

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 1 de 12

21.

FECHA Haga clic aquí o pulse para escribir una fecha.

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Ciudad

UNIDAD REGIONAL	Sede Fusagasugá
TIPO DE DOCUMENTO	Trabajo De Grado
FACULTAD	Ingeniería
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Electrónica

El Autor (Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
Rodríguez Mantilla	Christian José	1007413292
Ortiz Rodríguez	Yeferson Yair	1007466471

Director (Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
Guerrero Guerrero	Andrés Felipe

TÍTULO DEL DOCUMENTO

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
 Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 2 de 12

Estrategia de control para la compensación de hundimientos de tensión con el uso de sistema de almacenamiento con baterías.


SUBTÍTULO
(Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

EXCLUSIVO PARA PUBLICACIÓN DESDE LA DIRECCIÓN INVESTIGACIÓN	
INDICADORES	NÚMERO
ISBN	
ISSN	
ISMN	

AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO	NÚMERO DE PÁGINAS
2023	71

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)	
ESPAÑOL	INGLÉS
1. Hundimientos de Tensión	Voltage Sags
2. Restaurador dinámico de Tensión	Dynamic Voltage Restorer
3. Sistema BESS	Battery Energy Storage System
4. Control de Hundimientos de Tensión	Voltage Sag Control
5. Microrredes	Microgrids
6. Problemas de calidad de la Energía	Power Quality Problems


FUENTES (Todas las fuentes de su trabajo, en orden alfabético)
1. A. Bendre, D. Divan, W. Kranz, y W. E. Brumsickle, "Are voltage sags destroying equipment?", IEEE Industry Applications Magazine, vol. 12, núm. 4, 2006, doi: 10.1109/MIA.2006.1678326.
2. A. F. Guerrero-Guerrero et al., "Voltage sags: energy and severity index assessment", Revista UIS Ingenierías, vol. 18, núm. 1, pp. 141–148, 2019.
3. A. F. Salazar Jiménez y others, "Guía metodológica para el análisis de hundimientos de tensión en el sistema de distribución de la CHEC", 2015.
4. A. Hameed Soomro, A. Sattar Larik, M. Ahmed Mahar, A. Ali Sahito, y I. Ahmed Sohu, "Simulation-based Analysis of a Dynamic Voltage Restorer under Different Voltage Sags with the Utilization of a PI Controller", 2020. [En línea]. Disponible en: www.etasr.com

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 3 de 12


5. A. K. Sadigh y K. M. Smedley, "Review of voltage compensation methods in dynamic voltage restorer (DVR)", en IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345153.
6. A. R. Vargas Serrano, "Diseño e implementación de un prototipo de inversor trifásico orientado a redes de distribución", Santiago, abr. 2010. Consultado: el 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103945/cf-vargas_as.pdf?sequence=3&isAllowed=y
7. B. P. Ganthia, S. Mohanty, P. K. Rana, y P. K. Sahu, "Compensation of voltage sag using DVR with PI controller", en International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016, 2016. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755068.
8. C. J. O'Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin, y J. L. Kirtley, "A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, núm. 4, pp. 2070–2083, 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2941175.
9. C. J. O'Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin, y J. L. Kirtley, "A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: Dq0, Clarke, and Park", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, núm. 4, 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2941175.
10. C. Nucamendi Canelas, "Diseño de la instrumentación y protección de restaurador dinámico de voltaje", 2015.
11. C. N. M. Ho, H. S. H. Chung, y K. T. K. Au, "Design and implementation of a fast dynamic control scheme for capacitor-supported dynamic voltage restorers", IEEE Trans Power Electron, vol. 23, núm. 1, 2008, doi: 10.1109/TPEL.2007.911780.
12. C. P. Aedo Paredes, "Algoritmos de detección de fase para sincronización y control de frecuencia de Central Micro Hidráulica Plug & Play", 2014.
13. C. Tu et al., "Dynamic voltage restorer with an improved strategy to voltage sag compensation and energy self-recovery", CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 4, núm. 3, pp. 219–229, 2019, doi: 10.24295/CPSSTPEA.2019.00021.
14. C. Zhan, C. Fitzer, V. K. Ramachandaramurthy, A. Arulampalam, M. Barnes, y N. Jenkins, "Software phase-locked loop applied to dynamic voltage restorer (DVR)", en 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), 2001, pp. 1033–1038 vol.3. doi: 10.1109/PESW.2001.917210.
15. Clarke and Park Transforms - MATLAB & Simulink. Consultado: el 28 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/solutions/electrification/clarke-and-park-transforms.html>
16. CREG. Comisión de Regulación de Energía y Gas, "Resolución CREG 024 de 2005", Resolución CREG-024, 2005.
17. D. F. Paris Valencia y others, "Simulación y análisis de los diferentes tipos de Sags producidos en sistema trifásicos de distribución", 2004.
18. D. Gallo, C. Landi, y M. Luiso, "Accuracy analysis of algorithms adopted in voltage dip measurements", IEEE Trans Instrum Meas, vol. 59, núm. 10, 2010, doi: 10.1109/TIM.2010.2045256.
19. D. Moya-López et al., "Control de la tensión del bus de continua de un filtro activo mediante un convertidor DC-DC", 2015.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 4 de 12


20. D. Rodríguez, R. Gómez, y A. Campos, "Sistemas de gestión de baterías (BMS) y su importancia para los sistemas de almacenamiento de baterías (BESS)", Tecnura, 2015.
21. E. Babaei y M. Farhadi Kangarlu, "Three-phase cross-phase voltage sag compensator to compensate balanced/unbalanced voltage sags and phase outages in distribution systems", en 2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference, 2011, pp. 128–133. doi: 10.1109/EPEC.2011.6070182.
22. ENEL, "Conoce los resultados financieros del primer semestre de 2023". Consultado: el 29 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/es/prensa/news/d202307-resultados-financieros-primer-semestre.html>
23. ENEL, "En 2022 Enel Colombia recibió alrededor de 4.000 denuncias por hurto de energía", Bogotá, el 1 de junio de 2023. Consultado: el 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/es/prensa/news/d202306-resultados-denuncia-hurto-de-energia.html>
24. Energía Estratégica, "Enel fortalece alianzas para mejorar el servicio de energía en Bogotá y Cundinamarca - Energía Estratégica". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/enel-fortalece-alianzas-para-mejorar-el-servicio-de-energia-en-bogota-y-cundinamarca/>
25. Federico Miyara, "PLL LAZOS DE FIJACIÓN DE FASE", Universidad Nacional de Rosario, Rosario, 2005.
26. G. Bianchi, Phase-Locked Loop Synthesizer Simulation. McGraw Hill LLC, 2005.
27. G. ORDOÑEZ, "Perturbaciones en la onda de tensión huecos y sobretensiones", Programa ALURE-CREG, Cartagena de Indias, 2002.
28. I. Setiawan, M. Facta, A. Priyadi, y M. H. Purnomo, "Comparison of three popular PLL schemes under balanced and unbalanced grid voltage conditions", en Proceedings of 2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering: Empowering Technology for Better Future, ICITEE 2016, 2017. doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863282.
29. Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Guide for Voltage Sag Indices. 2014.
30. J. A. Aguirre Díaz y C. A. Chiquito Manso, "Análisis y diseño de un puente inversor trifásico VSI controlado mediante SVM utilizando un microcontrolador", 2014.
31. J. C. Paredes Acosta, M. X. Moyano Pinos, y E. R. Serrano Veloz, "Análisis, diseño e implementación de un restaurador dinámico de voltaje (dvr) basado en un convertidor trifásico modulado por ancho de pulso con la técnica de vector espacial (svpwm) controlado por DSP", Escuela superior politecnica del Litoral, Guayaquil, 2009.
32. J. C. Paredes Acosta, M. X. Moyano Pinos, y E. R. Serrano Veloz, "Análisis, diseño e implementación de un restaurador dinámico de voltaje (dvr) basado en un convertidor trifásico modulado por ancho de pulso con la técnica de vector espacial (svpwm) controlado por DSP", Escuela superior politecnica del Litoral, Guayaquil, 2009.
33. J. E. Celis Montero, "Metodología para la estimación de hundimientos de tensión en sistemas eléctricos empleando una cantidad limitada de medidores de calidad de potencia.", 2016.
34. J. Gala García, "ANÁLISIS Y DIMENSIONADO DE LOS CONVERTIDORES CC/CA", UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, Valladolid, 2022.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 5 de 12

