general de las señales	37
2.4 Clasificación de las señales por su descripción matemática	38
2.5 Señales continuas más usadas en el procesamiento digital de señales (PDS).	41
2.1.5.2 Función Pulso	41
2.1.5.3 Función Delta de Dirac $\delta(t)$	41
2.6 Señal estacionaria y no estacionaria	41
2.7 Sistema	42
2.8 Clasificación general de los sistemas	42
2.9 Tipos de sistemas y sus propiedades	43
2.10 Sistema causal	44
2.11 Sistema no causal	45
2.12 Sistema determinístico	45
2.13 Sistema estocástico	45
2.14 Interconexión de sistemas	46

2.17	Arco eléctrico	47
2.18	Modelos convencionales de arco eléctrico	48
2.19	Filtrado	52
2.20	Procesamiento Digital de señales (PSD)	53
2.20.1	Métodos de procesamiento de señales	53
2.21	Cálculo de la energía de los coeficientes	60
2.22	Wavelet Diádicas	61
2.23	Propiedades de la transformada Wavelet Diádica	61
2.24	Análisis multiresolución (AMR)	62
2.25	Exponente de Lipschitz (LE)	64
2.26	Herramientas de procesamiento de señales Matlab y simulink	67
2.27	Seguridad en los Sistemas Fotovoltaicos	67
2.28	Seguridad eléctrica en los sistemas fotovoltaicos	69
2.29	Arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos	70
CAPÍTULO 3. DESARROLLO TEÓRICO / EXPERIMENTAL		72
3.1	Metodología experimental	72
3.2	Equipo, material y herramientas computacionales usadas	73
3.3	Configuración experimental de arco eléctrico en panel fotovoltaico	73
3.4	Modelado del sistema en simulink	76
3.4.1	Panel fotovoltaico	77
3.4.2	Arco eléctrico	85
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		88
4.1	Caracterización de la señal de arco eléctrico en ambos modelos	88
4.2	Factores externos que influyen en la la generación de un arco eléctrico	93
4.3	Procesamiento de la señal de arco eléctrico.	95
4.4	Morfología de la Wavelet Seuret-Trutié (WST) vs Haar.	104
4.5	Análisis de descomposición usando Wavelet Seuret-Trutié (WST).	105
4.6	Reconstrucción de la señal de arco eléctrico usando Wavelet Seuret-Trutié (WST).	108
4.7	Aplicación de Wavelet Seuret-Trutié	110
4.8	Análisis de energía de los coeficientes entre Wavelet Seuret-Trutié (WST) y Wavelet Haar.	114
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		117
REFERENCIAS		120
APÉNDICES		130
APENDICE A. DATASHEET DE CÁMARAS TERMOGRÁFICAS FLIR		130
APENDICE B. BITÁCORA EXPERIMENTAL		131
APENDICE C. EXPONENTE DE LIPSCHITZ		132
APENDICE D. MORFOLOGÍA WST VS HAAR		134
APENDICE E. DESCOMPOSICIÓN CON WST		135
APENDICE F. RECONSTRUCCIÓN DE SEÑAL CON WST		135
APENDICE G. APLICACIÓN DE WST		136
APENDICE H. ENERGÍA DE LOS COEFICIENTES DE DETALLE		137
ANEXOS		138
ANEXO I.	XV TALLER DE FÍSICA	138
ANEXO II.	CONGRESO VIRTUAL CIID 2020	139

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	Tipos de arcos eléctricos en un generador fotovoltaico y maniobras de protección a realizar. fuente: adaptada de [93].	71
TABLA 2.	Especificaciones técnicas de los paneles fotovoltaicos.	74
TABLA 3.	Especificaciones técnicas de osciloscopio.	75
TABLA 4.	Especificaciones técnicas de cámara termográfica.	75
TABLA 5.	Condiciones experimentales.	75
TABLA 6.	Especificaciones de panel fotovoltaico utilizado.	76
TABLA 7.	Eg (banda prohibida) de semiconductores.	77
TABLA 8.	Condiciones estándar vs condiciones normales.	78
TABLA 9.	Parámetros en condiciones experimentales ingresados al modelo.	79
TABLA 10.	Fórmulas del modelo matemático de panel solar.	79
TABLA 11.	Nomenclatura con parámetros utilizados.	80
TABLA 12.	Comparacion de resultados.	85
TABLA 13.	Caída de voltaje de 35 arcos eléctrico con electrodos de hierro.	90
TABLA 14.	Caída de voltaje de 35 arcos eléctrico con electrodos de cobre.	91
TABLA 15.	Propiedades de los metales más comunes .	93
TABLA 16.	Porcentaje de error en cada nivel de descomposición usando WST.	107
TABLA 17.	Porcentaje de error por nivel de descomposición	109
TABLA 18.	Correspondencia no. de muestra con tiempo.	114

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	Gráfico de forma de onda	22
FIGURA 2.	Gráfico de espectro de frecuencia.	22
FIGURA 3.	Gráfico de diferentes análisis de una señal eléctrica.	23
FIGURA 4.	Gráfico señal constante y variable.	23
FIGURA 5.	Gráfico señal alterna y continua.	24
FIGURA 6.	Gráfico señal periódica.	24
FIGURA 7.	Aspecto de una onda.	26
FIGURA 8.	Ejemplo de diagrama de bode de un filtro paso bajo Butterworth de primer orden (con un polo).	30
FIGURA 9.	Ejemplo de un diagrama de circuito.	30

FIGURA 10.	Clasificación de los circuitos.	30
FIGURA 11.	Carga de un capacitor.	35
FIGURA 12.	Descarga de un capacitor.	35
FIGURA 13.	Forma de señal continua.	37
FIGURA 14.	Señal coseno en tiempo discreto.	38
FIGURA 15.	Gráfica de funciones seno y coseno.	40
FIGURA 16.	Descomposición de una señal periódica en series de Fourier.	40
FIGURA 17.	Sistema dinámico.	42
FIGURA 18.	Diagrama de tipos de sistemas.	43
FIGURA 19.	Gráfica de causalidad.	44
FIGURA 20.	Diagrama de relación de sistema y señal de arco eléctrico.	46
FIGURA 21.	Diagrama de conexión en serie.	46
FIGURA 22.	Diagrama conexión en paralelo.	46
FIGURA 23.	Diagrama de conexión con retroalimentación.	47
FIGURA 24.	Clasificación de fallas de arco de corriente continua (CC) en un sistema fotovoltaico (FV)	48
FIGURA 25.	Ejemplo de aplicación del teorema de Nyquist o Shannon.	51
FIGURA 26.	Filtro ideal vs real.	53
FIGURA 27.	Concepto de traslación de wavelet.	58
FIGURA 28.	Concepto de escala de una wavelet.	58
FIGURA 29.	Diferencia entre tiempo-frecuencia de TFCT y tiempo-escala de TWC.	59
FIGURA 30.	Partición tiempo-frecuencia de la DWT, para 4 escalas.	62
FIGURA 31.	Proceso de filtración de una señal mediante un análisis wavelet.	63
FIGURA 32.	Proceso de descomposición múltiple de una señal.	64
FIGURA 33.	Diagrama de metodología empleada.	73
FIGURA 34.	Estructura para generación de arco eléctrico.	75
FIGURA 35.	Estación experimental completa.	76
FIGURA 36.	Diagrama general de circuito.	76
FIGURA 37.	Modelo general en Simulink de un panel fotovoltaico.	81
FIGURA 38.	Modelo en Simulink del pv module.	81
FIGURA 39.	Modelo en Simulink del subsistema corriente de saturación reversa.	81
FIGURA 40.	Modelo en Simulink del subsistema corriente de saturación.	82
FIGURA 41.	Modelo en Simulink del subsistema fotocorriente.	82
FIGURA 42.	Modelo en Simulink del subsistema corriente de resistencia de derivación.	83
FIGURA 43.	Modelo en Simulink del subsistema corriente de salida.	83

FIGURA 44.	Funcionamiento del modelo en Simulink. (a) Gráfica P-V, (b) Gráfica I-V.....	84
FIGURA 45.	Funcionamiento del modelo en Matlab. (a) Gráfica P-V, (b) Gráfica I-V.....	84
FIGURA 46.	Modelo en Simulink de una señal de arco eléctrico sintética con corrientes AC y DC.	86
FIGURA 47.	Modelo en simulink de una señal de arco eléctrico sintética con corriente DC. .	86
FIGURA 48.	Señal de arco eléctrico generada en simulink con corrientes AC y DC.....	86
FIGURA 49.	Señal de arco eléctrico generada en simulink con corriente DC.	87
FIGURA 50.	Señal de arco eléctrico en matlab con corrientes AC y DC.	87
FIGURA 51.	Señal de arco eléctrico en matlab con corriente DC.....	87
FIGURA 52.	Señal de arco eléctrico simulado.	88
FIGURA 53.	Señal de arco eléctrico experimentalmente con acoplamiento DC.....	89
FIGURA 54.	Señal de arco eléctrico experimentalmente con acoplamiento AC.....	90
FIGURA 55.	Señal de arco eléctrico físico con puntas de cobre y acoplamiento AC.	91
FIGURA 56.	Temperaturas con electrodos de cobre. antes del arco (a), durante el arco (b), después de un arco sostenido por 10 s (c).....	92
FIGURA 57.	Temperatura registrada con puntas de acero, después de un arco sostenido por 10 s.	92
FIGURA 58.	Arco eléctrico con puntas de acero.....	95
FIGURA 59.	Arco eléctrico con puntas de cobre.....	95
FIGURA 60.	Comparación de Wavelets Coiflet en 10 niveles de descomposición.....	98
FIGURA 61.	Comparación de Wavelets Daubechies 1-9 en 10 niveles de descomposición..	98
FIGURA 62.	Comparación de Wavelets Daubechies 10-18 en 10 niveles de descomposición.	99
FIGURA 63.	Comparación de Wavelets Daubechies 19-27 en 10 niveles de descomposición.	99
FIGURA 64.	Comparación de Wavelets Daubechies 28-36 en 10 niveles de descomposición.	100
FIGURA 65.	Comparación de Wavelets Daubechies 37-45 en 10 niveles de descomposición.	100
FIGURA 66.	Comparación de Wavelets Symlet 2-9 en 10 niveles de descomposición.....	101
FIGURA 67.	Comparación de Wavelets Symlet 10-17 en 10 niveles de descomposición....	101
FIGURA 68.	Comparación de Wavelets Symlet 18-25 en 10 niveles de descomposición....	102
FIGURA 69.	Comparación de Wavelets Symlet 26-33 en 10 niveles de descomposición....	102
FIGURA 70.	Comparación de Wavelets Symlet 34-41 en 10 niveles de descomposición....	103
FIGURA 71.	Gráfica de WST con 5 niveles de descomposición.....	105
FIGURA 72.	Gráfica comparativa entre WST vs Haar.....	105
FIGURA 73.	Señal de arco eléctrico original.....	106

FIGURA 74.	Descomposición de señal de arco en nivel 1	106
FIGURA 75.	Descomposición de señal de arco en nivel 2	107
FIGURA 76.	Descomposición de señal de arco en nivel 3	107
FIGURA 77.	Reconstrucción nivel 1.	108
FIGURA 78.	Reconstrucción nivel 2.	109
FIGURA 79.	Reconstrucción nivel 3.	109
FIGURA 80.	Ruido blanco gaussiano.	111
FIGURA 81.	Señal de arco eléctrico con electrodos de hierro.	111
FIGURA 82.	Señal compuesta arco eléctrico + ruido gaussiano.....	112
FIGURA 83.	WST vs Haar en nivel 1 de descomposición.....	112
FIGURA 84.	WST vs Haar en nivel 2 de descomposición.....	112
FIGURA 85.	WST vs Haar en nivel 3 de descomposición.....	113
FIGURA 86.	WST vs Haar en nivel 4 de descomposición.....	113
FIGURA 87.	WST vs Haar en nivel 5 de descomposición.....	113
FIGURA 88.	Energía de los coeficientes con Wavelet Haar y Wavelet ST	115
FIGURA 89.	Comparación con nivel 6 de descomposición.....	116
FIGURA 90.	Comparación con nivel 8 de descomposición.....	117
FIGURA 91.	Comparación con nivel 3 de descomposición.....	¡Error! Marcador no definido.

Glosario

		F	
		FFT	
		Transformada rápida de Fourier	56
		FV	
		Fotovoltaicos	13
		G	
		G	
		Radiación solar	78
		H	
		Hz	
		Hertz	26
		I	
		I_0	
		Corriente de saturación	79
		IEC	
		Comisión Electrotécnica Internacional	20
		IEEE	
		Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica	19
		I_{mp}	
		Corriente al punto de máxima potencia	85
		I_{ph}	
		Fotocorriente	79
		I_{rs}	
		Corriente de saturación reversa	79
		I_{sc}	
		Corriente de corto circuito	79
		I_{sh}	
		Corriente a través de resistencia de shunt	79
		K	
		K	
		Constante de Boltzmann	79
		kHz	
		Kilohertz	20
		KI	
		Coefficiente de temperatura de corriente de corto circuito	79
		kW	
		Kilowatts	69
		L	
		$L^2(R)$	
		Funciones de energía finita	60
		LE	
		Exponente de Lipschitz	64
		M	
		Matlab	
		Plataforma de Programación y cálculo numérico	18
A			
A			
Ampers	31		
AC o CA			
Corriente Alterna	32		
C			
C/s			
Coulombio/segundo	31		
CC			
Corriente continua	20		
CDA o DAC			
Convertor análogo-digital	29		
CIICAp			
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas	18		
CPU			
Unidad central de procesamiento	53		
CR			
Código de Red	19		
CRE			
Comisión Reguladora de Energía	13		
CSA			
Canadian Standards Association	70		
D			
dB			
Decibel	27		
DC			
Corriente Directa	14		
DFT			
Transformada Discreta de Fourier	56		
DSP			
Procesador Digital de Señales	16		
E			
E_{Go}			
Banda prohibida del semiconductor	79		
ETL			
Testing Laboratories	70		

MW			SNL	
Megawatts		69	Sandia National Laboratories	20
	N		SSTDR	
			Spread Spectrum Time Domain Reflectometry	20
			STC	
			Standar Test Condition	78
N			T	
Factor del diodo ideal		79	T	
NEC			Temperatura de la celda	79
Código Eléctrico Nacional		47	TFCT	
NOCT			Transformada de Fourier de Tiempo Corto	55
Nominal Operating cell temperature		78	TFF	
N_p			Transformada Rápida de Fourier	16
Número de celdas conectadas en paralelo		79	TN	
N_s			Temperatura nominal	79
Número de celdas conectadas en serie		79	TO	
	o		Transformada de Ondeleta	56
°C			TWD	
Grados centígrados		92	Transformada Wavelet Discreta	59
	P		U	
PDS			UL	
Procesamiento Digital de Señales		39	Underwriter Laboratories	47
P_{mpp}			V	
Potencia máxima de salida		85	VDC	
P-V			Volts de corriente Directa	71
Potencia-Voltaje		83	V-I	
	Q		Voltaje-Corriente	83
Q			V_{mpp}	
Carga del electrón		79	Voltaje al punto de máxima potencia	85
	R		VOC	
RAM			Voltaje de circuito abierto	79
Memoria de acceso aleatorio		53	v_t	
RS			Voltaje térmico del diodo	80
Resistencia en serie		79	W	
RSH			W/(K·m)	
Resistencia de shunt		79	vatio por Kelvin*metro	93
	S		W/m·K	
S·m⁻¹			Watts/metro * Kelvin	93
Siemens*metro-1		93	WST	
SI			Wavelet Seuret-Trutié	106
Sistema Internacional de Unidades		32	Ω	
Simulink®			Ω	
Entorno de programación gráfica en Matlab para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos multidominio		67	Ohmio	33

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la industria fotovoltaica se debe en parte a las políticas favorables de energía limpia, las mejoras tecnológicas y la dramática reducción de costos de los módulos fotovoltaicos (FV) [1]. Un área de tecnología que presenta un desafío para continuar con la adopción generalizada de PV es la detección de arco.

Las fallas de arco son un peligro para los sistemas fotovoltaicos, contienen cables largos y expuestos y son susceptibles a condiciones ambientales como corrosión por contacto, picaduras de roedores y clima húmedo [2]. Dichas fallas de arco pueden causar incendios, peligro de descarga eléctrica y fallas del sistema[3], pero sobre todo es un riesgo para los operadores y usuarios .

Los estándares de calidad y seguridad emergentes pronto requerirán obligatoriamente que los sistemas FV incluyan equipos de detección de falla de arco [113,114,115], por lo que los sistemas fotovoltaicos deben estar equipados con dispositivos de protección para detectar fallas de arco [17], [119] y aislar el arco, como interruptores de circuito de falla de arco o en su defecto estar motinoreados en este sentido.

Las técnicas existentes dependen del reconocimiento de patrones en el dominio del tiempo, o la detección de amplitud en el dominio de la frecuencia mediante el uso de una transformada de Fourier [4,6,7]. En el caso de los arcos eléctricos la relación señal / ruido es baja y no es periódica, por lo que el análisis de transformada de wavelet proporciona un enfoque de tiempo y frecuencia para analizar señales objetivo[28].

En términos de seguridad fotovoltaica, está íntimamente relacionada con la calidad de la energía estipulada legalmente en el código de red [116,117] que es la transformación en ley de recomendaciones. Dicho código entró en vigor a partir de abril de 2019. Los beneficios se basan en el incremento de sus índices productivos y al mismo tiempo el ahorro de los recursos energéticos. Las sanciones por incumplimiento de este código de red van desde multas del 2 al 10% de los ingresos brutos de todo un año, según los criterios de la CRE, hasta el corte de energía por no acatar las exigencias del código.

Las variables eléctricas consideradas en el código de red son:

1. Voltaje.
2. Frecuencia.
3. Factor de potencia.
4. Calidad de energía.
5. Flicker.
6. Desbalance de Corriente.

Dentro del concepto de calidad de energía, la alteración en la “forma de la onda” tiene lugar en los propios procesos de producción, transporte y distribución, así como en la utilización de determinados receptores que generan perturbaciones; siendo estos factores inevitables pero si controlables por medio de mecanismos preventivos.

Actualmente la generación y distribución de energía eléctrica tienen que afrontar dos retos importantes:

1. Aumentar la capacidad de generación y distribución de energía eléctrica, para responder a la demanda creciente ya que los sistemas de generación y distribución están funcionando muy cerca del límite de su capacidad máxima
2. Asegurar la calidad de la energía eléctrica generada y distribuida por fuentes de energía limpias, para que se pueda garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y la seguridad de los usuarios y operadores.

Las investigaciones relacionadas con arco eléctrico [54, 55, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 70] contribuyen para generar avances tecnológicos y criterios para el tratamiento de fallas de arco en los sistemas fotovoltaicos y por ende en el cumplimiento del código de red en el marco de calidad de la energía.

En esta tesis además de presentar las características de las señales de arco eléctrico, se propone el uso de la transformada de wavelet para el procesamiento y posible detección de fallas de arco en sistemas de corriente directa (DC), con experimentos que ejemplifican su alcance y eficiencia al procesar señales estocásticas.

PROBLEMÁTICA

No se cuenta con información específica sobre las características esenciales que tienen las señales de arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos y existe controversia entre los métodos comerciales para el procesamiento y detección de las fallas de arco. Así mismo determinar el método de procesamiento adecuado para señales de arco es ambiguo y no se ejemplifica con claridad la eficiencia de dichos métodos. Obtener información de este tipo permite que el procesamiento de la señal en instrumentos de detección de fallos sea eficiente.

El problema de las fallas de arco en sistemas fotovoltaicos no solo radica en la manera en la que se procesan, sino en la calidad de la energía que se está generando para consumo y manipulación por tanto el impacto de las fallas de arco eléctrico es directamente proporcional al desarrollo de la industria fotovoltaica y de manera general al desarrollo de las energías limpias, mientras exista éste problema habrá preocupaciones importantes y responsabilidad en la adopción generalizada de la energía fotovoltaica [14], [57], [112].

En cuanto a la seguridad no podemos olvidar que los sistemas fotovoltaicos están compuestos por una gran cantidad de conectores eléctricos y cables largos expuestos para formar las series y combinaciones paralelas de módulos fotovoltaicos individuales en cadenas y matrices. La combinación de alto voltaje de DC y el deterioro del aislamiento del cable por perforaciones de roedores o abrasión por vibración, son las causas principales de fallas de arco y pueden provocar descargas eléctricas, incendios y fallas del sistema [14].

El problema de las fallas de arco no está limitado a sistemas residenciales de pequeña escala, sino también en los sistemas de servicios públicos a gran escala y puede representar amenazas significativas para la seguridad humana.

Por lo tanto, la detección de falla de arco es de vital importancia para la operación confiable y segura del sistema.

JUSTIFICACIÓN

La investigación de este proyecto está contribuyendo al objetivo del código de red de incentivar y permitir que el sistema eléctrico nacional se desarrolle económica, ordenada y eficientemente bajo criterios técnicos que permitan una operación segura y un suministro confiable, generando conciencia sobre la importancia de la calidad de la energía para la sustentabilidad incluso de los sistemas de generación de energías limpias como los sistemas fotovoltaicos los cuales también tienen aporte a la matriz energética nacional y que las legislaciones actuales consideren aplicar en sus sistemas las recomendaciones para una red de distribución de energía eficiente; además de evitar sanciones económicas para la industria conectada a centros de carga de media y alta tensión.

Los estudios y planteamientos en relación a las fallas de arco eléctrico tienen la finalidad de servir de apoyo al código de red que ya se encuentra en vigor. Así cuando la legislación del código de red toque al sector generador de energías limpias se cuente con información que defina la toma de decisiones.

La detección confiable de fallas de arco es crucial para la operación segura del sistema fotovoltaico. Los métodos de transformada rápida de Fourier (TFF) que se han utilizado previamente para detección de arco eléctrico examinan las características de frecuencia del voltaje o corriente en los sistemas, pero los arcos eléctricos son caóticos, no periódicos y no estacionarios, provenientes de un sistema estocástico con señales de tipo no estacionarias [4, 30]. Los procesamientos basados en wavelets son adecuados porque no asume periodicidad y es experta en detectar discontinuidades en la señal [10, 29, 61, 62, 63, 64]. La descomposición wavelet y discriminación de arco podían implementarse en tiempo real en un procesador digital de señales (DSP) de bajo costo, que nos permita detectar fallas de arco oportunas y evitar:

- Lesiones graves y/o la muerte.
- Destrucción de equipos e interrupciones del sistema.
- Tiempo de inactividad de las instalaciones.
- Multas y sanciones regulatorias

Teniendo en cuenta que sobre todo es para garantizar la seguridad personal.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo identificar y caracterizar las señales de arco eléctrico producidas en los sistemas fotovoltaicos?

HIPÓTESIS

Es posible detectar fallas de arco eléctrico si se caracterizan las señales utilizando la transformada wavelet discreta como método de procesamiento de señales en una herramienta computacional.

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar señales de arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar el estado del arte de los trabajos reportados en la literatura sobre la detección de fallas de arco.
- Diseñar y desarrollar experimentos que permitan evaluar el comportamiento de las señales de arco eléctrico.
- Diseñar una herramienta computacional que permita caracterizar señales de fallas producidos por arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos.
- Crear una señal de arco eléctrico en paneles fotovoltaicos de silicio policristalino.
- Comparar los datos de caracterización que aportan las señales de arco simuladas y reales.
- Validar el desempeño y efectividad de la nueva wavelet propuesta por el equipo de procesamiento de señales.

ALCANCE

El proyecto abarca el diseño de una herramienta computacional en Matlab para la simulación y caracterización de señales de arco eléctrico producidas en sistemas fotovoltaicos. Con el fin de generar un banco de pruebas, dichas señales tendrán orígenes distintos; una de origen sintético modelada en Simulink de Matlab y una más generada de manera física con paneles fotovoltaicos de silicio policristalino. Para la obtención de la señal de arco generada en los paneles fotovoltaicos se utilizará un osciloscopio y se procesará con la herramienta diseñada en Matlab.

Los métodos de procesamiento de señales que se utilizarán serán: Transformada wavelet diádica, exponente de Lipschitz y se propondrá una nueva wavelet desarrollada por el equipo de procesamiento de señales. Esto servirá para emitir criterios sobre los métodos adecuados para las señales de arco eléctrico y obtener la mayor cantidad de información para futuros trabajos de desarrollo de instrumentación de detección de fallas de arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos.

El proyecto se realizará en las instalaciones del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp).

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y MARCO CONCEPTUAL

1.1 ANTECEDENTES

Dentro de la comunidad científica se encuentran trabajos realizados con enfoque en el estudio de las fallas de arco eléctrico.

Zhan Wang & Robert S. Balog, en 2013 en la 39^o conferencia de especialistas fotovoltaicos en el Instituto de Ingeniería, Eléctrica y Electrónica (IEEE), presentaron un artículo relacionado con la detección de falla de arco y destellos en matrices fotovoltaicas de CC utilizando la transformada de wavelet [28].

En 2014 publicaron un método de evaluación para algoritmos de detección de falla de arco [30]. Durante el mismo año publicaron un artículo sobre la detección de señales de fallas de arco poniendo en comparación la transformada de Fourier y la de Wevelet utilizando datos sintetizados.

En 2016 en la 43^o conferencia de especialistas fotovoltaicos en el (IEEE), presentaron un estudio sobre la detección de falla de arco en tiempo real en sistemas fotovoltaicos utilizando la descomposición wavelet [29].

En 2017, se mostrarán dos artículos más uno sobre la detección de fallas de arco con alta fidelidad [31] y otro sobre un generador de arco para pruebas de detector de falla de arco fotovoltaico [32].

R. F. Dvorak and K. B. Wong, en 2007 obtienen una patente en US llamada " Sistema de interrupción de circuito de falla de arco" [19], el cual determina si hay un arco eléctrico presente en un circuito eléctrico.

J. C. Engel, T. J. Miller, K. L. Parker, J. J. Shea, and X. Zhou, en 2009 obtienen una patente en US llamada " Interruptor de circuito de falla de arco y método de detección de falla de arco en serie y en paralelo" [18], la cual trata de un interruptor de circuito de falla de arco que incluye contactos separables, un conductor neutro, un mecanismo operativo estructurado para abrir y cerrar los contactos separables.

Con la Reforma Energética, promulgada en 2013 por el gobierno del presidente Enrique Peña Nieto, se creó el Código de Red (CR), el cual entrará en vigor el 8 de abril de 2019 con el objetivo de ordenar nuevamente el Sistema Eléctrico Nacional.

El código de red es la transformación en ley de lo que fueron recomendaciones [105] emitidas por asociaciones ingenieriles profesionales reconocidas a nivel mundial como es el caso de la IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) y la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) enfocadas a mejorar la calidad del suministro eléctrico. El objetivo del Código es el de salvaguardar la integridad del sistema eléctrico así como brindarle calidad, continuidad, confiabilidad y sustentabilidad [107].

En México los requerimientos del Código de Red se hicieron obligatorios a partir del 9 de abril de 2016. El mismo Código de Red prevé que los requerimientos técnicos que deben de cumplir los Centros de Carga podrán ser exigibles por la CRE a partir del 8 de abril de 2019.

Tanto los requerimientos como las multas por sanción van contenidas en este código de red. A la fecha, la CRE (Comisión reguladora de energía) no ha recibido ningún Plan de Trabajo para asegurar el cumplimiento del código de red.

Por otro lado, cuando se genera un arco, se convierte en parte del sistema fotovoltaico, lo que significa que puede afectar las señales del circuito del sistema fotovoltaico. La mayoría de los investigadores utilizan las señales de corriente y voltaje de los sistemas fotovoltaicos para extraer las señales características del arco. Sandia National Laboratories (SNL) [56] realizó un descubrimiento importante de que el ruido de arco existe principalmente en la banda de frecuencia de 10-100 kHz. Además, debido a que los métodos utilizados para extinguir los arcos en serie y en paralelo son diferentes, en [57] se propusieron tres formas de diferenciar los arcos en serie y en paralelo. Hasta ahora, se han propuesto muchos métodos diferentes de detección de arco de CC, incluida la detección en el dominio de la frecuencia del tiempo [58-63], la inteligencia artificial [64-68], la reflectometría en el dominio del tiempo de espectro ensanchado (SSTDR) [69], la entropía de la corriente de arco [70] y separación de fuente ciega [71].

1.2 MARCO CONCEPTUAL

1.2.1 Señal eléctrica

La palabra señal proviene del latín “signalis” y se trata de un medio que informa, avisa o advierte de algo. De manera más amplia son funciones de una o más variables que permiten reconocer algún fenómeno.

Por tanto una señal eléctrica es un tipo de señal generada por algún fenómeno electromagnético. Éstas señales pueden ser de dos tipos:

1. Analógicas (varían de forma continua en el tiempo). Por ejemplo la voz, el pulso cardiaco etc.
2. Digitales (varían de forma discreta con parámetros que presentan saltos de un valor al siguiente, por ejemplo los valores binarios 0 y 1). Éste tipo de señales se generan artificialmente por un circuito electrónico (oscilador). Por ejemplo información recibida de un semáforo, código morse etc.

Por tanto podríamos definir a una señal eléctrica de dos maneras:

- a) La diferencia de potencial (o tensión) entre dos puntos cargados eléctricamente en el transcurso de un tiempo.
- b) La variación de la corriente en el transcurso del tiempo, se analiza la corriente que pasa por un conductor.

En la mayoría de las aplicaciones prácticas, la señal eléctrica representa la variación de otra magnitud física en el transcurrir del tiempo, convertida en electricidad por un transductor. Por tanto se considera como señal la información útil para el circuito y a cualquier información indeseada, inútil o dañina, introducida involuntariamente en el sistema, es considerada ruido.

1.2.2 Representación gráfica de las señales eléctricas

Una señal eléctrica aleatoria se puede estudiar a partir de su representación matemática en el gráfico cartesiano. Para una misma señal, hay dos representaciones posibles:

1. El tiempo: el eje de las abscisas representa el tiempo transcurrido, y el de las ordenadas representa la amplitud de la señal. Este gráfico es llamado de forma de onda.

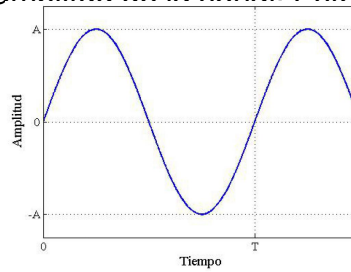


Figura 1. Gráfico de forma de onda

2. La frecuencia: el eje de las abscisas representa las frecuencias que componen la señal, y el de las ordenadas representa la amplitud de la señal. A este gráfico se le llama "de espectro de frecuencia".

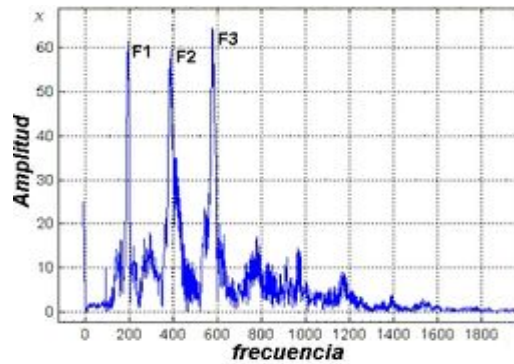


Figura 2. Gráfico de espectro de frecuencia.

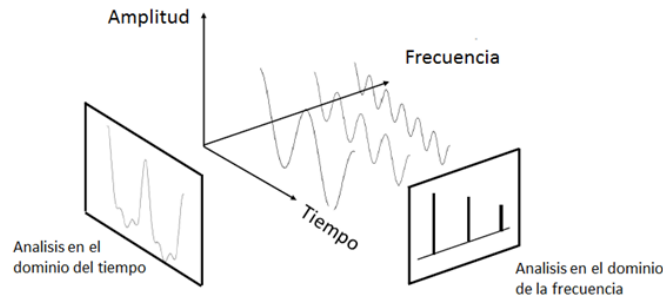


Figura 3. Gráfico de diferentes análisis de una señal eléctrica.

Para una señal sinusoidal pura (la red eléctrica residencial, por ejemplo) aunque existe la representación fasorial, en que el módulo del vector representa la amplitud y el ángulo representa el desfase de la señal en relación a un circuito puramente resistivo.

1.2.3 Tipos de señales

Señales constantes y variables.

Las señales constantes son aquellas que no varían en el tiempo. Tal es el caso del voltaje en bornes de una batería. Su representación gráfica es por lo tanto una línea recta horizontal. Las señales variantes son aquellas que cambian su valor de alguna manera con el tiempo [35].

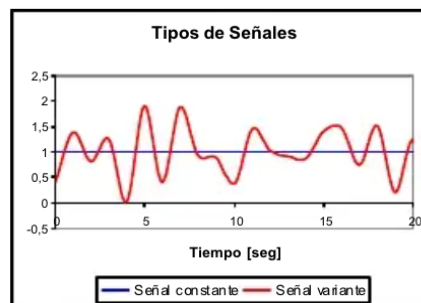


Figura 4. Gráfico señal constante y variable.

Señales continuas y alternas

Desde el punto de vista gráfico, las señales continuas son aquellas que siempre tienen el mismo signo, es decir, son siempre positivas o nulas, o siempre negativas o nulas. En el caso de una corriente, esto significa que la misma siempre circulará en el mismo sentido, aunque pueda variar su intensidad. Si la señal es de voltaje, debe interpretarse que la fuente intenta forzar la circulación de corriente siempre en el mismo sentido, aunque pueda variar su magnitud. Una señal continua, entonces, puede o no ser constante. Las señales alternas son aquellas que por el contrario varían de su magnitud. Una señal alterna nunca puede ser constante [35].

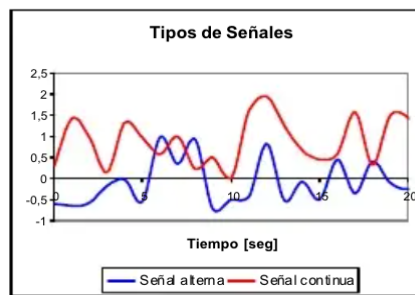


Figura 5. Gráfico señal alterna y continua.

Señales periódicas

Las señales periódicas son aquellas a las cuales se les puede encontrar un patrón de repetitividad $X(t) = X(t + T)$, es decir, que después de un determinado tiempo, vuelve a repetirse uno a uno los valores anteriores, una y otra vez. A este patrón se lo reconoce como ciclo de la onda. El tiempo que demora un ciclo en desarrollarse se denomina período, y por supuesto, se mide en segundos [35].

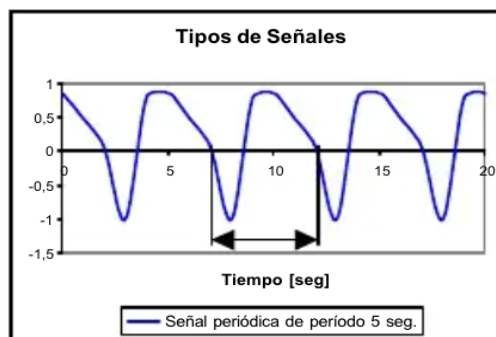


Figura 6. Gráfico señal periódica.

1.2.4 Características básicas de una señal eléctrica

La información que viaja a través de un canal de comunicación basado en cable de cobre es en realidad una señal eléctrica. Los elementos que conforman una señal son:

Amplitud

La amplitud es el valor máximo, tanto positivo como negativo, que puede llegar a adquirir la onda, también es la distancia máxima que separa cada partícula de su punto de equilibrio.

- El valor máximo positivo que toma la amplitud de una onda recibe el nombre de "pico o cresta";
- El valor máximo negativo que toma la amplitud se llama "valle";
- El punto donde la onda se anula al pasar del valor positivo al negativo, o viceversa, se conoce como "punto de equilibrio".

Fase

Es el momento o punto en el que dos señales se encuentran en un instante determinado. Cada punto de una onda posee una fase definida que indica cuánto ha avanzado dicho punto a través del ciclo básico de la onda. Existen factores que pueden hacer que una onda modifique su estado:

- Cuando existen dos ondas de igual frecuencia en igualdad de fase se suman (interferencia constructiva).
- Dos ondas de igual frecuencia en una fase totalmente opuesta, se restan y se forma un interferencia o distorsión (este tema se abordará posteriormente).
- Dos ondas idénticas desfasadas 180° se cancelan.

Umbral

El umbral es la cantidad mínima de señal que ha de estar presente para ser registrada por un sistema, siendo una base de exploración de sensibilidad. Donde: $\text{Sensibilidad} = 1/\text{Umbral}$. Para la determinación práctica del umbral se considera un 50% de probabilidades. Es decir, umbral es la menor cantidad de estímulo que tiene un 50% de probabilidades de ser detectado.

Frecuencia

Se denomina frecuencia de la señal a la cantidad de ciclos que pueden desarrollarse en un segundo. Se mide en ciclos por segundo o Hertz (Hz). La relación existente entre la frecuencia y el periodo de una señal es:

$$f = \frac{1}{T}$$

Por tanto las señales aperiódicas son aquellas a las cuales es imposible definirles un ciclo y éstas por lo general son señales aleatorias como suelen ser las de audio.

Periodo

Es el tiempo que tarda en repetirse un fenómeno periódico.

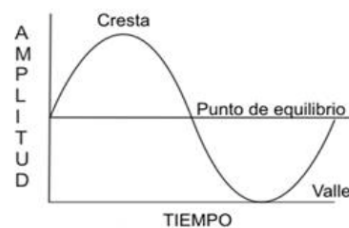


Figura 7. Aspecto de una onda.

1.2.5 Ruido

Se denomina ruido a toda señal no deseada que se mezcla con la señal útil que se quiere analizar. Es el resultado de diversos tipos de perturbaciones que tiende a enmascarar la información cuando se presenta en la banda de frecuencias del espectro de la señal, es decir, dentro de su ancho de banda.

Para medir la influencia del ruido sobre la señal se utiliza la relación señal/ruido, que generalmente se maneja en decibelios (dB). Dado que es una unidad que se utiliza para expresar la relación entre dos valores de presión sonora, o tensión y potencia eléctrica no se debe considerar como una unidad de medida sino más bien como una expresión no lineal, logarítmica, adimensional y matemáticamente escalar.

Los decibelios se emplean en acústica, electricidad, telecomunicaciones y otras especialidades para expresar la relación entre dos potencias: la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia [33].

Entonces tenemos las siguientes expresiones para su cálculo:

$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \text{ (si lo que se comparan son potencias).}$$

$$dB = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2} \text{ (si lo que se comparan son voltajes).}$$

$$dB = 20 \log_{10} \frac{I_1}{I_2} \text{ (si lo que se comparan son intensidades de corriente).}$$

Tipos de ruido

El ruido se puede generar de varias maneras [34]:

1. Por la agitación térmica producida en las moléculas del material que forma el conductor, debido al choque con los electrones en movimiento.
2. Fenómenos naturales tales como tormentas eléctricas con relámpagos, rayos, eclipses, manchas solares y otros disturbios en la atmósfera.
3. Contactos defectuosos, artículos eléctricos, radiación y alumbrado fluorescente.

Clasificación de los tipos de ruido Según la frecuencia

Ruido blanco

También conocido como gaussiano o térmico. Se presenta debido a la temperatura que es resultado de la agitación térmica de los electrones y está

uniformemente distribuido en el espectro de frecuencias, está presente en todos los medios electrónicos utilizados para transmitir señales. Es un tipo de ruido con espectro plano, es decir, tiene la misma energía en todas las frecuencias.

Este ruido es inevitable y no se puede eliminar, por esa razón se impone un límite superior en las prestaciones de los sistemas de comunicaciones.

Ruido rosa

Es un ruido cuyo nivel de presión sonora está caracterizado por una densidad espectral inversamente proporcional a la frecuencia ($1/f$).

Es un tipo de ruido que no tiene respuesta uniforme en todo el ancho de banda, sino que el nivel de energía decrece a razón de 3dB por octava. Si se representa esta energía en bandas de frecuencia vemos que el nivel permanece constante.

El ruido de tipo $1 / f$ aparece en un gran número de aplicaciones incluyendo: transistores, materiales magnéticos, el volumen de la grabaciones musicales, evolución de datos climáticos, tiempos transcurridos entre terremotos, ruido en dispositivos de grafeno, intermitencia de fluorescencia en nanocristales, fluctuaciones de corriente en electrodos de escalas nanométricas, procesos estocásticos caracterizados por subdifusión, difusión en sistemas desordenados y corrientes iónicas a través de nanoporos.

Ruido de Baja Frecuencia

Consideraremos valores de baja frecuencia todo ruido que se encuentre entre 20 y 125 Hz. Algunas fuentes que generan componentes de baja frecuencia se encuentran dentro del grupo de maquinaria industrial, principalmente motores, así como transformadores. Por ejemplo el ruido azul.

1.2.6 Conversor de señal

Un conversor de señal digital a analógica o conversor digital analógico, CDA o DAC (del inglés, *digital to analogue converter*) es un dispositivo para convertir señales digitales con datos binarios en señales de corriente o de tensión analógica. Hay distintos componentes que pueden intervenir en este proceso, como interruptores simples, red de resistores, fuentes actuales o condensadores. Un convertidor de analógico a digital (ADC) realiza la operación inversa.

1.2.7 Microprocesadores

Se denomina microprocesador al circuito electrónico que procesa la energía necesaria para que el dispositivo electrónico en que se encuentra funcione, ejecutando los comandos y los programas adecuadamente. Se caracteriza por ser un circuito integrado encargado de procesar y ejecutar las instrucciones codificadas en números binarios.

1.2.8 Diagrama Bode

Es una representación gráfica que sirve para caracterizar la respuesta en frecuencia de un sistema. Normalmente consta de dos gráficas separadas, una que corresponde con la magnitud de dicha función y otra que corresponde con la fase. Recibe su nombre del científico estadounidense que lo desarrolló, Hendrik Wade Bode.

Es una herramienta muy utilizada en el análisis de circuitos en electrónica, siendo fundamental para el diseño y análisis de filtros y amplificadores.

El diagrama de magnitud de Bode dibuja el módulo de la función de transferencia (ganancia) en decibelios en función de la frecuencia (o la frecuencia angular) en escala logarítmica. Se suele emplear en procesamiento de señal para mostrar la respuesta en frecuencia de un sistema lineal e invariante en el tiempo.

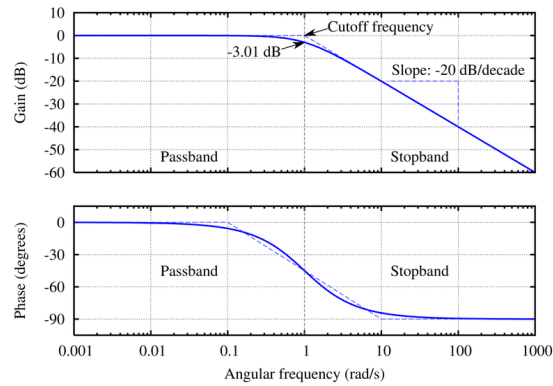


Figura 8. Diagrama de bode de un filtro paso bajo Butterworth de primer orden (con un polo).

1.2.9 Circuito

Un circuito es una interconexión de componentes eléctricos (como baterías, resistores, inductores, condensadores, interruptores, transistores, entre otros) que transporta corriente eléctrica a través de por lo menos una trayectoria cerrada [48,49].

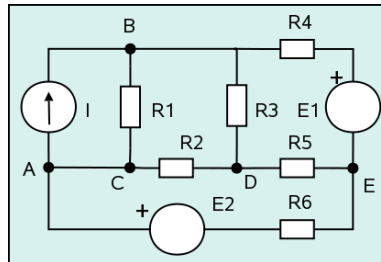


Figura 9. Ejemplo de un diagrama de circuito.

Clasificación de los circuitos

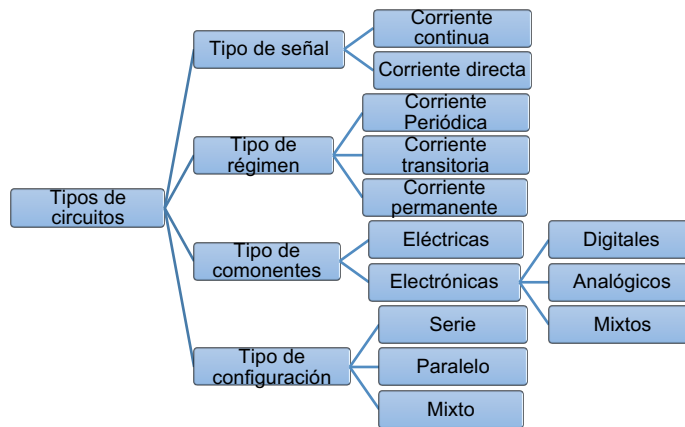


Figura 10. Clasificación de los circuitos.

1.2.10 Carga eléctrica

La carga eléctrica es una propiedad física intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante fuerzas de atracción y repulsión entre ellas a través de campos electromagnéticos. La unidad de carga eléctrica se denomina culombio o coulomb (símbolo C) y se define como la cantidad de carga que pasa por la sección transversal de un conductor eléctrico en un segundo, cuando la corriente eléctrica es de un amperio, y se corresponde con:

1 culombio = $6,242 \times 10^{18}$ electrones libres [36].

1.2.11 Campo eléctrico

El campo eléctrico (región del espacio en la que interactúa la fuerza eléctrica) es un campo físico que se representa por medio de un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica.¹ Se puede describir como un campo vectorial en el cual una carga eléctrica puntual de valor $\{ \displaystyle q \} q$ sufre los efectos de una fuerza eléctrica **F** dada por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{F} = q \mathbf{E}$$

Los campos eléctricos pueden tener su origen tanto en cargas eléctricas como en campos magnéticos variables [37].

1.2.12 Corriente eléctrica

Es el flujo de carga eléctrica que recorre un material. Se debe al movimiento de las cargas (normalmente electrones) en el interior del mismo. Al caudal de corriente (cantidad de carga por unidad de tiempo) se le denomina intensidad de corriente eléctrica (representada comúnmente con la letra I). En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en coulombios por segundo (C/s), unidad que se denomina amperio (A)[38].

El instrumento usado para medir la intensidad de la corriente eléctrica es el galvanómetro que, calibrado en amperios, se llama amperímetro, colocado en serie con el conductor por el que circula la corriente que se desea medir.

1.2.13 Corriente continua

Se denomina corriente continua o corriente directa (CC en español, en inglés DC, de direct current) al flujo de cargas eléctricas que no cambia de sentido con el tiempo. La corriente eléctrica a través de un material se establece entre dos puntos de distinto potencial. Cuando hay corriente continua, los terminales de mayor y menor potencial no se intercambian entre sí. Por tanto es continua toda corriente cuyo sentido de circulación es siempre el mismo, independientemente de su valor absoluto.

1.2.14 Corriente alterna

Se denomina corriente alterna (simbolizada CA en español y AC en inglés, de alternating current) a la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente. La forma de onda de la corriente alterna más comúnmente utilizada es la de una onda senoidal [39]. En el uso coloquial, corriente alterna se refiere a la forma en la cual la electricidad llega a los hogares y a las empresas.

La razón del amplio uso de la corriente alterna, que minimiza los problemas de transmisión de potencia, viene determinada por su facilidad de transformación, cualidad de la que carece la corriente continua [40].

1.2.15 Voltaje

La tensión eléctrica o diferencia de potencial (también denominada voltaje). Es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. También se puede definir como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas. Se puede medir con un voltímetro. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el voltio.

1.2.16 Resistencia eléctrica

Se le denomina resistencia eléctrica a la oposición al flujo de corriente eléctrica a través de un conductor. La unidad de resistencia en el Sistema Internacional es el ohmio, que se representa con la letra griega omega (Ω), en honor al físico alemán Georg Simon Ohm, quien descubrió el principio que ahora lleva su nombre.

Comportamiento de la resistencia en corriente continua

Una resistencia real en corriente continua (CC) se comporta prácticamente de la misma forma que si fuera ideal, esto es, transformando la energía eléctrica en calor por efecto Joule. La ley de Ohm para corriente continua establece que:

$$R = \frac{V}{I}, \text{ donde:}$$

R es la resistencia en ohmios, V es la diferencia de potencial en voltios e I es la intensidad de corriente en amperios.

Comportamiento de la resistencia en corriente alterna

En el caso de que la señal aplicada sea senoidal, corriente alterna (CA), a bajas frecuencias una resistencia real se comportará de forma muy similar a como lo haría en CC, siendo despreciables las diferencias. En altas frecuencias el comportamiento es diferente, aumentando en la medida en la que aumenta la frecuencia aplicada, lo que se explica fundamentalmente por los efectos inductivos que producen los materiales que conforman la resistencia real.

De donde se deduce que en los circuitos de CA la resistencia puede considerarse como una magnitud compleja con parte real y sin parte imaginaria o, lo que es lo mismo con argumento nulo.

1.2.17 Capacitancia eléctrica

En electromagnetismo y electrónica, la capacitancia eléctrica, es la propiedad que tienen los cuerpos para mantener una carga eléctrica. También es una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada para una diferencia de potencial eléctrico dada. El valor de la capacitancia de un capacitor se mide en faradios (F)

El dispositivo más común que almacena energía de esta forma es el capacitor. La relación entre la diferencia de potencial (o tensión) existente entre las placas del condensador y la carga eléctrica almacenada en este, se describe mediante la siguiente expresión matemática:

$$C = \frac{q}{v}, \text{ donde:}$$

C, es la capacitancia, medida en faradios (en honor al físico experimental Michael Faraday); esta unidad es relativamente grande y suelen utilizarse submúltiplos como el microfaradio o picofaradio.

q, es la carga eléctrica almacenada, medida en culombios.

v, es la diferencia de potencial (o tensión), medida en voltios.

La capacitancia puede aumentar cuando:

- Las placas de un capacitor (conductores) están colocadas más cerca entre sí.
- Las placas más grandes ofrecen más superficie.
- El dieléctrico es el mejor aislante posible para la aplicación.

En los circuitos eléctricos, los capacitores se usan con frecuencia para bloquear la corriente continua (CC), a la vez que permiten el flujo de la corriente alterna (CA).

Carga de un condensador

La carga del condensador no adquiere instantáneamente su valor máximo, Q , sino que va aumentando en una proporción que depende de la capacidad, C , del propio condensador y de la resistencia, R , conectada en serie con él. Por tanto la cantidad de carga que tendrá ese condensador en función del tiempo transitorio del circuito será:

$$q = Q \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}})$$

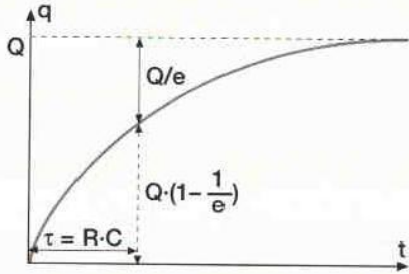


Figura 11. Carga de un capacitor.

En la figura se representa gráficamente esta ecuación, la carga del condensador en función del tiempo. Se denomina constante de tiempo del circuito: $\tau = R \cdot C$

Descarga de un condensador

Una vez que tenemos cargado el condensador, situamos el interruptor S en la posición 2, de forma que el condensador se desconecta de la batería. En esta situación el condensador va perdiendo paulatinamente su carga y su expresión de cálculo es:

$q = Q \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$ Siendo Q , la carga máxima que tenía al principio, antes de desconectarlo de la batería por medio del interruptor. $\tau = R \cdot C$ Al cabo del tiempo:

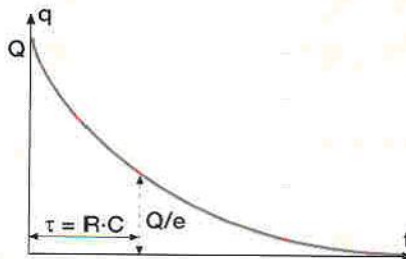


Figura 12. Descarga de un capacitor.

La carga del condensador es Q/e , es decir, tanto en la carga como en la descarga, la constante de tiempo tiene el mismo valor.

1.2.18 Inductancia

En electromagnetismo y electrónica, la inductancia (L), es la medida de la oposición a un cambio de corriente de un inductor o bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético, y se define como la relación entre el flujo magnético (Φ) y la intensidad de corriente eléctrica (I) que circula por la bobina y el número de vueltas (N) del devanado:

$$L = \frac{\Phi N}{I}$$

La inductancia depende de las características físicas del conductor y de la longitud del mismo.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Teoría de sistemas y señales

Las señales constituyen el vehículo más relevante para transmitir información y estamos en una era de la información donde es necesario procesarlas, distribuirlas, cambiarlas y hasta generarlas en algunas ocasiones.

Dentro de la teoría de sistemas y señales se mantiene el uso de la matemática aplicada para el estudio de señales. El enfoque de esta teoría no es solamente un análisis matemático sino que al existir sistemas, filtros, modulación y aplicaciones concretas de las transformadas hacen que tenga corte netamente electrónico con aplicaciones en computación.

2.2 Señales y sistemas

Señal

Una señal se puede considerar como una magnitud eléctrica (corriente, voltaje o carga) que representa una magnitud física y que provee información sobre el estado o evolución de un sistema o fenómeno [42]. La magnitud física puede ser función del tiempo, el espacio o cualquier otra variable o variables; es decir, que una señal puede considerarse como un fenómeno físico (cantidad física) que experimenta cambios en el tiempo, el espacio u otra variable independiente. Una señal es una descripción de cómo un parámetro varía con otro parámetro.

2.3 Clasificación general de las señales

Una clasificación muy general utilizada en el mundo de las señales indica que existen dos tipos: Continuas y Discretas [43]

Señales de variable independiente continua.

Las señales continuas están definidas para cualquier valor del dominio de los números reales y toman valores en un intervalo continuo, matemáticamente se representan como funciones de variable continua. A este tipo de señal también se le suele llamar analógica y son las que se presentan en el mundo real.

La señal es definida sobre un dominio que puede ser o no finito, sobre el cual a cada posible valor del dominio le corresponde un único valor de la señal. La continuidad de la variable del tiempo implica que el valor de la señal puede precisarse para cualquier punto arbitrario del tiempo perteneciente al dominio. Donde por ejemplo el tiempo siempre tendrá un instante y la señal está definida para cualquier valor[41].

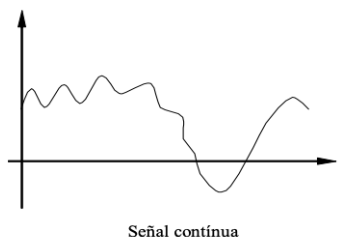


Figura 13. Forma de señal continua.

Señales de variable independiente discreta.

Están definidas sólo para ciertos puntos del dominio de los reales y comúnmente se utiliza el dominio de los enteros, donde estos puntos no necesitan ser equidistantes. Este tipo de señales se presenta por secuencias de números, secuencias discretas o tablas de datos. Uno de los resultados fundamentales en la teoría de señales detalla las condiciones en las cuales las señales análogas pueden ser transformadas en una señal de tiempo-discreto y ser recuperada sin ningún tipo de error [41].

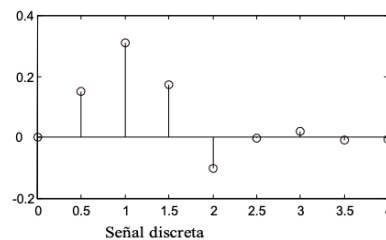


Figura 14. Señal coseno en tiempo discreto.

Una señal en tiempo discreto se define para cada valor n para $-\infty < n < \infty$. Por lo general nos referimos a $x(n)$ como la n -ésima muestra de la señal aún cuando $x(n)$ sea inherentemente en tiempo discreto.

2.4 Clasificación de las señales por su descripción matemática

Desde el punto de vista matemático las señales se pueden clasificar en Determinísticas y Aleatorias.

Señales determinísticas

Son señales que pueden ser descritas por una expresión matemática explícita, una tabla de datos, o una regla. Para estas señales los valores pasados, presentes y futuros de la señal pueden ser conocidos sin ninguna incertidumbre, es decir, que están completamente determinados.

Señales aleatorias

Se caracterizan porque sus valores en cada instante de tiempo no son predecibles. Las señales aleatorias son producidas por los fenómenos naturales tales como las ondas oceánicas, las ondas sísmicas, arcos eléctricos, rayos etc. Estas señales se pueden caracterizar por funciones de densidad de probabilidad, valores esperados, variancias y funciones de correlación. Para su análisis y descripción se utilizan técnicas estadísticas, teoría de probabilidad y procesos estocásticos en vez de fórmulas explícitas.

Señales continuas determinísticas de interés

A continuación se enuncian algunas señales que son de mucha importancia en el PDS y se utilizarán continuamente en este texto. Dentro de estas funciones o señales tenemos las senoidales y cosenoidales que corresponden a una base ortogonal ortogonal más famoso que existe; por otro lado mencionamos funciones como el escalón y el pulso con el fin de llegar a obtener la función impulso que es de suma importancia en el proceso de convertir una señal continua a discreta y en la caracterización de un sistema.

Señal periódica y no periódica

Las señales periódicas son aquellas a las cuales se les puede encontrar un patrón de repetitividad, es decir, que después de un determinado tiempo, vuelve a repetirse uno a uno los valores anteriores, una y otra vez. A este patrón se lo reconoce como ciclo de la onda. El tiempo que demora un ciclo en desarrollarse se denomina período, y por supuesto, se mide en segundos.

Definición matemática de una señal periódica es donde una señal $x(t)$ en TC se dice periódica si existe un valor $T_0 > 0$.

Tal que:

$$x(t+T_0) = x(t) \quad -\infty < t < \infty$$

El menor valor de T_0 para el cual se verifica esta ecuación se denomina período fundamental. Una señal que no verifica esta propiedad se dice que es no periódica o aperiódica.

Similarmente, una señal en TD $x(n)$ se dice periódica si existe un entero $N > 0$, tal que $x(n+N)=x(n)$ para todo n .

El menor valor de N para el cual se verifica esta propiedad se denomina período fundamental.

Para poder ejemplificar las magnitudes que caracterizan a una señal se usaran senos o cosenos.

Señal senoidal y cosenoidal

Es una oscilación armónica simple descrita matemáticamente por $x(t) = A \cos(\omega t + \beta)$ y está completamente determinada por su amplitud A , su frecuencia angular ω y el ángulo de fase β . Las funciones sinusoidales son de gran importancia, ya que de la teoría de Fourier, una función periódica $f(t)$ se puede expresar como una suma de funciones senoidales y cosenoidales dada por la serie de Fourier como se ve en la Fig. 16.

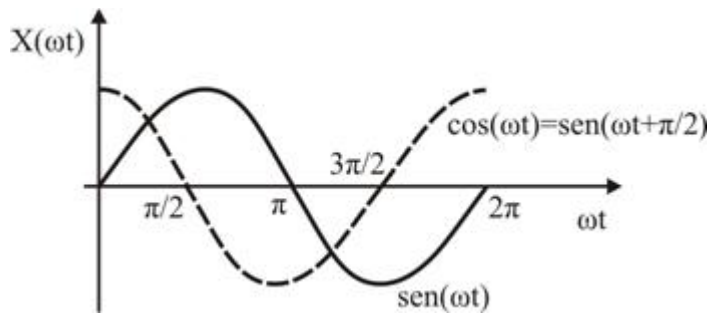


Figura 15. Gráfica de funciones seno y coseno.

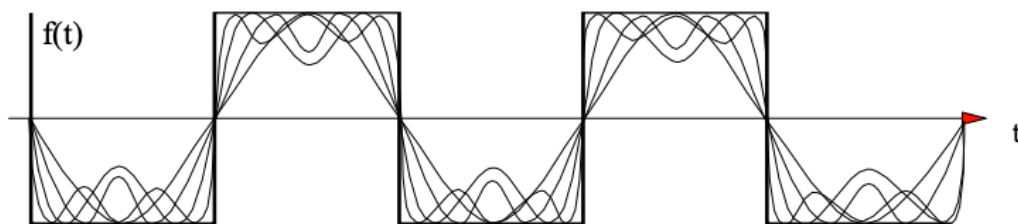
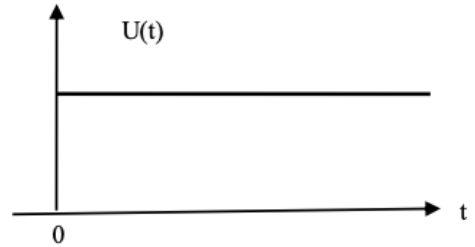


Figura 16. Descomposición de una Señal Periódica en Series de Fourier.

2.5 Señales continuas más usadas en el procesamiento digital de señales (PDS).

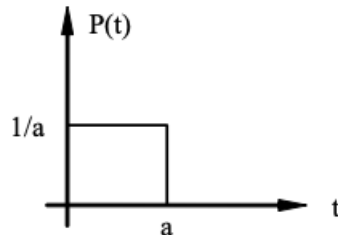
2.1.5.1 Función escalón unitario

$$U(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \geq 0 \\ 0 & \text{si } t < 0 \end{cases}$$



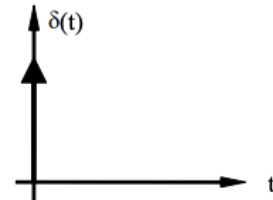
2.1.5.2 Función Pulso

$$f(t) = \frac{1}{a}U(t) - \frac{1}{a}U(t-a) = P(t)$$



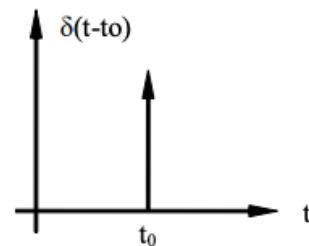
2.1.5.3 Función Delta de Dirac $\delta(t)$

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases}$$



2.1.5.4 Función Delta de Dirac retardada

$$\delta(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t \neq t_0 \\ \infty & t = t_0 \end{cases}$$



2.6 Señal estacionaria y no estacionaria

Una señal estacionaria es aquella en la cual su frecuencia no cambia con el tiempo, esto nos dice que la frecuencia se encuentra presente en todo instante de

tiempo. Mientras que las señales no estacionarias se definen como aquellas en las cuales las componentes de frecuencia varían en el tiempo por lo que sus características se mantienen inestables y no posee limitaciones en el tiempo.

2.7 Sistema

En su sentido más amplio, un sistema es un conjunto de dispositivos, subsistemas y componentes, relacionados o interconectados que realizan una función específica. Y que por tanto pueden transformar señales de su entrada a su salida.

El sistema está también afectado por estímulos externos. Las señales externas que pueden ser manipuladas son usualmente llamadas entradas, que denotamos con u , mientras que las que no pueden ser manipuladas son llamadas perturbaciones. Las perturbaciones suelen dividirse en aquellas que pueden medirse directamente y aquellas que se ponen en evidencia sólo a través de su influencia en las salidas.

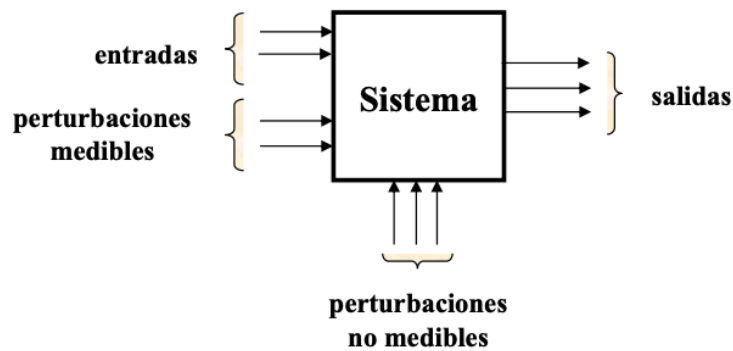


Figura 17. Sistema dinámico.

2.8 Clasificación general de los sistemas

Los sistemas se denominan continuos o discretos de acuerdo a cómo sean sus entradas y salidas. Indicaremos respectivamente con t , $f(t)$ y $y(t)$ a la variable t y a las señales de entrada y salida continuas, en tanto que con n , $f[n]$ y $y[n]$ a la variable n y a las señales de entrada y salida discretas; supondremos que n adopta valores enteros [44].

En otras palabras, las señales son continuas o discretas de acuerdo al modo en que varía la variable independiente. Para fijar ideas, supondremos que la variable independiente, ya sea t o n , representa al tiempo. El modo particular en que la señal de entrada es transformada para dar lugar a la de salida es una característica propia del sistema en cuestión. Dicho de otro modo, la señal que se obtiene a la salida es el resultado de la operación que el sistema ejecuta sobre la de entrada. A esa operación la denominamos función de transferencia del sistema. La relación entre ambas señales la simbolizamos en la forma:

$$f(t) \xrightarrow{\text{sistema}} y(t)$$

Si el sistema es continuo.

$$f[n] \xrightarrow{\text{sistema}} y[n]$$

Si el sistema es discreto.

2.9 Tipos de sistemas y sus propiedades

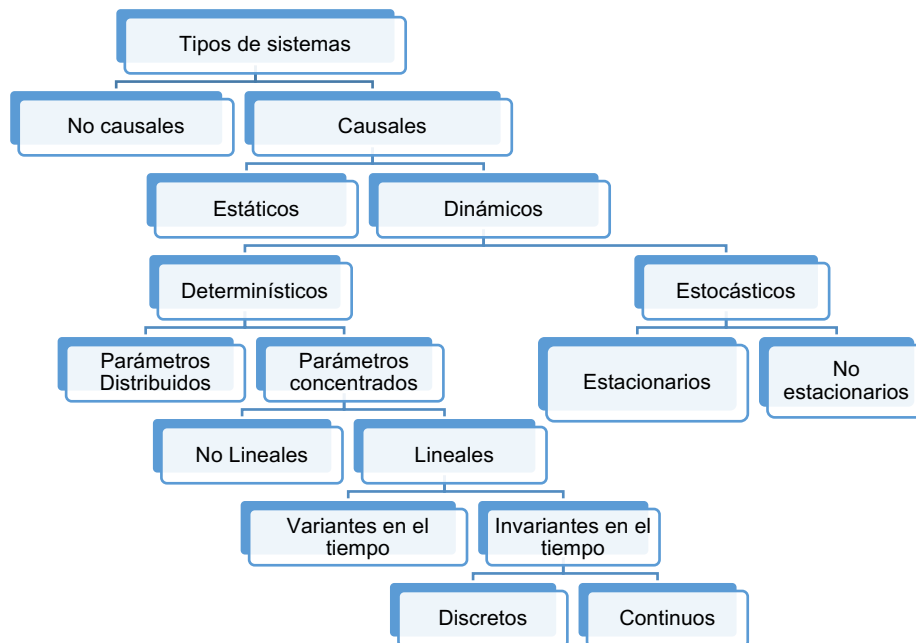


Figura 18. Diagrama de tipos de sistemas.

2.10 Sistema causal

En la teoría de control , un sistema causal (también conocido como sistema físico o no anticipativo) es un sistema en el que la salida depende de entradas pasadas y actuales, pero no de entradas futuras, es decir, la salida depende sólo de la entrada para los valores de $y(t_0)x(t) t \leq t_0$. [45]. La causalidad de los sistemas juega un papel importante en el procesamiento de señales digitales, los filtros se construyen para que sean causales, a veces alterando una formulación no causal de modo que sea realizable. Para un sistema causal, la respuesta al impulso del sistema debe usar solo los valores presentes y pasados de la entrada para determinar la salida. Este requisito es una condición necesaria y suficiente para que un sistema sea causal, independientemente de la linealidad. Se aplican reglas similares a los casos discretos o continuos. Según esta definición de no requerir valores de entrada futuros, los sistemas deben ser causales para procesar señales en tiempo real y responden a una relación de sucesiones descrita de la siguiente manera.

$$s[n] = \sum_{-\infty}^{\infty} b_{n_0} \{e[n - n_0]\} + \sum_{-\infty}^{\infty} a_{n_0} \{s[n$$

Donde:

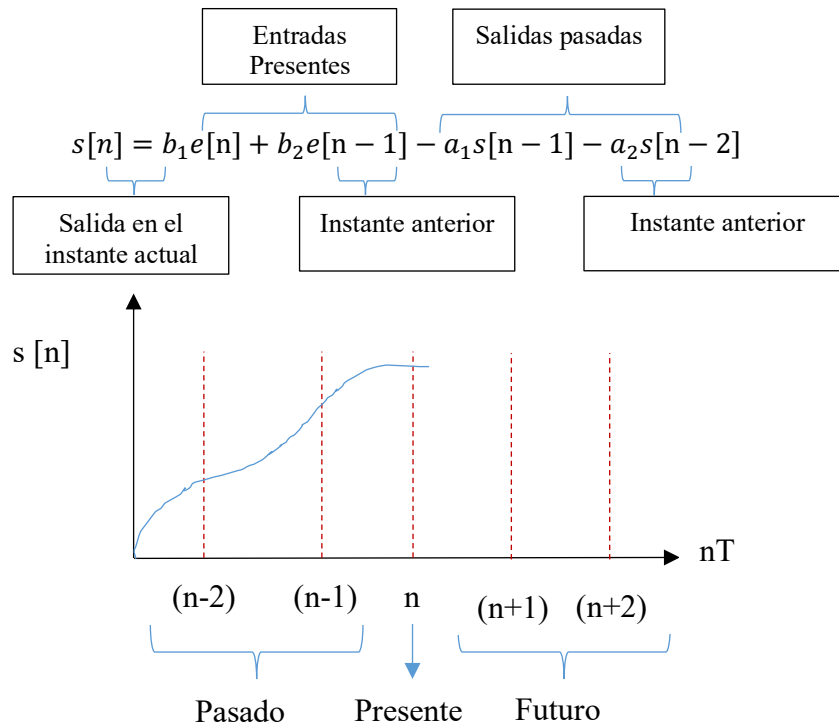


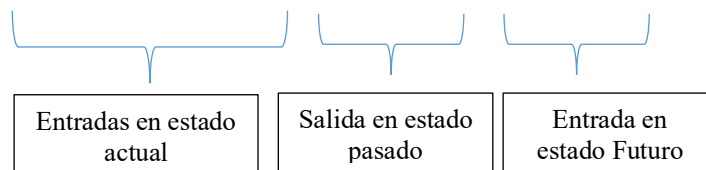
Figura 19. Gráfica de causalidad.

2.11 Sistema no causal

Este tipo de sistemas no existen en la naturaleza y generalmente surgen de algoritmos matemáticos y son representaciones abstractas y no cumplen con la propiedad de los sistemas de causalidad.

En particular un sistema se dice anticausal si su respuesta a una entrada depende exclusivamente de valores futuros de esa entrada y/o valores futuros de salidas.

$$s[n] = b_1 e[n] + b_2 e[n - 1] - a_1 s[n - 1] - a_2 s[n + 2]$$



2.12 Sistema determinístico

Las señales son determinísticas, cuando pueden ser modeladas con una función completamente especificada del tiempo, entonces el sistema se denomina determinístico. En concreto es un sistema donde cada causa produce un efecto y eso lo hace un sistema predecible.

2.13 Sistema estocástico

Se denomina estocástico al sistema cuyo comportamiento intrínseco es no determinista y es aquel, en la medida en que el subsiguiente estado del sistema se determina tanto por las acciones predecibles del proceso como por elementos aleatorios [46]. No obstante, de acuerdo con Mark Kac y E. Nelson cualquier desarrollo temporal (esencialmente probabilístico) que se pueda analizar en términos de probabilidad merece el calificativo de proceso estocástico. El término estocástico se aplica a procesos, algoritmos y modelos en los que existe una secuencia cambiante de eventos analizables probabilísticamente a medida que pasa el tiempo [47].

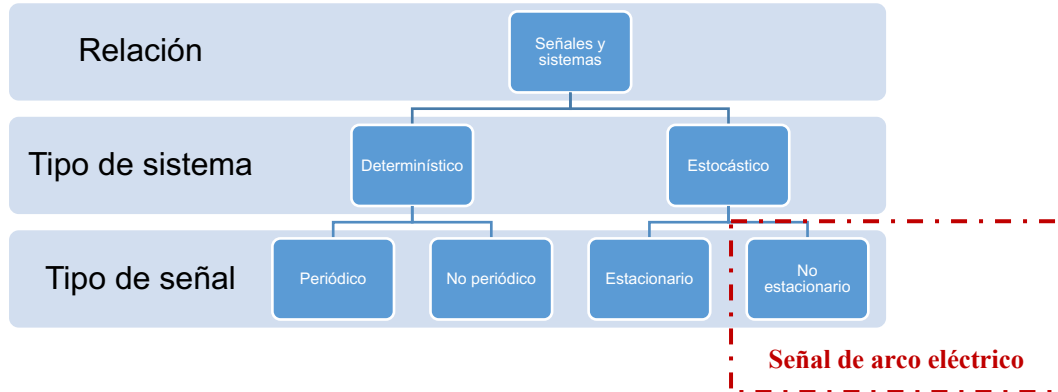


Figura 20. Diagrama de relación de sistema y señal de arco eléctrico .

En concreto un sistema estocástico es aquel en el cual las señales son aleatorias, como es el caso de las señales de arco eléctrico; es decir son señales que toman valores aleatorios en cada instante de tiempo y que son modeladas probabilísticamente (en general se especifican las estadísticas de primero y segundo orden (media y varianza) y/o la función de densidad de probabilidad).

2.14 Interconexión de sistemas

a) Serie o cascada

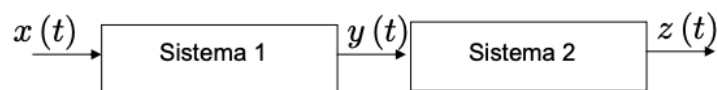


Figura 21. Diagrama de conexión en serie.

b) Paralelo

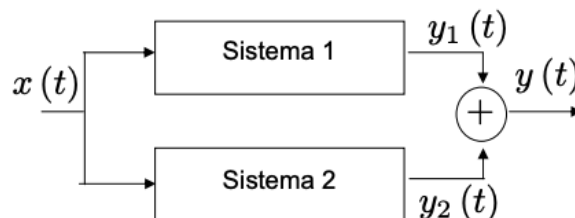


Figura 22. Diagrama conexión en paralelo.

c) Realimentación

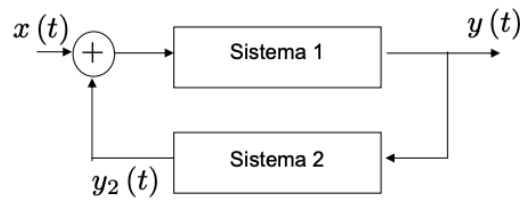


Figura 23. Diagrama de conexión con retroalimentación.

2.17 Arco eléctrico

El arco eléctrico de corriente continua (CC) es esencialmente un fenómeno de descarga eléctrica. La enorme cantidad de calor liberada por el arco puede encender fácilmente los materiales y combustibles circundantes [50], lo que genera peligro de incendio y mal funcionamiento del sistema fotovoltaico (FV). El primer riesgo de incendio registrado en una estación fotovoltaica causado por un arco de falla de CC se remonta a la década de 1990 [51]. Con el rápido crecimiento de la capacidad fotovoltaica instalada, el arco de falla de CC se convierte en un peligro potencial que no se puede ignorar. En 2011, el Código Eléctrico Nacional (NEC) [52] requirió por primera vez un interruptor de falla de arco en sistemas fotovoltaicos por encima de 80 V. En el mismo año, Underwriter Laboratories publicó UL 1699b, que especifica los estándares de prueba de los interruptores de circuito por falla de arco; por ejemplo, el tiempo de formación del arco antes de la operación del interruptor no debe exceder los 2 segundos [53]. Desde entonces, las fallas de arco de CC en los sistemas fotovoltaicos ha atraído una gran atención de la academia y la industria.

Las fallas de arco de DC en los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar en arcos en serie y en paralelo (Fig. 28). Un arco en serie generalmente se forma por la desconexión de un circuito conductor, mientras que un arco paralelo es causado por la falla del aislamiento del conductor. El arco en serie se puede extinguir

desconectando las ramas y, para extinguir el arco paralelo, se deben cortocircuitar las ramas afectadas por el arco paralelo. En los últimos años, la investigación académica se ha centrado en la detección de arcos de falla de DC en sistemas fotovoltaicos. El arco eléctrico puede generar sonido, luz y ondas electromagnéticas que pueden usarse como criterio para detectar el arco [9,54,55].

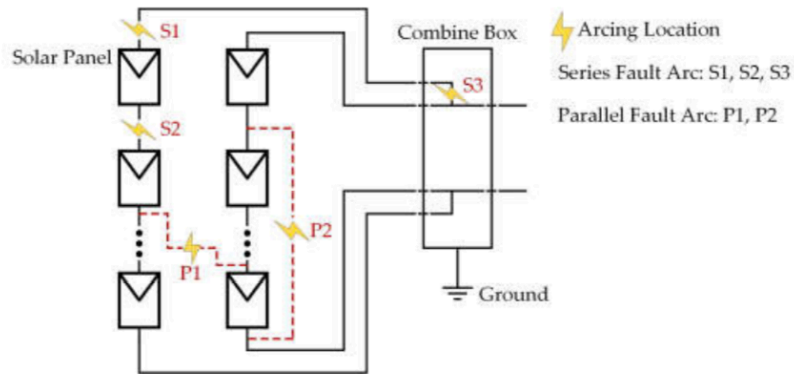


Figura 24. Clasificación de fallas de arco de corriente continua (CC) en un sistema fotovoltaico (FV).

Se puede utilizar un modelo de arco para calcular la corriente existente en la falla. Hay muchos modelos para describir el arco. Los modelos de arco se pueden clasificar en tres grupos: modelos físicos, modelos de caja negra y modelos basados en gráficos y diagramas. Los modelos de caja negra describen solo la relación entre las señales de entrada y salida[73]. Los modelos de caja negra definen la interacción entre el arco y el circuito eléctrico durante la falla. En los modelos de caja negra, el arco se describe mediante una ecuación diferencial o varias ecuaciones diferenciales que relacionan la conductancia del arco que describe el balance de energía de la columna del arco.

2.18 Modelos convencionales de arco eléctrico

La expresión general de un circuito con presencia de arco eléctrico es [73]:

$$u_s = Ri + L \frac{di}{dt} + u \qquad u_s = \sqrt{2}U_s \sin(\omega t + \alpha) \qquad (1)$$

Donde:

u_s = Tensión de alimentación.

i = Corriente del arco.

u = Voltaje a través del arco.

Modelo Cassie Arc

El modelo de arco de Cassie representa las propiedades dinámicas de un arco de CA mediante la siguiente ecuación diferencial (1).