35. J. J. Vera, F. Santamaria, y A. Jaramillo, "Power Quality Analysis in an Industrial System from Multipoint Measurements", Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 17, núm. 32, pp. 179–192, 2018.
36. J. M. Asanza Moreira, M. I. Quimis Quimí, y others, "Diseño del control y simulación de un restaurador dinámico de voltaje trifásico", ESPO. FIEC, 2018.
37. L. Castillo Barvo, D. Alejandro Ossa Urrea, L. Fernanda Camargo Sánchez, y J. Arley González Vásquez Oscar Fabio Vélez Cano Jhon Cristian Giraldo, "Diagnóstico de la calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia 2021", 2021.
38. L. F. Ccama Juño, "Análisis comparativo del control de modulación de un restaurador dinámico de voltaje monofásico para la determinación de armónicos", 2022.
39. L. F. Ccama Juño, "Análisis comparativo del control de modulación de un restaurador dinámico de voltaje monofásico para la determinación de armónicos", 2022.
40. L. Meng, M. Savaghebi, F. Andrade, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, y M. Graells, "Microgrid central controller development and hierarchical control implementation in the intelligent microgrid lab of Aalborg University", en Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2015. doi: 10.1109/APEC.2015.7104716.
41. M. Brenna, F. Foiadelli, y D. Zaninelli, "Voltage sags compensation through a DVR supplied by V2G vehicles charging stations", en 2013 4th IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT Europe 2013, 2013. doi: 10.1109/ISGTEurope.2013.6695334.
42. M. Del Rocio Ricardez-Trejo, C. Gutierrez-Martinez, J. A. Torres-Fortiz, y J. Meza-Perez, "Modeling and simulation of phase-locked loops (PLL) microwave generators using Matlab/Simulink® basic blocks", en 2017 IEEE URUCON, URUCON 2017, 2017. doi: 10.1109/URUCON.2017.8171854.
43. M. H. Bollen, "Voltage Sags Characterization", en Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, 2000, pp. 139–251. doi: 10.1109/9780470546840.ch4.
44. Mathworks, "Clarke and Park Transforms - MATLAB & Simulink". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/solutions/electrification/clarke-and-park-transforms.html>
45. Mathworks, "Generate pulses for PWM-controlled 2-level converter - Simulink". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pwmgenerator2level.html>
46. Mathworks, "Implement three-phase two-level power converter - Simulink". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/twolevelconverter.html>
47. Mathworks, "Simple 6-Pulse HVDC Transmission System - MATLAB & Simulink". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/ug/simple-6-pulse-hvdc-transmission-system.html>
48. Mathworks, "Simscape Electrical - MATLAB". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>
49. Mathworks, "Simulink - MATLAB". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 6 de 12


50. Mathworks, "Sistemas de electrificación con MATLAB, Simulink y Simscape". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/solutions/electrification.html>
51. Mathworks, "Specialized Power Systems - MATLAB & Simulink". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/specialized-power-systems.html>
52. Mathworks, "Three-phase voltage source with programmable time variation of amplitude, phase, frequency, and harmonics - Simulink". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/threephaseprogrammablevoltage_source.html
53. Matias Diazd, Transformadas de Clarke y Park, (el 6 de enero de 2021). Consultado: el 28 de septiembre de 2023. [En línea Video]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=_Zu9b6ubFFI
54. N. Z. Xu, M. Ding, y C. Y. Chung, "Control strategies of BESS for compensating renewable energy fluctuations", en 9th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2012), 2012, pp. 1–5. doi: 10.1049/cp.2012.2178.
55. O. Viktorin, J. Driesen, y R. Belmans, "Shunt-connected dynamic voltage restorer with decoupling inductors", en IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004., 2004, pp. 679–682 vol.2. doi: 10.1109/PSCE.2004.1397584.
56. Omar Antonio Lara, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE (DVR) SOPORTADO POR PANELES SOLARES", INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO, Madero, Tamaulipas, 2022.
57. P. Jayaprakash, B. Singh, D. P. Kothari, A. Chandra, y K. Al-Haddad, "Control of reduced-rating dynamic voltage restorer with a battery energy storage system", IEEE Trans Ind Appl, vol. 50, núm. 2, 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2272669.
58. S. A. Mohammed, A. García Cerrada, A. M. Mohammed Abdel-Rahim, y B. Hasanin, "Dynamic voltage restorer (DVR) system for compensation of voltage sags, state-of-the-art review", 2013.
59. S. Ali, I. Setiawan, y S. Handoko, "Design and Performance Test of Three Phased Synchronous Reference Frame-Phase Locked Loop (SRF-PLL) using DSPIC30F4011", en Proceedings - 2018 5th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering, ICITACEE 2018, 2018. doi: 10.1109/ICITACEE.2018.8576978.
60. S. Arias Guzmán, "TESIS DE MAESTRÍA HUNDIMIENTOS DE TENSIÓN Un enfoque de análisis a partir del álgebra tensorial", 2015.
61. S. Arias-Guzman et al., "Hundimientos de tensión: diseño y construcción de un prototipo virtual para su medición Voltage sags: design and construction of a virtual prototype for his measurement", a a, vol. 2, núm. 2, p. 2.
62. S. D. Mangate, A. D. Kanase, y A. A. Dharme, "Sag compensation in smart grid with distributed generation", en 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS 2017, 2018. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8389504.
63. S. Naetiladdanon, "Voltage sag compensation performance by DSTATCOM with series inductor and energy storage", en Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007. doi: 10.1109/PEDS.2007.4487755.
64. U. B. Mujumdar y J. S. Joshi, "Microcontroller based true RMS current measurement under harmonic conditions", en 2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET 2010, 2010. doi: 10.1109/ICSET.2010.5684468.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 7 de 12

65. UNAL, "Racionamiento de energía en varias regiones de Colombia, una posibilidad que no se descarta", Bogotá, el 31 de julio de 2023. Consultado: el 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://periodico.unal.edu.co/articulos/racionamiento-de-energia-en-varias-regiones-de-colombia-una-posibilidad-que-no-se-descarta>
66. V. K. Remya, P. Parthiban, V. Ansal, y B. Chitti Babu, "Dynamic voltage restorer (DVR) –areview", Journal of Green Engineering, vol. 8, núm. 4. River Publishers, pp. 519–572, el 1 de octubre de 2018. doi: 10.13052/jge1904-4720.844.
67. V. Kaura y V. Blasko, "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions", IEEE Trans Ind Appl, vol. 33, núm. 1, 1997, doi: 10.1109/28.567077.
68. W. Y. Svrcek, D. P. Mahoney, y B. R. Young, "A Real-Time Approach to Process Control Third Edition", 2014.

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS (Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

Los hundimientos de tensión se consideran uno de los problemas de calidad de energía más críticos, ya que pueden ser bastante comunes y afectar una amplia gama de equipos y usuarios. La gravedad de estos eventos puede variar, desde hundimientos leves que no causan problemas significativos hasta eventos más severos que resultan en inestabilidad en el servicio. Incluso hundimientos de tensión con una profundidad del 10% pueden afectar la mayoría de los equipos electrónicos. La frecuencia de esta problemática en una red eléctrica hace evidente la necesidad de encontrar medidas efectivas para su mitigación. El presente trabajo de grado se enfoca en la implementación en un entorno simulado de una estrategia de control que incorpora un sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS) para la compensación de hundimientos de tensión en una red eléctrica trifásica. El sistema desarrollado permite detectar y corregir hundimientos de tensión de manera efectiva, garantizando una respuesta rápida y la sincronización con la red eléctrica. Además, el sistema BESS proporciona una solución versátil para compensar hundimientos de diferente amplitud, lo cual contribuye a mejorar la estabilidad y calidad del servicio eléctrico. Se contemplaron los resultados de la prueba de variación de amplitud del hundimiento, donde se observó que la amplitud de la tensión entregada a la carga se mantuvo en un promedio de 154.85 V. Así, para un hundimiento de 20% de amplitud, el tiempo de respuesta es 0.442 ms, mientras que para un hundimiento de amplitud 40% el tiempo de respuesta medido fue de 0.619 ms. Se pudo concluir que la carga no se ve afectada por estas variaciones en el tiempo de respuesta por su reducido valor, por lo tanto, el sistema realiza la compensación de forma satisfactoria cuando los hundimientos son simétricos. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por medio de escenarios de prueba, se puede afirmar que el sistema corrige eficazmente hundimientos de tensión con una amplia variedad de características como, la variación de la amplitud del hundimiento de tensión, su duración y sus características multiestado.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 8 de 12

Voltage sags are considered one of the most critical power quality problems, as they can be quite common and affect a wide range of equipment and users. The severity of these events can vary from mild sags that do not cause significant problems to more severe events that result in service instability. Even voltage sags as deep as 10% can affect most electronic equipment. The frequency of this problem in an electrical network makes evident the need to find effective measures for its mitigation.

The present work focuses on the implementation in a simulated environment of a control strategy that incorporates a battery energy storage system (BESS) for the compensation of voltage sags in a three-phase electrical network. The developed system allows detecting and correcting voltage sags effectively, ensuring a fast response and synchronization with the power grid. In addition, the BESS system provides a versatile solution to compensate dips of different amplitude, which contributes to improve the stability and quality of the electrical service.


The results of the sag amplitude variation test were contemplated, where it was observed that the amplitude of the voltage delivered to the load remained at an average of 154.85 V. Thus, for a 20% amplitude sag, the response time is 0.442 ms, while for a 40% amplitude sag the measured response time was 0.619 ms. It could be concluded that the load is not affected by these variations in the response time due to its small value, therefore, the system performs the compensation satisfactorily when the dips are symmetrical. Considering the results obtained through test scenarios, it can be stated that the system effectively corrects stress sags with a wide variety of characteristics such as, the variation of the amplitude of the stress sag, its duration, and its multi-state characteristics.

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X	
2. La comunicación pública, masiva por cualquier procedimiento o medio físico, electrónico y digital.	X	

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 9 de 12


3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 10 de 12

está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado.

SI **NO** .

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos) en carta adjunta, expedida por la entidad respectiva, la cual informa sobre tal situación, lo anterior con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales.

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca

Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414

www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co

NIT: 890.680.062-2

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 11 de 12

Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el “Manual del Repositorio Institucional AAAM003”

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.




Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. Nombre completo del proyecto.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, vídeo, etc.)
---	---

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 12 de 12

1. Estrategia de control para la compensación de hundimientos de tensión con el uso de sistema BESS.pdf	Texto
---	-------

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafa)
Ortiz Rodríguez Yeferson Yair	
Rodríguez Mantilla Christian José	

21.1-51-20.

Estrategia de control para la compensación de hundimientos de tensión con el uso de sistema de almacenamiento con baterías

Autor (es)

**Yeferson Yair Ortiz Rodríguez
Christian José Rodríguez Mantilla**

Universidad de Cundinamarca

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Fusagasugá, Colombia

2023

Estrategia de control para la compensación de hundimientos de tensión con el uso de sistema de almacenamiento con baterías

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de ingeniero electrónico

Autor (es)

**Yeferson Yair Ortiz Rodríguez
Christian José Rodríguez Mantilla**

Director:

Andrés Felipe Guerrero Guerrero

Línea de investigación:

Aprendizaje, conocimiento, tecnologías, comunicación y digitalización

Universidad de Cundinamarca

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Fusagasugá, Colombia

2023

Dedicatoria

Con todo mi amor y agradecimiento, dedico este trabajo a mis padres y a mi hermano, quienes siempre han sido mi fuente de inspiración y apoyo incondicional. Sin su amor y cariño, este logro no sería posible. Los amo infinitamente.

Christian Rodríguez Mantilla

Con profundo cariño, dedico este trabajo a mi madre, quien ha sido un pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Su amor y sacrificio son los cimientos que han permitido que alcance este gran sueño. También, mi gratitud se extiende a toda mi familia, quienes siempre han estado a mi lado, brindándome orientación, apoyo y sabios consejos. Esta dedicatoria se dirige a todas las personas que, de una forma u otra, han contribuido a la realización de mis metas. En particular, quiero destacar a mi padre, quien, desde el cielo, sé que me guía. Aunque no esté físicamente presente, es él quien ha sembrado en mí la determinación de superar obstáculos y seguir adelante.

Yeferson Ortiz Rodríguez

Agradecimientos

Mis palabras de agradecimiento están dedicadas a todos aquellos que, de una forma u otra, han sido parte de mi éxito en este desafío académico

En primer lugar, agradezco a mis padres, Leonel Rodríguez Téllez y Paola Mantilla Díaz, por su amor inquebrantable, apoyo constante y sabias palabras. Su dedicación y sacrificio han permitido que pueda lograr todo lo que me propongo. A ustedes dos, les debo mi gratitud eterna.

A mi hermano, Samuel Rodríguez Mantilla, quien ha sido más que mi hermano; ha sido mi amigo, cómplice y confidente en todo momento. Tu aliento y alegría han sido y serán un regalo invaluable en mi vida.

Expreso mi profundo reconocimiento a mi director de tesis, Andrés Felipe Guerrero, por su orientación y paciencia. Gracias por brindarme la oportunidad de crecer y aprender en este desafío académico.

Agradezco a mi familia, amigos y compañeros de carrera, quienes han compartido esta etapa de mi vida y contribuyeron a que sea una experiencia inolvidable.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a todas las personas que, de una forma u otra, contribuyeron en mi éxito académico. Cada uno de ustedes ha contribuido y hace parte en la consecución de esta meta.

Christian Rodríguez Mantilla

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a todas las personas que han sido un apoyo constante en mi vida. En particular, deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi madre, Silvia Rodríguez, por ser mi principal fuente de apoyo en la consecución de mis metas. Su inmenso cariño y sacrificio han sido fundamentales, y sin ella, nada de esto habría sido posible.

También quiero extender mi gratitud a mi hermana, Carin Ramírez, a mi cuñado, Oscar Osorio, y a mis sobrinos, Esteban Osorio y Dayana Osorio, quienes me brindaron su apoyo y aliento en momentos de dificultad.

Mariana Mera merece un agradecimiento especial por su capacidad de aterrizar mis ideas, por su constante cariño y apoyo incondicional.

Asimismo, agradezco a mi director de tesis, Andrés Felipe Guerrero, por su orientación, sacrificio, valiosos consejos y paciencia en el transcurso de este camino académico.

No puedo dejar de mencionar a Cristian Rincón, cuyos consejos y orientación han sido de gran ayuda en este proyecto y otros.

Finalmente, pero no menos importante, mi gratitud se extiende a mis amigos, compañeros y allegados, cuyos aportes a lo largo del tiempo han contribuido significativamente a mi desarrollo personal y profesional.

Yeferson Ortiz Rodríguez

Resumen

Los hundimientos de tensión se consideran uno de los problemas de calidad de energía más críticos, ya que pueden ser bastante comunes y afectar una amplia gama de equipos y usuarios. La gravedad de estos eventos puede variar, desde hundimientos leves que no causan problemas significativos hasta eventos más severos que resultan en inestabilidad en el servicio. Incluso hundimientos de tensión con una profundidad del 10% pueden afectar la mayoría de los equipos electrónicos. La frecuencia de esta problemática en una red eléctrica hace evidente la necesidad de encontrar medidas efectivas para su mitigación.

El presente trabajo de grado se enfoca en la implementación en un entorno simulado de una estrategia de control que incorpora un sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS) para la compensación de hundimientos de tensión en una red eléctrica trifásica. El sistema desarrollado permite detectar y corregir hundimientos de tensión de manera efectiva, garantizando una respuesta rápida y la sincronización con la red eléctrica. Además, el sistema BESS proporciona una solución versátil para compensar hundimientos de diferente amplitud, lo cual contribuye a mejorar la estabilidad y calidad del servicio eléctrico.

Se contemplaron los resultados de la prueba de variación de amplitud del hundimiento, donde se observó que la amplitud de la tensión entregada a la carga se mantuvo en un promedio de 154.85 V. Así, para un hundimiento de 20% de amplitud, el tiempo de respuesta es 0.442 ms, mientras que para un hundimiento de amplitud 40% el tiempo de respuesta medido fue de 0.619 ms. Se pudo concluir que la carga no se ve afectada por estas variaciones en el tiempo de respuesta por su reducido valor, por lo tanto, el sistema realiza la compensación de forma satisfactoria cuando los hundimientos son simétricos. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por medio de escenarios de prueba, se puede afirmar que el sistema corrige eficazmente hundimientos de tensión con una amplia variedad de características como, la variación de la amplitud del hundimiento de tensión, su duración y sus características multiestado.

Palabras clave: hundimiento de tensión, estrategia de control, compensación, energía, control, PLL, Inversor trifásico, PWM.

Abstract

Voltage sags are considered one of the most critical power quality problems, as they can be quite common and affect a wide range of equipment and users. The severity of these events can vary from mild sags that do not cause significant problems to more severe events that result in service instability. Even voltage sags as deep as 10% can affect most electronic equipment. The frequency of this problem in an electrical network makes evident the need to find effective measures for its mitigation.

The present work focuses on the implementation in a simulated environment of a control strategy that incorporates a battery energy storage system (BESS) for the compensation of voltage sags in a three-phase electrical network. The developed system allows detecting and correcting voltage sags effectively, ensuring a fast response and synchronization with the power grid. In addition, the BESS system provides a versatile solution to compensate dips of different amplitude, which contributes to improve the stability and quality of the electrical service.

The results of the sag amplitude variation test were contemplated, where it was observed that the amplitude of the voltage delivered to the load remained at an average of 154.85 V. Thus, for a 20% amplitude sag, the response time is 0.442 ms, while for a 40% amplitude sag the measured response time was 0.619 ms. It could be concluded that the load is not affected by these variations in the response time due to its small value, therefore, the system performs the compensation satisfactorily when the dips are symmetrical. Considering the results obtained through test scenarios, it can be stated that the system effectively corrects stress sags with a wide variety of characteristics such as, the variation of the amplitude of the stress sag, its duration, and its multi-state characteristics.