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) \quad (2) \quad u = i / g \quad (3)$$

Donde:

g = es la conductancia del arco.

τ = es el tiempo del arco constante.

U_c = es una constante.

El modelo de arco de Cassie fue presentado por Cassie en 1939 [74]. Cassie supuso que el arco tiene una temperatura fija que se enfría por convección forzada. Esto implica que el área de la sección transversal del arco es proporcional a la corriente y que el voltaje sobre el arco es constante. El modelo de arco Cassie es adecuado para arcos con corrientes altas, $I \geq 100$ Ampers [73].

Modelo de arco de Schwarz

El modelo de arco de Schwarz se incluye la ecuación diferencial siguiente.

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau g^a} \left(\frac{ui}{Pg^b} - 1 \right) \quad (4)$$

Donde:

P = es la constante de enfriamiento.

a y b = son las constantes.

Los parámetros τ , a y b definen la forma de onda del voltaje del arco, y P asegura el valor medio del voltaje del arco.

Modelo de arco de Habedank

El modelo de arco de Habedank es una conexión en serie de un modelo de arco de Cassie y Mayr y consta de dos ecuaciones diferenciales y una ecuación algebraica (6).

$$\frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\left(\frac{ug}{U_c g_c} \right)^2 - 1 \right) \quad (5)$$

$$\frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u^2 g^2}{P_0 g_m} - 1 \right) \quad (6)$$

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \quad (7)$$

Donde:

g_c = es la conductancia del arco en la ecuación de Cassie.

τ_c = es la constante de tiempo de Cassie.

g_m = es la conductancia del arco en la ecuación de Mayr.

τ_m = es la constante de tiempo de Mayr.

P_0 = es una constante.

Modelo de arco de Mayr modificado

El modelo de arco de Mayr modificado contiene la ecuación diferencial (8).

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0 + C_i |i|} - 1 \right) \quad (8)$$

Donde:

C_i = es la constante actual.

El modelo de arco de Mayr se introdujo en 1943 [75, 76]. Mayr supuso que las pérdidas de potencia son causadas por la conducción térmica y que la conductancia del arco depende de la temperatura. El área de la sección transversal del arco se supone constante.

El modelo de arco de Mayr es apto para corrientes cercanas a cero , $I < 1$ Amper [26, 73].

Modelo de arco de Schavemaker

El modelo de arco de Schavemaker es un modelo de arco de Mayr modificado con un parámetro de tiempo constante τ y la potencia de enfriamiento que es función de la entrada de energía eléctrica. El modelo de arco de Schavemaker incluye la ecuación diferencial (8).

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{\max(U_{arc} |i|, P_0 + P_1 ui)} - 1 \right) \quad (9)$$

Donde:

P_1 = es la constante de enfriamiento.

U_{arc} = es una constante que determina el valor medio del voltaje del arco.

Schwarz desarrolló un modelo de arco de Mayr modificado en 1971 [77]. La constante de tiempo y la potencia de enfriamiento en el modelo dependen de la conductancia del arco [78].

Teorema de Nyquist o Shannon

Éste teorema establece que una señal continua con un ancho de banda limitado a $f < f_s / 2$ puede ser reconstruida de la señal muestreada si la razón de muestreo es al menos dos veces mayor que el ancho de banda de la señal de entrada.

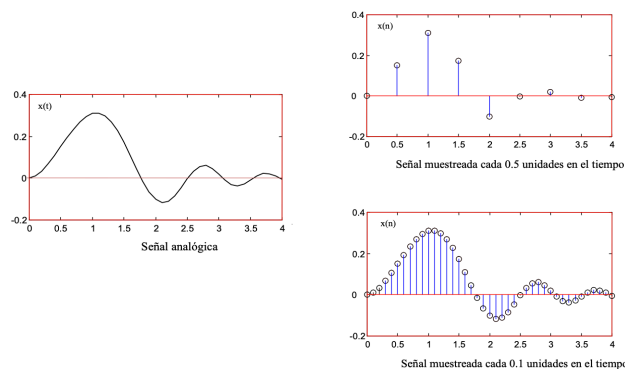


Figura 25. Ejemplo de aplicación del teorema de Nyquist o Shannon.

La frecuencia de muestreo implica una relación entre la resolución (aproximación a la señal analógica) y el tiempo de procesamiento de la señal. A mayor frecuencia de muestreo, mayor resolución pero también mayor tiempo de procesamiento de la señal. Por tanto se deben considerar las características de variación de la señal a muestrear: una señal con variaciones lentas precisará de una frecuencia de muestreo menor que una señal de variaciones rápidas.

2.19 Filtrado

Un filtro se puede definir como una “red” utilizada para separar señales en base a su frecuencia.

La función de filtrado consiste en seleccionar señales conteniendo frecuencias de interés para el sistema de instrumentación. Los filtros activos han mejorado la función de filtrado con la inclusión de amplificadores operacionales al proporcionar ganancias y respuestas a la frecuencia más tajante que las proporcionadas por los filtros tradicionales implementados con dispositivos pasivos, además mejoran mucho las características de estabilidad y acoplamiento electrónico y de adquisición de datos[79, 80].

Filtro ideal

Un filtro ideal sería el que tiene unas bandas pasante y de corte totalmente planas y unas zonas de transición entre ambas nulas, pero en la práctica esto nunca se consigue, siendo normalmente más parecido al ideal cuando mayor sea el orden del filtro, para medir cuanto de "bueno" es un filtro se puede emplear el denominado factor Q. En filtros de órdenes altos suele aparecer un rizado en las zonas de transición conocido como efecto Gibbs [121].

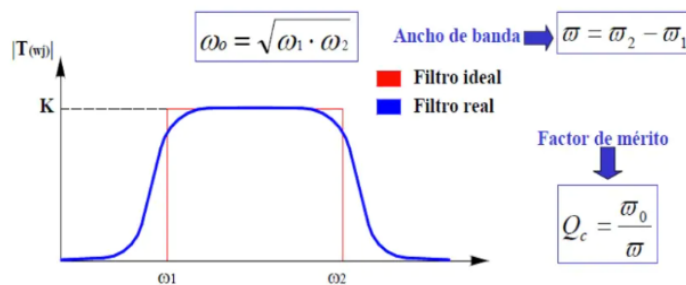


Figura 26. Filtro ideal vs Real.

Resulta complicado construir un filtro paso banda ideal (y, en general, filtros de respuesta ideal) en el mundo analógico, esto es, a base de componentes pasivos como inductancias, condensadores o resistores, y activos como operacionales o simples transistores. Sin embargo, si nos trasladamos al procesado digital de señales, resulta sorprendente ver cómo podemos construir respuestas en frecuencia prácticamente ideales, ya que en procesado digital de señal manejamos realmente vectores con valores numéricos (que son señales discretas en el tiempo), en lugar de señales continuas en el tiempo. Todo ello, no obstante, tiene una limitación importante: cuanto mayor precisión se requiera, mayor frecuencia de muestreo necesitaremos, y ello directamente implica un consumo de RAM y CPU superiores. Por ello, al menos con la tecnología de la que hoy día disponemos, resultaría inviable implementar filtros digitales ideales para radiofrecuencia, aunque en procesado de audio digital sí es posible, dado que el rango de frecuencias que ocupa no supera los 20 kHz.

2.20 Procesamiento Digital de señales (PSD)

El procesamiento de señales digitales o DSP (sigla en inglés de digital signal processing) es la manipulación matemática de una señal de información para modificarla o mejorarla en algún sentido. Este está caracterizado por la representación en el dominio del tiempo discreto, en el dominio frecuencia discreta, u otro dominio discreto de señales por medio de una secuencia de números o símbolos y el procesado de esas señales. La finalidad extraer la mayor cantidad de información importante, la cual esta contenida en la señal [8,125].

2.20.1 Métodos de procesamiento de señales

Transformada de Fourier

El análisis de Fourier, tiene una larga historia; el cual analiza una señal en sinusoides de diferentes frecuencias, transformando la señal desde un marco temporal

a un marco de frecuencias. Este análisis tiene sus orígenes en las series de Fourier las cuales son aplicables para señales periódicas, ya sea en tiempo continuo o tiempo discreto.

La transformada de Fourier es la transformada con mayor aplicación en el área de ingeniería y muchas otras disciplinas, debido a que esta relación matemática básicamente se encarga de transformar a una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. La transformada de Fourier se define como [85]:

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (10)$$

Proporciona una representación en el dominio de la frecuencia de una señal estacionaria, ya que la frecuencia w , está presente en todo el intervalo de tiempo $(-\infty, \infty)$.

Su anti transformada o transformada inversa se define como:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(w)e^{j\omega t} d\omega \quad (11)$$

Que es la que permite obtener $x(t)$ a partir de su espectro $X(w)$; por lo que la transformada

de Fourier y su transformada inversa se relacionan de la siguiente manera: $x(t) \Leftrightarrow X(w)$

Estas ecuaciones representan a una señal continua en el tiempo; pero no todas las señales son continuas en el tiempo, existen señales discretas, y para este tipo de señales existe la transformada de Fourier discreta. Para una señal discreta la transformada de Fourier se representa [85]:

$$x[n] = \sum_{k=\langle n \rangle} a_k e^{jk(2\pi/N)n} \quad (12) \quad \therefore N \text{ toma valores positivos y } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=\langle N \rangle} x[n] e^{-jk(2\pi/N)n}$$

El análisis de una señal mediante la transformada de Fourier es exclusivamente para señales en las cuales su contenido de frecuencias no cambia en el tiempo es decir señales estacionarias, sin embargo la mayoría de las señales contienen características

transitorias o no estacionarias; por lo que el análisis de Fourier no está adecuado para detectar estos cambios.

Para intentar corregir las deficiencias de la transformada de Fourier se desarrolló la transformada de Fourier de corto tiempo [21].

Transformada de Gabor o transformada de Fourier de tiempo Corto(TFCT).

Esta transformada fue introducida por Denis Gabor en la década de los cuarenta, la cual realiza un esfuerzo por resolver el problema de resolución en tiempo de la transformada de Fourier; esta transformada ha sido la más usada en el análisis de señales no estacionarias.

La idea básica de la TFCT es dividir la señal en segmentos cortos de tiempo para que después Fourier realice un análisis de cada segmento y poder conocer cuáles son las frecuencias que existen en ese segmento.

Estos segmentos de tiempo son considerados inmóviles o estacionarios, también son conocidos como ventanas. Está formulada de la siguiente forma [86]:

$$S_t(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-jw\tau} s(\tau)h(\tau - t)d\tau \quad (13)$$

Donde $s(\tau)$ es la señal original y $h(\tau - t)$ es la función de ventana. Uno de los problemas que presenta este tipo de transformada es la elección de una buena ventana, y esto dependerá de cómo estén constituidas las componentes de frecuencia en la señal; ya que si las componentes de frecuencia están bien separadas unas de otras, entonces se puede sacrificar resolución en la frecuencia y mejorar la resolución en tiempo.

En general se puede decir [87]:

- Ventana estrecha: Buena resolución en el tiempo y pobre resolución en el dominio de la frecuencia.
- Ventana ancha: Buena resolución en el dominio de la frecuencia y pobre resolución en el dominio del tiempo.

La transformada corta de Fourier tiene como propiedad que la resolución en tiempo y en frecuencia de la señal es constante, y esta resolución solo puede ser cambiada re-escalando la ventana [88].

Transformada rápida de Fourier (FFT)

El desarrollo que han alcanzado en los años más recientes los métodos de tiempo discreto para el análisis y síntesis de señales se debe fundamentalmente a la gran capacidad de cálculo de las computadoras modernas. Una ventaja adicional de la transformada discreta de Fourier (DFT), es que existen diversos algoritmos computacionales para evaluarla. Uno que resulta sumamente ágil se denomina transformada rápida de Fourier y se indica FFT por las iniciales de su nombre en inglés (Fast Fourier Transform).

La FFT es un algoritmo para el cálculo de la transformada discreta de Fourier que reduce el tiempo de ejecución del programa en gran medida. Desde 1965 [83], cuando James W. Cooley y John W. Tukey publicaron dicho algoritmo, su uso se ha expandido rápidamente y las computadoras personales han impulsado una explosión de aplicaciones adicionales de la FFT. Algunos ejemplos de la aplicación de la FFT son diseño de circuitos, espectroscopia, cristalografía, procesamiento de señales, comunicaciones, imágenes, etc.

Cuando se habla del tratamiento digital de señales (reducción de ruido, análisis en frecuencia de cualquier señal discreta), el algoritmo FFT impone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante ya que la señal muestreada que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos [84]. El rango de frecuencias cubierto por el análisis FFT depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.

Transformada Wavelet

También conocida como la transformada de Ondeleta (TO) ha sido particularmente útil para el análisis de señales no periódicas, ruidosas, intermitentes, transitorias, etc., esto es debido a la capacidad con la que cuenta para examinar la

señal en tiempo y en frecuencia [89]. El análisis mediante la transformada wavelet es ahora aplicado en muchas áreas de la investigación de múltiples fenómenos físicos.

La wavelet puede ser manipulada de dos formas [89]:

- Puede ser trasladada en varias localidades de la señal.
- La wavelet puede estrecharse o comprimirse, lo cual es conocido como escala.

La transformada wavelet realiza un filtrado de la señal en el dominio del tiempo mediante filtros paso bajos y paso altos, logrando con esto la eliminación de ciertas componentes de alta o baja frecuencia de la señal y este proceso se repite, para las señales resultantes del proceso de filtrado anterior. La transformada wavelet fue desarrollada por Morlet en 1984.

Transformada wavelet continua (TWC)

La transformada wavelet se basa en la descomposición de una función de entrada utilizando versiones escaladas y trasladadas de una función wavelet básica conocida como wavelet madre. La transformada wavelet continua se expresa de la siguiente forma [89]:

$$T(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (14)$$

Donde:

$x(t)$, contiene a la señal y a la wavelet que controla la traslación y la escala, la cual es $\psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$.

Las variables a y b , son las encargadas de controlar el ancho de la función ψ en el caso de a .

b , se encarga de dar la ubicación en el dominio del tiempo de la función ψ .

La transformada wavelet continua también cuenta con una transformada inversa la cual esta expresada por [89]:

$$x(t) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} T(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{dad b}{a^2} \quad (15)$$

Para la aplicación de la wavelet es necesario cumplir con ciertos requisitos matemáticos.

Las variables a y b que aparecen en la ecuación de la transformada wavelet continua también reciben el nombre de variables de escala (a) y variables de traslación (b); estas variables están definidas como [87]:

- Escala: En el análisis de ondeleta el parámetro escala es análogo con el parámetro de escala utilizado en los mapas, por lo que las escalas corresponden a una visión global y no detallada de la señal; y las bajas escalas corresponden a una vista detallada. También mediante esta variable es posible comprimir ($|a| < 1$) o dilatar ($|a| > 1$) la función; la escala se relaciona con la frecuencia según la siguiente ecuación:

$$escala = \frac{1}{frecuencia}$$

- Traslación: Este término está relacionado con la localización de la ventana a medida que esta se desplaza a través de la señal. Obviamente, este término corresponde a la información del tiempo en el dominio transformado.

En otras palabras, para escalas pequeñas la transformada wavelet continua entrega una buena resolución en el dominio del tiempo, mientras que para escalas grandes nos entregara una buena resolución en el dominio de la frecuencia.



Figura 27. Concepto de traslación de wavelet.

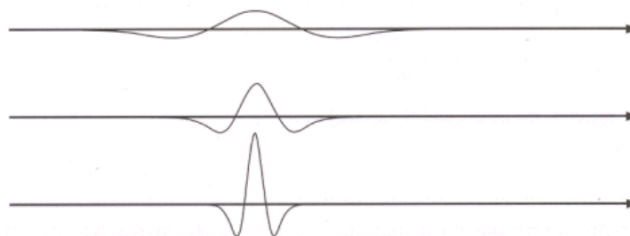


Figura 28. Concepto de escala de una wavelet.

Podemos observar que la transformada de Fourier de tiempo corto y la transformada wavelet continua tienen como diferencia principal, que mientras la transformada wavelet continua ocupa ventanas de corta duración para altas frecuencias y ventanas de largas duración, para bajas frecuencias la transformada de Fourier de tiempo corto utiliza una sola ventana de la misma duración tanto para altas frecuencias como bajas.

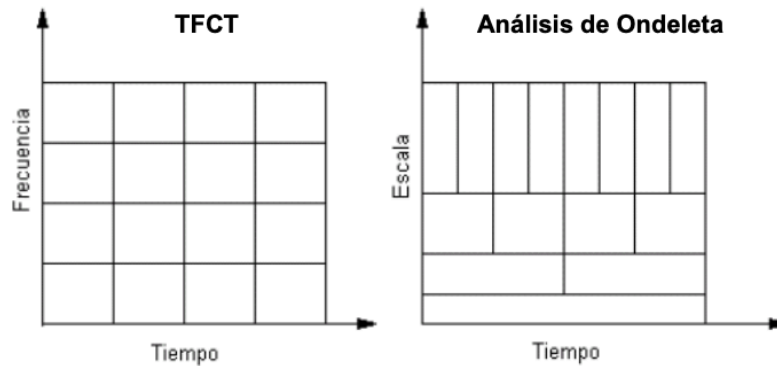


Figura 29. Diferencia entre tiempo-frecuencia de TFCT y tiempo-escala de TWC.

Transformada wavelet discreta (TWD)

El cálculo de los coeficientes wavelet en cada posible escala, origina una gran cantidad de trabajo y una gran cantidad de datos. Por tanto escoger solo aquellas escalas y posiciones que resulten interesantes para ciertos estudios es una tarea difícil. Si se escogen aquellas escalas y posiciones basadas en potencias de dos, los resultados serán más eficaces. Este análisis se denomina TWD. Esta filtración de algoritmos aporta una transformación rápida de wavelet (una función donde se introduce una señal y por donde se obtienen rápidamente coeficientes wavelet). Por lo tanto, la TWD se utiliza para analizar y descomponer señales. La transformada wavelet discreta es formulada de la forma [25,90]:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{2^j-1} c_{j_0,k} \varphi_{j_0,k}(t) + \sum_{j=j_0}^{N-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad j, k \in \mathbb{Z}^+$$

(16)

Donde:

$C_{j_0,k}$,son los coeficientes de escala.

$d_{j,k}$,son los coeficientes wavelet.

j_0 , nos entrega el espacio inicial. Dependiendo de este j_0 es que el resto de los índices seguirá corriendo.

2^n , es la longitud de la señal $f(n)$, y esta será la que delimite el nivel de descomposición de la señal.

Una característica que debe hacerse notar es que la transformada wavelet discreta es capaz de otorgar la suficiente información tanto para el análisis como para la reconstrucción de una señal.

2.21 Cálculo de la energía de los coeficientes

Una señal se considera un vector elemento de un espacio vectorial. Dentro del cálculo de la energía se considera el concepto de norma vectorial. Un vector es un elemento de un espacio vectorial del que, en ocasiones, especialmente en física y geometría, interesa conocer su longitud. Para ello se hace necesario definir un operador norma que determine magnitud del vector bajo consideración [98, 99].

Por tanto, basándonos en las propiedades básicas que la determinación de la longitud tiene en el espacio euclídeo habitual, definimos matemáticamente qué condiciones mínimas debe satisfacer un operador que actúe sobre un vector para poder ser considerado un operador norma en cualquier geometría [100].

Del espacio $L^2(\mathbb{R})$ de señales que tienen una energía finita [88]

$$\|f\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt < +\infty. \quad (17)$$

$\|f\|$ Espacio Euclidiano o de Hilbert normado
 $L^2(\mathbb{R})$ Funciones de energía finita

Una señal de energía finita. Por lo tanto, puede representarse por sus coeficientes de producto interno wavelet. El operador norma que determina la longitud o magnitud de

vector bajo consideración. Entonces para calcular la energía existente en los coeficientes de detalle obtenidos del uso de una wavelet es:

$$\|f\|^2 = \sum_{n=1}^N f_n^2 \quad (18)$$

$$\|f\| = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_N^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^N f_n^2} \quad (19)$$

Donde:

N= Cantidad de coeficientes de detalle

f_n^2 = Coeficientes de detalle

2.22 Wavelet Diádicas

Un problema de la transformada wavelet discreta es que resulta ser una representación variante frente a la traslación, esto es, dos señales iguales pero desplazadas cierta cantidad de tiempo, obtendrán representaciones diferentes. Esto no es muy deseable desde el punto de vista del reconocimiento de patrones donde se desea que el mismo patrón, sin importar su defasaje relativo, tenga la misma representación. Además, el número de coeficientes necesarios es mucho mayor que el número N de valores usados en la representación original. Una forma de solucionar estos dos problemas consiste en utilizar la constante $a = 2$ en el desarrollo anterior. Para entender el funcionamiento de la DWT es necesario introducir algunos conceptos del análisis multiresolución. Dada una señal f , se puede pensar en un análisis de f con resolución 2^j , como una función muestreada f_i que en cada muestra tiene un promedio local de la señal f en una vecindad de tamaño 2^j [88].

2.23 Propiedades de la transformada Wavelet Diádica

Propiedades de la transformada wavelet diádica (DWT) presenta características particulares que la hacen muy interesantes para el procesamiento de señales de todo tipo. Una de las principales características es la forma en que particiona el plano Tiempo-Frecuencia. La transformada generará una representación tiempo-escala,

donde para cada escala se presenta la evolución temporal de la señal proyectada sobre la wavelet a esa escala. Desde el punto de vista de un banco de filtros, el efecto de la transformada es analizar la señal con un banco de filtros en el cual el ancho de banda de los mismos varía con la escala, de forma que a medida que se pierde resolución temporal, en ancho de banda de los filtros se hace menor, ganando resolución frecuencial. Este fenómeno se puede apreciar en la Figura [33]. Esta estructura se puede asimilar con un árbol diádico para el soporte temporal, donde los nodos hijos ven reducido a la mitad su soporte, y siempre utilizando dos hijos para cada padre.

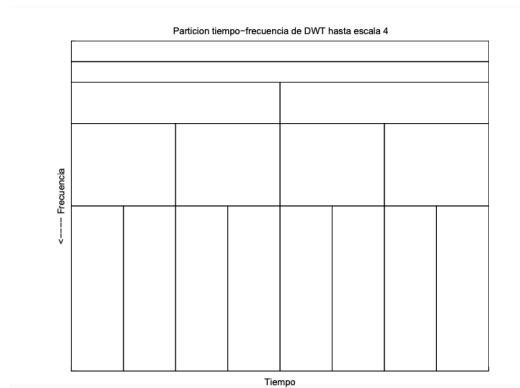


Figura 30. Partición tiempo-frecuencia de la DWT, para 4 escalas.

2.24 Análisis multiresolución (AMR)

Para que la teoría de wavelet sea útil, es necesario que se disponga de algoritmos rápidos para su uso en computadoras, es decir, un método rápido para poder encontrar los coeficientes wavelet y para reconstruir la función que representa. Estos algoritmos se encuentran en el análisis de multiresolución. Este análisis fué desarrollado para descomponer señales en tiempo discreto, haciendo uso de distintas frecuencias de corte que son usadas para analizar la señal en diferentes escalas. La señal se pasa a través de filtros paso alto para analizar las componentes de altas frecuencias y se pasa por filtros de paso bajo para analizar las componentes de baja frecuencia, por lo que estas operaciones cambian la resolución de la señal, y la escala cambia mediante operaciones de interpolación y submuestreo.

La multiresolución consiste básicamente en aproximar una función $f(t)$ en distintos niveles de resolución ($f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$...), es decir en un nivel de resolución j es aproximada por $f_j(t)$, mientras que en el siguiente nivel de resolución $j+1$, los detalles de este nivel son incluidos y denotados por $d_j(t)$ y se tiene la aproximación $f(t)$ en el nuevo nivel de resolución $f_{j+1}(t) = f_j(t) + d_j(t)$; esto se puede generalizar para j niveles de resolución expresándose de la forma (20) [85]:

$$f(t) = f_j(t) + \sum_{k=j}^{\infty} d_k(t) \quad (20)$$

Como hemos mencionado el análisis de multiresolución nos permite analizar en forma discreta las diferentes componentes de la frecuencia mediante filtros paso alto y paso bajas. El nivel de filtración más bajo lo muestra la Fig 31.

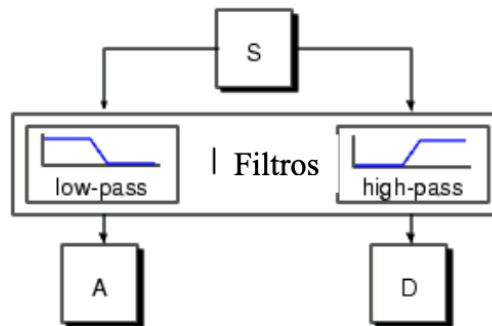


Figura 31. Proceso de filtración de una señal mediante un análisis wavelet.

Donde S es la señal original y se hace pasar por dos filtros (paso alto y paso bajo), obteniéndose con ello dos señales denominadas aproximación (A) y detalle (D) de la señal, siendo los coeficientes de la señal detalle los que constituyen principalmente el ruido de alta frecuencia por lo que los coeficientes de aproximación contienen menos ruido de los que contenía la señal original.

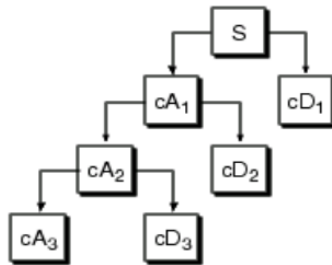


Figura 32. Proceso de descomposición múltiple de una señal.

Tanto el análisis de multiresolución y la transformada wavelet discreta, son herramientas que nos proporcionan y permiten filtrar una señal. El filtrado de una señal adquiere importancia en el procesamiento de señales si consideramos que el contenido de bajas o altas frecuencias arroja información que permite caracterizar trozos específicos de la señal.

La ventaja que nos ofrece el análisis multiresolución es que podemos extraer partes específicas de la señal estudiada y el poder manipular la dilatación y contracción de las ventanas tiempo-frecuencia nos permite obtener acercamientos con resoluciones diferentes de las características que queremos resaltar de una señal.

En el caso de las señales de arco eléctrico, señales de tipo estocásticas y no estacionarias; las cuales no tienen repetitividad de las cuales no se puede extraer información de frecuencia como lo haría la transformada de Fourier de tiempo corto hace que el procesamiento de la señal sea por medio de una transformada wavelet diádica que utiliza un método de análisis multiresolución y se vuelve relevante si lo que buscamos es extraer las características de la ocurrencia del arco.

2.25 Exponente de Lipschitz (LE)

Función Lipschitziana [91]

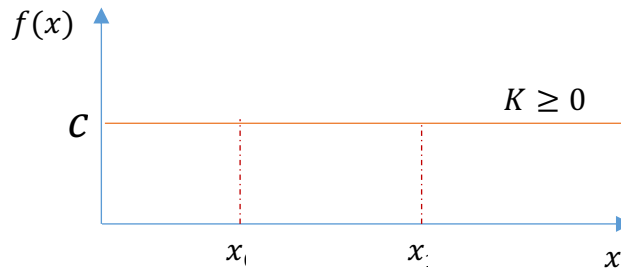
En matemática, una función $f: M \rightarrow N$ entre espacios métricos (M, d_M) y (N, d_N) se dice que es Lipschitziana o es Lipschitz continua; porque satisface la condición de Lipschitz y ésta es, si existe:

$K > 0$; K : Es la constante de Lipschitz de la función.

Tal que:

$$|f(x_0) - f(x_1)| \leq K|x_0 - x_1| \quad (21)$$

Si cumple dicha condición significa que la función $f(x)$, es Lipschitz continua para el intervalo x_0, x_1 .



Regularidad Lipschitz

Para caracterizar estructuras singulares, es necesario cuantificar con precisión la regularidad local de una señal $f(t)$. Los exponentes de singularidad o Lipschitz Hólder proporcionan medidas de regularidad uniformes en intervalos de tiempo, pero también en cualquier punto v . Si f tiene una singularidad en v , lo que significa que no es diferenciable en v , entonces el exponente de Lipschitz en v caracteriza este comportamiento singular.

Esta medida de regularidad global es inútil para analizar las propiedades de la señal en ubicaciones particulares. Por tanto los procedimientos de zoom que miden los exponentes de Lipschitz locales son a partir del decaimiento de la amplitud de la transformada wavelet a escalas finas [88].

El teorema dice que:

$$|f(x_0) - f(x_1)| \leq K|x_0 - x_1|^\alpha \quad (22)$$

Donde:

k = Es la constante Lipschitz de la función.

α = Es el exponente de Lipschitz que caracteriza el tipo de singularidad.

Por tanto:

$\alpha = 0$ La función es discontinua en el intervalo.

$\alpha = 1$, La función es continua en ese intervalo.

$\alpha < 1$, En un punto, entonces $f(x)$, no es diferenciable en ese punto.

Condición Exponente de Lipschitz

Si el exponente (α) se encuentra dentro del intervalo: $0 \leq \alpha < 1$. Existe una singularidad en ese punto.

Método para calcular el exponente de Lipschitz

El análisis de singularidades de señales muestra información interesante sobre fallas del sistema. En matemáticas, el LE puede caracterizar estas singularidades [91].

$$\hat{\alpha} = -\frac{\log_2\left(\frac{|Wf(k,j)|_{máx}}{A}\right)}{j} - \frac{1}{2} \quad A \in \mathbb{R}^+ \text{ y } j, k \in \mathbb{Z}^+. \quad (23)$$

Donde:

$\hat{\alpha}$ = Es el exponente de Lipschitz.

k= Es la traslación de la ventana.

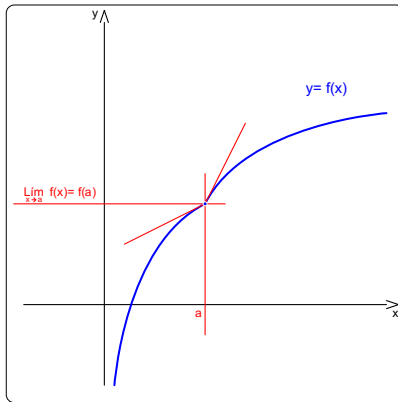
j= Es el nivel de descomposición.

A= Es un valor mayor que cero, determinado por la condición de Lipschitz

$Wf(k, j)$ = Son los coeficientes de detalle de la Transformada Wavelet Diádica.

Punto singular

Un punto singular de una función es un punto donde la función es continua pero la derivada en dicho punto es discontinua (tiene una discontinuidad no evitable de primera especie).



2.26 Herramientas de procesamiento de señales Matlab y Simulink

Los ingenieros de procesamiento de señales utilizan MATLAB® y Simulink® en todas las etapas del desarrollo, desde el análisis de las señales y la exploración de algoritmos hasta la evaluación de diseños para la creación de sistemas de procesamiento de señales en tiempo real. MATLAB y Simulink ofrecen [27, 98,120]:

- Análisis y medición de señales.
- Diseño y análisis de filtros
- Diseño basado en modelos para procesamiento de señales.
- modelos predictivos para aplicaciones de procesamiento de señales.
- Generación de código embebido.

2.27 Seguridad en los Sistemas Fotovoltaicos

La instalación de sistemas fotovoltaicos en edificios está en auge en todo el planeta y tiene un futuro muy prometedor, pudiendo alcanzar a medio plazo más del 50% del mercado fotovoltaico. Los módulos fotovoltaicos se pueden situar sobre cubiertas, superpuestos a fachadas y tejados o integrarse como elementos del propio edificio como cerramientos, recubrimientos, pérgolas, lucernarios, etc.

Cuando los módulos reciben la luz solar generan una corriente eléctrica continua (DC) que circula dentro de las células que constituyen los módulos fotovoltaicos, por el cableado de

conexión de los mismos y a través del inversor que la convierte en corriente alterna. Esto da lugar a que por las propias envolventes de los edificios fotovoltaicos, o por elementos anexos a ellas, circulen corrientes eléctricas a tensiones que, si bien se mantienen dentro de lo que se considera baja tensión, son suficientemente elevadas como para ser consideradas peligrosas [93].

Una instalación fotovoltaica en términos simples se definiría como un sistema generador de energía eléctrica en baja tensión y, por tanto, bastaría con aplicar los métodos habituales de protección de las instalaciones eléctricas [20] respecto a la seguridad de equipos y personas. Sin embargo; en la práctica, los generadores fotovoltaicos tienen características singulares, especialmente porque no se puede interrumpir la generación de la fuente de energía solar. Por estos motivos se complica la aplicación de los métodos y dispositivos convencionales de protección y pueden existir riesgos adicionales para los equipos de extinción de incendios.

Además de las causas generales de los sistemas eléctricos, las causas potenciales y particulares de incendio en los sistemas fotovoltaicos son:

- Puntos calientes en módulos fotovoltaicos.
- Calentamientos y/o arcos eléctricos en módulos fotovoltaicos: interior del módulo fotovoltaico, caja de conexión del módulo fotovoltaico, conectores.
- Calentamientos y/o arcos eléctricos en «cajas de corriente continua»: cajas de paralelos, cajas de protección y maniobra, etc.
- Calentamientos y/o arcos eléctricos en el cableado de corriente alterna.
- Para hacer frente a estos riesgos hay que tener en cuenta las características especiales de un generador fotovoltaico:
- Los módulos fotovoltaicos están expuestos a la luz solar es imposible eliminar la tensión en el campo fotovoltaico.
- La corriente de cortocircuito es sólo ligeramente superior a la corriente en condiciones normales de operación; además, su valor, que depende de la irradiancia incidente, oscila entre valores nulos antes del amanecer a valores máximos en el mediodía solar [94].

- El valor de la tensión, depende de las variaciones de la temperatura ambiente y de la radiación incidente, puede oscilar en centenas de voltios entre el inicio y el centro del día.
- Su potencia puede variar desde 1 kW hasta varios MW, lo que conlleva que las intensidades de corriente continua puedan ir desde unos pocos hasta centenas de Amperios.

2.28 Seguridad eléctrica en los sistemas fotovoltaicos

Las protecciones de sobreintensidades y puesta a tierra tienen una gran influencia en el riesgo de incendio de cualquier instalación eléctrica y, por tanto, en un sistema fotovoltaico. Respecto a la puesta a tierra de un conductor activo (conductor que en funcionamiento normal de la instalación tiene tensión y circula corriente eléctrica por él) del generador fotovoltaico existen distintas posibilidades:

- Aislado.
- Puesta a tierra del polo positivo.
- Puesta a tierra del polo negativo.
- Puesta a tierra de un punto intermedio del generador fotovoltaico.

En cuanto a la protección de sobreintensidades, se deben instalar dispositivos de protección y desconexión en ambos terminales, positivo y negativo, de cada una de las ramas de la asociación fotovoltaica.

Teniendo en cuenta que la Industria ligada a la Energía Solar Fotovoltaica puede alcanzar en los próximos 20-30 años dimensiones gigantescas, cercanas a la Industria del automóvil [75] y su importante protagonismo se han desarrollado y adoptado medidas específicas que favorecen un considerable desarrollo del mercado. La investigación en materia de seguridad eléctrica en los sistemas fotovoltaicos, está relacionada con guías de extinción de incendios [16], [103], [104], [105], [106] en edificios con sistemas fotovoltaicos, normativa y códigos que abarcan desde las condiciones de fabricación como de uso y de instalación de generadores fotovoltaicos [76], [107], [108], [109], [111], [122], [123], [124] y recientemente énfasis en las

investigaciones especializadas para detectores de arco eléctrico en dichos sistemas [5], [10], [12], [13], [15], [14], [112].

Es claro que el desarrollo de tecnologías en generadores de energía eléctrica con fuentes renovables no es igual en todos los países y se distingue principalmente por la cantidad de recursos destinados a éste tipo de proyectos. Es por esto por lo que la normativa aplicable también se ve afectada. Los países desarrollados han mostrado avances en regulaciones que garanticen la calidad y seguridad de los equipos y por ende la energía que se produce.

Con el cumplimiento de certificados de seguridad, la energía sustentable en México 80 cuenta con el aval para brindar confianza a los usuarios de paneles solares, no sólo deben velar por el correcto cumplimiento de las normas estipuladas por el sector y el gobierno del país, sino que también tienen que hacer lo propio apegándose a las normas internacionales. De ello depende una correcta distribución y financiamiento de los módulos solares en México. Las tres organizaciones nacionales de pruebas más 85 comúnmente aceptadas por la mayoría de las jurisdicciones son Underwriters Laboratories (UL), Canadian Standards Association (CSA) y ETL Testing Laboratories, Inc. (ETL). La mayoría de los inspectores eléctricos y de construcción esperan ver una marca de listado (UL, CSA, ETL) en los productos eléctricos utilizados en los sistemas eléctricos en los Estados Unidos. El proceso de prueba de 90 certificación implica una gama de pruebas y verificaciones de conformidad, incluido el diseño del sistema de CC, la conformidad de la instalación, la conformidad del código eléctrico local, las protecciones, la conexión a tierra, el etiquetado y la prueba de rendimiento de salida de potencia.

2.29 Arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos

Los generadores fotovoltaicos trabajan con tensiones e intensidades elevadas en corriente continua que además son variables, están sometidos a condiciones ambientales extremas y tienen un tiempo de vida muy elevado. Por tanto, aunque para un generador

bien diseñado y ejecutado, con material de calidad y la probabilidad de arcos eléctricos sea muy baja, no es posible garantizar que no se produzcan en ningún caso.

Estos arcos son más peligrosos que los arcos de corriente alterna, puesto que no se producen pasos por cero en la señal de corriente. La detección de arcos eléctricos en sistemas fotovoltaicos permite reducir considerablemente el riesgo de incendio. Por este u otros motivos, las normativas en algunos países consideran el uso de detectores de arco para la protección de generadores fotovoltaicos, Por ejemplo, el NEC (National Electric Code) de EE. UU ; establece la obligatoriedad de incluir equipos de protección frente a arcos en serie de corriente continua en sistemas fotovoltaicos instalados en edificios para instalaciones con tensión nominal igual o superior a 80 VDC [95]. Cuando se detecte un arco, el sistema de protección ha de ser capaz de desconectar el circuito con defecto y todos los componentes del sistema involucrados en la aparición del arco. Cuando un arco serie o paralelo se origina en generador fotovoltaico, se produce una distorsión en las señales de corriente y tensión que provoca un cambio en las características en frecuencia de estas señales. El principio de funcionamiento de los detectores de arco se basa en el análisis de los cambios que se producen en el espectro en frecuencia de las señales medidas [96,118].

Una dificultad añadida en la detección de arcos surge cuando se trata de diferenciar si se ha producido un arco serie o paralelo, ya que la señal del arco suele ser similar en ambos casos. Mientras que algunos autores sostienen que los arcos paralelo pueden ser diferenciados utilizando la medida de la resistencia de aislamiento, otros proponen métodos alternativos [23, 96, 97]. En la Tabla 1 se indican los tipos de arco y la actuación requerida para eliminarlos o minimizar su impacto.

<i>Tipo de arco</i>	<i>Acción sobre el generador fotovoltaico</i>
<i>Arco serie</i>	Abrir el circuito
<i>Arco paralelo sin tierra</i>	Cortocircuitar para evitar diferencias de potencial
<i>Arco paralelo a tierra con generador puesto a tierra</i>	Separar de tierra
<i>Arco paralelo a tierra con generador aislado de tierra</i>	Cortocircuitar para evitar diferencias de potencial

Tabla 1. Tipos de arcos eléctricos en un generador fotovoltaico y maniobras de protección a realizar.

Fuente: Adaptada de [93].

En la actualidad existen algunos modelos comerciales de detectores de arco para instalaciones fotovoltaicas pero, en la mayor parte de los casos, la funcionalidad de detección se integra en el propio inversor.

La detección de fallas de arco se enfoca principalmente en los cambios de los sistemas fotovoltaicos dentro de los 2 segundos posteriores a la ignición del arco según la sugerencia de UL 1699b, mientras que la respuesta a largo plazo de los sistemas fotovoltaicos dirige menos atención de los investigadores. De hecho, para tener una comprensión profunda de las interacciones entre el arco y el sistema fotovoltaico, se debe estudiar bien la reacción de los sistemas fotovoltaicos provocada por el arco tanto a corto como a largo plazo. Debido a la inconveniencia del experimento de falla de arco y la dificultad de lograr condiciones experimentales específicas como temperatura e irradiancia, la influencia del arco en el sistema fotovoltaico en diferentes condiciones se puede analizar de manera efectiva a través de la simulación. Con la ayuda de la tecnología informática moderna, se ha hecho posible el uso de modelos de arco complejos. Estos modelos de arco se basan en ecuaciones físicas fundamentales, como las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, y las ecuaciones de Maxwell [72]. Sin embargo; al estudiar las interacciones entre el arco y el circuito externo, la atención se centra en la respuesta del circuito y los cambios del arco, algunos investigadores han elegido modelos de arco simples para estudiar cómo el arco y el circuito se afectan entre sí.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO TEÓRICO / EXPERIMENTAL

3.1 Metodología experimental

La metodología empleada se basa en el método científico que consiste en la observación sistemática, medición, experimentación y la formulación, análisis y modificación de hipótesis. En la Figura 36 se describe la metodología empleada para la caracterización de las señales de arco eléctrico mediante un diagrama de flujo.

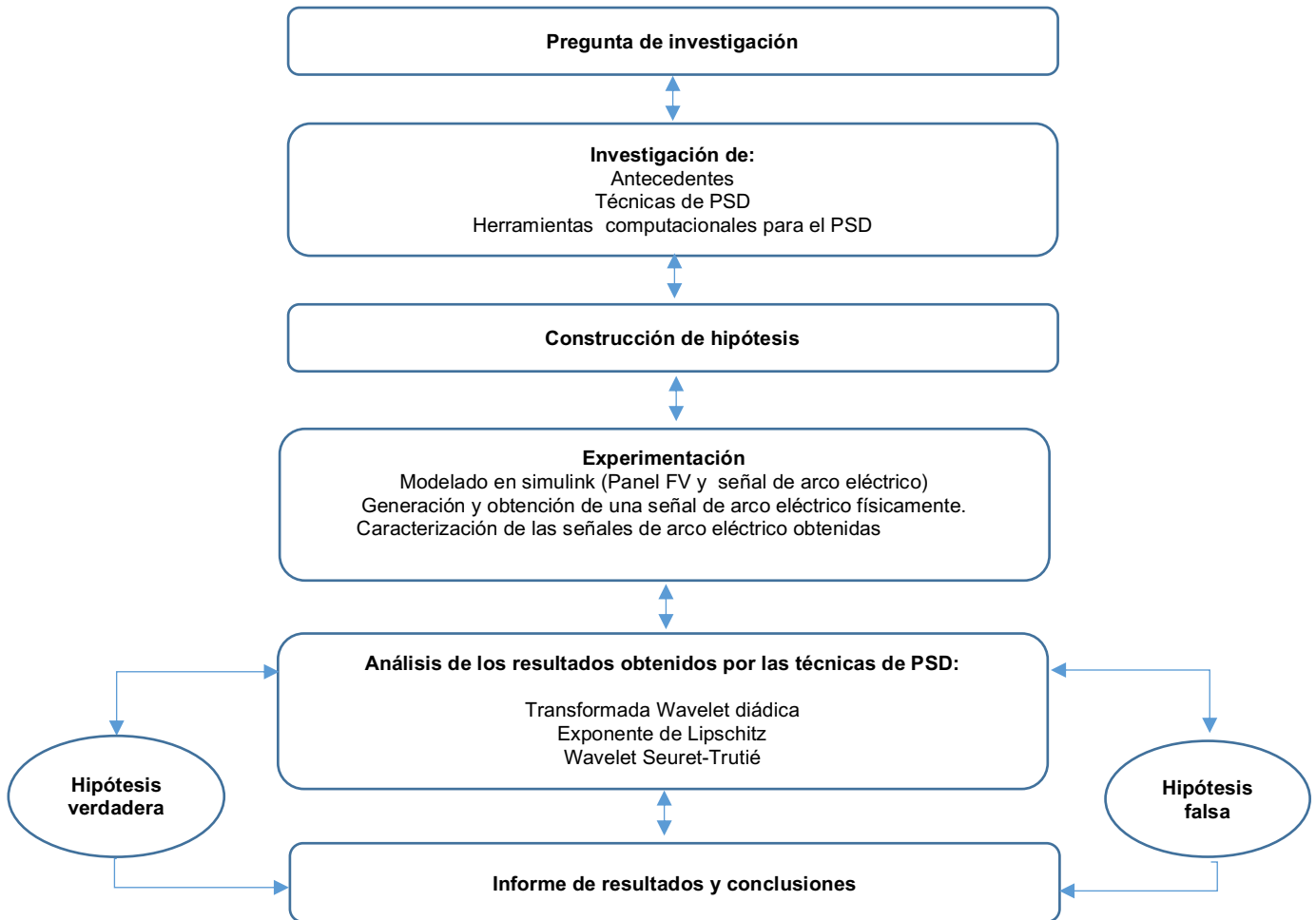


Figura 33. Diagrama de metodología empleada.

3.2 Equipo, material y herramientas computacionales usadas

Para el desarrollo del modelo del panel fotovoltaico y de la señal sintética de arco eléctrico se utilizó la herramienta computacional Simulink de Matlab versión 2018a, por la versatilidad y toolboxes con las que cuenta para el procesamiento de señales.

Así mismo para el procesamiento de la señal de arco eléctrico adquirida del experimento físico se utilizó Matlab.

3.3 Configuración experimental de arco eléctrico en panel fotovoltaico

El experimento se realizó con la intención de lograr la adquisición de una señal de arco eléctrico. El generador de arco eléctrico está formado por dos electrodos de acero, los cuales se intercambiarán por electrodos de cobre (un electrodo estacionario y uno móvil, colocados en una estructura de madera con una placa móvil milimétricamente para cuantificar la distancia a la que rompe el arco eléctrico. La condición para generar el arco en serie consiste en unir gradualmente los dos electrodos dejando un espacio entre ellos de 2mm aproximadamente. El sistema es alimentado por dos paneles FV de silicio multicristalino, modelo ERDM 235TP/6 de la marca ERDM SOLAR SA DE CV (detalles del producto en tabla 1), conectados en serie. Dos focos halógenos de 24V sirven como carga en el circuito con configuración horizontal. Los electrodos tienen terminación en punta y se deben pulir antes de cada prueba experimental para eliminar el material fundido entre prueba y prueba. Los detalles del equipo utilizado en la configuración experimental se describen en las tablas 2 y 3. La Figura 49 muestra el dispositivo generador de arco, la Figura 50 muestra la estación experimental completa y la Figura 51 el diagrama de circuito general. Los detalles de la configuración experimental se enumeran en la Tabla 5.

<i>Tipo de panel</i>	<i>Silicio monocristalino</i>
<i>Modelo</i>	ERDM 235TP/6
<i>Marca</i>	ERDM SOLAR SA DE CV
<i>Celdas</i>	10x6 (serie/paralelo)
<i>Potencia máxima de salida (Pmpp)</i>	235 W
<i>Voltage a circuito abierto (Voc)</i>	36.5 Vdc
<i>Voltage óptimo de operación (Vmpp)</i>	28.55 Vdc
<i>Corriente de corto circuito (Isc)</i>	8.65 A
<i>Corriente Óptima de operación (Impp)</i>	8.25 A
<i>Temperatura de Operación</i>	-40°C a +90 °C
<i>Voltage máximo del sistema</i>	1000 Vdc
<i>Fire rating</i>	C class
<i>Dimensiones</i>	1640 mm x 990 mm x 50 mm
<i>Peso</i>	20 Kg

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los paneles fotovoltaicos.

<i>Modelo</i>	Tektronix
<i>Marca</i>	TBS1052B-EDU
<i>Ancho de banda</i>	50 MHz
<i>Frecuencia de muestreo</i>	1Gs/s
<i>Rango de sensibilidad de entrada</i>	2 mV a 5 V / div

<i>Acoplamiento</i>	AC
<i>Canales</i>	2

Tabla 3. Especificaciones técnicas de osciloscopio.

<i>Modelo</i>	FLIR E40
<i>Marca</i>	FLIR
<i>Intervalo de temperatura</i>	-20 a 650 °C
<i>Sensibilidad térmica (NETO)</i>	< 0.07 °C a 30°C
<i>Matriz de plano focal</i>	160 x 120 pixeles
<i>Frecuencia de imagen</i>	60Hz
<i>Rango espectral</i>	7.5 a 13 μm

Tabla 4. Especificaciones técnicas de cámara termográfica.

<i>Tipo de fuente de DC</i>	2 Panel FV DE 235 W
<i>Tipo de panel FV</i>	ERDM 235TP/6
<i>Radianza</i>	800-1000 W/m ²
<i>Temperatura de los paneles</i>	35-46 °C
<i>Temperatura del ambiente</i>	27-30°
<i>Humedad</i>	25-35 %
<i>Distancia entre electrodos</i>	2-6 mm

Tabla 5. Condiciones experimentales.



Figura 34. Estructura para generación de arco eléctrico.



Figura 35. Estación experimental completa.

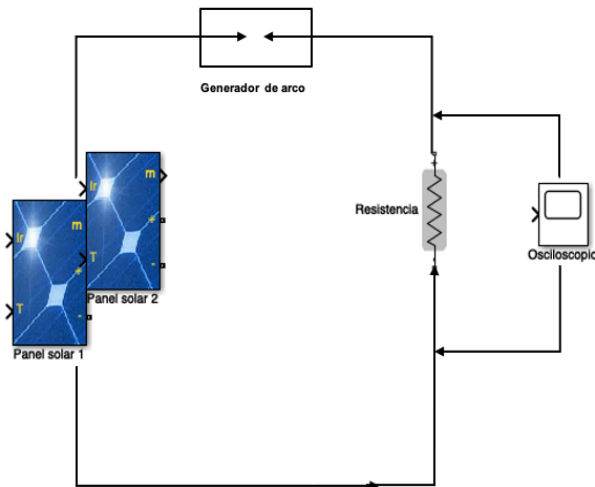


Figura 36. Diagrama general de circuito.

3.4 Modelado del sistema en simulink

El modelado del sistema a estudiar está compuesto por un panel fotovoltaico con las siguientes características:

Tipo de panel	Silicio monocristalino
Modelo	S36MC-100
Marca	Solartec
Celdas	4x9 (serie/paralelo)
Potencia máxima de salida (P_{mpp})	100 W
Voltage a circuito abierto (V_{oc})	22.43Vdc
Voltaje óptimo de operación (V_{mpp})	18.68 Vdc
Corriente de corto circuito (I_{sc})	5.49 A
Corriente Óptima de operación (I_{mpp})	5.08 A
Temperatura de Operación	-40°C a +90 °C
Voltage máximo del sistema	600 Vdc
Fire rating	C class
Dimensiones	1.2 x .55 x .035 m
Peso	8 Kg

Tabla 6. Especificaciones de panel fotovoltaico utilizado.

Se utilizó la herramienta Simulink de Matlab para la simulación del funcionamiento del panel descrito anteriormente y generar una señal sintética de arco eléctrico, los cuales

se describen a continuación. Cabe mencionar que el modelo realizado en simulik es modificable según sea necesario siempre y cuando sea un panel de tecnología silicio.

3.4.1 Panel fotovoltaico

De manera general una celda solar funciona con la interacción de la luz con la materia; Por tanto se emplea la energía de un fotón y el choque generado entre fotón-electrón, si la energía del fotón es mayor que el E_g (Banda prohibida) del material semiconductor, entonces el electrón puede saltar de la banda de valencia a la de conducción.

<i>MATERIAL</i>	<i>E_g (eV)</i>
<i>Si</i>	1.14
<i>Ge</i>	0.67
<i>GaA</i>	1.4
<i>GaP</i>	2.25
<i>Te</i>	0.33
<i>CdS</i>	2.42
<i>CdTe</i>	1.45
<i>CdSe</i>	1.72
<i>CU₂O</i>	2.1
<i>TiO₂</i>	3.0
<i>CU₂S</i>	1.2

Tabla 7. E_g (Banda prohibida) de semiconductores.

Característica V-I de la celda solar

$$I = C * R - I_s * \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right]$$

Donde:

C=Constante

R= Radiación solar [W/m²]

I_s= Corriente de saturación del diodo [Ampers]

Q= Carga de electrón [1.6*10⁻¹⁹ Coulomb]

K= Constante de Boltzmann [1.380649 x10⁻²³ J/K]

T= Temperatura absoluta [°K]

Corriente de cortocircuito ($V=0$)

$$I_{sc} = C * R$$

Voltaje de circuito abierto ($I=0$)

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} * \ln\left(\frac{C * R}{I_s} - 1\right)$$

La potencia máxima (W_p): Es la máxima Potencia que puede suministrar el módulo cuando se expone en condiciones de prueba estándar (STC). Pero en la práctica las condiciones estándar no siempre se cumplen y a éstas se les conoce como condiciones normales de operación (NOCT).

<i>Parámetro</i>	<i>STC</i>	<i>NOCT</i>
<i>Radiación</i>	1000 W/m ²	~ 800 W/m ²
<i>Espectro</i>	1.5 AM	~ 0.7
<i>Temperatura</i>	25 °C	> 25°C

Tabla 8. Condiciones estándar vs condiciones normales.

Factor de llenado (FF): Es el cociente entre la máxima potencia y el producto del voltaje a circuito abierto y la corriente de cortocircuito ($V_{oc} I_{sc}$).

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{sc}}$$

Simulación del panel solar en MATLAB / Simulink

El programa de simulación se desarrolla considerando un modelo matemático de celda fotovoltaica de un solo diodo con resistencias en derivación. Programa de simulación probado en matlab / simulink para módulo fotovoltaico solar SOLARTEC S36MC-100 de 100 W en condiciones estándar.

Posteriormente en las condiciones normales promedio de operación

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	VALORES
Radiación solar (G)	1000 W/m ²
Temperatura de la celda (T)	25 °C
Temperatura nominal (Tn)	298 K
Coficiente de temperatura de corriente de cortocircuito (ki)	0.0032 en condiciones STC
Constante de boltzmann (K)	1.38X10 ⁻²³ (J/K)
Carga del electrón (q)	1.6X10 ⁻¹⁹ Coulombs
Factor del diodo ideal (n)	1.3 electrón /volt
Banda prohibida del semiconductor (E _{g0})	1.14 (silicio)
Número de celdas conectadas en serie (N _s)	9
Número de celdas conectadas en paralelo (N _p)	4
Resistencia en serie (Rs)	.221 (Ohms)
Resistencia Shunt (Rsh)	414.405 (Ohms)
Voltage a circuito abierto (Voc)	22.43 Volts
Corriente de corto circuito	5.49 Amperios

Tabla 9. Parámetros en condiciones experimentales ingresados al modelo.

El modelo matemático del panel fotovoltaico [81] consiste de las siguientes fórmulas [82].

<i>Fotocorriente</i>	$I_{ph} = I_{sc} + k_i * (T - 298) * \frac{G}{1000}$
<i>Corriente de Saturación</i>	$I_0 = I_0 = I_{sr} * \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 * \exp\left[\frac{q * E_{g0} * (1/T_n - 1/T)}{n * K}\right]$
<i>Corriente de Saturación Inversa</i>	$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q * V_{oc}}{n * N_s * K * T}\right)} - 1}$
<i>Corriente a través de resistencia shunt</i>	$I_{sh} = \left(\frac{V + I * R_s}{R_{sh}}\right)$

Tabla 10. Fórmulas del modelo matemático de panel solar.

La nomenclatura aplicada se describe en la tabla 9.

	<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>		<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>
I_{ph}	Corriente Fotoeléctrica	(Amper)	n	Factor del diodo ideal	1.3
I_{sc}	Corriente de corto circuito	5.49Ampers	K	Constante de Boltzmann	1.38×10^{-23} (J/K)
ki	Coefficiente de temperatura de corriente de corto circuito	0.0024	E_{g0}	Energía de banda prohibida del semiconductor	1.14 eV
T	Temperatura de operación	°C	N_s	Número de celdas conectadas en serie	9
T_n	Temperatura Nominal	298 K	N_p	Número de celdas conectadas en paralelo	4
G	Irradiación Solar	W/m ²	R_s	Resistencia en serie	.221 (Ohms)
q	Carga elemental	1.6×10^{-19} (Coulombs)	R_{sh}	Resistencia de derivación	415.405 (Ohms)
V_{oc}	Voltaje de corto circuito	22.43Volts	V_t	Voltaje térmico del diodo	Volts

Tabla 11. Nomenclatura con parámetros utilizados.

Desarrollo en simulink

El modelo se compone de subsistemas correspondientes a las fórmulas descritas en la tabla 10.

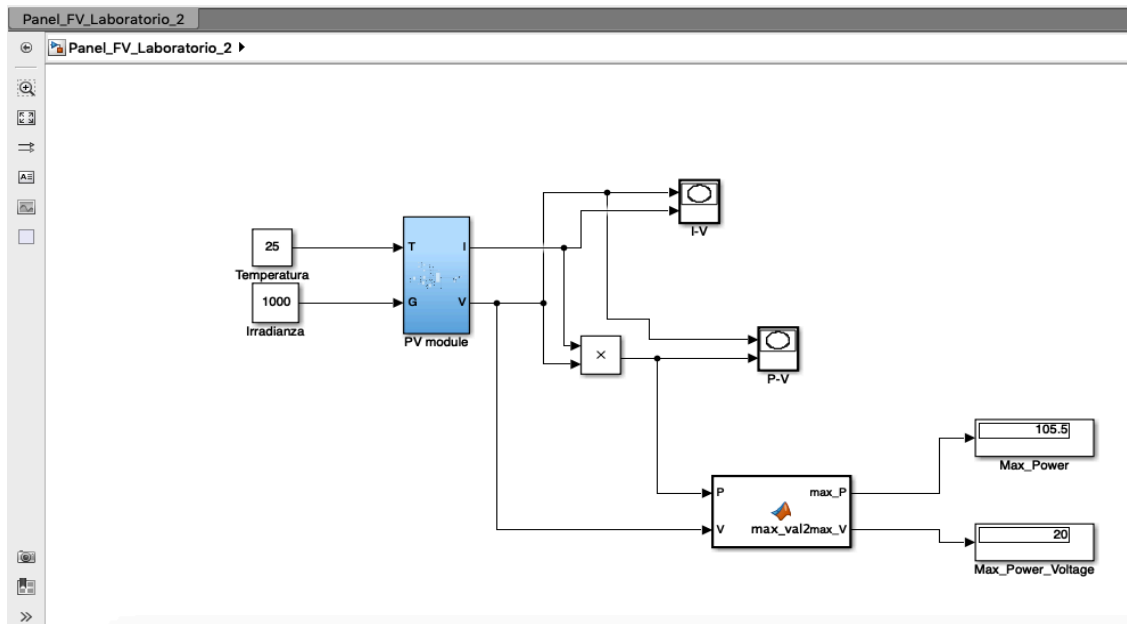


Figura 37. Modelo general en Simulink de un panel fotovoltaico.

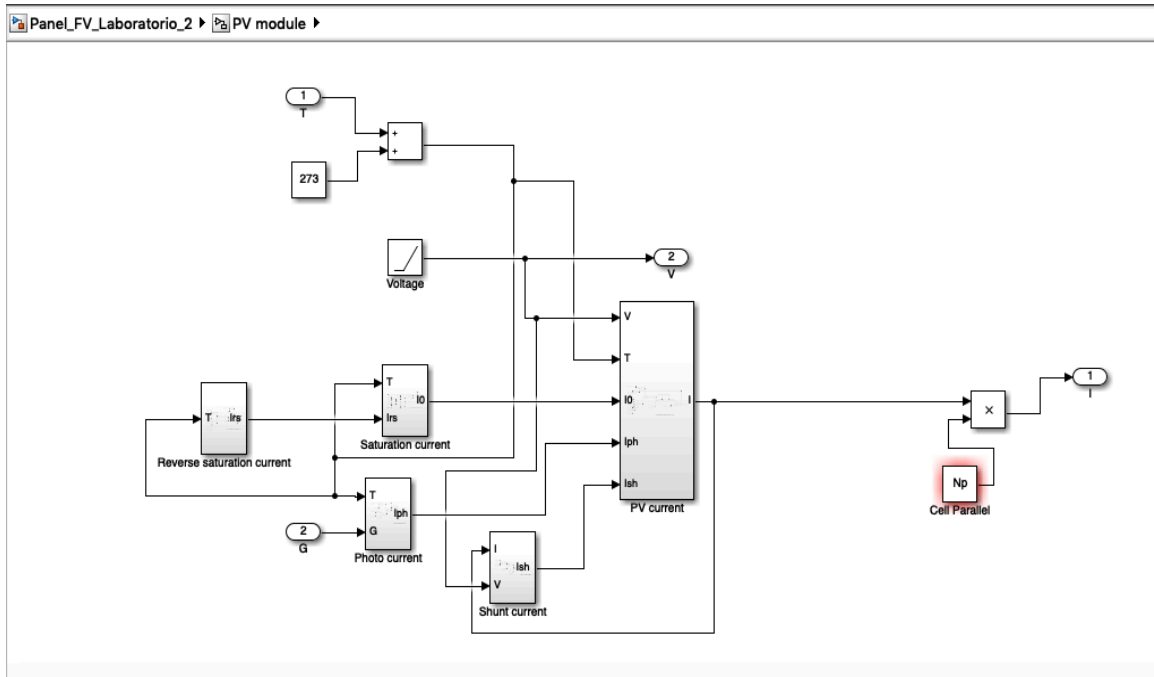


Figura 38. Modelo en Simulink del PV module.

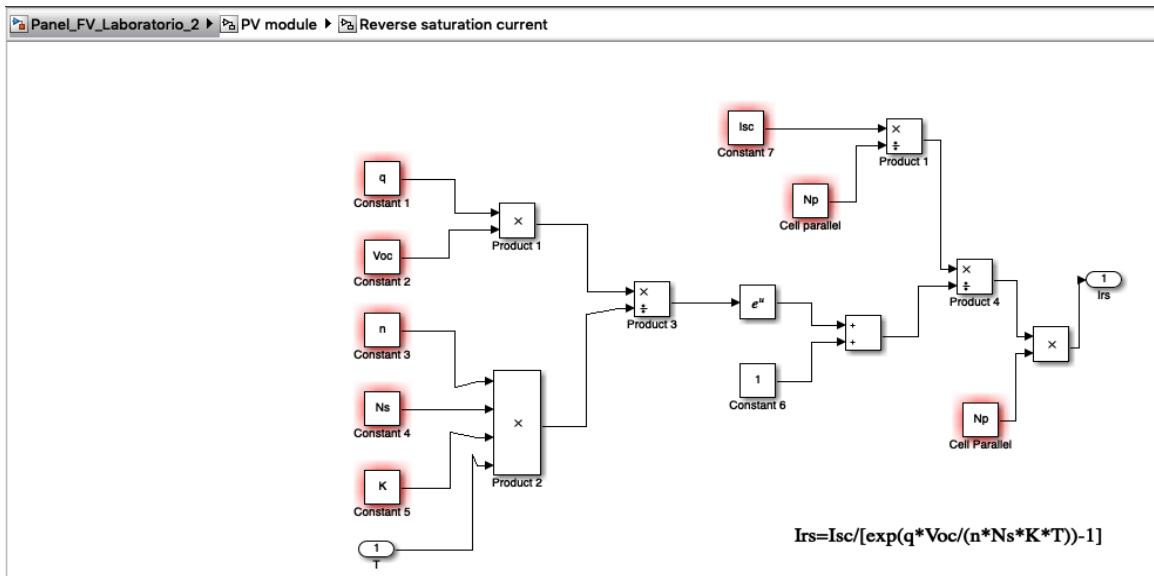


Figura 39. Modelo en Simulink del subsistema corriente de saturación reversa.

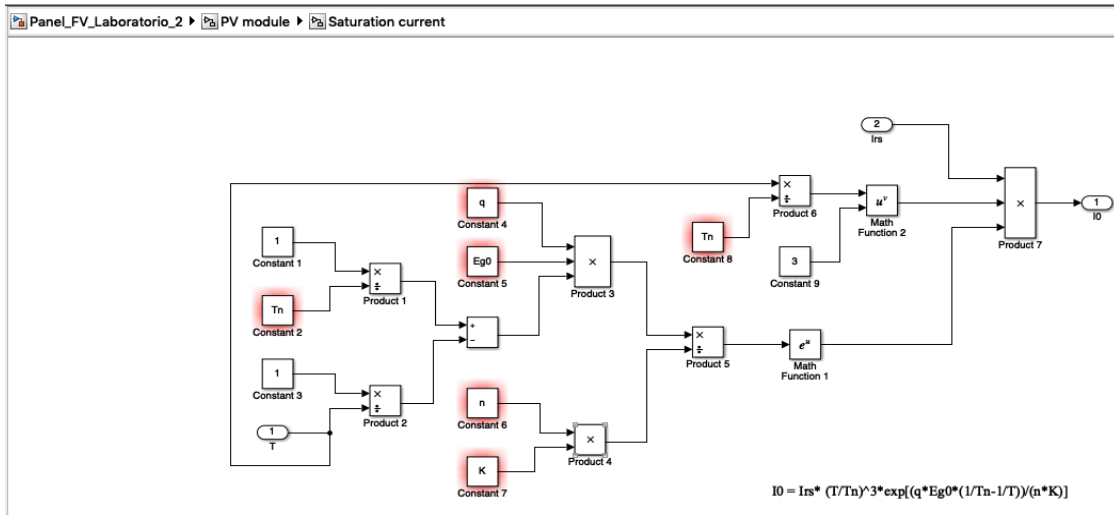


Figura 40. Modelo en Simulink del subsistema corriente de saturación.

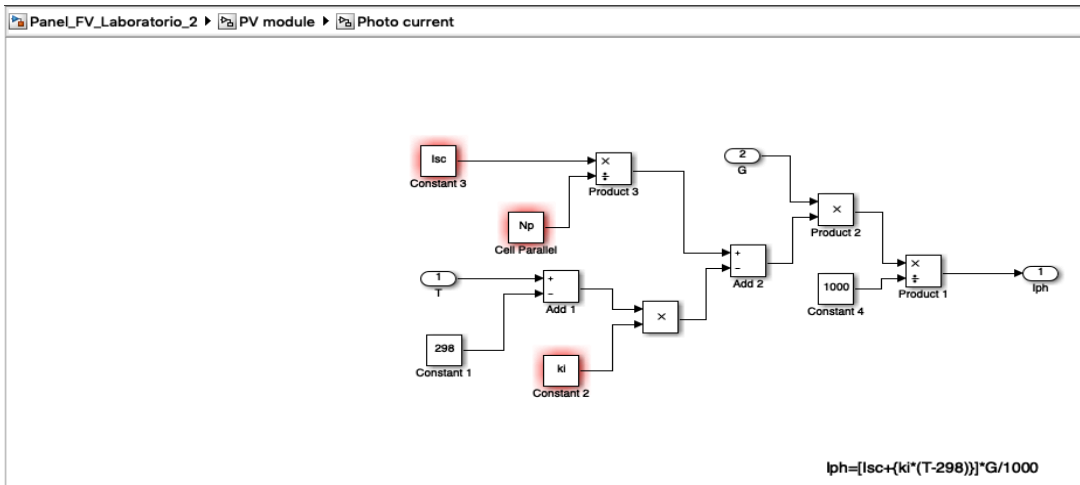


Figura 41. Modelo en Simulink del subsistema fotocorriente.

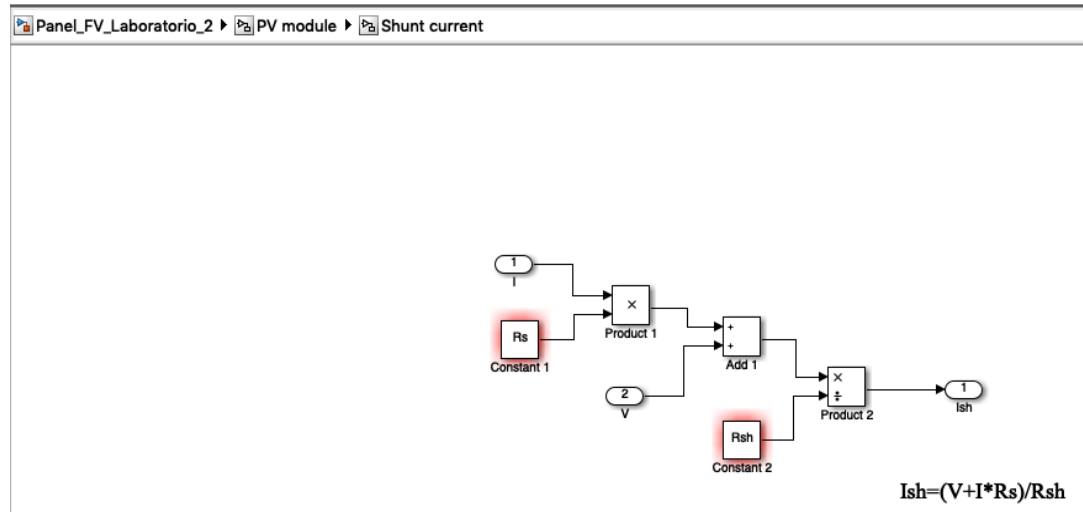


Figura 42. Modelo en Simulink del subsistema corriente de resistencia de derivación.

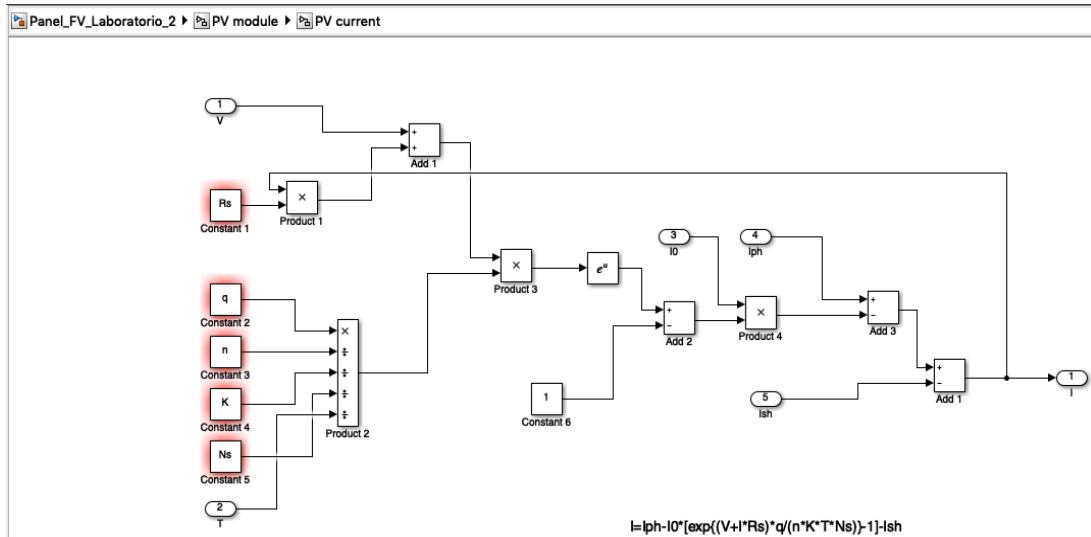


Figura 43. Modelo en Simulink del subsistema corriente de salida.

Funcionamiento del modelo

Al probar el funcionamiento del modelo desarrollado en Simulink con las fórmulas contenidas en la Tabla. 10, aquí se muestran los resultados en las gráficas principales de un panel fotovoltaico, (gráfica V-I y gráfica P-V). Se consideraron para el desarrollo del modelo las condiciones estándar Tabla 9 mismas que se aplican para proporcionar la información del panel por parte del proveedor.

En la Figura 47^a, se muestra el comportamiento del panel simulado con la gráfica P-V (potencia-voltaje) y en la Figura 47^b, se muestra el comportamiento del panel simulado con la gráfica I-V (corriente-voltaje).

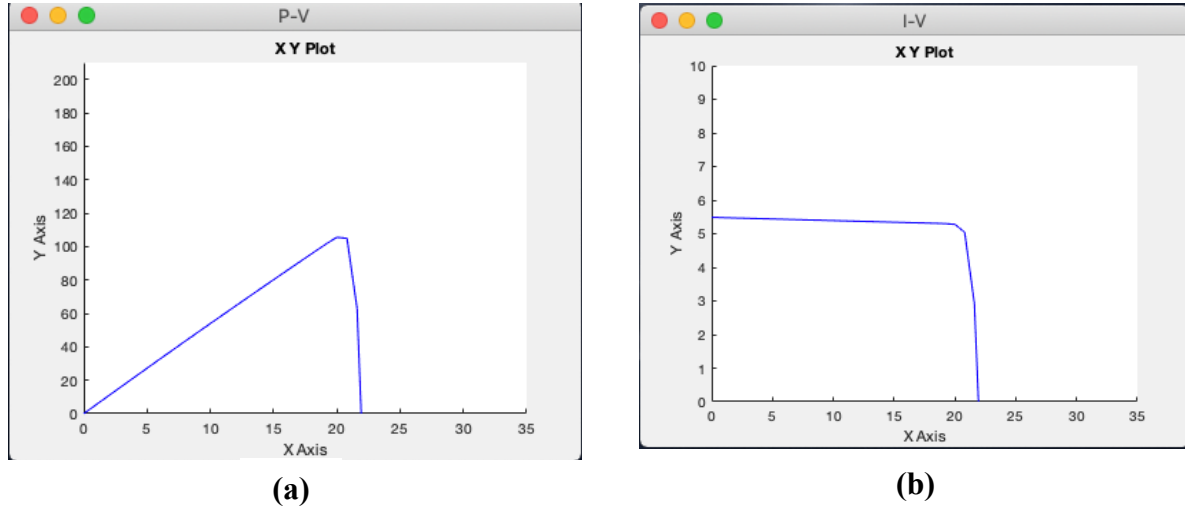


Figura 44. Funcionamiento del modelo en Simulink. (a) Gráfica P-V, (b) Gráfica I-V.

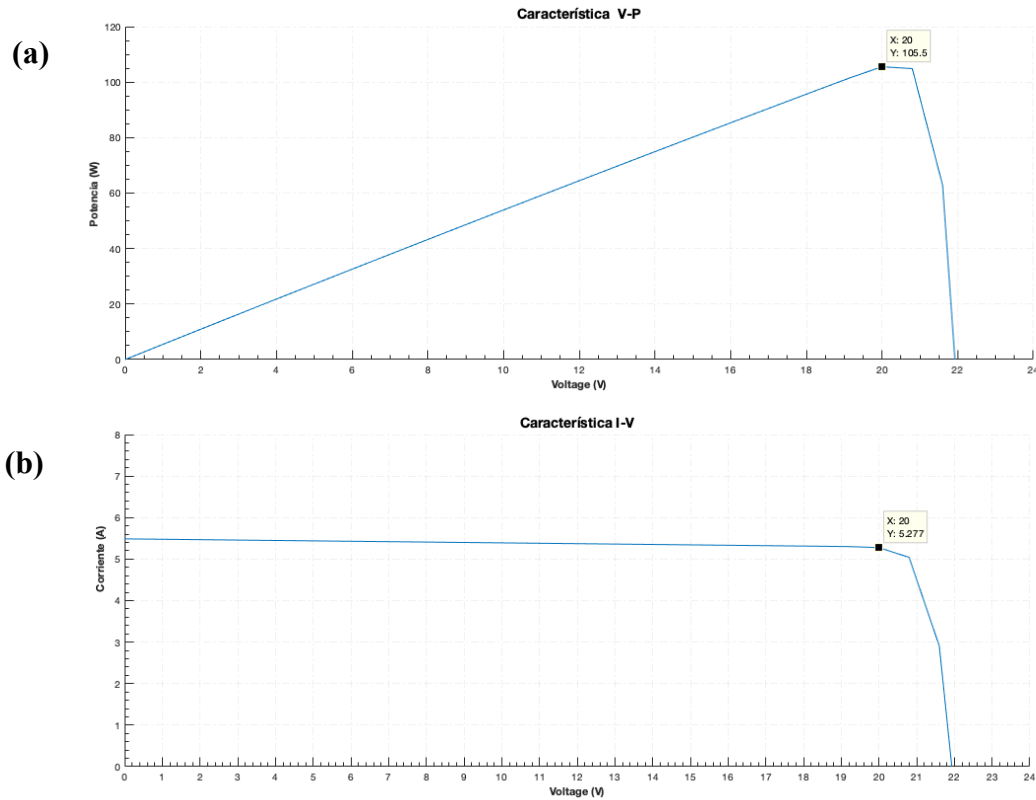


Figura 45. Funcionamiento del modelo en Matlab. (a) Gráfica P-V, (b) Gráfica I-V.

Las gráficas nos muestran el funcionamiento característico que tienen los sistemas fotovoltaicos representando la característica Volt-Ampericia y mostrando los puntos de máxima potencia que tiene el panel fotovoltaico. Los resultados obtenidos en este modelo se compararán con los descritos en la etiqueta informativa del panel fotovoltaico que se encuentra en el laboratorio.

	<i>Panel FV en Simulink</i>	<i>Panel FV físico</i>	<i>% de error</i>
<i>Potencia máxima de salida (P_{mpp})</i>	100 W	105.5 W	$\frac{105.5 - 100}{100} * 100 = 5.5 \%$
<i>Voltaje al punto de máxima Potencia (V_{mpp})</i>	20 Vdc	20 Vdc	$\frac{20 - 20}{20} * 100 = 0 \%$
<i>Corriente al punto de máxima potencia (I_{mpp})</i>	5.08 Ampers	5.277 Ampers	$\frac{5.277 - 5.08}{5.08} * 100 = 3.87 \%$

Tabla 12. Comparación de resultados.

Cálculo de porcentaje de error experimental

$$\% \text{ error} = \frac{\text{Valor aproximado} - \text{Valor exacto}}{\text{Valor exacto}} * 100$$

Tomando en cuenta que los valores mostrados en las etiquetas informativas de los paneles fotovoltaicos corresponden a valores promedio de un lote de producción el error estimado entre el modelo simulado y el valor real se consideran mínimos y es aceptable para su utilización.

3.4.2 Arco eléctrico

Para la generación de una señal sintética de arco se utilizó el modelo Cassie [10,73]. Se probaron dos condiciones, una con la combinación de corrientes alternas y corriente directa, como se ve en las Figuras 46, 48 y 50. La segunda simulación se realizó quitando las corrientes alternas, como se observa en las Figuras 47, 49 y 51.