Keywords: voltage sag, control strategy, compensation, power, control, PLL, three-phase inverter, PWM.

Contenido

Resumen	6
Abstract.....	7
INTRODUCCIÓN	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
OBJETIVOS DEL ESTUDIO	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
JUSTIFICACIÓN	14
ALCANCES Y LIMITACIONES	15
Alcances.....	15
Limitaciones	15
1. MARCO REFERENCIAL	17
1.1. ESTADO DEL ARTE	17
1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
1.2.1 Microrred (MG).....	22
1.2.2 Sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS).....	23
1.2.3 Hundimientos de tensión	23
1.2.4 Técnicas convencionales para detectar y clasificar hundimientos de tensión.	24
1.2.5 Transformaciones de marcos de referencia	25
1.2.6 Métodos de sincronización en Frecuencia	27
2. DISEÑO METODOLÓGICO	29
3. ESTRATEGIA PARA LA COMPENSACION DE HUNDIMIENTOS DE TENSIÓN	31
3.1. ANÁLISIS	31
3.1.1. Requerimientos del sistema.....	31
3.2. DISEÑO	36
3.2.1. Etapa de Control.....	38

3.2.2. Etapa de Potencia	40
3.3. IMPLEMENTACIÓN	44
3.3.1. Entorno de simulación.....	44
3.3.2. Estructura	45
3.3.3. Topología	48
3.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y/O DESEMPEÑO.....	51
3.4.1. Sincronización de la compensación.....	51
3.4.2. Hundimientos de tensión simétricos.....	52
3.4.3. Hundimientos de tensión asimétrico.....	56
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	61
5.1. CONCLUSIONES	61
5.2. PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO	62
BIBLIOGRAFÍA	64

Índice de figuras

Figura 1. Control de corriente mediante regulador y filtro activo. [20].	21
Figura 2. Hundimientos de tensión en multiestado [15].	23
Figura 3. Sistema eléctrico trifásico [32].	25
Figura 4. Comportamiento transformado de Clarke. [32].	26
Figura 5. Transformada de Park. [32].	26
Figura 6. Proceso Metodológico	29
Figura 7. Clasificación de hundimientos según su duración [35].	34
Figura 8. Curvas de inmunidad [35].	34
Figura 9. Sistema de compensación con almacenamiento energético.	36
Figura 10. Estructura del sistema.	36
Figura 11. Esquema simplificado del PLL [45].	38
Figura 12. Filtro LC [53].	42
Figura 13. Análisis de Fourier de la señal de salida del inversor.	43
Figura 14. Comportamiento fuente programada con hundimientos de tensión.	46
Figura 15. Modelo del PLL [61].	47
Figura 16. Modelo de las transformadas Clarke y Park [62]	47
Figura 17. Modelo del controlador PI [66].	48
Figura 18. Modelo del PWM [67].	48
Figura 19. Etapa de control.	49
Figura 20. Etapa de potencia.	50
Figura 21. Vista general.	51
Figura 22. Funcionamiento preliminar.	51
Figura 23. Prueba de funcionamiento: sincronización.	52
Figura 24. Prueba de funcionamiento: amplitud 60%	53
Figura 25. Prueba de funcionamiento: duración 200 ms.	54
Figura 26. Prueba de funcionamiento: repetición de hundimientos.	55
Figura 27. Prueba de funcionamiento: hundimiento dentro de un hundimiento.	56
Figura 28. Prueba de funcionamiento: hundimiento asimétrico	57

Índice de tablas

Tabla 1. Curva de severidad SEMI F47 [27].	24
Tabla 2. Algoritmos basados en PLL.	27
Tabla 3. Límites máximo y mínimo de tensión según normatividad [35].	32
Tabla 4. Formas de conexión para la compensación: Utilidades [37].	33
Tabla 5 Componentes del sistema según los requerimientos identificados.	37
Tabla 6. Características de las estrategias de control [47].	39
Tabla 7. Pruebas de funcionamiento: amplitud	53
Tabla 8. Pruebas de funcionamiento: duración.....	54
Tabla 9. Pruebas de funcionamiento: Hundimiento dentro de un hundimiento.	56

INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los países con mayor capacidad para satisfacer la demanda energética nacional en la región. Sin embargo, la falta de inversión pública en el sector representa problemas de rendimiento en diversas áreas de la red. Las zonas más afectadas en el país son la capital y sus municipios aledaños, viéndose reflejadas en deficiencias en el servicio de energía eléctrica que ocasionan baja confiabilidad y eficiencia [1].

Las deficiencias son producto de distintas actividades como la manipulación de las redes eléctricas para el hurto de energía (alteración de medidores, conexión directa a postes), ya que pueden desencadenar sobrecargas en los circuitos, hundimientos y/o fluctuaciones de energía. Municipios ubicados al norte de Bogotá, como Chía, Zipaquirá y Cajicá, entre otros, se encuentran entre los lugares más afectados a nivel nacional, llegando a perder 230 GWh al año, equivalentes al consumo de 145.000 hogares. Además, en lo corrido del año 2023, se registran 1250 denuncias por hurto de energía en zonas industriales y residenciales de localidades como Bosa, Kennedy, Fontibón, Usme, Ciudad Bolívar, Barrios Unidos y Suba [2].

Este trabajo de grado se desarrolla a partir del proyecto marco de investigación “Desarrollo de Microrredes y almacenamiento (ESS) prestadores de servicios complementarios para incrementar la cobertura, eficiencia y confiabilidad del servicio en el departamento de Cundinamarca”, el cual se centra en la integración de diferentes fuentes de energía para mejorar la calidad del servicio en regiones donde el suministro eléctrico se vea afectado por fallas en la red de distribución. Con este propósito, se plantea el diseño de un método de compensación de hundimientos de tensión a partir de la interacción con un sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS), que permita el uso eficiente de la energía eléctrica para aumentar la cobertura y confiabilidad del servicio en zonas no interconectadas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, el aumento de las cargas electrónicas, en su mayoría no lineales, conectadas a la red eléctrica, plantean un reto para los operadores de red en la búsqueda de garantizar la calidad del suministro. Este incremento se relaciona con el crecimiento industrial de las ciudades en todas sus escalas, generando factores

que afectan negativamente la calidad de la potencia suministrada. En este sentido, se ha extendido el uso de sistemas de acondicionamiento de línea, buscando contrarrestar las perturbaciones de tensión desde la red eléctrica. Idealmente, los sistemas de distribución de energía proporcionan a los usuarios un flujo ininterrumpido del nivel de magnitud y frecuencia contratados. Sin embargo, debido a los problemas de calidad de la energía, causados en su mayoría por los hundimientos de tensión, se han propuesto una gran variedad de soluciones diferentes, buscando desarrollos que sean más eficaces en la solución de esta problemática [3].

Los hundimientos de tensión son responsables de más del 90% de las caídas en las líneas de energía [4],[5], generando afectaciones en el funcionamiento de diversos equipos eléctricos, fallos en procesos industriales o pérdidas de materia prima, provocando afectaciones económicas [6]. Comúnmente se asocia cualquier falta de suministro eléctrico con una interrupción de energía, pero en realidad, existe una mayor cantidad de hundimientos de tensión que interrupciones. La diferencia entre un hundimiento y una interrupción está en el tiempo de duración y la magnitud de la tensión RMS [7]. Dichos hundimientos se caracterizan por una disminución del valor de la tensión nominal eficaz en un rango de entre el 10% y el 90%, en la mayoría de ocasiones causados por fallos en la red, arranque de motores de gran dimensión o conexión de cargas con una alta demanda de potencia [5]. El impacto de encontrar una cantidad considerable de caídas de energía se manifiesta, sobre todo a nivel industrial, en dispositivos y procesos sensibles a los cambios de tensión, como controladores lógicos programables (PLC), sensores, servoaccionamientos o procesos robóticos, entre otros [4]. Esta situación evidencia la necesidad de forjar soluciones que contribuyan en la mitigación de los efectos de los hundimientos de tensión.

Teniendo la problemática mencionada, se hace necesario diseñar un sistema que permita inhibir los efectos negativos de los hundimientos de tensión, tomando como referencia lo anteriormente mencionado surge el siguiente interrogante: ¿Cómo diseñar una estrategia de control que permita la corrección de hundimientos de tensión integrando un sistema de almacenamiento con baterías (BESS)?

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Objetivo general

Desarrollar una estrategia de control que permita compensar hundimientos de tensión a partir de la interacción con un sistema de almacenamiento de baterías (BESS) y la red de distribución.