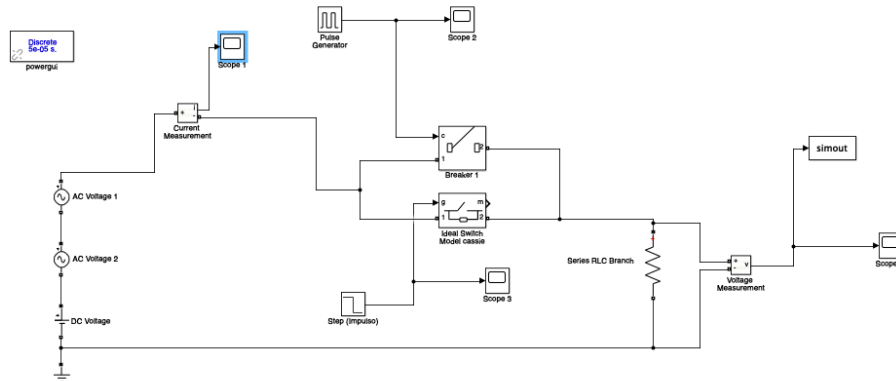


Figura 46. Modelo en Simulink de una señal de arco eléctrico sintética con corrientes AC y DC.

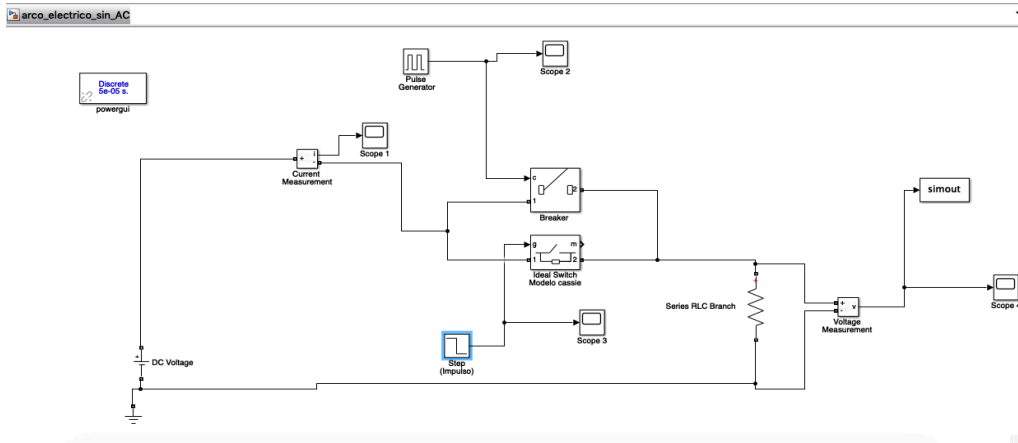


Figura 47. Modelo en Simulink de una señal de arco eléctrico sintética con corriente DC.

Funcionamiento del modelo de arco eléctrico en simulink.

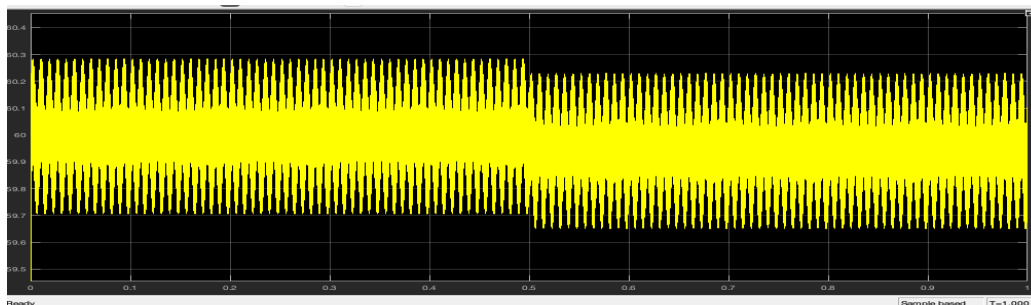


Figura 48. Señal de arco eléctrico generada en Simulink con corrientes AC y DC.

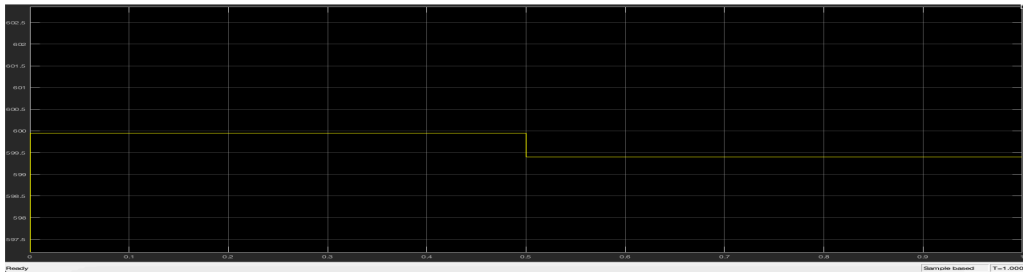


Figura 49. Señal de arco eléctrico generada en Simulink con corriente DC.

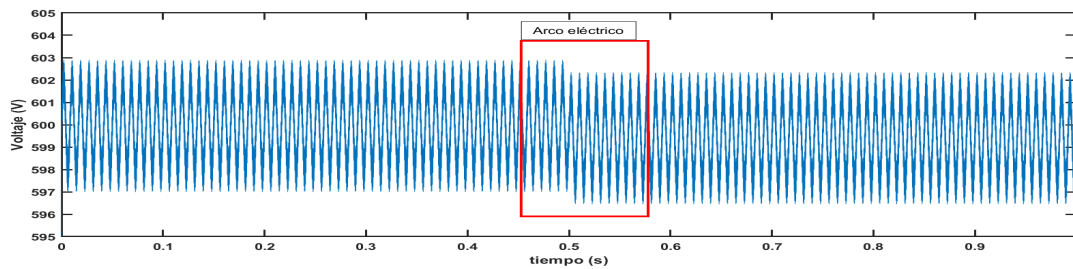


Figura 50. Señal de arco eléctrico en Matlab con corrientes AC y DC.

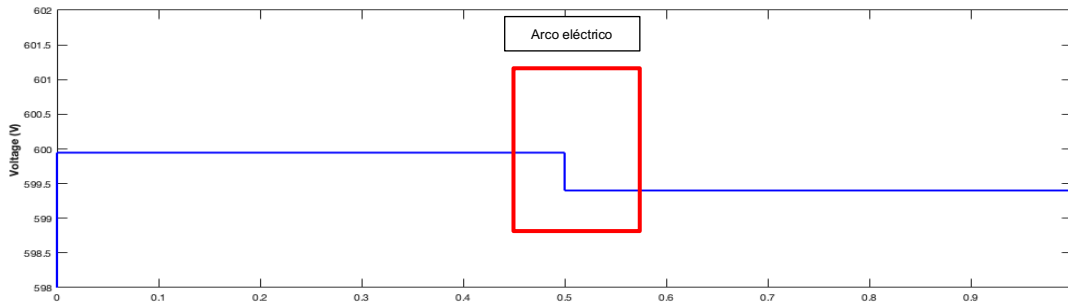


Figura 51. Señal de arco eléctrico en Matlab con corriente DC.

En las figuras 50 y 51 se observa una caída de voltaje producida en el segundo 0.5 como se indicó en el simulador y esto nos muestra morfológicamente como es que se ve una señal de arco eléctrico.

El proposito de realizar la simulación de una señal arco eléctrico es para tener un panorama de lo que se espera al momento de extraer la señal de arco eléctrico de manera física en condiciones reales. Sin embargo una señal simulada nos puede

ofrecer la opción de poder modificar las condiciones experimentales cuantas veces sea necesario en la búsqueda de resultados relacionados con la influencia de arcos eléctricos en sistemas fotovoltaicos y con condiciones extremas de modo que esto sirva de punto de partida en el diseño de instrumentos de detección de fallas. Cabe destacar que se probó el modelo en las dos condiciones anteriormente descritas con la finalidad de observar el comportamiento del arco eléctrico y obtener un panorama de cómo se esperaría en el experimento en condiciones físicas; además de comprobar que el funcionamiento fuera correcto comparandolo con los resultados encontrados en la literatura de la cual se tomó referencia.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de la señal de arco eléctrico en ambos modelos

En la Figura 53 se muestra la señal de arco eléctrico adquirida experimentalmente y se pudo observar; como era esperado de la simulación previa Figura 52, una caída de voltaje en el momento en que ocurre el arco; dicho voltaje después de ocurrir el arco no se restablece.

Las condiciones experimentales de temperatura ambiente, humedad, radianza, distancia entre los electrodos para la generación del arco eléctrico, instrumentación y condiciones de los aparatos y equipos etc. se encuentran especificados en el Apéndice B Bitácora experimental.

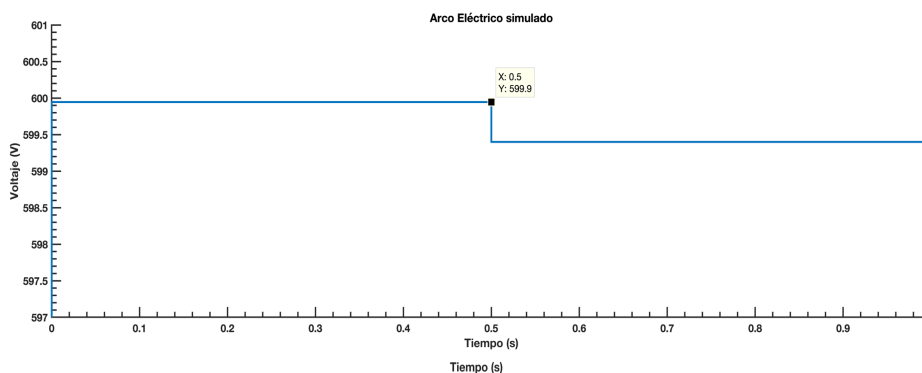


Figura 52. Señal de arco eléctrico simulado.

El experimento se realiza con electrodos de acero y con uso del acoplamiento DC, condición que fué probada también en el arco eléctrico simulado y de ésta manera se comprueba que ambos muestran el principio físico de un arco eléctrico; que es una caída de voltaje en el momento que se ha generado el arco eléctrico. En la Figura 56 se puede observar la caída de voltaje que representa 15.2 V.

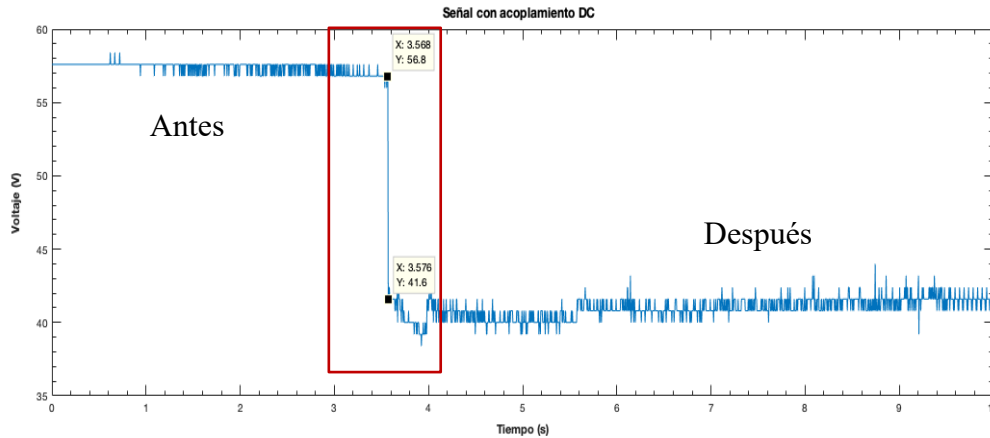


Figura 53. Señal de arco eléctrico experimentalmente con acoplamiento DC.

Con el fin de acentuar la caída de voltaje, y obtener la señal de arco eléctrico insitu se bloquea el nivel de directa y se genera nuevamente un arco eléctrico con electrodos de acero, en esta ocasión se hace más perceptible la caída de voltaje Figura 54.

La caída de voltaje bloqueando el nivel de directa representa 16 V. También se observa que la señal de arco eléctrico tiene un comportamiento $\tau = R \cdot C$ similar al efecto de carga y descarga de un capacitor, por tanto es importante resaltar que se puede apreciar un tiempo de recuperación después de generarse el arco y que éste tiempo de recuperación depende de la resistencia que se haya generado al momento del arco eléctrico. Por lo tanto; entre mayor sea la resistencia, mayor será el tiempo de recuperación y esto se observará cuando se comparen las señales de arco con diferentes materiales (hierro y cobre).

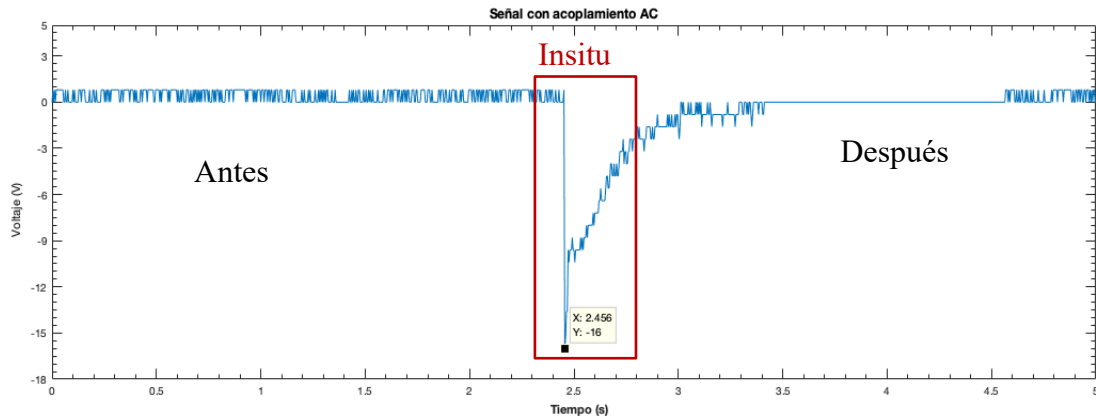


Figura 54. Señal de arco eléctrico experimentalmente con acoplamiento AC.

En base al teorema del límite central en el cual se garantiza un patrón de comportamiento en el que a medida que se aumenta el tamaño de la muestra se disminuye la variabilidad; dentro la literatura un tamaño de muestra suficientemente grande es $n \geq 30$ en poblaciones que no tienen un comportamiento normal; es el caso del comportamiento de las señales de arco eléctrico. Por tanto se toma una muestra representativa de 35 señales de arco eléctrico con puntas de hierro, a éstas se les realizó una atenuación de ruido en Matlab para su posterior procesamiento.

Todas éstas muestras presentarán la misma morfología y el cambio radicó en la magnitud de la caída de voltaje entre cada señal. En la Tabla 13 se muestran los resultados de las 30 muestras obtenidas.

<i>Muestra</i>	<i>Caída de voltaje</i>	<i>Muestra</i>	<i>Caída de voltaje</i>	<i>Muestra</i>	<i>Caída de voltaje</i>	<i>Muestra</i>	<i>Caída de voltaje</i>
1	16	11	10.4	21	17.6	31	20
2	15.2	12	12.8	22	11.2	32	13.6
3	15.2	13	14.4	23	13.6	33	12
4	20.8	14	27.2	24	15.2	34	19.2
5	15.2	15	16.8	25	16	35	16
6	53.6	16	28	26	17.6		
7	55.2	17	13.6	27	12.8		
8	14.4	18	14.4	28	12.8		
9	15.2	19	22.4	29	16.8		
10	15.2	20	52	30	19.2		
					<i>Media</i>		19.4743
					<i>Desviación estándar</i>		11.2853

Tabla 13. Caída de voltaje de 35 arcos eléctrico con electrodos de hierro.

Para enriquecer la investigación se planteó usar electrodos de cobre y realizar el mismo experimento, los resultados del arco eléctrico generado se muestran en la Figura 55. Se puede observar la misma morfología que la obtenida en las puntas de hierro y la diferencia principal radica en la magnitud de la caída de voltaje; la cual en éste caso es de 54.4 V. Por lo que se puede mostrar que el material de los electrodos si puede influir en la caída de voltaje de salida al momento de generarse un arco eléctrico. Considerando que en las instalaciones fotovoltaicas reales el cableado es regularmente de cobre, ésta sería a situación más acercada a la realidad. También se extraen 30 señales de arco y en la tabla 13 se muestran las caídas de voltaje obtenidas.

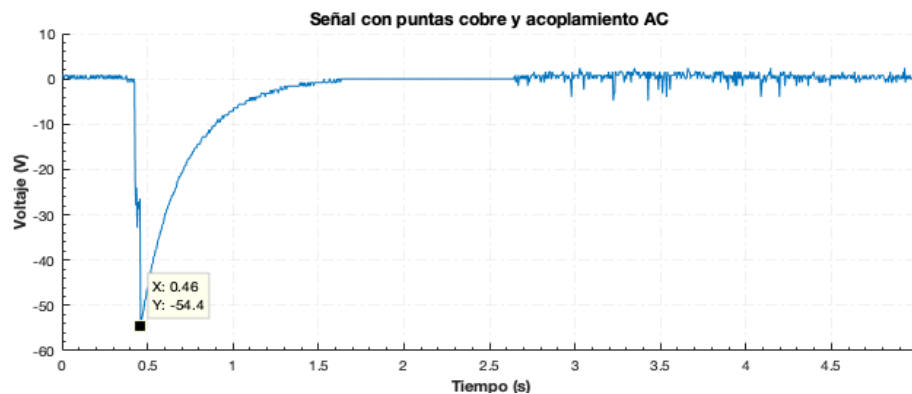


Figura 55. Señal de arco eléctrico físico con puntas de cobre y acoplamiento AC.

<i>Muestra</i>	<i>Caída de voltaje</i>	<i>Muestra</i>	<i>Caída de voltaje</i>	<i>Muestra</i>	<i>Caída de voltaje</i>	<i>Muestra</i>	<i>Caída de voltaje</i>
1	13.6	11	22.4	21	24	31	14.4
2	17.6	12	19.2	22	16	32	24
3	39.2	13	19.2	23	52	33	16
4	20	14	14.4	24	17.6	34	14.4
5	32	15	38.4	25	13.6	35	16.8
6	18.4	16	16	26	38.4		
7	26.4	17	17.6	27	30.4		
8	14.4	18	16.8	28	26.4		
9	29.6	19	14.4	29	36		
10	54.4	20	16.8	30	17.6		
					<i>Media</i>		23.3829
					<i>Desviación estándar</i>		10.7333

Tabla 14. Caída de voltaje de 35 arcos eléctrico con electrodos de cobre.

Caracterización en temperatura

Para completar la caracterización planeada para la señal de arco eléctrico y completar el estudio se decide utilizar una cámara termográfica para detectar la temperatura existente antes, durante y después de la generación del arco, los resultados se muestran en la Figura 56 y 57.

Cabe mencionar que el intervalo de temperatura de la cámara termográfica FLIR E40 utilizada en el experimento es de -20 a 650 °C. Las especificaciones técnicas de la cámara termográfica están descritas en la Tabla 4.

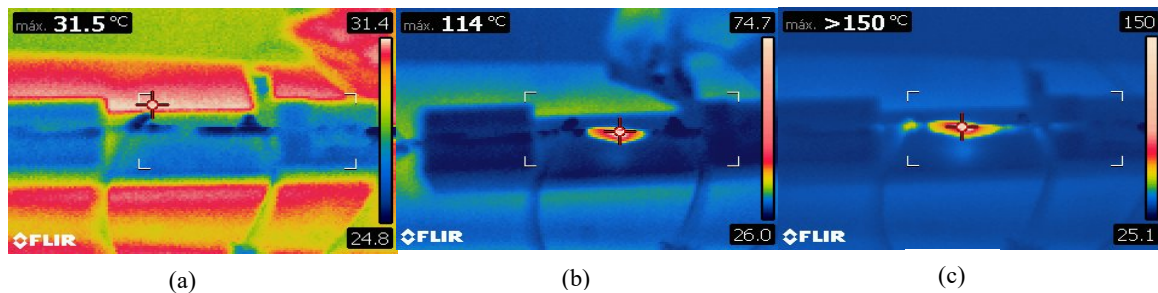


Figura 56. Temperaturas con electrodos de cobre. Antes del arco (a), durante el arco (b), después de un arco sostenido por 10 s (c).

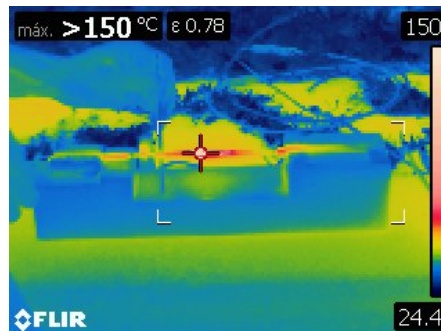


Figura 57. Temperatura registrada con puntas de acero, después de un arco sostenido por 10 s.

Para ambos materiales la temperatura registrada después de sostener un arco eléctrico por 10 s es mayor a los 150 °C.

Podemos concluir que aunque la temperatura y el calor poseen definiciones diferentes, sin embargo, ambas están relacionadas y que entre el hierro, cobre y aluminio; el cobre es el material que se calienta más rápido. Esto se debe a que es un elemento con mayor valor de conductividad térmica, este valor es de 372 W/m·K. La Tabla 15 nos muestra las propiedades térmicas de los materiales mencionados.

En metales, la conductividad térmica, varía muy a la par con la conductividad eléctrica de acuerdo con la ley de Wiedemann-Franz ya que los electrones de valencia que se mueven libremente transportan no solo corriente eléctrica sino también energía calórica. Sin embargo, la correlación general entre conductancia eléctrica y térmica no se mantiene para otros materiales, debido a la importancia de la transmisión por fotones en no metales [92].

	<i>Temperatura de fundición</i>	<i>Conductividad Térmica</i>	<i>Conductividad eléctrica</i>
	<i>° C</i>	<i>W/(K·m)</i>	<i>(S·m⁻¹)</i>
<i>Aluminio</i>	620 - 650	237	37.8×10^6
<i>Bronce</i>	880 - 920	116-186	17×10^6
<i>Latón</i>	930 - 980	81-116	17.89×10^6
<i>Cobre</i>	1050	372.1 – 385.2	59.6×10^6
<i>Hierro fundido</i>	1220	80,2	
<i>Hierro forjado</i>	1593		
<i>Acero de alto carbono</i>	1370		15.3×10^6
<i>Acero medio carbono</i>	1430		
<i>Acero bajo carbono</i>	1510	47-58	
<i>Acero inoxidable</i>	1430		

Tabla 15. Propiedades de los metales más comunes .

4.2 Factores externos que influyen en la la generación de un arco eléctrico

Numerosas propiedades químicas y físicas de un elemento o material pueden influenciar su conductividad térmica. En general, materiales de composición química y estructura molecular simple poseen una alta conductividad térmica. Una característica muy común que puede influenciar en el valor de la conductividad térmica de un material es su porosidad.

El aire es otro factor indispensable ya que es el medio de transporte de los electrones cuando éste se ioniza a esto se le conoce como plasma. Tiene una conductividad térmica 0.02 W/(m/K) a temperatura ambiente ($20\text{-}25^\circ\text{C}$). Este valor es considerablemente bajo respecto a la mayoría de los materiales sólidos. Cuando el aire es atrapado en los poros de una sustancia puede disminuir la velocidad a la cual el calor puede pasar en forma efectiva a través de ellos. El tamaño del poro, su distribución, forma y conectividad, todos influyen en la porosidad de un material. Una porosidad elevada disminuirá la conductividad térmica.

Otros factores externos que pueden impactar en la conductividad térmica, es la humedad y la dirección del flujo de calor. El agua y el hielo tienen una mayor conductividad térmica que el aire. Si un material es expuesto a un ambiente húmedo, esta puede potencialmente ser absorbida y consecuentemente incrementará el valor de la conductividad térmica. La estructura molecular de un material también puede potencialmente restringir el flujo de calor.

En las Figuras 58 y 59 se muestra el estado físico de las puntas después del arco eléctrico; así como la luz emitida con cada material. Podemos concluir que la intensidad de luz emitida por el arco eléctrico en puntas de cobre y acero es diferente visualmente observable; en intensidad y color tendiendo a ser mayor con electrodos de cobre en comparación con electrodos de acero. La resistencia que se genera en las puntas es mayor en cobre y esto genera que las caídas de voltaje sean mayores en comparación con las de acero.

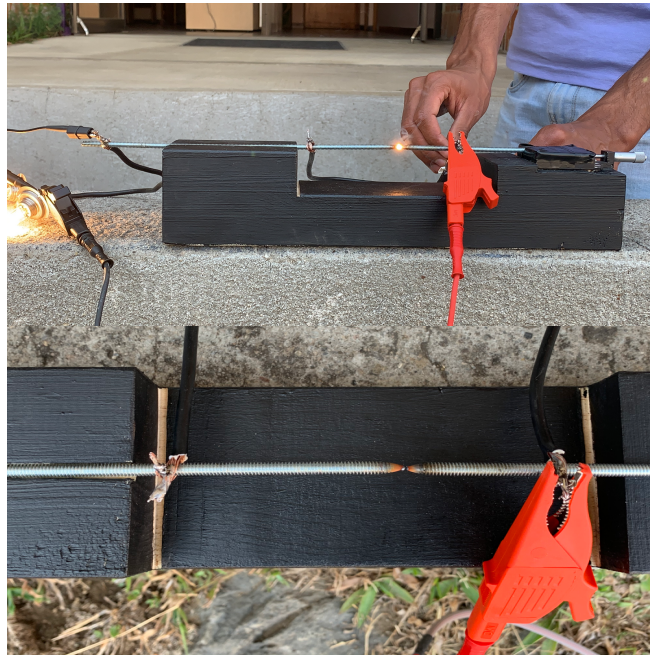


Figura 58. Arco eléctrico con puntas de acero.

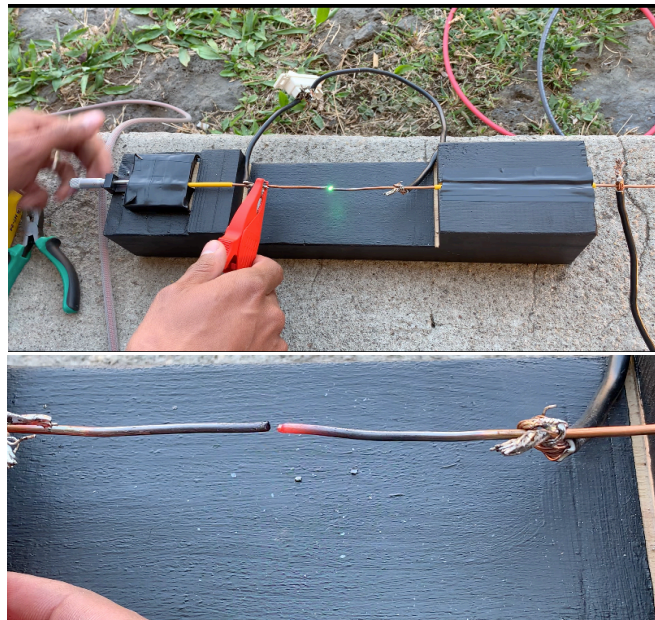


Figura 59. Arco eléctrico con puntas de cobre.

4.3 Procesamiento de la señal de arco eléctrico.

El análisis de una señal mediante la transformada de Fourier es exclusivamente para señales en las cuales su contenido de frecuencias no cambia en el tiempo es decir señales estacionarias, sin embargo; la mayoría de las señales contienen características transitorias o no estacionarias; por lo que el análisis de Fourier no es adecuado para detectar estos cambios. La señal de arco eléctrico, como se pudo observar en las gráficas obtenidas de los experimentos en condiciones reales y en la señal simulada; sabemos que es una señal no estacionaria durante un periodo de tiempo.

Conociendo que la deficiencia de la Transformada de Fourier de tiempo corto estudiada en la literatura, la cual divide la señal en segmentos cortos de tiempo para después realizar análisis de cada segmento [86] y estos segmentos ó ventanas de tiempo son considerados inmóviles o estacionarios, entendemos que la limitante principal es que no se puede realizar un análisis multiresolución.

Debido a esto se opta por utilizar la Transformada Wavelet, una transformada que puede enfocarse en estructuras de señales localizadas con un procedimiento de multiresolución (zoom), que reduce progresivamente el parámetro de escala.

La transformada wavelet es un tipo especial de transformada matemática que representa una señal en términos de versiones trasladadas y dilatadas de una onda finita (denominada óndula madre).

La teoría de ondículas está relacionada con campos variados [22,24]. Todas las transformaciones de ondículas pueden ser consideradas formas de representación en tiempo-frecuencia y, por tanto, están relacionadas con el análisis armónico. Las transformadas de ondículas son un caso particular de filtro de respuesta finita al impulso [11].

Con esto podemos definir que usar Transformada wavelet nos ofrece un procedimiento de análisis multiresolución en un banco de filtros que se adecua a las señales de arco eléctrico. A partir de aquí definiremos un primer planteamiento para el procesamiento de la señal de arco.

Planteamiento 1

Las singularidades y las estructuras irregulares a menudo llevan información esencial en una señal [88]. Para caracterizar estructuras singulares, es necesario cuantificar con precisión la regularidad local de una señal $f(t)$. Los exponentes de Lipschitz proporcionan medidas de regularidad uniformes en intervalos de tiempo, pero también en cualquier punto v . Si f tiene una singularidad en v , significa que no es diferenciable en v , entonces el exponente de Lipschitz en v caracteriza este comportamiento singular. Por tanto se relaciona la transformada wavelet como un operador diferencial multiescala relacionado con la regularidad Lipschitz [88].

Se considera la señal de arco eléctrico como una singularidad y se requiere establecer el tipo de wavelet que se adapte mejor a las señales de arco eléctrico.

El primer criterio para seleccionar las familias wavelet que se usarán en el procesamiento de las señales de arco eléctrico se basó en la característica que permite que una wavelet funcione como un banco de filtros (wavelet diádica), ya que el objetivo es caracterizar una señal estocástica y no estacionaria en el tiempo. Así tenemos cuatro familias wavelet que ofrecen ésta función: Daubechies, Coiflet, Symlet y Biorotogonal. La familia wavelet biorotogonal no es necesaria para éste estudio ya que es una wavelet que sirve para construir y reconstruir una señal y en éste caso no es necesario reconstruir una señal de arco eléctrico; es por esto que se elimina del estudio a realizar.

La elección de wavelet y nivel de descomposición adecuado comienza con una serie de gráficos donde se aprecia el comportamiento de singularidad de las tres familias wavelet diádicas utilizadas en este experimento.

Se toma una señal de arco eléctrico obtenida con electrodos de hierro. Los resultados de comparación de wavelets se muestran en las Figuras 60-70.

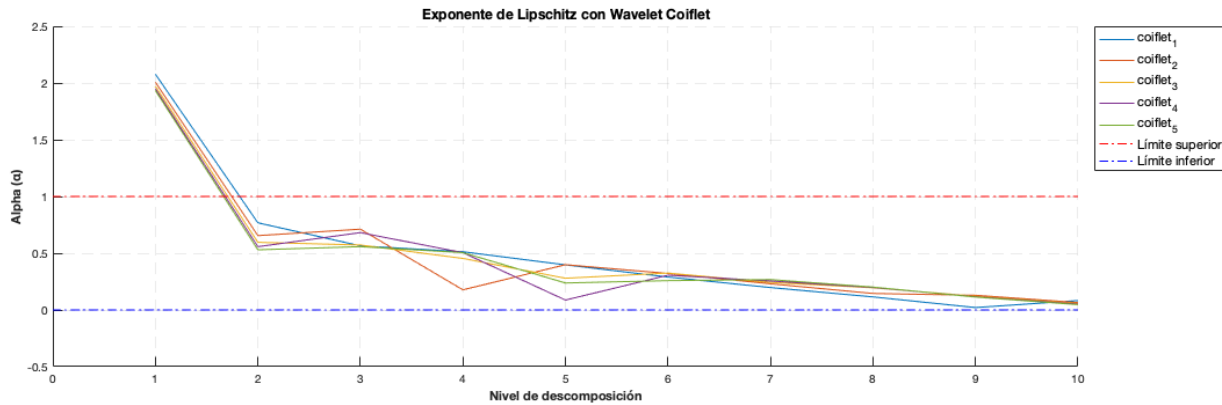


Figura 60. Comparación de Wavelets Coiflet en 10 niveles de descomposición.

Como se observa en la Fig. 60 usando cualquier tipo de la familia coiflet se encuentra la singularidad de la señal a partir del nivel 2 y hasta el nivel 10 de descomposición, por lo que se considera que la familia de wavelet coiflet proporciona opciones diversas para procesar una señal de arco eléctrico.

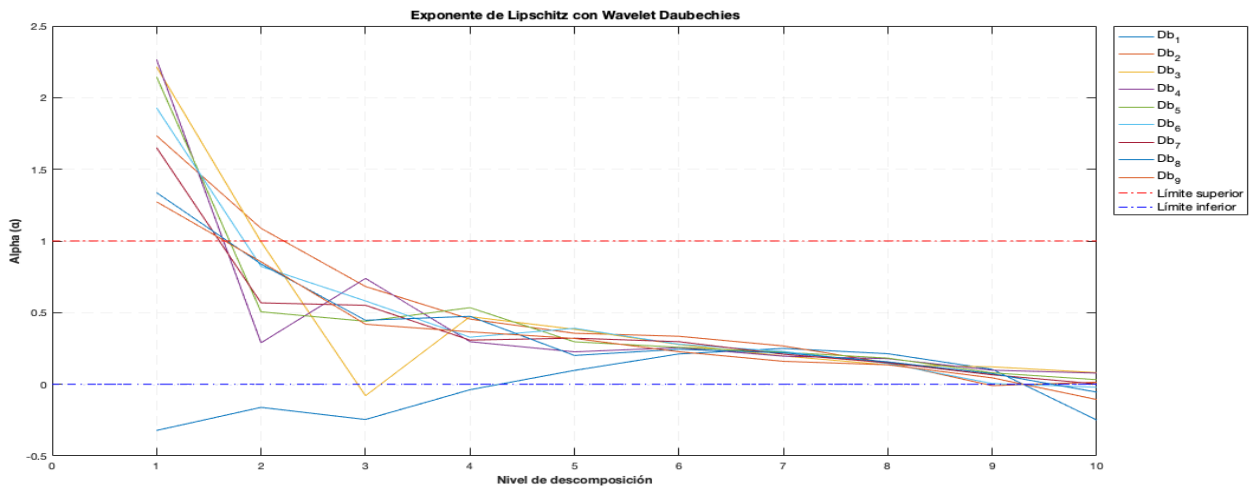


Figura 61. Comparación de Wavelets Daubechies 1-9 en 10 niveles de descomposición.

En la Fig. 61 se puede observar el comportamiento de Lipschitz con la familia daubechies del 1-9, donde las daubechies 1-3 muestran la singularidad de la señal de arco en niveles de descomposición más grandes lo que implicaría un mayor tiempo y costo de procesamiento.

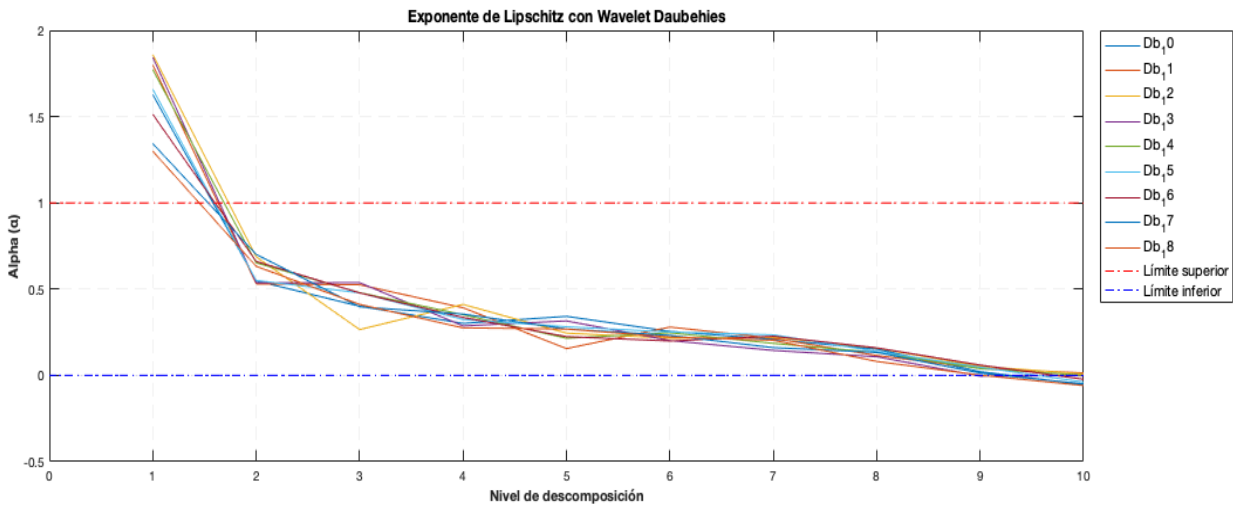


Figura 62. Comparación de Wavelets Daubechies 10-18 en 10 niveles de descomposición.

En la Fig. 62 se observa que las wavelet daubechies 10-18 tienen un comportamiento similar para encontrar la singularidad de la señal de arco eléctrico, todas a partir del nivel 2 de descomposición. Entre mayor sea el nivel de descomposición el exponente de lipschitz se acerca más a 0, de tal manera que cuando sale del límite inferior no se podría considerar que existe en la señal una singularidad.

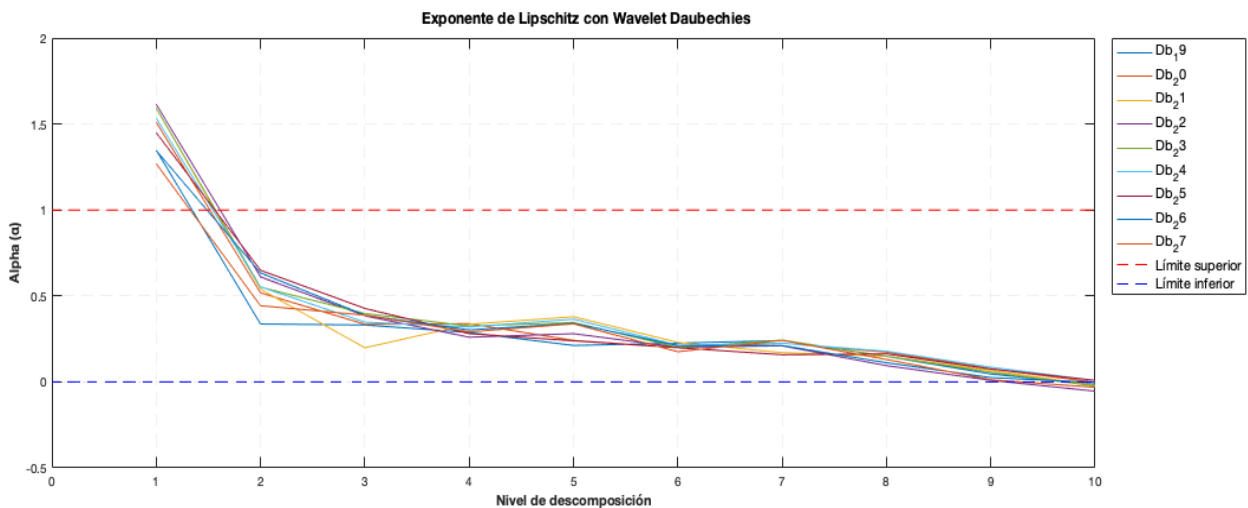


Figura 63. Comparación de Wavelets Daubechies 19-27 en 10 niveles de descomposición.