Objetivos específicos

- ✓ Clasificar estrategias de control de convertidores de potencia utilizadas en la compensación de hundimientos de tensión en microrredes con sistemas de almacenamiento.
- ✓ Diseñar una estrategia de control para mitigar hundimientos de tensión en la red de distribución eléctrica basada en el principio de funcionamiento de un sistema de almacenamiento por baterías.
- ✓ Implementar escenarios de prueba integrando modelos de simulación que permitan verificar el funcionamiento de la estrategia de control desarrollada.

JUSTIFICACIÓN

Por medio de la revisión bibliográfica, se observó que los hundimientos de tensión se encuentran entre los causantes más frecuentes de pérdidas de energía en una red trifásica. Además, la ausencia de control en estos instantes causa problemas en el funcionamiento de equipos sensibles, como computadores, motores y relés, presentes comúnmente en los hogares e industria actuales [8]. La implementación de un sistema eficiente de restauración es esencial para garantizar la estabilidad y confiabilidad de la red eléctrica. En este contexto, la selección y diseño adecuado de dispositivos en cuanto a tipo, función, dimensionamiento y acondicionamiento, se vuelve fundamental [9]. Además, se hace imprescindible la incorporación de un sistema BESS como fuente de almacenamiento energético acoplado al sistema, lo que garantiza una respuesta eficaz ante las caídas de tensión que puedan afectar las líneas de energía, debido a un alto nivel de eficiencia en comparación con otras estrategias empleadas en la industria, como el uso de supercondensadores, se elige implementar la configuración antes mencionada [10].

Por otra parte, los municipios ubicados al nororiente del departamento de Cundinamarca han experimentado un crecimiento significativo en términos de población y desarrollo tecnológico en los últimos años. No obstante, este aumento supuso una mayor demanda energética, lo que a su vez ha traído inconvenientes

en la calidad del suministro eléctrico, representada en la presencia de hundimientos de tensión a lo largo de las líneas de la red de distribución de energía [11].

El diseño de un método de compensación de hundimientos de tensión incorporando un sistema BESS permite destacar los aspectos y requerimientos que deben ser considerados para su futura implementación. A través de las pruebas de funcionamiento en el entorno de simulación, se verifican las limitaciones existentes.

Por otra parte, este proyecto brinda la oportunidad de participar en el estudio y desarrollo de tecnologías en el área de la calidad de la potencia, ofreciendo la posibilidad de explorar nuevas estrategias y enfoques para mejorar la calidad en la red eléctrica. Además, promueve la colaboración entre la Universidad de Cundinamarca y otras instituciones estimulando la creación de alianzas estratégicas que pueden dar lugar a proyectos conjuntos de investigación.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcances

La estrategia de control diseñada se centra en la compensación de hundimientos de tensión con diferentes características, por medio de la incorporación de un sistema de almacenamiento por baterías (BESS). Este sistema permite la recuperación de energía en situaciones que comprenden hundimientos del 10% hasta el 90%, convirtiéndose en una solución versátil para enfrentar los desafíos de la calidad de la energía. Adicionalmente, se destaca por su alta velocidad de respuesta, lo que significa que puede corregir hundimientos de tensión en cuestión de milisegundos, evitando interrupciones significativas en el suministro eléctrico.

Por otra parte, la sincronización con la red eléctrica es esencial para garantizar que el sistema funcione sin problemas, independientemente de la magnitud o la duración del hundimiento de tensión. Este sistema ha sido diseñado para mantener una conexión estable y constante con la red, lo que asegura que su actuación sea siempre coordinada con las condiciones de la red eléctrica.

La estrategia se implementa y se valida mediante software de simulación.

Limitaciones

El sistema cuenta con algunas limitaciones en su funcionamiento cuando se trata de compensar hundimientos asimétricos de tensión. Al estar diseñado principalmente para abordar hundimientos simétricos, su capacidad de respuesta se reduce cuando las diferencias entre las fases son importantes. Cuando se presentan hundimientos asimétricos, la compensación puede ser parcial o

insuficiente, lo que limita su capacidad para restaurar la calidad de la energía de manera óptima.

1.MARCO REFERENCIAL

En esta sección se realiza la revisión de algunos trabajos anteriores donde se aplican métodos similares con fin de encontrar diferentes soluciones que aportarán una guía primaria para llegar al objetivo propuesto de este proyecto. Además, se realiza una revisión de conceptos que contribuirán en la comprensión del presente documento.

1.1. ESTADO DEL ARTE

Para entender el contexto del presente proyecto, se revisan los avances realizados anteriormente en otros trabajos de investigación, sobre los hundimientos de tensión, la implicación con sistemas fotovoltaicos, la mejor forma de integrar un sistema de mitigación de los hundimientos de tensión con un sistema del almacenamiento por baterías BESS, así como los principios de funcionamiento utilizados en diferentes trabajos. Para la compensación adecuada de los hundimientos de tensión se requiere una etapa de detección confiable, por lo que se realiza primero una contextualización de trabajos que hayan hecho aportes en este campo.

Los hundimientos de tensión hacen parte de la mayoría de los problemas asociados a la calidad de la energía. Con el fin de solventar estas problemáticas, se deben desarrollar sistemas que se complementen con las necesidades intrínsecas de las redes de distribución. Con el paso de los años se han popularizado soluciones cuyo fundamento principal es el uso de convertidores electrónicos de potencia, como un inversor de fuente de voltaje (VSI), controlados por medio de la técnica de modulación de onda cuadrada o six-tep, la modulación sinusoidal (SPWM), entre otros [12]. La implementación de este tipo de sistemas ofrece ventajas como la flexibilidad y el alto rendimiento. Para la compensación de hundimientos de tensión, la solución más utilizada es la implementación de un compensador estático en serie (SSC por sus siglas en inglés) o un restaurador dinámico de voltaje (DVR por sus siglas en inglés) conectados en serie con un VSI [13].

Con el fin de identificar hundimientos de tensión en nodos desatendidos, Celis Montero propone un método basado en matriz de impedancias, esta medición se realiza a partir de un número limitado de equipos de medición, emplea una formulación única que es independiente de la impedancia de la falla y de la topología del sistema de distribución. El método desarrollado para estimar

hundimientos de tensión en nodos no monitorizados está formulado utilizando fasores de tensión, lo que tiene la ventaja sobre los métodos actuales dado que además de la magnitud, se pueden determinar otros parámetros como el desplazamiento de fase y duración del evento. Por otro lado, la evaluación del error en los resultados obtenidos con los parámetros NRMSE (error cuadrático medio normalizado) muestra que el método es eficiente para estimar las tensiones RMS con buena precisión entre los nodos no supervisados en diferentes casos de estudio [14].

Santiago Guzmán y colaboradores llevaron a cabo un estudio sobre los hundimientos de tensión, la evaluación de su energía y su severidad. Se consideran las deficiencias en la caracterización del hundimiento de tensión por el método de tensión RMS y se propone un nuevo método de segmentación, clasificación y caracterización partiendo del análisis tensorial de formas de onda. En este trabajo se propone considerar las características de cada segmento (n) y determinar la energía no suministrada como la suma de la energía perdida en cada segmento, además se considera también usar el indicador de pérdida de energía total del hundimiento como el único parámetro de análisis. En los resultados se observa una comparación entre el método RMS y el método propuesto, donde se identifica que en el primer método solo se obtiene la tensión residual de los hundimientos y la duración, ya que este método ignora las características multiestado de las caídas, por otro lado, el método propuesto en el artículo permite obtener la duración, número de segmentos, tensión residual y número de fases afectadas por cada hundimiento de tensión [15].

Los trabajos descritos anteriormente se centran en una contextualización de las formas de detección de hundimientos de tensión y su caracterización. Sin embargo, no se presenta una implementación completa que integre un sistema de compensación de dichos hundimientos, aunque se mencionan soluciones dentro de estos trabajos, sin profundizar en su desarrollo. En los últimos años se ha popularizado el uso del control proporcional integral junto con VSI para brindar una solución eficiente a esta problemática. Por lo tanto, la revisión que se presentará a continuación se enfoca en documentos relacionados con este campo, sin descartar otros métodos propuestos por diversos autores. Además, se enfatiza especialmente en desarrollos que incluyan el uso de sistemas de almacenamiento de energía por baterías (BESS), para comprender de mejor manera conceptos acerca de la forma de implementación de los sistemas identificados previamente en su conjunto.

Pychadathil Jayaprakash y colaboradores analizaron diferentes métodos de compensación de tensión, proponiendo el desarrollo de un método que involucra controladores proporcionales integrales, para eliminar el error entre los voltajes de referencia y los voltajes del DVR. El método de control propuesto está diseñado con el fin de minimizar el error de compensación de tensión, este supe la energía que requiere el DVR para realizar la compensación en la red. El sistema inyecta potencia reactiva cuando la tensión se encuentra en cuadratura con la corriente a frecuencia fundamental, si la tensión compensada se encuentra en fase con la corriente, el DVR compensa con potencia activa y en este punto se requiere de una batería para el VSI. Lograron estimar la tensión de carga de referencia mediante el método de vectores unitarios, con lo cual consiguieron el control del DVR usando la teoría SRF (Factor de reducción de estrés), lo que minimiza el error de compensación de tensión, se concluyen que la compensación de tensión en fase es realizada de manera eficiente por el DVR, aunque se requiere una fuente de energía en el bus de DC [16].

Aparte de la solución presentada en el trabajo anterior, se enfatiza en la revisión de artículos que incluyan métodos de control alineados a las tendencias actuales en este campo de estudio, como el desarrollo presentado por Shrikant D. Mangate y colaboradores, se propuso un método de compensación de hundimientos en una red inteligente con generación distribuida, se muestra la implementación de un sistema de control para la recuperación de la potencia perdida. El sistema consta de un convertidor DC - DC y DC - AC, utilizando un método de control proporcional integral para mitigar el efecto del hundimiento de tensión en la red, lo que brinda ventajas como proporcionar una respuesta rápida y precisa del sistema en función de las condiciones de entrada y salida, permitiendo mejorar las acciones en el bus de DC. Los resultados de la simulación indican que el sistema mantiene su estabilidad en condiciones normales, generando una salida de 1.5 MW y manteniendo una tensión de 575 V. Se subraya la eficacia del control desacoplado de la potencia real y reactiva del generador de inducción de doble alimentación (DFIG) para mitigar los efectos adversos de dichas fallas en la red [17].

En el trabajo presentado por Chunming Tu y colaboradores, se propuso un esquema de control, con el fin de evidenciar una mejora en la calidad de la tensión de las cargas sensibles usando DVR, basándose en sus necesidades para obtener un funcionamiento óptimo, con el fin de encontrar el máximo nivel de eficiencia. El punto operativo inicial del proceso de recuperación debe ajustarse con respecto al estado final de la compensación de voltaje, para evitar más saltos de ángulo de fase después de eliminar la falla. Además, la tensión del enlace de

DC después de la desaparición de la caída de tensión se recupera rápidamente al valor establecido, lo que garantiza que el equipo esté listo para la siguiente fángulo de fase del voltaje de carga durante toda la etapa de operación de recuperación. Los autores tienen en cuenta las diferentes estrategias de compensación que puede usar un DVR, como la compensación en fase, la compensación de pre-sag, la compensación de potencia reactiva y la compensación de potencia activa mínima, se centran en las dos últimas ya que estas mejoran la efectividad del DVR. Su estrategia optimizada de control tiene recuperación automática de energía en el bus DC y mitiga los saltos de fase [18].

Por su parte en el trabajo presentado por Morris Brenna y colaboradores, se observa un sistema de compensación de hundimientos de tensión tomando como referencia un DVR (Restaurador de Voltaje Dinámico), para ser implementado en vehículos de la nueva generación (Vehículos Eléctricos de Batería (BEV) o Vehículos Eléctricos Híbridos Enchufables (PHEV). Los hundimientos de tensión más probables en estos sistemas están establecidos por la duración del hundimiento, tomando como referencia el momento cuando la caída supera el 10% del valor de tensión RMS (media cuadrática), y el valor de potencia reactiva. Una de las problemáticas que encuentran en la presentación de resultados corresponde a la alta demanda de potencia por parte del DVR, denotando la necesidad de un área equipada para una carga rápida y confiable ante los requerimientos de varios vehículos a la vez. Estos datos se han utilizado para definir un dispositivo adecuado que pueda compensar los problemas mencionados con respecto a la calidad de la energía entregada a las baterías [19].

Luego de implementar un sistema de compensación de hundimientos de tensión que funciona aislado de la red eléctrica, presentado por Daniel López y colaboradores se muestran los métodos utilizados por los autores para lograr los objetivos, así como los resultados obtenidos, se evidencia el uso de convertidores DC-DC bidireccionales (Buck o Boost) lo que permite igualar la tensión de la batería con la tensión del bus DC. Para la gestión del convertidor se utilizó un control por realimentación de estados, seguido de un inversor para la inyección en la línea trifásica. El sistema propuesto permite adaptar la corriente y tensión destacando su funcionamiento adecuado en el régimen transitorio evitando el modo discontinuo de conducción del convertidor. En la Figura 1 se presenta el esquema de control de corriente mediante un regulador y filtro activo implementado en este trabajo [20].

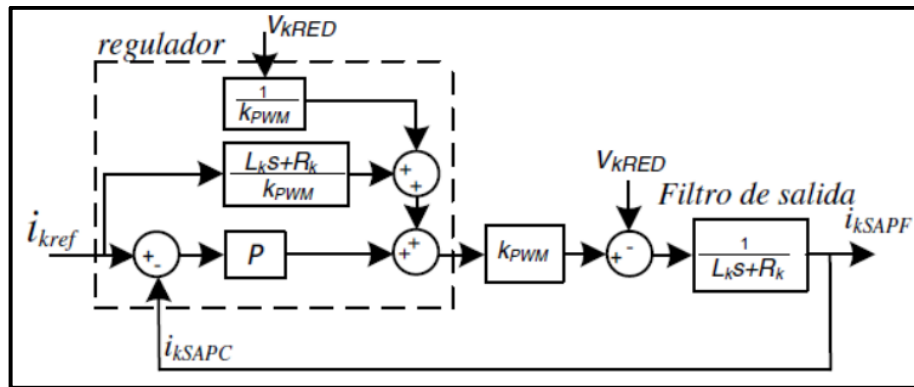


Figura 1. Control de corriente mediante regulador y filtro activo. [20].

En el artículo presentado en [21] se realiza una descripción de los principales métodos de compensación de hundimientos, se describe el método de compensación en fase, compensación Pre-Sag, método de compensación de energía minimizada y método híbrido. Respecto al método de compensación en fase, la tensión de la línea se encuentra en fase con la tensión adicionada en la compensación, independientemente de la condición anterior a la falla, este método solo tiene la posibilidad de corregir la magnitud de la tensión de la carga, ya que carece de la posibilidad de compensar el salto de fase, además se debe intercambiar potencia activa y reactiva con la línea, con el fin de mantener la compensación de tensión durante los hundimientos profundos y prolongados. En esta estrategia el bucle de enganche de fase (PLL) estará sincronizado a la red trifásica y permanecerá enganchado durante toda la compensación [21].

Otro método descrito es la compensación Pre-sag, cuyo funcionamiento consiste en devolver la tensión de la carga a la magnitud y las condiciones anteriores a la caída. Para esta estrategia el PLL se debe sincronizar con la tensión de la carga y en el momento en que existe un hundimiento este se bloquea y reestablece el ángulo de fase. En este caso también se requiere que la magnitud de la tensión en serie que se inyecte tenga el máximo valor posible, debido a que no solo debe compensar el hundimiento sino además el salto de fase. Este método de compensación tiene la ventaja de producir distorsiones armónicas menores del lado de la carga ya que la magnitud y la fase son restablecidas cuando se produce un hundimiento. También ofrece una disminución muy precisa de los saltos de fase incluso si estos no son equivalentes en cada una de las líneas, de la misma forma que en la compensación en fase se realiza una inyección de potencia activa [38].

También se hace referencia a otros métodos de compensación de hundimientos de tensión, como el método de compensación de energía minimizada, cuyo principio de funcionamiento es realizar la inyección o absorción de potencia reactiva de la red eléctrica hasta compensar el hundimiento, si bien es cierto que este método es ventajoso por no requerir una gran magnitud de potencia activa, presenta diversos retos, como el salto de fase producido al aplicar la compensación, además de requerir de una amplitud de tensión bastante más alta para realizar la inyección [22], [21], por último está el método híbrido de compensación de tensión que se logra combinando los métodos descritos anteriormente, con lo que se consigue aprovechar las ventajas de cada uno de forma conjunta.

A partir de esta revisión se comprendieron diversos conceptos, destacándose los métodos más utilizados para la detección de hundimientos de tensión, las técnicas de compensación y la integración de una estrategia de control. Otro aspecto para tener en cuenta es el uso de un sistema de almacenamiento por baterías y su integración a todo el diseño. A través de esta investigación previa también se pueden apreciar las diversas aplicaciones, que diferentes autores realizaron para sistemas que permiten solucionar problemáticas similares.

1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.2.1 Microrred (MG)

Una microrred es un sistema de generación, almacenamiento y distribución de energía eléctrica a pequeña escala que opera de manera autónoma o conectada a una red eléctrica principal. En una microrred, se utilizan fuentes de energía renovable, como la energía solar, eólica o hidráulica, así como tecnologías de almacenamiento de energía, como baterías o sistemas de almacenamiento térmico, para satisfacer las necesidades energéticas de una comunidad o un grupo de usuarios. La microrred tiene la capacidad de operar de forma autónoma en caso de fallo de la red eléctrica principal, lo que la hace ideal para áreas remotas o aisladas. Además, puede estar conectada a la red eléctrica principal para compartir o recibir energía, lo que mejora la fiabilidad y la eficiencia del sistema [24].