En la Fig. 63 se muestra como las daubechies 19-27 procesan una señal de arco eléctrico y encuentran la singularidad de la señal de manera similar a partir del nivel 2 de descomposición, donde alpha (exponente de lipschitz) se encuentra dentro del rango para considerar que existe una singularidad en la señal. La tendencia a acercarse cada vez más a 0 se debe al aumentar los niveles de descomposición.

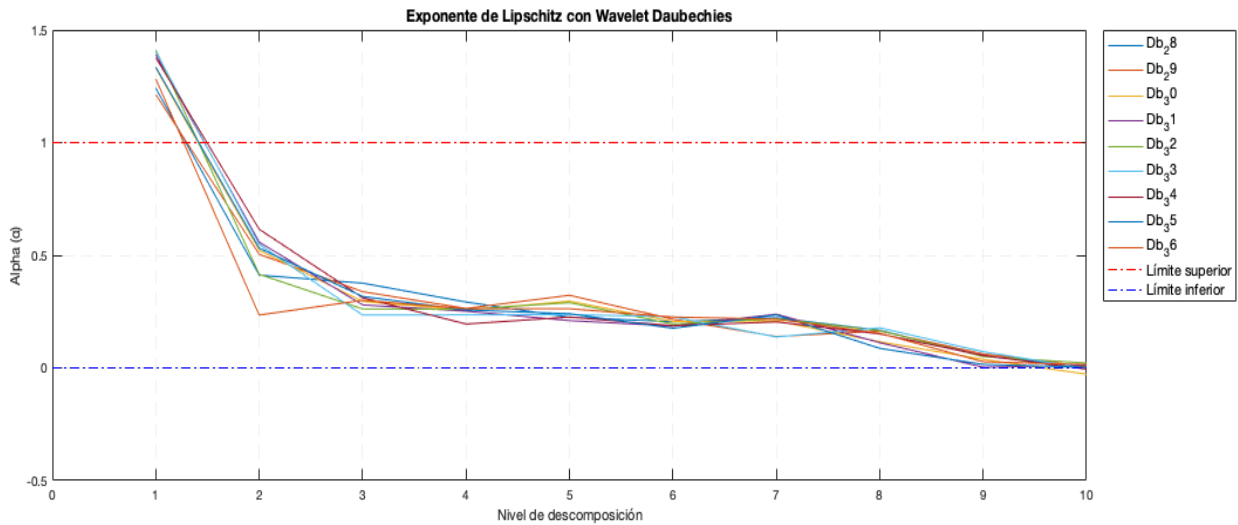


Figura 64. Comparación de Wavelets Daubechies 28-36 en 10 niveles de descomposición.

En la Fig. 64 se muestra como las wavelet daubechies 28-36 encuentran la singularidad de la señal de arco eléctrico a partir del nivel 2 de descomposición y mantienen una similitud en los diferentes niveles de descomposición.

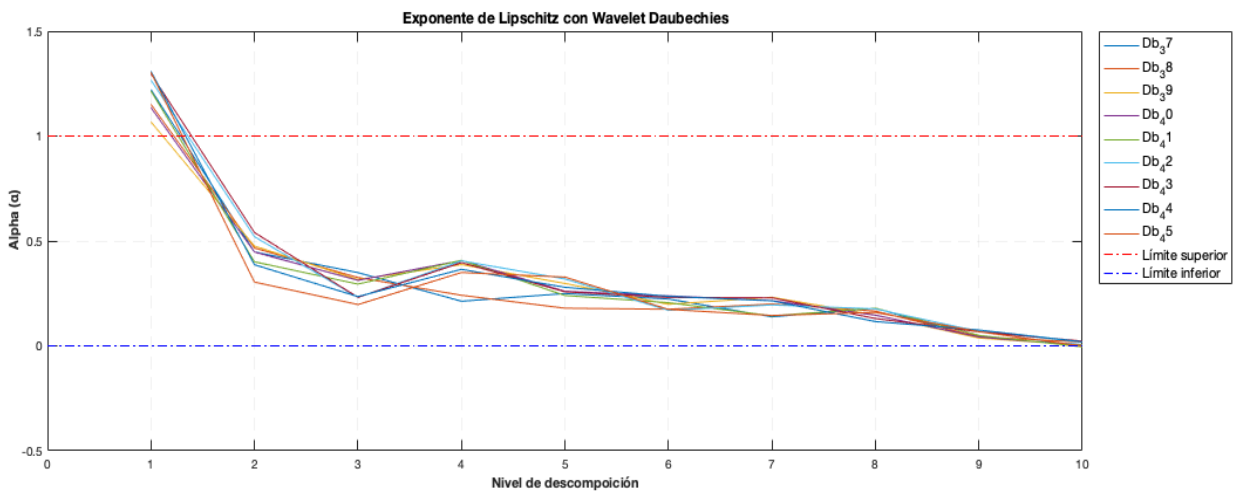


Figura 65. Comparación de Wavelets Daubechies 37-45 en 10 niveles de descomposición.

En la Fig. 65 se muestra el comportamiento del exponente de lipschitz para las wavelet daubechies 37-45 que al igual que las anteriores mantienen un comportamiento similar y encuentran la singularidad de la señal de arco eléctrico a partir del nivel de descomposición 2.

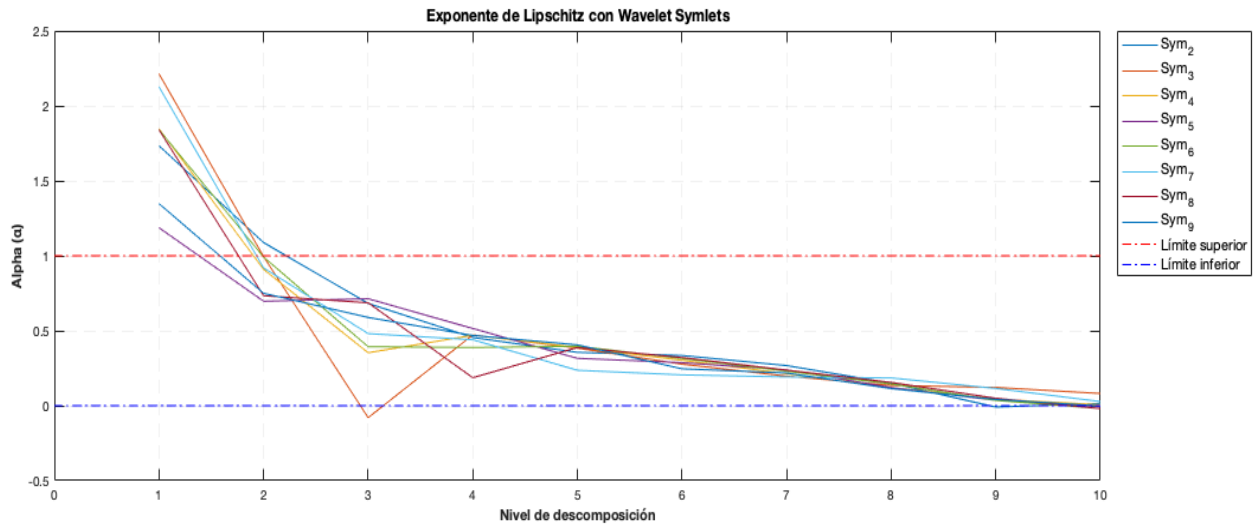


Figura 66. Comparación de Wavelets Symlet 2-9 en 10 niveles de descomposición.

En la Fig. 66 se analiza el comportamiento para encontrar la singularidad de la señal de arco eléctrico con la familia de wavelet symlet 2-9. La wavelet symlet 3 se sale del comportamiento general que tienen las demás ya que a partir del nivel 4 marca que existe una singularidad en la señal de arco.

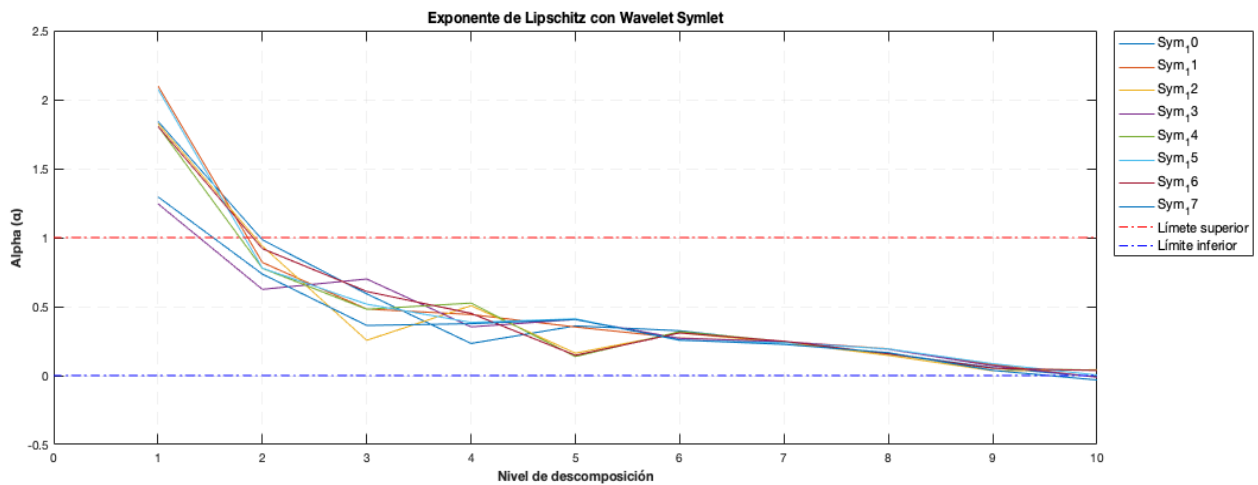


Figura 67. Comparación de Wavelets Symlet 10-17 en 10 niveles de descomposición.

En la Fig. 67 se observa un comportamiento más uniforme de las wavelet symlet 10-17 donde a partir del nivel 2 de descomposición se encuentra la singularidad de la señal de arco eléctrico.

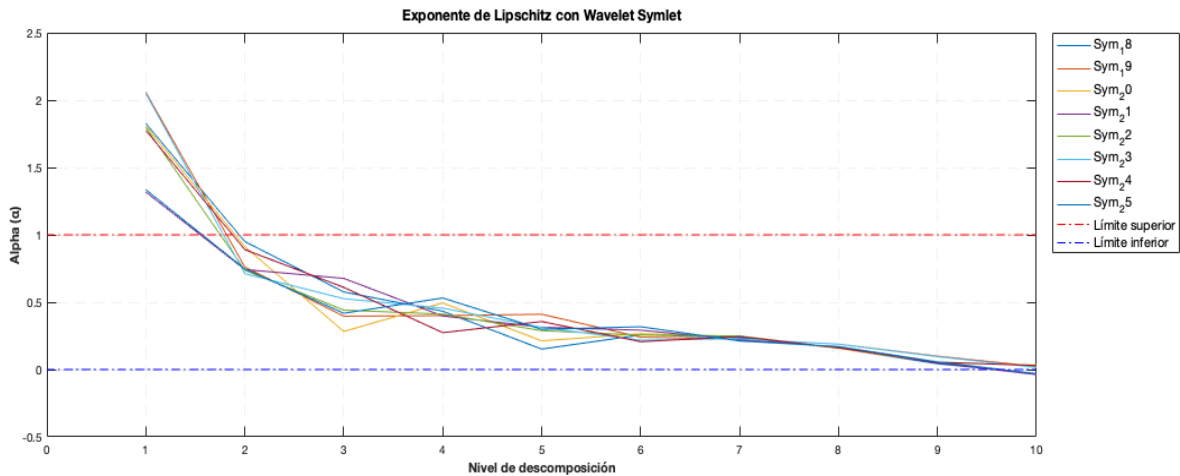


Figura 68. Comparación de Wavelets Symlet 18-25 en 10 niveles de descomposición

En la Fig. 68 se puede observar que el comportamiento del exponente de lipschitz para las wavelet symlet 18-25 es estable en los 10 niveles de descomposición y dichas wavelets symlet encuentran la singularidad de la señal desde el nivel de descomposición 2 y hasta el nivel 9 o 10 según mantengan la condición de estar entre el límite de 0-1 de alpha.

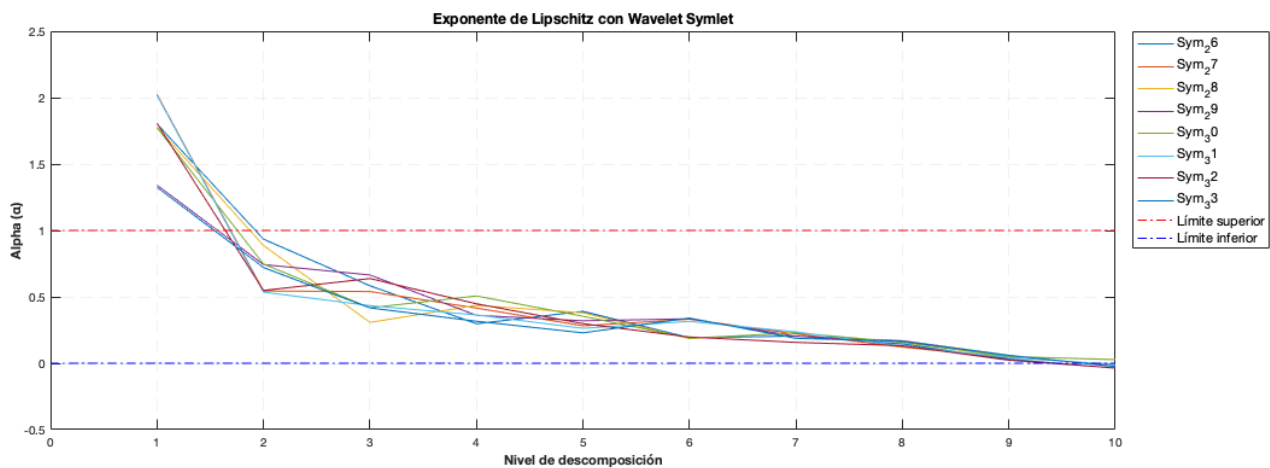


Figura 69. Comparación de Wavelets Symlet 26-33 en 10 niveles de descomposición

En la Fig. 69 se observa el exponente de lipschitz para las wavelet symlet 26-33 de modo que encuentran la singularidad de la señal de rco eléctrico en los niveles de descomposición del 2-10 de manera muy similar.

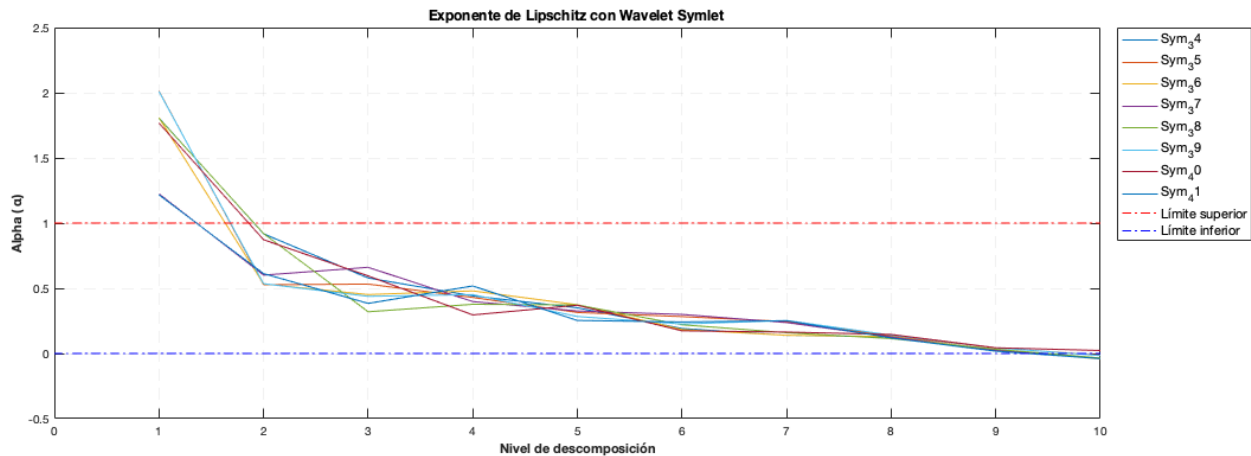


Figura 70. Comparación de Wavelets Symlet 34-41 en 10 niveles de descomposición

En la Fig. 70 se observa como las wavelet symlet 34-41 tienen un comportamiento similar en todos los niveles de descomposición y encuentran la singularidad a partir del nivel de descomposición 2.

Para el procesamiento de la señal de arco eléctrico en las diferentes familias wavelet wavelet se limitó a 10 niveles de descomposición considerando el tiempo de procesamiento que éste consumiría y se considera que son suficientes para mostrar el comportamiento de detección de singularidad en la señal estudiada.

Cabe mencionar que dentro de la familia wavelet symlet existen 45 tipos y solo se pudo llegar hasta la 41 debido al tiempo de procesamiento que las coiflet 42-45 requerían para mostrar resultados que el programa y equipo utilizados nos permitía.

Para ejemplificar la relación del exponente de Lipschitz con la detección de la singularidad de una señal se presenta un ejercicio con la Wavelet Daubechies1 (Wavelet Haar), descompuesta en 10 niveles.

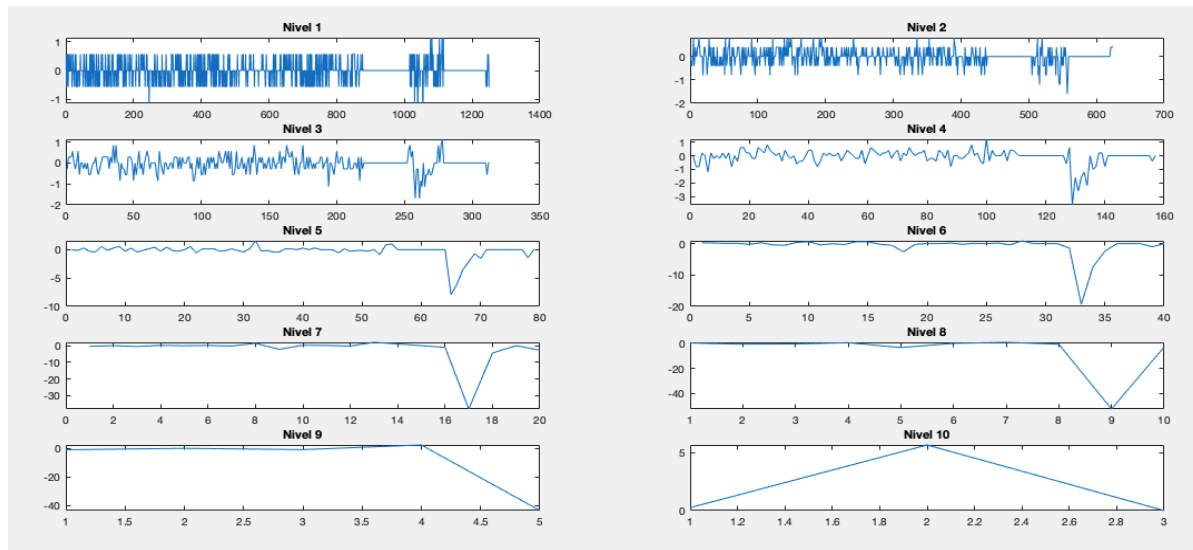


Figura 71. Descomposición a 10 niveles de la señal de arco con Daubechies 1.

Cómo se puede observar en la Figura 71, a medida que aumenta el nivel de descomposición se va perdiendo resolución; ésta es la misma tendencia que se graficó con el exponente de Lipschitz en la búsqueda de singularidad en la señal de arco eléctrico. También se puede destacar que en los niveles que salen de los límites determinados con el Exponente de Lipschitz (1, 2, 3, 4 y 10) son los que gráficamente tienen menor resolución para detectar el arco eléctrico.

4.4 Morfología de la Wavelet Seuret-Trutié (WST) vs Haar.

En ésta tesis se presenta la propuesta de una nueva Wavelet para el procesamiento de las señales de arco eléctrico, fenómeno descrito en los puntos 4.1 y 4.2.

La Wavelet Seuret-Trutié es un trabajo de investigación en proceso de publicación por lo que es de comunicación privada y no se mostrarán detalles sobre su expresión analítica, solo mostraremos una figura ilustrativa que muestra la forma de dicha wavelet y el comportamiento de las contracciones y dilataciones de sus ventanas en los primeros 5 niveles de descomposición.

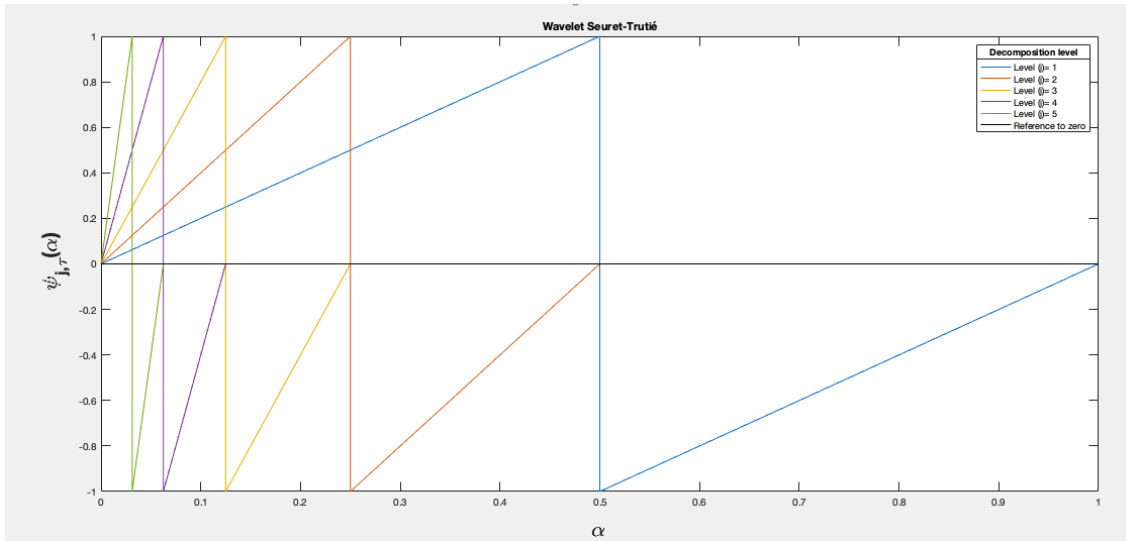


Figura 72. Gráfica de WST con 5 niveles de descomposición.

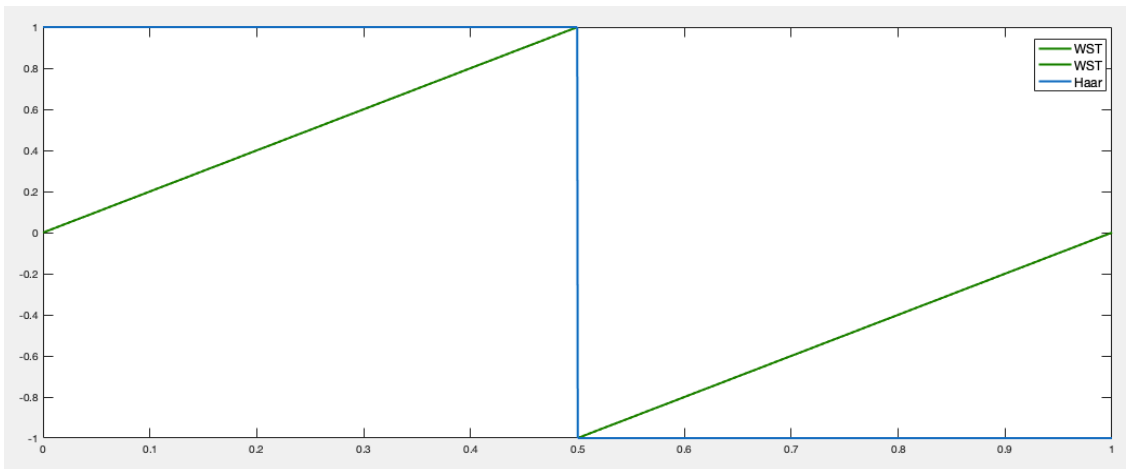


Figura 73. Gráfica comparativa entre WST vs Haar.

La finalidad de la propuesta es probar y mostrar los resultados que puede ofrecer esta nueva wavelet en el procesamiento de señales de arco eléctrico y crear un punto de partida para el estudio mediante la Wavelet Seuret-Trutié de fenómenos con características similares a alas del arco eléctrico.

4.5 Análisis de descomposición usando Wavelet Seuret-Trutié (WST).

Para evaluar el funcionamiento de la WST se calcularán los porcentajes de error en los 3 primeros niveles de descomposición. Dicha prueba consiste en descomponer la señal de arco eléctrico en diferentes niveles e identificar el pico representativo de la caída de voltaje y compararlo con el tiempo de ocurrencia de caída de voltaje en la señal original. Los resultados se muestran en las Figuras 74-77.

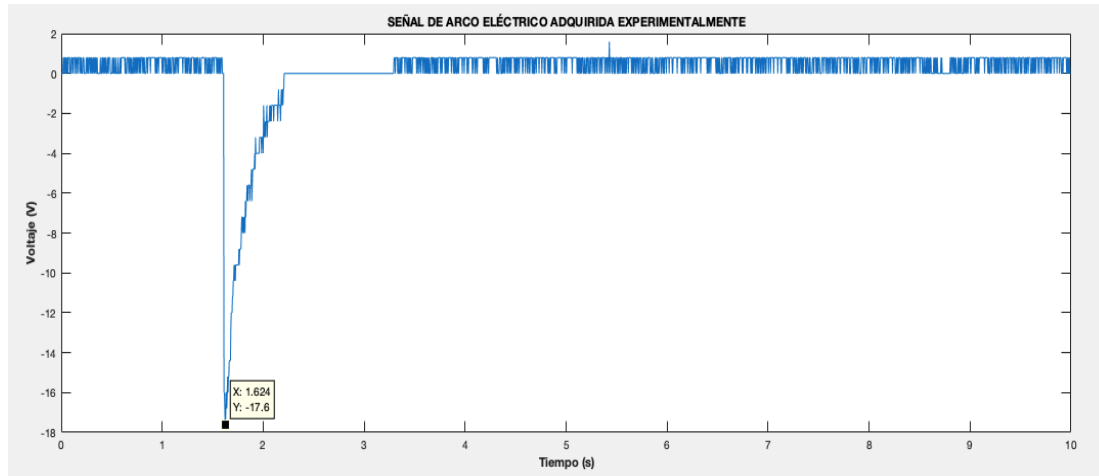


Figura 74. Señal de arco eléctrico original.

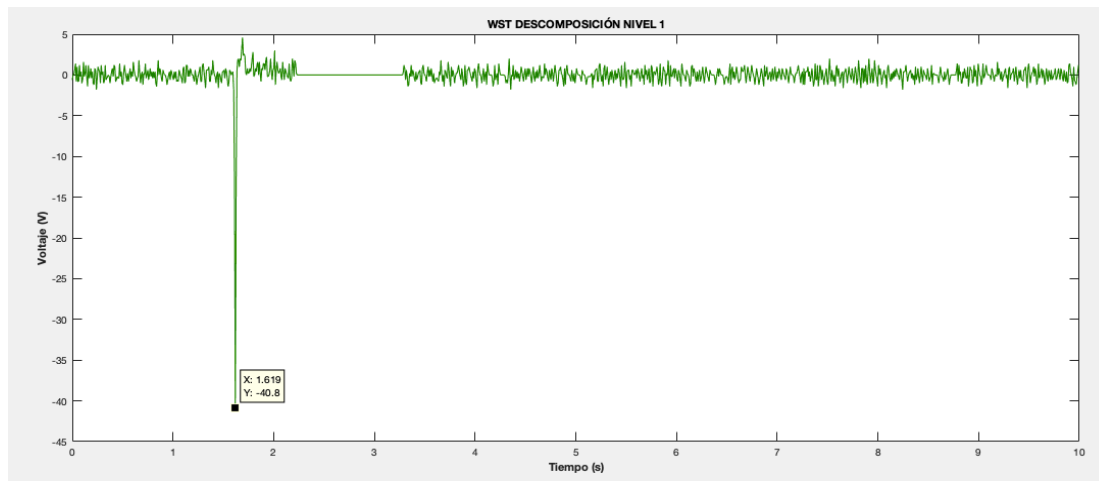


Figura 75. Descomposición de señal de arco en nivel 1

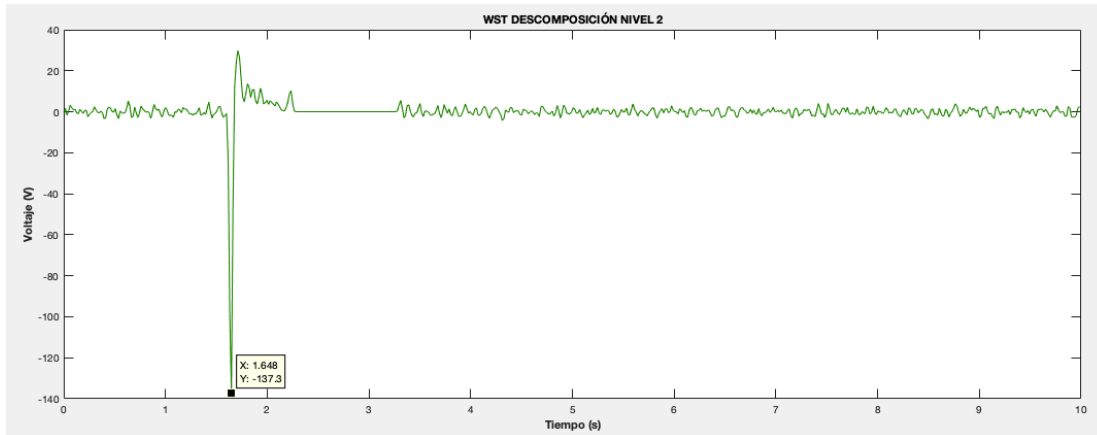


Figura 76. Descomposición de señal de arco en nivel 2.

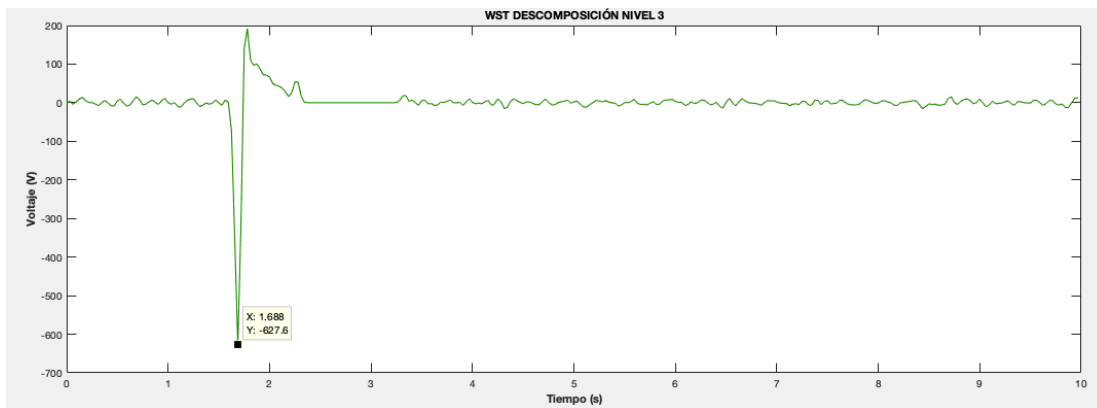


Figura 77. Descomposición de señal de arco en nivel 3.

En la Tabla 16 se muestran los porcentajes de error obtenidos para los primeros 3 niveles de descomposición.

<i>Nivel de descomposición</i>	Tiempo Seg.	% de error
<i>Señal original</i>	1.624	
1	1.619	0.307
2	1.648	1.477
3	1.688	3.940

Tabla 16. Porcentaje de error en cada nivel de descomposición usando WST.

Como se puede observar en las Figuras 74-77 y en la Tabla 16 los porcentajes de error obtenidos con el análisis multiresolución de la WST son mínimos de modo que se prueba la eficacia al momento de descomponer la señal, con un grado de precisión que permite identificar y extraer la mayor cantidad de información del pico que marca la caída de voltaje representado en el arco eléctrico. También se debe resaltar la eficiencia de la WST en relación al tiempo de procesamiento y lo que esto implica. Teniendo en cuenta que a mayor nivel de descomposición, mayor tiempo de procesamiento y por consiguiente mayor consumo de recursos energéticos y de almacenamiento. Esto significa que la WST nos ofrece una precisión con un porcentaje de error mínimo y una resolución adecuada en los primeros 3 niveles de descomposición.

4.6 Reconstrucción de la señal de arco eléctrico usando Wavelet Seuret-Trutié (WST).

El principio fundamental del uso de una wavelet, es que ésta nos permita descomponer y reconstruir la señal a la cual le estamos aplicando dicho procesamiento. Es por esto que con la intención de evaluar la confiabilidad de la WST y habiendo demostrado porcentajes aceptables de error al momento de realizar la descomposición de la señal de arco en los primeros 3 niveles de descomposición. Se presenta el funcionamiento de la WST con la reconstrucción de la señal de arco.

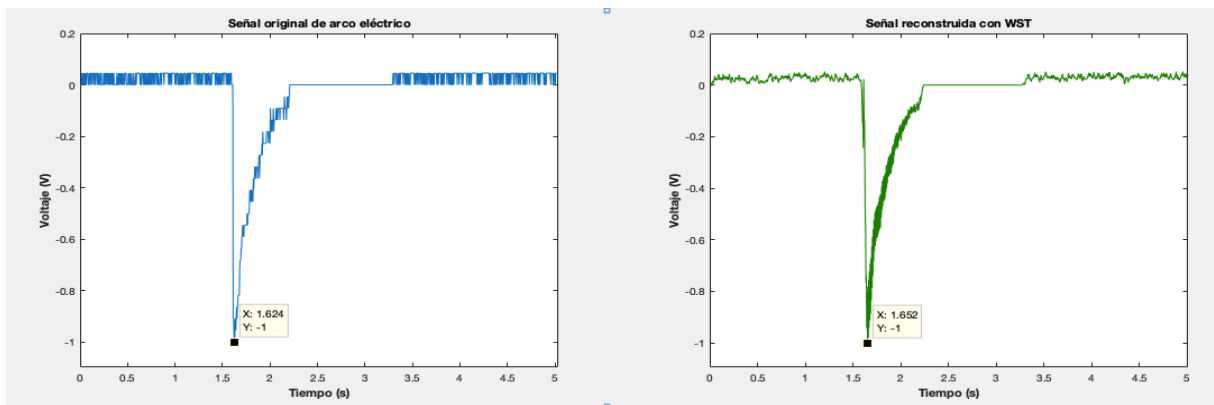


Figura 78. Reconstrucción Nivel 1.

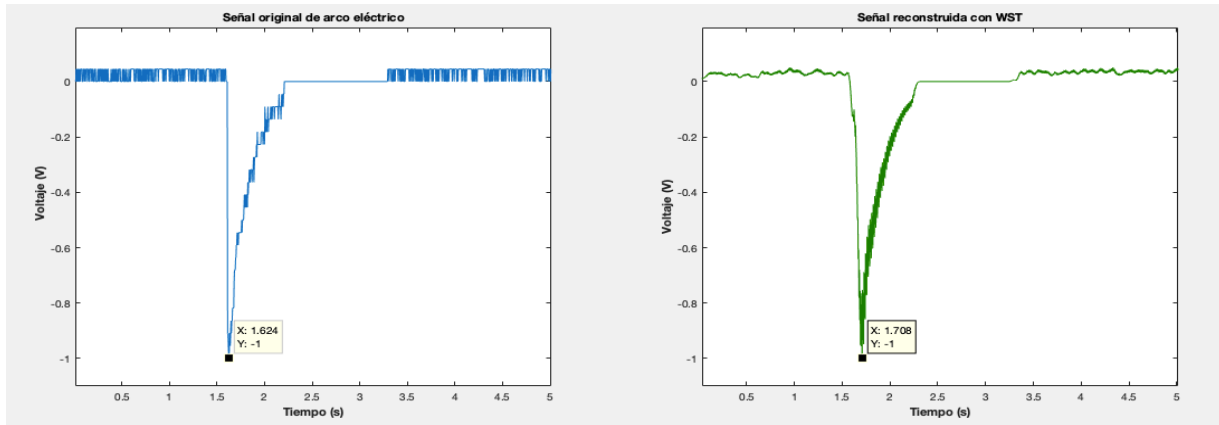


Figura 79. Reconstrucción Nivel 2.

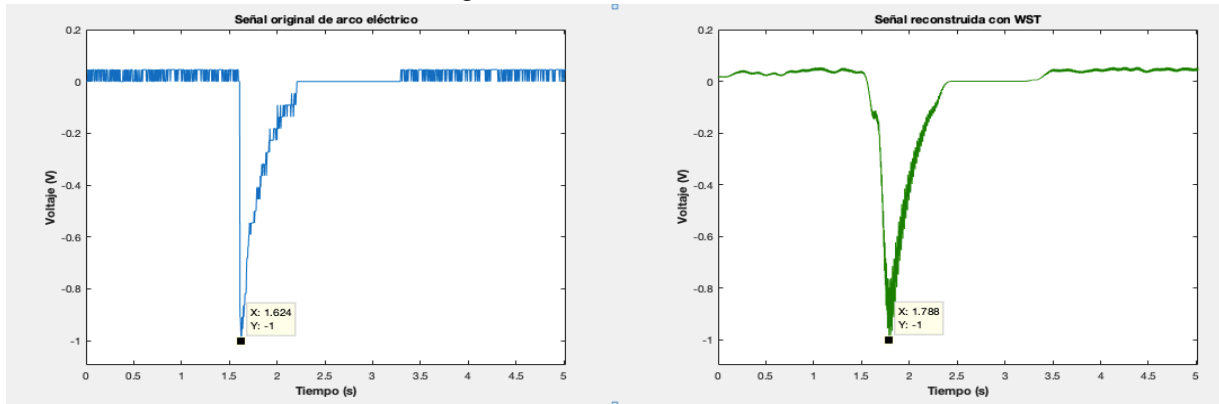


Figura 80. Reconstrucción Nivel 3.

Los resultados considerando el porcentaje de error se muestran en la Tabla 17. Podemos observar que a medida que aumenta el nivel de descomposición el porcentaje de error aumenta y esto se refiere a un problema resolutivo. Por lo que para el uso óptimo de la WST en reconstrucción de señales con características similares a las que tiene el arco eléctrico se requieren niveles bajos de resolución para mejores resultados.

Nivel de descomposición	Tiempo Seg.	% de error
Señal original	1.624	
1	1.652	1.7241
2	1.708	5.1724
3	1.788	10.0985

Tabla 17. Porcentaje de error por nivel de descomposición.

Se comparó el funcionamiento de reconstrucción de la Wavelet Seuret-Trutié con las otras wavelet utilizadas en ésta investigación (Coiflet, Daubechies, Symlet, Haar). Los resultados se muestran en la Tabla 18.