1.2.2 Sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS)

Un sistema BESS (Battery Energy Storage System) es un sistema de almacenamiento de energía eléctrica que utiliza baterías recargables para almacenar la energía eléctrica generada por fuentes renovables o suministrada por la red eléctrica convencional. Los sistemas BESS se utilizan en una variedad de aplicaciones, como para respaldo de energía, gestión de la demanda eléctrica y compensación de fluctuaciones en la generación de energía renovable.

Un BESS consta de una o varias baterías, un inversor y un sistema de control. Las baterías almacenan la energía eléctrica y el inversor convierte la energía eléctrica de corriente continua (DC) almacenada en las baterías en corriente alterna (AC) utilizada por los dispositivos eléctricos en los hogares o edificios. El sistema de control permite la supervisión del estado de carga de las baterías y controla la carga y descarga del sistema para maximizar la eficiencia energética y la vida útil de las baterías [25].

1.2.3 Hundimientos de tensión

El hundimiento de tensión es una disminución temporal de la tensión en un sistema eléctrico de potencia, que dura desde unos pocos ciclos hasta varios segundos. El hundimiento de tensión puede ser causado por una variedad de factores, como cortocircuitos, arranques de motores, fallos en la red eléctrica, etc. Los hundimientos de tensión pueden ser perjudiciales para los equipos eléctricos y electrónicos, especialmente para aquellos que son sensibles a las variaciones en el voltaje de suministro. Si la tensión cae por debajo de cierto umbral, es posible que el equipo no funcione correctamente o que se produzcan daños permanentes en sus componentes [15]. En la Figura 2 se presenta un hundimiento de tensión multiestado.

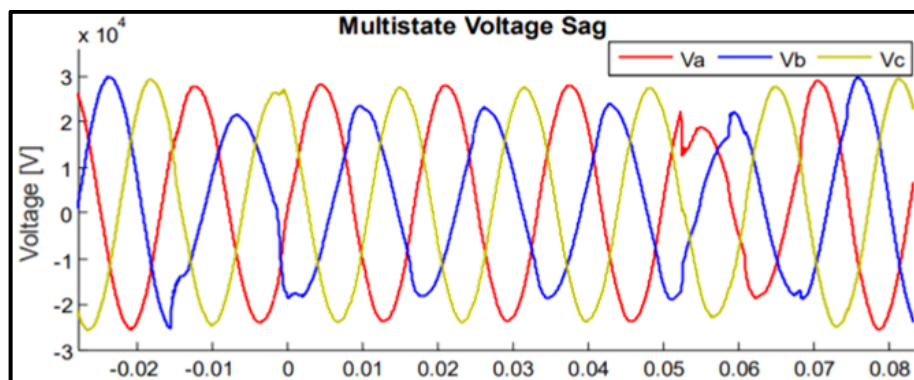


Figura 2. Hundimientos de tensión en multiestado [15].

La duración de un hundimiento de tensión (T) representa el intervalo de tiempo en el que existió la falla. Se calcula con el tiempo en el que la tensión efectiva cae por debajo de un umbral del 90% y por encima del 10%, con una duración de medio ciclo (8.33 ms a 60 Hz) a 1 minuto. En el estándar IEEE 1564 de 2014 [26] se describen los indicadores para evaluar el impacto de un hundimiento de tensión. De acuerdo con la ecuación (1) la energía de los hundimientos de tensión representa el tiempo equivalente de una interrupción comparado con la tensión nominal [15].

$$E_{VS} = \left[1 - \left(\frac{V}{V_{nom}} \right)^2 \right] T \quad (1)$$

El cálculo representaría un valor adimensional que equivale a la probabilidad de que se genere un hundimiento de tensión en la carga de la red, según la normativa se recomienda el uso de los parámetros representados en la Tabla 1.

Tabla 1. Curva de severidad SEMI F47 [27].

Duración	Computo de severidad (S_e)
$T \leq 20ms$	$1 - V$
$20ms \leq T \leq 200ms$	$2(1 - V)$
$200ms \leq T \leq 500ms$	$3.3(1 - V)$
$500ms \leq T \leq 10s$	$5(1 - V)$
$T > 10s$	$10(1 - V)$

1.2.4 Técnicas convencionales para detectar y clasificar hundimientos de tensión.

Método “NRM” (Método de Residuo Normalizado)

El método "NRM" o Método de Residuo Normalizado es una técnica utilizada para detectar y clasificar el hundimiento de tensión en sistemas eléctricos de potencia. El método NRM utiliza mediciones de tensión en múltiples ubicaciones del sistema para detectar y localizar el hundimiento. El método NRM se basa en la comparación de las magnitudes de los residuos normalizados de las tensiones medidas con un umbral de alarma predefinido. Si el residuo normalizado de un voltaje medido supera el umbral de alarma, se considera que hay un hundimiento de tensión en esa ubicación del sistema. La técnica también puede utilizarse para

clasificar el tipo de hundimiento de tensión, como un hundimiento de tensión de corta duración o uno de larga duración [28].

El método RMS

El método RMS se utiliza comúnmente para medir la amplitud de una señal eléctrica. En el contexto de un hundimiento de tensión, el método RMS se puede utilizar para calcular la magnitud de la reducción de tensión que experimenta una red eléctrica durante un evento de hundimiento. Durante un hundimiento de tensión, la tensión en la red eléctrica disminuye temporalmente. La magnitud de esta disminución se puede calcular utilizando la fórmula RMS, que es la raíz cuadrada de la media del cuadrado de la tensión en el período de tiempo afectado. Es importante tener en cuenta que el método RMS solo proporciona información sobre la magnitud de la disminución de tensión y no sobre la duración o la causa del evento de hundimiento de tensión [29].

1.2.5 Transformaciones de marcos de referencia

Transformada de Clarke

La transformada Alpha-Beta o transformada de Clarke es una función matemática que se utiliza para facilitar el análisis de sistemas eléctricos trifásicos. Se utilizan coordenadas complejas (α como componente real y β como componente imaginaria) para representar la señal trifásica en una señal bifásica. La Figura 3 muestra el comportamiento de un sistema eléctrico trifásico y la Figura 4 muestra el gráfico resultante luego de aplicar la transformada de Clarke [30], [31].

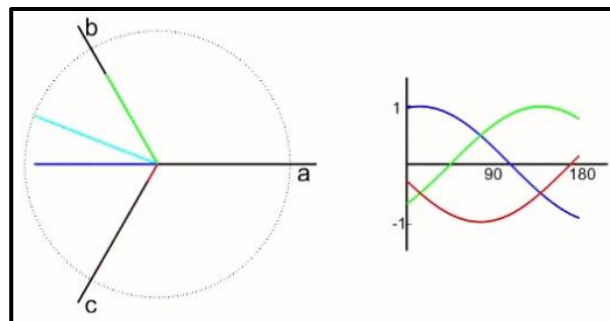


Figura 3. Sistema eléctrico trifásico [32].

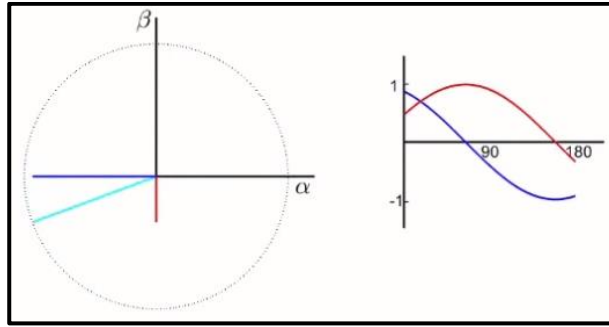


Figura 4. Comportamiento transformado de Clarke. [32].

Las expresiones que se utilizan para diagramar la transformada se presentan en la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Cabe destacar que las señales $\alpha - \beta$ en estado estacionario se encuentran desfasadas por 90° , dejando claro que la señal α se encuentra en fase con la fase a del sistema trifásico original [30], [31].

Transformada de Park

La transformada de cuadratura directa cero o transformada de Park es una función matemática que convierte dos componentes de un marco estacionario ortogonal $\alpha\beta$ (transformada de Clarke) a un marco rotatorio ortogonal dq, como lo muestra la Figura 5, [30], [31].

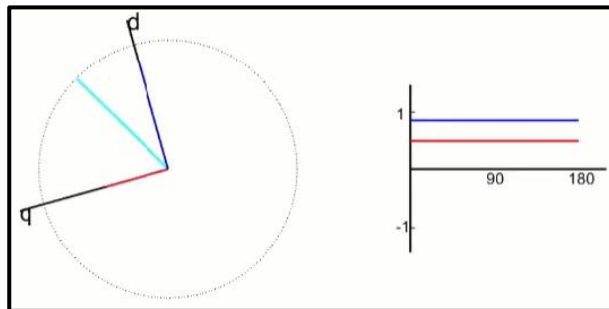


Figura 5. Transformada de Park. [32].