Nivel de descomposición	WAVELET SEURET-TRUTIÉ		WAVELET HAAR	WAVELET DAUBECHIES	WAVELET SYMLET	WAVELET COIFLET
	Tiempo Seg.	% de error	% de error	% de error	% de error	% de error
Señal original	1.624					
1	1.652	1.7241	1.8691e-14	2.9680e-11	1.5286e-11	9.5062e-10
2	1.708	5.1724	3.2889e-14	6.0199e-11	2.3319e-11	1.3381e-09
3	1.788	10.0985	4.7241e-14	9.9253e-11	3.1746e-11	1.7589e-09

Tabla 18. Porcentaje de error de reconstrucción con diferentes wavelet.

Comparando los resultados contenidos en la Tabla 18, se puede observar que a medida que aumenta el nivel de descomposición utilizando WST, ésta aumenta su porcentaje de error al reconstruir la señal; en comparación con las demás wavelet éste porcentaje es mayor y con esto se puede decir que la WST no cuenta con un funcionamiento eficiente cuando se trata de reconstruir señales.

Dado que para esta investigación la reconstrucción de la señal no es relevante, la falla descrita en este punto de la Wavelet Seuret-Trutié no afecta para que sea usada en el procesamiento de la señal de arco eléctrico.

4.7 Aplicación de Wavelet Seuret-Trutié

Para comprobar la eficiencia de la wavelet Seuret-Trutié (WST) en el procesamiento de señales de arco eléctrico, se realizó un experimento utilizando Matlab bajo las siguientes condiciones:

- Agregar un ruido gaussiano a la señal de arco eléctrico adquirida, con una amplitud cercana a la amplitud de la señal de arco eléctrico.

Con la finalidad de que en la señal de arco eléctrico no sea perceptible de manera inmediata, incluso pasar desapercibida en la gráfica y poder probar la capacidad de procesamiento que ofrece la wavelet Seuret-Trutié para realizar análisis multiresolución en sistemas con ruido. En las Figura 81-83 se muestra el planteamiento del experimento.

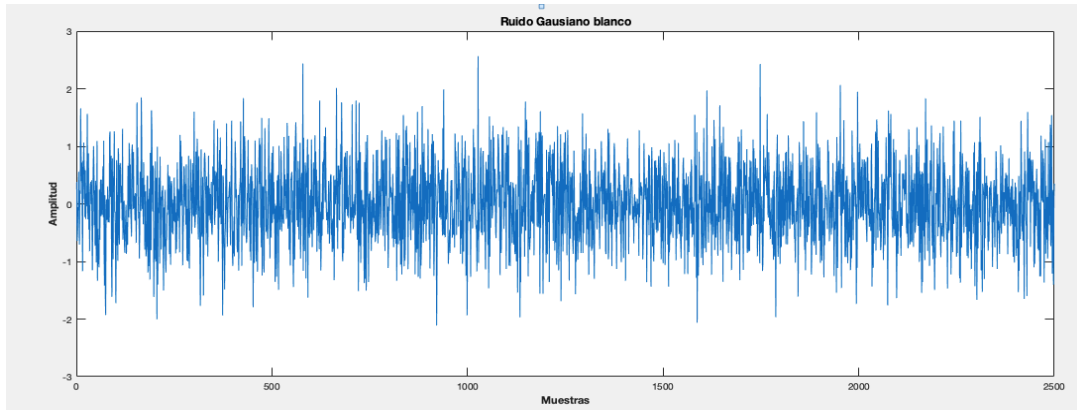


Figura 81. Ruido blanco gaussiano.

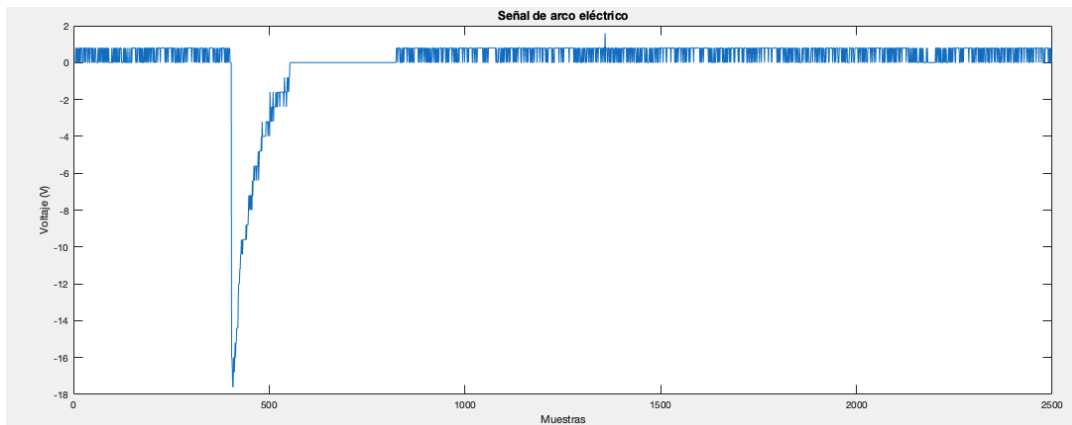


Figura 82. Señal de arco eléctrico con electrodos de hierro.

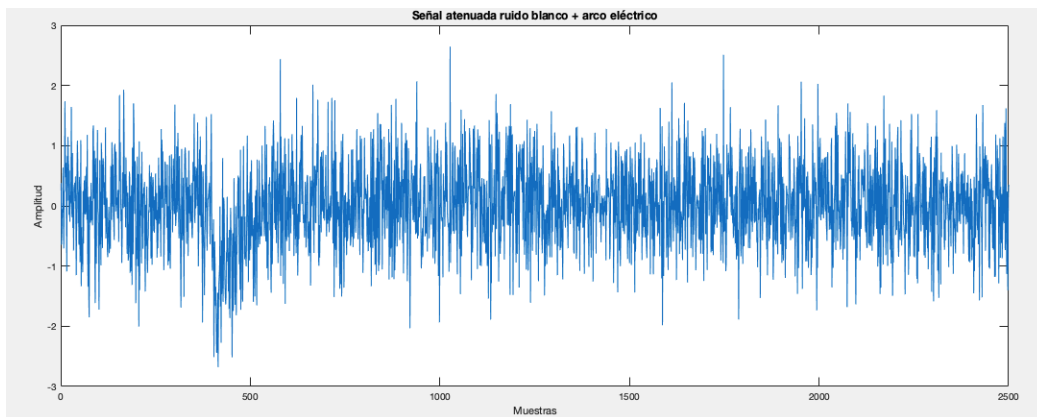


Figura 83. Señal compuesta Arco eléctrico + Ruido gaussiano.

Como parte del procesamiento a la señal de arco eléctrico en la condición extrema descrita en la Figura 83, se realizó además un análisis comparativo entre la Wavelet de Haar y la nueva Wavelet llamada Seuret-Trutié, partiendo del principio de dos condiciones características que tienen estas dos wavelets que son:

1. Ambas son wavelet diádicas.
2. Ambas tienen un solo momento de desvanecimiento.

Los resultados obtenidos al procesar la señal compuesta se muestran en las Figuras 84-88. Se realiza la comparación para los primeros 5 niveles de descomposición donde se encontró información que demuestra la eficiencia de la WST ante Wavelet Haar en la condición extrema de colocar la señal de arco eléctrico dentro de una señal de ruido.

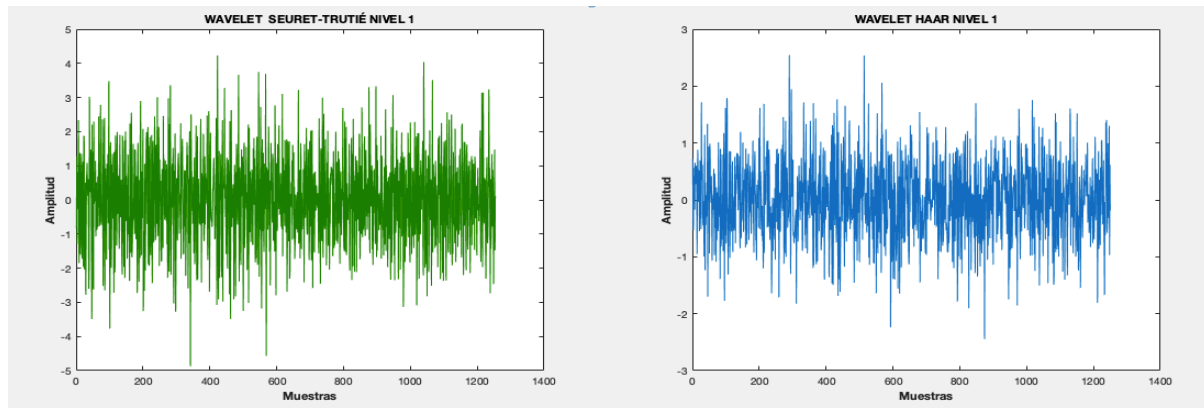


Figura 84. WST vs Haar en nivel 1 de descomposición.

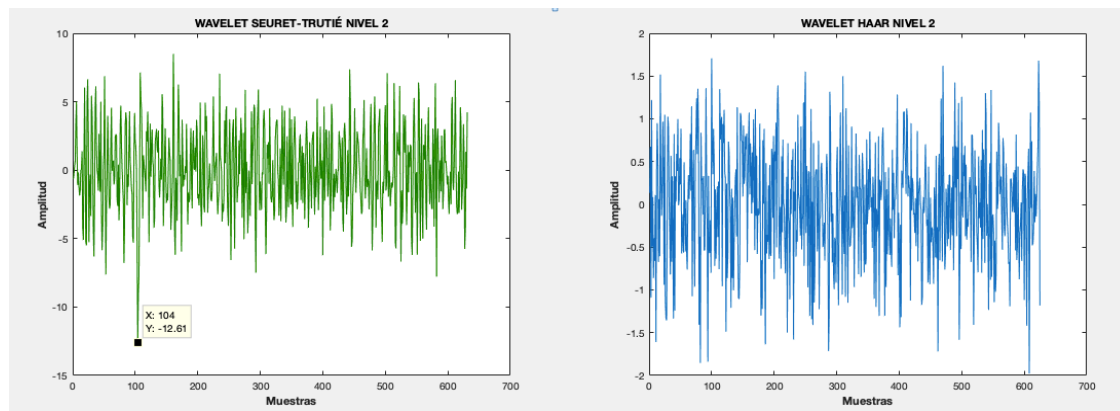


Figura 85. WST vs Haar en nivel 2 de descomposición.

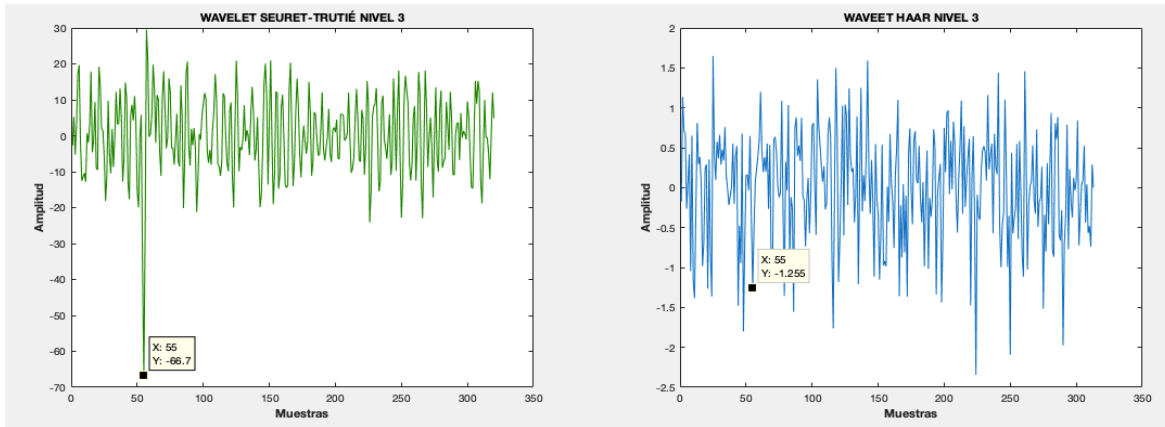


Figura 86. WST vs Haar en nivel 3 de descomposición.

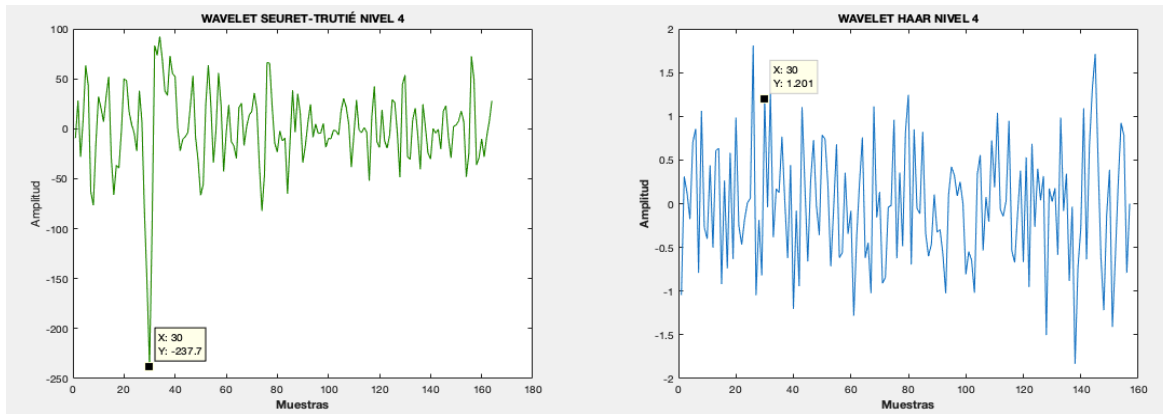


Figura 87. WST vs Haar en nivel 4 de descomposición.

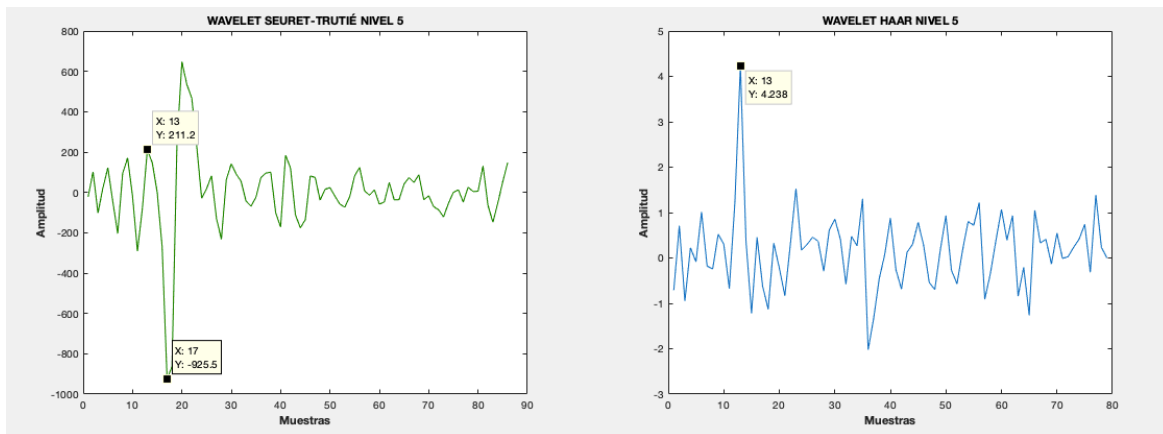


Figura 88. WST vs Haar en nivel 5 de descomposición.

En la Tabla 19 se presenta la información del tiempo que corresponde a la muestra que indica el pico de caída de voltaje que representa el arco eléctrico. La frecuencia de muestreo de la señal original es 250Hz.

<i>Nivel de descomposición</i>	<i>WST</i>		<i>Haar</i>	
	Frecuencia de muestreo Hz	Muestra	Tiempo seg	Tiempo Muestra seg
<i>Señal original</i>	250		1.624	
1	125	No es detectable		No es detectable
2	62.5	104	1.664	No es detectable
3	31.25	55	1.76	No es detectable
4	15.62	30	1.92	No es detectable
5	7.81	17	2.17	13 1.664

Tabla 19. Correspondencia No. de muestra con tiempo.

Con los resultados obtenidos del procesamiento de la señal de arco eléctrico con las dos wavelet se puede observar que la eficiencia de la WST es más alta en comparación con wavelet Haar, desde el nivel 2 de descomposición la WST muestra con suficiente resolución el pico representativo del arco eléctrico; mientras que en la wavelet Haar dicho pico es identificable con claridad hasta el nivel 5 de descomposición.

La manera de probar que se está encontrando el mismo pico representativo en la señal original de arco eléctrico es trasladando el valor de la muestra a su tiempo correspondiente con la finalidad de comparar con el tiempo de la señal original en donde ocurrió la caída de voltaje.

4.8 Análisis de energía de los coeficientes entre Wavelet Seuret-Trutié (WST) y Wavelet Haar.

Suponemos que al aplicar el teorema referente al cálculo de la energía de los coeficientes [88, 98, 99, 100,101,102] se puede obtener información que ayude a definir la wavelet apropiada para el procesamiento de este tipo de señales; así como el nivel de descomposición óptimo para su procesamiento. A continuación se muestra una gráfica comparativa usando Wavelet Haar y Wavelet ST con 10 niveles de descomposición.

Cálculo de la energía existente en los coeficientes de detalle obtenidos del procesamiento de a señal de arco eléctrico con wavelet Haar y Seuret-Trutié.

$$\|f\|^2 = \sum_{n=1}^N f_n^2$$

$$\|f\| = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_N^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^N f_n^2}$$

Donde:

N = Número de coeficientes de detalle

f_n^2 = Coeficiente de detalle al cuadrado

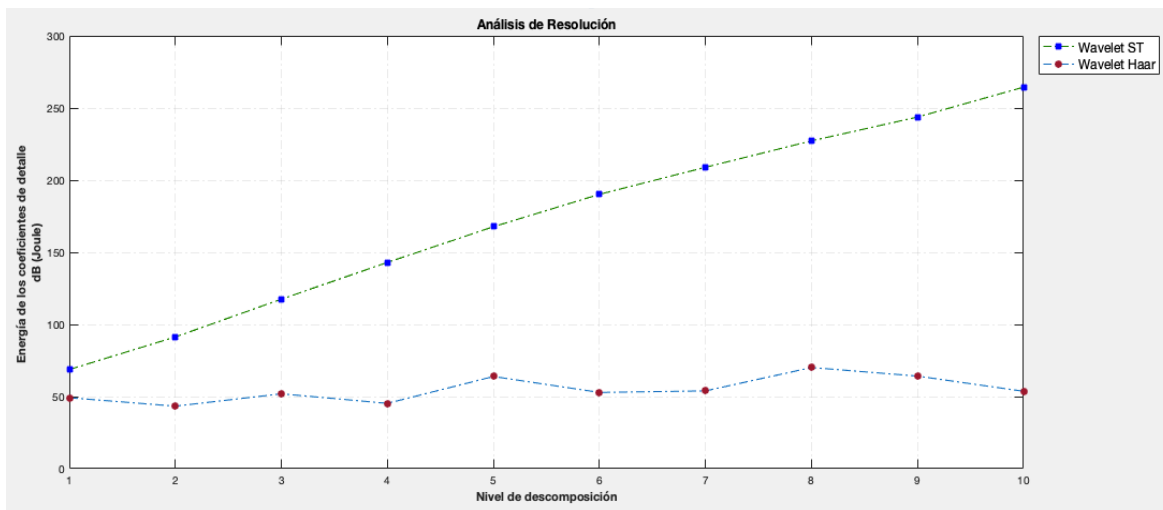


Figura 89. Energía de los coeficientes con Wavelet Haar y Wavelet ST

Tomando como métrica la energía de los coeficientes de detalle que arrojan las wavelet Haar y Seuret-Trutié de la señal de arco analizada y cuyos resultados se presentan en la Fig. 89, podemos observar las siguientes contribuciones:

1. Al aumentar el nivel de descomposición aumenta la energía y por tanto resolución en Wavelet Seuret-Trutié.
2. La Wavelet Seret-Trutié presenta mayor carga de energía desde el nivel 1-10 en comparación con la Wavelet de Haar.

- El nivel más alto de energía está representado por la Wavelet Seuret-Trutié en los 10 niveles de descomposición; mientras que el nivel más alto con Wavelet Haar es el 8.

Si tomamos de referencia los niveles más altos de energía para cada Wavelet, las representaciones gráficas de la señal de arco serian como se presentan a continuación.

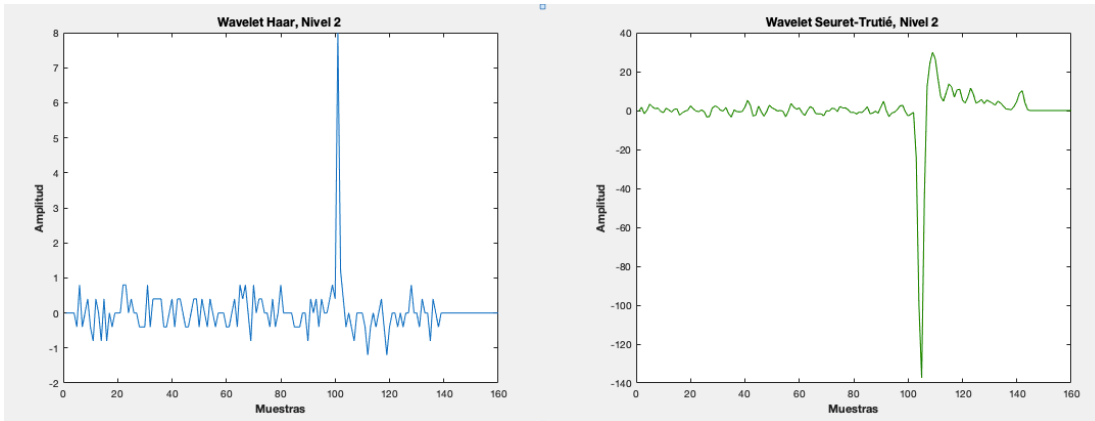


Figura 90. Comparación con nivel 2 de descomposición.

El nivel 1 de descomposición es el nivel cercano al valor más alto en energía en la Wavelet Haar, comparado su comportamiento gráficamente se observa que tenemos un espectro de la señal más limpio con WST. Aún cuando la resolución y claridad de la característica de singularidad del arco eléctrico parezca ser similar entre ambas wavelet.

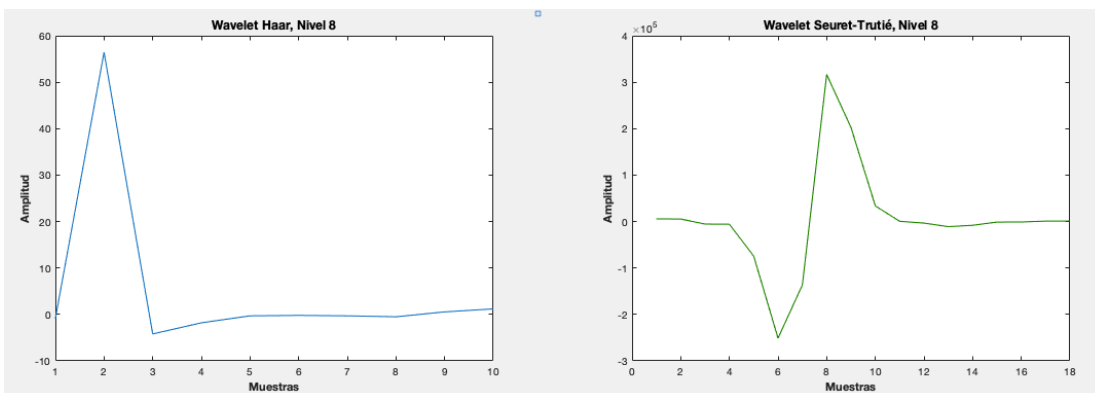


Figura 91. Comparación con nivel 8 de descomposición.

El nivel 8 de descomposición es el nivel más alto en energía en la Wavelet Haar, comparado con la Wavelet Seuret-Trutié se observa que tenemos una resolución parecida y una captura de la singularidad de la señal mejor identificada con wavelet Haar; sin embargo un nivel 8 de descomposición significa que requiere mayor tiempo de procesamiento de la señal.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtuvo información cualitativa y cuantitativa de las señales de arco eléctrico, con diferentes formas de caracterización, las cuales entregaron datos útiles para futuros trabajos de detección de fallas de arco eléctrico. La señal de arco eléctrico simulada presentó una ocurrencia morfológica similar a la señal generada en condiciones reales; comprobando el principio físico de arco eléctrico que es una caída de voltaje. Ésta simulación podría utilizarse para generar situaciones extremas.

Al realizar el desacoplamiento de DC se pudo obtener la señal de arco insitu y esto refleja la existencia de un tiempo de recuperación que está relacionado con la resistencia generada por la acción del arco eléctrico, entre mayor sea esta resistencia mayor será el tiempo de recuperación, tal como sucede con la carga de un capacitor.

Al comparar las señales de arco generadas con electrodos de cobre y de acero se encuentra que las caídas de voltaje en cobre son mayores respecto a las de acero teniendo una media de 23.48 V y 17.47 V respectivamente y esto se debe a las propiedades de los materiales como la conductividad térmica y eléctrica; así como la temperatura de fundición. Esto resume el impacto de la resistencia que se genera durante un arco eléctrico para determinar la magnitud de las caídas de voltaje.

Al usar el criterio de correlación Wavelet y el Exponente de Lipschitz, éste refleja el comportamiento de un aparente punto singular en la señal de arco. A medida que

aumenta el nivel de descomposición la tendencia es a la no existencia de un punto singular y esto se debe a que se va perdiendo resolución.

Al determinar las condiciones para el análisis y procesamiento de las señales de arco eléctrico, se debe tomar en cuenta que son señales estocásticas y no estacionarias; por tanto las Wavelet diádicas son las que pueden permitirnos análisis multiresolución efectivos para su estudio.

Para el procesamiento de la señal de arco eléctrico en las diferentes familias wavelet se limitó a 10 niveles de descomposición considerando el tiempo de procesamiento que éste consumiría y se considera que son suficientes para mostrar el comportamiento de detección de singularidad en la señal estudiada. Cabe mencionar que dentro de la familia wavelet symlet existen 45 tipos y solo se pudo llegar hasta la 41 debido al tiempo de procesamiento que las coiflet 42-45 requerían para mostrar resultados que el programa y equipo utilizados nos permitía.

Las temperaturas durante la generación de arco eléctrico tanto en varillas de acero como de cobre son superiores a los 150 °C en los primeros 10 seg de haberse generado el arco. Esta caracterización refleja el impacto que puede tener un arco eléctrico a gran escala y su peligro para los SFV y sobre todo a las personas.

Se recomienda para la caracterización de temperaturas usar una cámara termográfica con mayor rango de temperatura para obtener información más detallada de los arcos eléctricos generados con diferentes materiales.

Al realizar un análisis comparativo entre la Wavelet Haar y una nueva propuesta en ésta investigación llamada Wavelet Seuret-Trutié pudimos concluir que la WST presenta un procesamiento de la señal de arco eléctrico con mejor eficiencia y esto se ve reflejado en la gráfica de análisis comparativo de resolución. Se destaca que la WST muestra resoluciones óptimas para la detección de singularidades en las señales de arco en niveles bajos de descomposición comparado con Wavelet de Haar, dicho procesamiento traducido en tiempo y almacenamiento representa una ventaja si se aplica en dispositivos de detección.

Con la WST se puede extraer señales de arco eléctrico más pequeñas que el ruido existente en el circuito, lo cual es una ventaja frente a las demás Wavelet presentadas en esta investigación.

No tiene sentido realizar un procesamiento de la señal de arco eléctrico con la transformada rápida de Fourier porque la señal estudiada no es determinista. La diferencia entre Wavelet y FFT radica en el tipo de análisis que realizan cada una. El análisis de soporte compacto es el que nos permite analizar las señales de arco eléctrico obteniendo resultados y ese tipo de análisis es el que nos ofrece una wavelet. Con el desarrollo de éste análisis de resolución y el uso de la propuesta que ofrece la WST, se pretende proporcionar un punto de partida para establecer métodos, parámetros y criterios en el procesamiento de señales de arco eléctrico para posteriores trabajos de investigación y/o aplicación en dispositivos embebidos con microcontroladores.

Finalmente se demuestra y concluye que el uso de la WST puede ser considerada para fenómenos con características similares a las que presentan las señales de arco eléctrico.

Existen pocos modelos de detectores de arcos en sistemas fotovoltaicos, tanto a nivel de dispositivo como integrados en los inversores, y llevan poco tiempo en el mercado como para poder tener una suficiente experiencia sobre su fiabilidad y la de los ensayos aplicados. Por tanto, es necesario avanzar en las líneas siguientes de investigación:

- Caracterización de los distintos tipos de arco eléctrico en los circuitos de corriente continua de los sistemas foto- voltaicos.
- Diseño de detectores de arco que puedan distinguir entre arcos serie y arcos paralelo.
- Perfeccionamiento de los ensayos a realizar sobre los detectores de arco para garantizar un buen funcionamiento de los dispositivos que pasen los ensayos.

El objetivo de ésta investigación se centró en aportar información de caracterización de los arcos eléctricos para crear un punto de partida que sugiera el uso de la Transformada Wavelet Seuret-Trutié como herramienta adecuada para el análisis de dispositivos enbédidos. Se espera que el desarrollo de trabajos de detección de arco eléctrico comprenda nuevos métodos y equipos a fin de llevar la energía fotovoltaica a la más alta calidad en seguridad para los equipos y sobre todo para las personas.

REFERENCIAS

- [1] S. Harb, M. Kedia, H. Zhang, and R. S. Balog, "Microinverter and string inverter grid-connected photovoltaic system - A comprehensive study," in *39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013, pp. 2885-2890.
- [2] J. Johnson, "Overview of Arc-Faults and Detection Challenges," Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Rep SAND2009-2801P, Available: http://www.solarabcs.org/about/publications/meeting_presentations_minutes/2011/02/pdfs/Johnson_Presentation.pdf, 2011.
- [3] J. Johnson, B. Pahl, C. Luebke, T. Pier, T. Miller, J. Strauch, S. Kuszmaul, and W. Bower, "Photovoltaic DC Arc Fault Detector testing at Sandia National Laboratories," in *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2011, pp. 003614- 003619.
- [4] W. Zhan, S. McConnell, R. S. Balog, and J. Johnson, "Arc fault signal detection - Fourier transformation vs. wavelet decomposition techniques using synthesized data," in *40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, pp. 3239-3244.
- [5] J. Johnson, M. Montoya, S. McCalmont, G. Katzir, F. Fuks, J. Earle, J. Fresquez, S. Gonzalez, J. Granata, "Differentiating series and parallel photovoltaic arc-faults," in *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2012, pp. 000720-000726.
- [6] M. K. Alam, F. Khan, J. Johnson, and J. Flicker, "A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV Arrays: Types, Detection, and Mitigation Techniques," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, pp. 982-997, 2015.
- [7] B. M. Aucoin and B. D. Russell, "Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components," *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-2, pp. 46-47, 1982.
- [8] J. G. Proakis, *Digital signal processing: principles, algorithms, and application*, 4th ed. New York: Pearson, 2006.
- [9] A. Lazkano, J. Ruiz, E. Aramendi, and L. A. Leturiondo, "Evaluation of a new proposal for arcing fault detection method based on wavelet packet analysis," in *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2001, pp. 1328-1333.

- [10] W. Zhan and R. S. Balog, "Arc fault and flash detection in DC photovoltaic arrays using wavelets," in *39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013, pp. 1619-1624.
- [11] S. Narasimhan, N. Basumallick, and S. Veena, *Introduction to wavelet transform: a signal processing approach*, 1st ed. Oxford, UK: Alpha Science International Ltd, 2011.
- [12] Y. Xiu, L. Herrera, H. Yi, and W. Jin, "The Detection of DC Arc Fault: Experimental Study and Fault Recognition," in *27th Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2012, pp. 1720-1727.
- [13] S. McConnell, W. Zhan, R. S. Balog, and J. Johnson, "Evaluation method for arc fault detection algorithms," in *40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, pp. 3201- 3206.
- [14] C. Strobl and P. Meckler, "Arc Faults in Photovoltaic Systems," in *2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM)*, 2010, pp. 1-7.
- [15] A. Lazkano, J. Ruiz, E. Aramendi, and L. A. Leturiondo, "Evaluation of a new proposal for arcing fault detection method based on wavelet packet analysis," in *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2001, pp. 1328-1333
- [16] P. E. Casey C. Grant, "Fire Fighter Safety and Emergency Response for Solar Power Systems," Fire Protection Research Foundation May, 2010 2010.
- [17] P. H. Schavemaker and L. V. D. Sluis, "The Arc Fault Blockset," in *Proceedings of the Second IASTED International Conference, Power and Energy System (EuroPES)*, Crete, Greece, 2002.
- [18] J. C. Engel, T. J. Miller, K. L. Parker, J. J. Shea, and X. Zhou, "Arc fault circuit interrupter and method of parallel and series arc fault detection," US7558033 B2, Jul 7, 2009, 2009. **(PATENTE DE US)**
- [19] R. F. Dvorak and K. B. Wong, "Arc fault circuit interrupter system," Aug 7, 2007, 2007. **(PATENTE DE US)**
- [20] J. C. Engel, "Combination AFCIs: What they will and will not do," in *Electrical Safety Workshop (ESW), 2012 IEEE IAS*, 2012, pp. 1-18.
- [21] A. Boggess and F. J. Narcowich, *A First Course in Wavelets with Fourier Analysis*, v2 ed. Hoboken, N.J: J. Wiley & Sons, 2009.
- [22] I. Yilmazlar and G. Kokturk, "Power system failure analysis by using the discrete wavelet transform," in *Proceedings of the 10th WSEAS international conference on Wavelet analysis and multirate systems*, Sousse, Tunisia, 2010, pp. 56-60.
- [23] K. H. Kashyap and U. J. Shenoy, "Classification of power system faults using wavelet transforms and probabilistic neural networks," in *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems*, 2003, pp. 423-426

- [24] P. Chengzong and M. Kezunovic, "Fast Distance Relay Scheme for Detecting Symmetrical Fault During Power Swing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 2205-2212, 2010.
- [25] A. Jensen and A. I. Cour-Harbo, *Ripples in Mathematics: : the discrete wavelet transform*, 2001 edition ed. Berlin ; New York:Springer, 2001.
- [26] J. L. Guardado, S. G. Maximov, E. Melgoza, J. L. Naredo, and P. Moreno, "An improved arc model before current zero based on the combined Mayr and Cassie arc models," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 138-142, 2005.
- [27] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, and J.-M. Poggi, "Wavelet Toolbox - User's Guide," ed, 2013.
- [28] Wang, Zhan Balog, Robert S.. (2013). Arc fault and flash detection in DC photovoltaic arrays using wavelets. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 13, 1619-1624.
- [29] Zhu, Hezi Wang, Zhan Balog, Robert S.. (2017). Real time arc fault detection in PV systems using wavelet decomposition. 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017, 17, 1-6.
- [30] Wang, Zhan McConnell, Stephen Balog, Robert S. Johnson, Jay. (2014). Arc fault signal detection - Fourier transformation vs. wavelet decomposition techniques using synthesized data. IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014, 40, 3239-3244.
- [31] Zhu, Hezi Wang, Zhan McConnell, Stephen Hatton, Phillip C. Balog, Robert S. Johnson, Jay. (2017). High fidelity 'replay' arc fault detection testbed. IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017, 44, 1-6.
- [32] Phillip C. Hatton, Mohammed Bathaniah, Zhan Wang, Robert Balog. (2017). Arc generator for photovoltaic arc fault detector testing. IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017, 44, 1-6.
- [33] Alexander, Charles K.; O. Sadiku, Matthew N. (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos* (Quinta edición). México: McGraw-Hill. pp. 531-532. ISBN 978-607-15-0948-2.
- [34] P Miramontes (1999). El color del ruido. *Revistas uaem*. pp 4-11
- [35] Patricia Otamendi. (2008). Características de las señales eléctricas. 18-11-2020, de academia.edu Sitio web:https://www.academia.edu/11123826/2do_A%C3%B1o_Electronica_TTP_I_Caracter%C3%ADsticas_de_las_se%C3%B1ales_el%C3%A9ctricas.
- [36] Eric W. Weisstein (2007). Charge (en inglés). Consultado el 18 de Noviembre de 2020.
- [37] Griffiths, David J. (1999). *Introduction to Electrodynamics*. Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-805326-X.

- [38] Berkeley Physics Course, Volumen 2. Edward M. Purcell, p. 118, en Google Libros
- [39] García Álvarez, José Antonio E¿Qué es la corriente alterna? asifunciona.com [23-08-2008]
- [40] María, Yusta Loyo, José; Rodolfo, Dufo López (3 de mayo de 2011). Tecnología eléctrica. Prensas de la Universidad de Zaragoza. ISBN 9788415274117. Consultado el 18 de noviembre de 2020.
- [41] Dimitris G. Manolakis Vinay K. Ingle, Stephen M. kogn . (2005). Statistical and Adaptive Signal Processing. 685 Canton Street Norwood, MA 02062: McGraw-Hill book.
- [42] Kuo S. M. & Gan. Digital Signal Processors, Arechitectures, Implementations and Applications. Pearson Prentice-Hall. New Jersey 2005.
- [43] Proakis J. G. & Manolakis. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms and Applications. Macmillan. Singapore 1992.
- [44] Alicia D. Tecnicaturas en Electromedicina y en Diagnóstico por Imágenes. UNSAM – Escuela de Ciencia y Tecnología.
- [45] Oppenheim, Alan V .; Willsky, Alan S .; Nawab, Hamid; con S. Hamid (1998). Señales y Sistemas. Educación Pearson. ISBN 0-13-814757-4. Sistema causal - https://es.qaz.wiki/wiki/Causal_system
- [46] Juan Martín García. Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas ,Edición 2019 ISBN 978-1718148352
- [47] M. Kac & J. Logan, en Fluctuation Phenomena, eds. E.W. Montroll & J.L. Lebowitz, North-Holland, Ámsterdam, 1976.
- [48] Belevitch V (May 1962). "Summary of the history of circuit theory". Proceedings of the IRE 50 (5): 849. doi:10.1109/JRPROC.1962.288301. cites "IRE Standards on Circuits: Definitions of Terms for Linear Passive Reciprocal Time Invariant Networks, 1960". Proceedings of the IRE 48 (9): 1609. September 1960. doi:10.1109/JRPROC.1960.287676.to justify this definition.
- [49] Nilsson, J W, Riedel, S A (2007). Electric Circuits (8ª ed.). Pearson Prentice Hall. pp. 112–113. ISBN 0-13-198925-1.
- [50] Hastings, J.K.; Juds, M.A.; Luebke, C.J.; Pahl, B. A Study of Ignition Time for Materials Exposed to DC Arcing in PV Systems. In Proceedings of the 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Seattle, WA, USA, 19–24 June 2011.
- [51] Haerberlin, H. Arc Detector as an External Accessory Device for PV Inverters for Remote Detection of Dangerous Arcs on the DC Side of PV Plants. In Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, Citeseer, 6-10 September 2010.

- [52] NFPA 70: National Electrical Code; National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA, 2011.
- [53] UL 1699b. Outline of Investigation for Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection; Underwriters Laboratories: Northbrook, IL, USA, 2011.
- [54] Xiong, Q.; Ji, S.C.; Zhu, L.Y.; Zhong, L.; Liu, Y. A Novel DC Arc Fault Detection Method Based on Electromagnetic Radiation Signal. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2017, 45, 472–478.
- [55] Miao, W.C.; Liu, X.Y.; Lam, K.H.; Pong, P.W.T. DC-Arcing Detection by Noise Measurement With Magnetic Sensing by TMR Sensors. *IEEE Trans. Magn.* 2018, 54, 5.
- [56] Johnson, J.; Pahl, B.; Luebke, C.; Pier, T.; Miller, T.; Strauch, J.; Kuzmaul, S.; Bower, W. Photovoltaic DC arc fault detector testing at Sandia National Laboratories. In *Proceedings of the 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE, Seattle, WA, USA, 19–24 June 2011; pp. 003614–003619.
- [57] Johnson, J.; Montoya, M.; Mccalmon, S.; Katzir, G.; Fuks, F.; Earle, J.; Fresquez, A.; Gonzalez, S.; Granata, J. Differentiating Series and Parallel Photovoltaic Arc-Faults. In *Proceedings of the 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Austin, TX, USA, 3–8 June 2012; pp. 720–726.
- [58] Gao, Y.; Zhang, J.; Lin, Y.; Sun, Y. An Innovative Photovoltaic DC Arc Fault Detection Method through Multiple Criteria Algorithm Based on a New Arc Initiation Method. In *Proceedings of the 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Denver, CO, USA, 8–13 June 2014; pp. 3188–3192.
- [59] Chen, S.L.; Li, X.W.; Xiong, J.Y. Series Arc Fault Identification for Photovoltaic System Based on Time- Domain and Time-Frequency-Domain Analysis. *IEEE J. Photovolt.* 2017, 7, 1105–1114.
- [60] He, C.X.; Mu, L.H.; Wang Y.J. The Detection of Parallel Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on a Mixed Criterion. *IEEE J. Photovolt.* 2017, 7, 1717–1724. *Energies* 2020, 13, 1416 15 of 17
- [61] Yao, X.; Herrera, L.; Ji, S.C.; Zou, K.; Wang, J. Characteristic Study and Time-Domain Discrete-Wavelet- Transform Based Hybrid Detection of Series DC Arc Faults. *IEEE Trans. Power Electron.* 2014, 29, 3103–3115.
- [62] Zhu, H.; Wang, Z.; Balog, R.S. Real Time arc Fault Detection in PV Systems Using Wavelet Decomposition. In *Proceedings of the 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Portland, OR, USA, 5–10 June 2016; pp. 1761–1766.
- [63] Xiong, Q.; Feng, X.Y.; Gattozzi, A.L.; Liu, X.; Zheng, L.; Zhu, L.; Ji, S.; Hebner, R.E. Series Arc Fault Detection and Localization in DC Distribution System. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2020, 69, 122–134.

- [64] Gao, Y.; Dong, J.; Sun, Y.; Lin, Y.; Zhang, R. PV Arc-Fault Feature Extraction and Detection Based on Bayesian Support Vector Machines. *Int. J. Smart Grid Clean Energy SGCE* 2015, 4, 283–290.
- [65] Wang, Z.; Balog, R.S.; IEEE. Arc Fault and Flash Detection in Photovoltaic Systems Using Wavelet Transform and Support Vector Machines. In *Proceedings of the 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference*, IEEE, Portland, OR, USA, 5–10 June 2016; pp. 3275–3280.
- [66] Yi, Z.; Etemadi, A. Line-to-Line Fault Detection for Photovoltaic Arrays Based on Multi-resolution Signal Decomposition and Two-stage Support Vector Machine. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 64, 8546–8556.
- [67] Grichting, B.; Goette, J.; Jacomet, M.; IEEE. Cascaded Fuzzy Logic based Arc Fault Detection in Photovoltaic Applications. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Taormina, Italy, 16–18 June 2015; pp. 178–183.
- [68] Telford, R.D.; Galloway, S.; Stephen, B.; Elders, I. Diagnosis of Series DC Arc Faults-A Machine Learning Approach. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2017, 13, 1598–1609.
- [69] Alam, M.K.; Khan, F.H.; Johnson, J.; Flicker, J. PV Arc-fault Detection using Spread Spectrum Time Domain Reflectometry (SSTDR). In *Proceedings of the 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, IEEE, Pittsburgh, PA, USA, 14–18 September 2014; pp. 3294–3300.
- [70] Georgijevic, N.L.; Jankovic, M.V.; Srdic, S.; Radakovic, Z. The Detection of Series Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on the Arc Current Entropy. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31, 5917–5930.
- [71] Ahmadi, M.; Samet, H.; Ghanbari, T. A New Method for Detecting Series Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on the Blind-Source Separation. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2020, 67, 5041–5049.
- [72] Gleizes A., Gonzalez J. J., Freton P. Thermal plasma modelling. *J. Phys. D-Appl. Phys.* 2005, 38, R153–R183.
- [73] Ling Yuan, Lin Sun, Huaren Wu. (July 2013). Simulation of Fault Arc Using Conventional Arc Models. *Scientific Research*, 5, 833-837.
- [74] A. M. Cassie, “Theorie Nouvelle des Arcs de Rupture et de la Rigidité des Circuits,” *CIGRE*, Vol. 102, 1939, pp. 588-608.
- [75] Grupo de nuevas actividades profesionales, “Energia_Solar_Fotovoltaica_2E5C69a6,” 2002.
- [76] Comisión Reguladora de Energía (CRE), Anexo B Fotovoltaico. 2017, p. 27.
- [77] J. Schwarz, “Dynamisches Verhalten eines Gasbe- blase- nen, Turbulenzbestimmten Schaltlichtbogens,” *ETZ-A*, Vol. 92, 1971, pp. 389-391.

- [78] P. H. Schavemaker, "Arc Model Blockset for use with MATLAB Simulink and Power System: Blockset-User's Guide," http://www.ewi.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/EWI/Over_de_faculteit/Afdelingen/Electrical_Sustainable_Energy/HCP_S/EPS/downloads/doc/amb2.zip
- [79] Vázquez-Machorro, Rodrigo y Reyes-Cruz, Alexander y Atonal-Sánchez, Juan (2014). Comparación de filtros digitales en Matlab para implementación en un FPGA. Científica, 18 (2), 71-77. [Fecha de Consulta 26 de Noviembre de 2020]. ISSN: 1665-0654. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=614/61448035003>
- [80] Proakis G. J. and Manolakis G. D., Tratamiento digital de señales, Pearson Prentice Hall, España, pp. 273-336, 2003.
- [81] Mayer-Baese, U., Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays, 3a ed., Springer: Estados Unidos, pp. 165-209 215-240 308-313 477-515 661, 2007.
- [82] Ami Shukla, Manju Khare, K N Shukla. (Enero,2015). Modeling and Simulation of Solar PV Module on MATLAB/Simulink. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 4, 18516-18527.
- [83] Cooley, J. W. y Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of Computation, 19(90), 297, doi:10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1. (PDF) Transformada Rápida de Fourier. Available from: https://www.researchgate.net/publication/336339137_Transformada_Rapida_de_Fourier [accessed Dec 02 2020].
- [84] Michael Joel Spilsbury, Armando Euceda. (10-agosto-2016). Transformada Rápida de Fourier. REVISTA DE LA ESCUELA DE FÍSICA, UNAH, 4, 45-52.
- [85] Dimitris G. Manolakis, Vinay K. Ingle, Stephen M. Kogon. (2005). Statistical and adaptive Signal Processing. Norwood, MA 02062: Artech House, Inc.
- [86] Leon Cohen, "Principios de incertidumbre de la transformada de Fourier de corta duración", Proc. SPIE 2563, algoritmos avanzados de procesamiento de señales, (7 de junio de 1995); <https://doi.org/10.1117/12.211427>
- [87] Polikar, R. (1996). The wavelet tutorial.
- [88] Mallat, S. (1999). A wavelet tour of signal processing. Elsevier.
- [89] Addison, P. S., Watson, J. N., Clegg, G. R., Steen, P. A., & Robertson, C. E. (2002). Finding coordinated atrial activity during ventricular fibrillation using wavelet decomposition. IEEE engineering in medicine and biology magazine, 21(1), 58-65.

- [90] Wei, D., Tian, J., Wells, R. O., & Burrus, C. S. (1998). A new class of biorthogonal wavelet systems for image transform coding. *IEEE Transactions on Image processing*, 7(7), 1000-1013.
- [91] Eduardo Trutié-Carrero, Yosniel Cabrera-Hernández, Arturo Hernández-González, Jorge Ramírez-Beltrán. (28-octubre-2019). Automatic detection of burst in water distribution systems by Lipschitz exponent and Wavelet correlation criterion. *Measurement*, 151, 1-7.
- [92] David R. Lide (2009). CRC Press Inc, ed. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (en inglés) (90 edición). p. 2804. ISBN 978-1-420-09084-0.
- [93] Amador Guerra, Julio, Chenlo Romero, Faustino, Alonso Abella, Miguel, Zeaiter Zeaiter, Hussein. (2014). Prevención y actuación frente a INCENDIOS EN EDIFICIOS con instalaciones fotovoltaicas. *Seguridad y medio ambiente*, 133, 48-60.
- [94] Calais et al (2008). Over-current protection in PV array installations. *IEEE Transactions on energy conversion*. Vol 24 No 1 Marzo 2009.
- [95] NEC 2011. National Electrical Code of USA. Artículo 690.11 (PV). Artículo 210.12 (ac).
- [96] Strobl et al 2010. Arc Faults in Photovoltaic Systems. Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), 2010.
- [97] Johnson J. et al 2012. Differentiating series and parallel photovoltaic arc-faults, 38th IEEE PVSC, Austin, TX, 4 June, 2012.
- [98] A. Haar. Zur theorie der orthogonalen funktionensysteme. *Math. Annal.*, 69: 331–371, 1910.
- [99] Bourbaki, Nicolas (1987). «capítulos 1–5». *Topological vector spaces*. Springer. ISBN 3-540-13627-4.
- [100] Prugovečki, Eduard (1981). *Quantum mechanics in Hilbert space* (2nd edición). Academic Press. p. 20. ISBN 0-12-566060-X.
- [101] Khaleelulla, S. M. (1982). *Counterexamples in Topological Vector Spaces*. Lecture Notes in Mathematics 936. Springer-Verlag. pp. 3-5. ISBN 978-3-540-11565-6. Zbl 0482.46002.
- [102] Trèves, François (1995). *Topological Vector Spaces, Distributions and Kernels*. Academic Press, Inc. pp. 136-149, 195-201, 240-252, 335-390, 420-433. ISBN 0-486-45352-9.
- [103] M. C. Falvo and S. Capparella, “Safety issues in PV systems: Design choices for a secure fault detection and for preventing fire risk,” *Case Stud. Fire Saf.*, vol. 3, pp. 1–16, 2015, doi: 10.1016/j.csfs.2014.11.002.
- [104] N. G. Dhere and N. S. Shiradkar, “Fire hazard and other safety concerns of PV systems,” *J. Photonics Energy*, vol. 8112, pp. 022006–1 to 022006–13, 2011, doi: 10.1117/12.893927.
- [105] M. C. Miguel A. Egidio, “Guía de Normas y Protocolos Técnicos para la Electrificación Rural con Energías Renovables,” 2008.

- [106] C. C. Grant and Fire Protection Research Foundation, “Fire Fighter Safety and Emergency Response for Solar Power Systems Prepared by :,” Quincy, MA, USA, 2013.
- [107] Comisión Federal de Electricidad, “Interconexión a la red eléctrica de baja tensión de sistemas fotovoltaicos con capacidad hasta 30 kW,” 2008.
- [108] Departamento de Energía Solar del IDAE, Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid., and Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica del Departamento de Energías Renovables del CIEMA T., “Instalaciones de energía fotovoltaica. Pliego de condiciones técnicas de Instalaciones conectadas a red.,” 2002.
- [109] International Code Council.Inc, International Fire Code. 2018, p. 637.
- [110] Comisión Reguladora de Energía (CRE), Anexo B Fotovoltaico. 2017, p. 27.
- [111] G.- Villegas, J. Carlos, A. Mejía-pérez, and G. Alberto, “Evolución de la normatividad y su impacto en el aumento de los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) instalados en México.,” Rev. Operaciones Tecnológicas, vol. 2, no. 7, pp. 1– 6, 2018.
- [112] A. Mellit, G. M. Tina, and S. A. Kalogirou, “Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems_A review,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 91, pp. 1–17, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.062>.

PÁGINAS DE INTERNET

- [113] www.cre.gob.mx
- [114] <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/445420/Guia-PT-13032019-VF.PDF>
- [115] <https://www.gob.mx/cre/documentos/guia-sobre-los-requerimientos-tecnicos-del-codigo-de-red-aplicables-a-centros-de-carga>
- [116] <https://www.tecsaqro.com.mx/blog/que-es-el-codigo-de-red-y-como-afecta-a-la-industria-electrica-en-mexico/>
- [117] Resolución 151 2016 Código de Red DOF 2016 04 08. Pdf
- [118] <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f0588f6965067ee4e0d32517021f76d0fc77feae/version:1518454824/folleto-detector-arco-electrico-siemens.pdf>
- [119] <https://new.siemens.com/es/es/productos/energia/baja-tension/detector-arco-electrico.html>
- [120] <https://la.mathworks.com/solutions/signal-processing.html>
- [121] https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_paso_banda
- [122] ACEE, “Código de red - Reforma Energética,” 2009. [Online]. Available: [file:///Users/lorenamirandasanchez/Desktop/mendeley/Código de red - Reforma Energética. Ayudamos a su industria a cumplir con las nuevas leyes..html](file:///Users/lorenamirandasanchez/Desktop/mendeley/Código%20de%20red%20-%20Reforma%20Energética.%20Ayudamos%20a%20su%20industria%20a%20cumplir%20con%20las%20nuevas%20leyes..html).
- [123] Enlight México, “Estándares de seguridad que deben cumplir los módulos fotovoltaicos - Paneles Solares México,” 2020. [Online]. Available: <https://residencial.enlight.mx/estandares-modulos-fotovoltaicos/>. [Accessed: 02-Feb-2021].

[124] National Fire Protection Association (NFPA), “Lista de códigos y estándares de la NFPA,” 2021. [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/Codes-and-Standards/All-Codes-and-Standards/List-of-Codes-and-Standards>. [Accessed: 03-Feb-2021].

[125] Wikipedia.org, “Procesamiento digital de señales”, 2021. [online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Procesamiento_digital_de_se%C3%B1ales. [Accessed: 12-Oct-2021]

APÉNDICES

APENDICE A. DATASHEET DE CÁMARAS TERMOGRÁFICAS FLIR

Información de la cámara termográfica que se recomienda [FLIR E96] para obtención de información en arcos eléctricos con diferentes materiales.




FLIR Exx-Series

ADVANCED THERMAL IMAGING CAMERAS

SPECIFICATIONS

Model	E54	E76	E86	E96
IR resolution	320 x 240 pixels	320 x 240 pixels	464 x 348 pixels	640 x 480 pixels
Resolution with UltraMax® enhancement	—	307,200 pixels	645,888 pixels	1.2 megapixels
MSX™ image enhancement	Yes: details from visual camera add depth and perspective			
Built-in visual camera	5 MP, fixed focus, with built in LED light			
Thermal sensitivity	<40 mK @ 30°C (86°F)	<30 mK @ 30°C (86°F), 42" lens	<30 mK @ 30°C (86°F), 42" lens	<30 mK @ 30°C (86°F), 42" lens
Temperature range	-20°C to 120°C (-4°F to 248°F); 0°C to 650°C (32°F to 1202°F)	-20°C to 120°C (-4°F to 248°F); 0°C to 650°C (32°F to 1202°F)	-20°C to 120°C (-4°F to 248°F); 0°C to 650°C (32°F to 1202°F); 300°C to 1500°C (572°F to 2732°F)	-20°C to 120°C (-4°F to 248°F); 0°C to 650°C (32°F to 1202°F); 300°C to 1500°C (572°F to 2732°F)
Optional temperature range	—	300°C to 1000°C (572°F to 1832°F)	—	—
Accuracy	±2°C (±3.6°F) or ±2% of the reading			
Focus modes	Manual	Continuous laser distance meter (LDM), one-shot LDM, one-shot contrast, manual	Continuous LDM, one-shot LDM, one-shot contrast, manual	Continuous LDM, one-shot LDM, one-shot contrast, manual
Digital zoom	1–4x continuous			1–8x continuous
Measurement tools	3 spotmeters in live mode, 1 area meter in live mode	3 spotmeters in live mode, 3 area meters in live mode		—
Measurement presets	None, center spot, hot spot, cold spot, 3 spots, hot spot-spot*	None, center spot, hot spot, cold spot, User Presets 1&2		—
Available lenses	None (fixed lens)	14°, 24°, 42°, macro (2x)		—
Lens identification	—	Automatic (FLIR AutoCal™)		—
1-Touch Level/Span	Yes: automatic contrast enhancement			
Laser pointer	Yes	—	—	—
Laser distance meter	—	Yes	—	—
Area measurement information	—	—	Yes	—
On-camera routing software	FLIR Inspection Route™ — enabled			
On-camera report building	Voice annotation and GPS tagging to images and video; on-screen text; sketch on infrared images from touchscreen			
FLIR software integration	FLIR Thermal Studio Starter, FLIR Thermal Studio, FLIR Thermal Studio Pro, FLIR Research Studio			
Radiometric JPEG	Yes			
IR, radiometric, visual video recording	Yes			
IR, radiometric, visual video streaming	Yes, over UVC (radiometric, non-radiometric, visual) and Wi-Fi (non-radiometric, visual)			
Communication modes	USB 2.0, Bluetooth, Wi-Fi, DisplayPort			
METERLiNK®	Yes			
Display	640 x 480 pixels (VGA) Dragontrail® touchscreen			
Drop-testing	2 m (6.6 ft)			
Battery operation time	>2.5 hours, typical use			

*Hot spot to center spot Delta measurement

Specifications are subject to change. For the most up-to-date specifications, please visit flir.com.

APENDICE B. BITÁCORA EXPERIMENTAL

Bitácora experimental de arco eléctrico en condiciones reales									
Lugar	Laboratorio de sustentabilidad del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas								
	Fecha	26-feb-21	11-mar-21	16-mar-21	16-mar-21	16-mar-21	24-mar-21	30-abr-21	Total Muestras
	Hora	2:00 p. m.	4:00 p. m.	12:00 p. m.	12:47 p. m.	1:36 a. m.	3:15 p. m.	12:15 p. m.	108
	Muestras	14	10	11	35	0	15	23	
Especificaciones de la fuente fotovoltaica									
No. de paneles		3	2	2	2	2	2	2	
Conexión de paneles		Paralelo	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	
Marca		ERDM SOLAR SA DE CV							
Modelo		ERDM 235TP/6							
No. de serie		1302101474							
Potencia máxima (Pmax)		235 Watts							
Corriente al punto máximo (Imp)		8.25 Amps							
Voltaje al punto máximo (Vmp)		28.55 Volts							
Voltaje a circuito abierto (Voc)		36.5 Volts							
Corriente de corto circuito (Isc)		8.65 Amps							
Voltaje máximo del sistema		1000 Volts							
Max. Fuse Rating		15 Amps							
Especificaciones del ambiente									
Temperatura		27 °C	29 °C	27 °C	28 °C	29 °C	30 °C	24 °C	
Humedad		18%	18%	35%	34%	25%	13%	44%	
Radiación		980 W/m2	800 W/m2	1000-1010 W/m2	1030-1040 W/m2	1040 W/m2	810 W/m2	790 W/m2	
Especificaciones del arco eléctrico									
Tipo de arco		Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	
Material de los diodos		Hierro	Hierro	Hierro	Hierro	Hierro	cobre	cobre	
Distancia entre los diodos		0.84 mm	2 mm	2 mm	2 mm		4.5-6 mm	3mm	
Especificaciones de la carga									
Foco halógeno		2							
Modelo		GE58521U							
Voltaje		24 Volts							
Potencia		70 Watts							
Configuraciones del osciloscopio									
Marca		Tektronix							
Modelo		TBS1052B-EDU							
Acoplamiento		NO SE USÓ	DC	AC	AC	AC	AC	AC	
Escala eje x (Tiempo)			1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s	
Escala eje y (Voltaje)			20 v	20 v	20 v	20 v	20 v	20 v	
Canal			1	1	1	1	1	1	
Características eléctricas del osciloscopio									
Ancho de banda		50 MHz							
Frecuencia de muestreo		1Gs/s							
Longitud de registro		2.5 K							
Canales		2							
Rango de sensibilidad de entrada		2mV							
Configuraciones de la cámara infraroja									
Marca		NO SE USÓ						FLIR	FLIR
Modelo		NO SE USÓ						FLIR-E64501	FLIR-E64501
Temperatura antes del arco		NO SE USÓ	NO SE USÓ	NO SE USÓ	NO SE USÓ	NO SE USÓ	31.5 °C	31.5 °C	
Temperatura al inicio del arco							114 °C	114 °C	
Temperatura después del arco							> 150 °C	> 150 °C	

APENDICE C. EXPONENTE DE LIPSCHITZ

```

%%***Análisis con familia Wavelet Coiflet*****
clear
clc
% Entradas
x= [Se introduce señal de arco eléctrico]
lev = 10; %Niveles de descomposición

for i = 1:5 % En la familia coiflet, existen 5 coiflets
    [c,l] = wavedec(x,lev,['coif' num2str(i)]);
    [cd1,cd2,cd3,cd4,cd5,cd6,cd7,cd8,cd9,cd10] = detcoef(c,l,[1 2 3 4 5 6 7
8 9 10]);
    for e = 1:lev
        A = 1;
        num = log2(max(abs(evalin('base', ['cd' num2str(e)])))/A);
        den = e;
        alpha(i,e) = num/den - 0.5;
    end
    plot(1:lev,alpha(i,:), '-- *')
    hold on

    legend('coiflet_1','coiflet_2','coiflet_3','coiflet_4','coiflet_5')
end

hold on
plot(linspace(0,10,2500),linspace(1,1,2500))
plot(linspace(0,10,2500),linspace(0,0,2500))

%%*****FIN*****

%%***Análisis con familia Wavelet Daubechies*****
clc
% Entradas
x= [Se introduce señal de arco eléctrico]
lev = 10; %Niveles de descomposición
numero_familia_wavelet = 45; % Dentro de la familia debuchies existen 45

for i = 37:numero_familia_wavelet
    [c,l] = wavedec(x,lev,['db' num2str(i)]);
    [cd1,cd2,cd3,cd4,cd5,cd6,cd7,cd8,cd9,cd10] = detcoef(c,l,[1 2 3 4 5 6 7
8 9 10]);
    for e = 1:lev
        A = 1;
        num = log2(max(abs(evalin('base', ['cd' num2str(e)])))/A);
        den = e;
        alpha(i,e) = num/den - 0.5;
    end
    plot(1:lev,alpha(i,:))
    hold on

    %legend('Db_1','Db_2','Db_3','Db_4','Db_5','Db_6','Db_7','Db_8','Db_9')

```

```

%legend('Db_10','Db_11','Db_12','Db_13','Db_14','Db_15','Db_16','Db_17','Db_18')

%legend('Db_19','Db_20','Db_21','Db_22','Db_23','Db_24','Db_25','Db_26','Db_27')

%legend('Db_28','Db_29','Db_30','Db_31','Db_32','Db_33','Db_34','Db_35','Db_36')

legend('Db_37','Db_38','Db_39','Db_40','Db_41','Db_42','Db_43','Db_44','Db_45')

end

hold on
plot(linspace(0,10,2500),linspace(1,1,2500))
plot(linspace(0,10,2500),linspace(0,0,2500))

%%*****FIN*****

%***Análisis con familia Wavelet Symlet*****
clc
% Entradas
x= [Se introduce señal de arco eléctrico]
lev = 10; %Niveles de descomposición
numero_familia_wavelet = 45; % Dentro de la familia Symlets existen 45
empezando del 2

for i = 42:numero_familia_wavelet
    [c,l] = wavedec(x,lev,['sym' num2str(i)]);
    [cd1,cd2,cd3,cd4,cd5,cd6,cd7,cd8,cd9,cd10] = detcoef(c,l,[1 2 3 4 5 6 7
8 9 10]);
    for e = 1:lev
        A = 1;
        num = log2(max(abs(evalin('base', ['cd' num2str(e)])))/A);
        den = e;
        alpha(i,e) = num/den - 0.5;
    end
    plot(1:lev,alpha(i,:))
    hold on

%legend('Sym_2','Sym_3','Sym_4','Sym_5','Sym_6','Sym_7','Sym_8','Sym_9')

%legend('Sym_10','Sym_11','Sym_12','Sym_13','Sym_14','Sym_15','Sym_16','Sym_17')

%legend('Sym_18','Sym_19','Sym_20','Sym_21','Sym_22','Sym_23','Sym_24','Sym_25')

%legend('Sym_26','Sym_27','Sym_28','Sym_29','Sym_30','Sym_31','Sym_32','Sym_33')

%legend('Sym_34','Sym_35','Sym_36','Sym_37','Sym_38','Sym_39','Sym_40','Sym_41')

```



```

legend('Sym_42','Sym_43','Sym_44','Sym_45')

end
hold on
plot(linspace(0,10,2500),linspace(1,1,2500))
plot(linspace(0,10,2500),linspace(0,0,2500))

%%*****FIN*****

```

APENDICE D. MORFOLOGÍA WST VS HAAR

```

close all
clear all
clc
%%**Comportamiento de las Dilataciones y Contracciones de la WST*****
levelmax = 5;
representacion = 100;

for h = 1:levelmax
    [y1,~,x] = WST_g(h,representacion); % Función de WST
    txt = ['Level (j)= ',num2str(h)];
    figure(1)
    plot(x,y1,'LineWidth',1,'DisplayName',txt)
    hold on
end
figure(1)
plot(linspace(0,1,representacion),linspace(0,0,representacion),'LineWidth',1
,'color','k','DisplayName','Reference to zero')
hold off
leg = legend('show');
title(leg,'Decomposition level')
title('Wavelet Seuret-TrutiÈ')
ylabel('\psi_{j,\tau}(\alpha)')
xlabel('\alpha')
%%*****FIN*****

%%*****Morfología comparativa WST vs Haar*****

x=linspace(0,0.5,1000); %Linearly spaced vector.linspace(X1, X2) generates a
row vector of 100 linearly
                        %equally spaced points between X1 and X2.
                        %linspace(X1, X2, N) generates N points between X1
and X2.
x1=linspace(0.5,1,1026);
ejex=linspace(0,1,2000);
a = 2.*x;
b = 2.*(x1 - 1);
% AQUI SE PLOTEA LA FUNCION WST
plot(x,a)
hold on
plot(x1,b)
xlim([0 1])%xlim([XMIN XMAX]) sets the x limits.
ylim([-1 1])
%
TS = [a b]; % Crea un vector con a y a continuacion b
%

```

```
% Wavelet Haar
HAAR = [ones(1,1000) -ones(1,1000)];
% plot(ejex,TS)
%figure
hold on
ejex=linspace(0,1,2000);
plot(ejex,HAAR)

legend ('WST', 'WST', 'Haar')

%
Hdft = fft(TS,1024); %fft(X,N) is the N-point fft, padded with zeros if X
has less
%than N points and truncated if it has more.
Hdft1 = fft(HAAR,1024);

%%*****FIN*****
```

APENDICE E. DESCOMPOSICIÓN CON WST

```
%%*****Análisis de descomposición en tiempo con WST*****
signal = [se introduce vector de señal de arco eléctrico];
Fu = 250; % Frecuencia de la señal original
t = (0:length(signal)-1)/Fu;

figure(1)
plot(t,signal)
ylabel('Voltaje (V)')
xlabel('tiempo (s)')

[y1,y2,~] = WST_g(1,10);
%
n = 1; % Es el nivel de descomposicion
[c,l] = wavedec(signal,n,y2,y1); % Cálculo del nivel de descomposicion
[cd1] = detcoef(c,l,[1]);
%
coeficiente=cd1; % Se fija el nivel de descomposicion
tam=length(coeficiente);
tamSx=length(signal);
fu=250;
fn=(fu*tam)/tamSx;
T=(1/fn);
t1=(0:length(coeficiente)-1)*T;
figure(2)
plot(t1,coeficiente,'LineWidth',1,'color','g')
ylabel('Voltaje (V)')
xlabel('Tiempo (s)')
%%*****FIN*****
```

APENDICE F. RECONSTRUCCIÓN DE SEÑAL CON WST

```
%%*****Análisis de reconstrucción*****
signal = [se introduce señal de arco eléctrico];
t = (0:length(signal)-1)/250; % Vector de tiempo
n = 1; % Nivel de descomposición
```

```
[y1,y2,~] = WST_g(1,10); % Funcion de WST

[c,l] = wavedec(signal,n,y2,y1); % calculo del nivel de descomposición
[cd1] = detcoef(c,l,[1]); % Coeficientes de detalle
A = appcoef(c,l,y2,y1,n); % Coeficientes de aproximación

C = [A cd1];
L = [length(A) length(cd1) length(signal)];

signal_reconstruida = waverec(C,L,y2,y1);

figure(1)
subplot(1,2,1)
plot(t,signal./abs(min(signal)))
title('Señal original de arco eléctrico')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (V)')
figure(2)
subplot(1,2,2)
plot(t,signal_reconstruida./abs(min(signal_reconstruida)))
title('Señal reconstruida con WST')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (V)')
%%*****FIN*****
```

APENDICE G. APLICACIÓN DE WST

```
% *****Análisis señal/Ruido - Aplicación de WST*****
```

```
signal = [Se introduce señal de arco eléctrico];
noise = [Se introduce señal de ruido blanco gaussiano];
atenuada = (1/10).*signal + noise; % Señal atenuada
t = (0:length(atenuada)-1)/250; % Vector de tiempo

n = 10; % Nivel de descomposición
[y1,y2,~] = WST_g(1,10); % Función WST
[c,l] = wavedec(atenuada,n,y2,y1);
[ws1,ws2,ws3,ws4,ws5,ws6,ws7,ws8,ws9,ws10] = detcoef(c,l,[1 2 3 4 5 6 7 8 9
10]);

%%*****Wavelet Haar*****

[cc,ll] = wavedec(atenuada,n,'db1');
[h11,h22,h33,h44,h55,h66,h77,h88,h99,h10] = detcoef(cc,ll,[1 2 3 4 5 6 7 8 9
10]);

%%*****Ploteo*****
figure(1)
plot(t,atenuada)
%%***** Ploteo de comparación*****
figure(1)
subplot(1,2,1)
plot(ws1)
```

```
subplot(1,2,2)
plot(h11)
```

```
% %%*****FIN*****
```

APENDICE H. ENERGÍA DE LOS COEFICIENTES DE DETALLE

```
%%*****Cálculo de la energía de los coeficientes WST vs Haar*****
clear
close all
clc
%Entradas
x = [Se introduce la señal de arco eléctrico];
%*****Cálculo de la energía de los coeficientes de detalle*****

for h = 1:10 % Niveles de descomposición a graficar
    dimension = 2^h;
    y1=[ones(1,dimension/2) -ones(1,dimension/2)]; % wavelet de haar
    y2=ones(1,dimension);
%*****WST*****

    [y11,y22] = WST_g(h); % WST_G función que permite calcular la WST

% y11 permite calcular los coeficientes de detalle.
% y22 permite calcular los coeficientes de aproximacion

%*****Extracción de los coeficientes de detalle de WST Y Haar*****
% trutiano es un método creado para esta aplicación para calcular la
transformada wavelet di·dica

    R1 = trutiano(h,x,y1); %Con wavelet de Haar coeficientes de detalle

    R2 = trutiano(h,x,y11); %Con WST coeficientes de detalle

    Rcoef_haar(h) = sum(R1.^2); %energia para los coeficientes de haar
    Rcoef_WST(h) = sum(R2.^2); %energia para los coeficientes de WST
end

nivel_descomposicion = 1:h;

plot(nivel_descomposicion,Rcoef_haar,'--','Marker','o')
hold on
plot(nivel_descomposicion,Rcoef_WST,'--','Marker','*')
legend('Wavelet Haar','Wavelet ST')

% %%*****FIN*****
```

ANEXOS

ANEXO I. XV TALLER DE FÍSICA

Diploma de participación en el XV Taller de Física de la materia condensada y Molecular, Centro de investigación en Ciencias, UAEM, México.

XV Taller de Física de la Materia Condensada y Molecular
21-23 de junio de 2021

Centro de Investigación en Ciencias
Universidad Autónoma del Estado de Morelos

El Comité Organizador agradece a
L. Miranda-Sánchez, E. Trutié-Carrero, D.Seuret-Jiménez , J.A Marbán-Salgado

Por la presentación de la Conferencia en la sesión de energías renovables:
“Caracterización de señales de arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos, mediante transformada Wavelet diádica”

En el Décimo Quinto Taller de Física de la Materia Condensada y Molecular, llevado a cabo en el Centro de Investigación en Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Rolando Pérez Álvarez
Dr. Rolando Pérez Álvarez
Presidente Comité Organizador

Centro de Investigación en Ciencias

UAEM
Cuerpo Académico de Física del Estado Sólido

Cuernavaca Morelos C.P. 62209, México.
“Ciudad de la eterna primavera”

ANEXO II. CONGRESO VIRTUAL CIID 2020

Diploma de participación en congreso virtual CIID 2020 en Bogotá, Colombia.



ANEXO III. PARTICIPACIÓN HEINEKEN GREEN CHALLENGE 2020

Registro de participación en convocatoria heineken green challenge 2020.

The screenshot shows a web interface for the Heineken Green Challenge 2020. The top navigation bar includes 'INICIO', 'APLICAR INICIATIVA', 'VER MI INICIATIVA', and 'FORO DISCUSION'. The main content area is titled 'Proyecto "EDÉN" (D1332)' and shows submission details: 'Team - diego@seuret.com', 'Submitted: Sep 25 2020', 'Industria: Energía', and 'Estatus: Recibido'. A 'Voting Is Disabled' banner is visible. The submission team consists of two members. The description of the project is as follows:

Descripción

El proyecto Edén propone la creación de micro redes de generación de energía fotovoltaica y consumo. El proyecto Edén está concebido para ser aplicado en conjuntos habitacionales.

- Cerradas.
- Condominios.
- Edificios.

Con bloques que estarán conformados por 5 a 10 casas de habitación. El número de casas que se unirán a la red de generación-distribución dependerá de.

- Interés de los vecinos.
- Área para instalar sistemas fotovoltaicos.
- Capital disponible.

La red no afecta la relación con CFE. Una casa o un área generará energía eléctrica fotovoltaica y la distribuirá al resto de la red de casa (nodos). La generación-distribución-venta de la energía será administrada dentro de la red formando una cooperativa que decida de los precios y condiciones comerciales.

Para esto, en una segunda etapa, se generaran blockchains que permitirán el intercambio comercial de energía sin dependencias de monedas fiduciarias.

La idea consiste en un grupo de casas donde una de ellas genere energía fotovoltaica y que la distribuya a otros nodos de la red (casa). Para esto cada casa contará con un contador bidireccional inteligente. Este tipo de contador ya se distribuyen comercialmente. Por ejemplo CFE usa los modelo V-14 y V-15. En Europa se encuentra gran variedad de medidores inteligente como el ISKRAEMECO MT 382. Muchos países de Europa ya cuentan con prototipos y planes de negocio para la generación distribuida. Entre los más avanzados están Estonia, Dinamarca, Suiza, Alemania, Francia y Reino Unido.

Esta red tendrá las características de ser

- Descentralizada.
- Transacciones en tiempo real.
- Transparencia.
- Segura.
- Ahorro de costos.
- Ahorro de tiempo.

Y es el caso típico de una economía Circular ya que maximiza la utilización de recursos naturales en la generación de energía y minimiza las pérdidas en su uso.

¿Cuál es tu genero? *
Masculino

¿En que rango de edad te ubicas? *
56 o más

¿Cuál es tu número telefónico? *
7771040358

¿Cuál es tu lugar de residencia actual? *
Morelos

¿Cuál es tu ocupación actual? *
Empleado de tiempo completo

¿En cuál institución universitaria estudias? o ¿de cuál egresaste? *
UAEM Morelos

Ubicación de la Institución en la que estudias o estudiaste (Estado o Campus) *
Cuernavaca

¿Cuál es tu rol principal dentro de la iniciativa emprendedora? *
Fundador / Co fundador


Describe la problemática que resuelve tu iniciativa emprendedora *

El proyecto "Edén" pretende resolver el problema de la dependencia de los consumidores de energía eléctrica de redes de distribución como CFE en México. Los consumidores de electricidad están cautivos de grandes monopolios de distribución de energía eléctrica por lo cual deben acatar todas sus regla y precios sin poder protestar.

Objetivo del proyecto es:

- Situar a la energía solar fotovoltaica en primer lugar de consumo energético doméstico.
- Crear un nuevo modelo de generación-distribución-consumo de energía eléctrica fotovoltaica.
- Un modelo que sea modular, fácilmente expansible.
- Crear una moneda electrónica (Azteccoin) para la compra venta de energía solar.
- Liberar a los consumidores de los precios cautivos que imponen las productoras y distribuidoras monopólicas tanto privadas como estatales.
- Preservar el medio ambiente sin renunciar al confort y el consumo.
- Crear y difundir una cultura de protección al medio ambiente.

Este proyecto propone un método mediante el cual el cliente adquiere cierta independencia. Debe seguir conectado a la red de CFE pero ahora no en un 100%. Su dependencia dependerá de cuanto energía de la red fotovoltaica consume.



¿En qué vertical se ubica tu iniciativa emprendedora? *

Uso compartido de los recursos
Optimización de recursos
Digitalización de productos y/o servicios

Selecciona los indicadores de impacto socio-ambiental que desarrolla tu iniciativa emprendedora: *

En la reducción de desperdicios, residuos y agentes contaminantes
Alto nivel de optimización de recursos
Uso de energía renovable

¿En qué etapa se encuentra tu iniciativa emprendedora? *

Idea que puede ser un negocio

¿Tienes un primer prototipo en ambiente experimental? *

No

¿Cuáles han sido tus principales logros y avances de tu iniciativa emprendedora? *

Los avances del proyecto están situados en la investigación integral de las alternativas; así mismo el análisis benchmarking con otros modelos iguales a este pero realizados en otros países de Europa y E.UA. Es un negocio una idea que se está gestando a nivel internacional.

Nos encontramos en la planeación de fase de experimentación para probar el sistema.

¿Cuándo inició o iniciará operaciones tu iniciativa emprendedora? (MM/DD/AAAA) *


04/05/2021

¿Actualmente estás buscando capital? *

Si

¿Cuánto estas buscando?

25000.00



Carga el video (url) *

https://youtu.be/2_k2PoYpqr0

Página web / perfil en redes sociales de la iniciativa emprendedora (opcional)

¿En qué región o regiones de México tu iniciativa emprendedora puede tener un mayor impacto? en toda la Rep. Mexicana y el extranjero.


¿Por qué tu iniciativa emprendedora debe ser seleccionada en el HEINEKEN Green Challenge? *

Porque es de energía sustentable y economía circular. Es un proyecto modelo de negocio escalable en cualquier parte de la república mexicana comprobado por los estudios favorables de radiación que incide en nuestro país. Es una propuesta con el firme objetivo de avanzar en el desarrollo de las energías limpias en nuestro país y de optimizar los recursos.

Comments

D

Add a comment



No comments