Las expresiones que se utilizan para diagramar la transformada se presentan en la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \sin(\theta_e) \\ -\sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2.6 Métodos de sincronización en Frecuencia

La detección rápida y precisa de los hundimientos de tensión aumenta la eficiencia en el sistema y mejora la señal de control. Dos parámetros importantes para el rendimiento del controlador del DVR son el ángulo de fase y la frecuencia [40], algunos métodos utilizados para la detección de estas variables son:

Métodos de detección de cruce por cero: es posible inferir el funcionamiento de su propia designación, en este caso el proceso realizado es la detección de los cruces por cero que tiene la señal, esta condición puede ser detectada cada medio ciclo, se convierte en insatisfactoria debido a que muchas señales pueden tener múltiples cruces por cero, un caso típico se da en señales con distorsión armónica. [40].

Métodos basados en filtros: en este caso la detección del ángulo de fase se realiza mediante la aplicación de filtros en las tres líneas del sistema de distribución, dependiendo del sistema de referencia sobre el que será aplicable el método, se definen estructuras que están basadas en marco de referencia estacionario (coordenadas $\alpha\beta$) o en marco de referencia rotatorio a velocidad de sincronismo (coordenadas dq) [40].

Así mismo una estrategia comúnmente empleada para realizar esta tarea es el Phase Locked-Loop (PLL), pues además de permitir una respuesta rápida, tiene como función esencial prevenir la distorsión en la señal de salida [41], [42]. Para su aplicación existen diferentes configuraciones que son descritas a continuación.

Métodos basados en Phase Locked-Loop: a la configuración básica de un PLL se pueden aplicar diferentes algoritmos que permiten mejorar las características de funcionamiento del sincronizador, un ejemplo de una configuración utilizada usualmente corresponde al método Synchronous Reference Frame PLL (SRF-PLL), el cual permite operar en un amplio margen de ancho de banda o de alta ganancia [40], en la Tabla 2 se presentan este y otros algoritmos basados en PLL con sus principales características.

Tabla 2. Algoritmos basados en PLL.

Algoritmo	Características
SRF-PLL	Permite la operación en un amplio margen de ancho de banda. En condiciones de desbalance puede presentar armónicos

	en la señal.
Double Synchronous Reference Frame PLL (DSRF-PLL)	Permite reducir las limitaciones del SRF-PLL Puede detectar las componentes de secuencia positiva y negativa del vector de tensión.
SOGI-PLL	Igual que en DSRF-PLL separa las componentes de la señal, pero agrega un generador de señales en cuadratura. Su respuesta dinámica es mejorada.
Adaptive Notch Filter PLL	Su principal ventaja es la de permitir el seguimiento de las variaciones de frecuencia de la señal de entrada. Por su configuración permite eliminar tantos armónicos como se desee.

En [40] se presenta un análisis de algoritmos aplicados a PLL con diferentes configuraciones, algunos son: SOAP-PLL, LC-PLL, LCA-PLL, CDSC-PLL y SSI-PLL, para el desarrollo de este trabajo se tiene en cuenta la aplicabilidad de la estrategia PLL, con su factor de mejora en caso de ser necesario.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

En esta sección, se establece la metodología siguiendo un enfoque de tres etapas distintas. Cada una de estas etapas se diseñó con el propósito de abordar los objetivos específicos definidos previamente. La Figura 6 ofrece una representación de las etapas definidas.

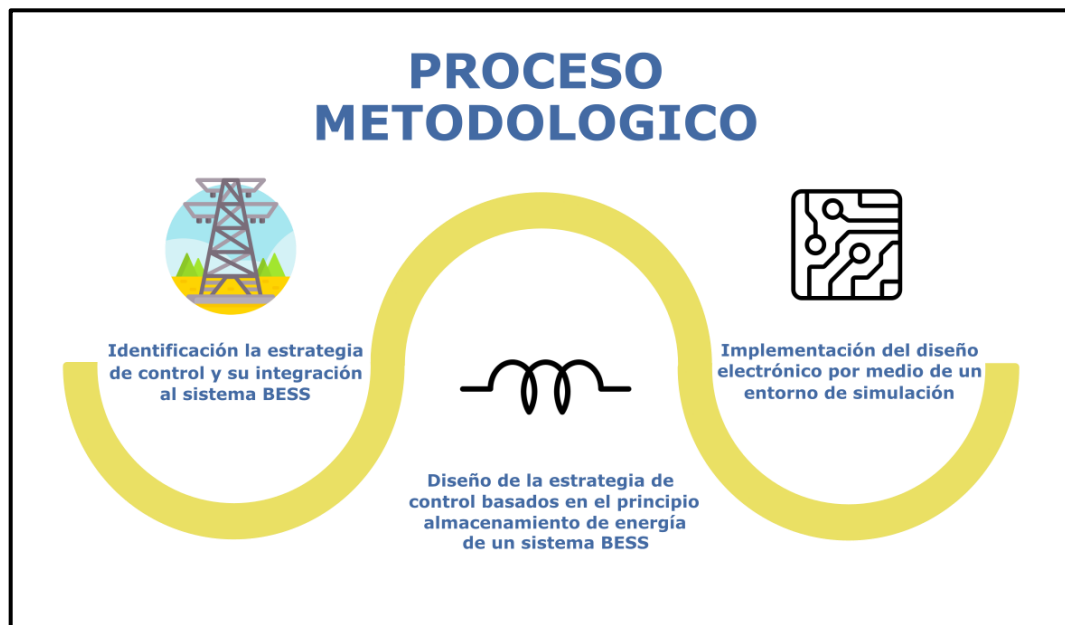


Figura 6. Proceso Metodológico

En la etapa inicial se realizó una revisión bibliográfica a través de la literatura existente para la identificación de estrategias de control y evaluación de su viabilidad para integrar un sistema de almacenamiento de energía con baterías (BESS), en la compensación de hundimientos de tensión en sistemas trifásicos. Posteriormente se analizaron las distintas estrategias identificadas y, luego de evaluar las características de cada una, se tomó la decisión de implementar el control proporcional integral.

La siguiente etapa se enfocó en el desarrollo de la estrategia de control basado en el funcionamiento de un sistema BESS, teniendo en cuenta las consideraciones de la etapa anterior. Luego, se profundizó en diferentes conceptos relacionados con el comportamiento de una red trifásica, los convertidores DC-AC y un Phase-Locked Loop (PLL). Se llevaron a cabo análisis de los componentes que cumplan con los requerimientos de diseño y se construyó de manera simulada para realizar las respectivas pruebas.

En la última etapa del proyecto se implementaron escenarios de prueba con el propósito de realizar la verificación del rendimiento del sistema y la corrección de fallas en el funcionamiento, mediante el software de simulación SIMULINK de MATLAB.

3. ESTRATEGIA PARA LA COMPENSACION DE HUNDIMIENTOS DE TENSION

Esta sección proporciona una descripción detallada del proceso de análisis, diseño, implementación y pruebas de cada una de las etapas que compone el sistema de compensación de hundimientos de tensión. Se presentan detalles técnicos acerca de la estructura utilizada, se explica la elección y comportamiento de los componentes integrados a la solución. Por último, se presentan las pruebas realizadas al sistema para comprobar su correcto funcionamiento.

3.1. ANÁLISIS

En este apartado se realiza una evaluación de las condiciones que debe satisfacer el sistema, teniendo en cuenta los problemas de calidad de la energía y las diferentes topologías que pueden presentar los hundimientos de tensión, luego se presenta una descripción detallada de cada una de las necesidades del sistema para que pueda cumplir con cada uno de los objetivos establecidos.

3.1.1. Requerimientos del sistema

En el año 2021, la Superintendencia de Servicios Públicos llevó a cabo un estudio sobre la calidad de la energía en los diferentes departamentos de Colombia, evaluando el desempeño de las diversas empresas prestadoras del servicio. En los resultados obtenidos se demostró un comportamiento aceptable en términos de indicadores, pero observando una tendencia a la decadencia del servicio a lo largo de los últimos años [38]. Por ello, para el presente año, los gobiernos departamental y distrital trabajan conjuntamente para la mejora del servicio eléctrico y el aumento en los estándares de calidad de la energía, invirtiendo alrededor de 960 millones de pesos en la infraestructura, mantenimiento de redes existentes y expansión en la capacidad de distribución a lo largo del departamento [34]. Una gran parte de los problemas relacionados con la calidad de la energía tienen que ver con hundimientos de tensión, estos pueden tener diferentes características, donde se destacan [37]:

- Momento de inicio y fin: La mayor parte de los hundimientos inician en la zona de valores máximos de la onda de tensión y finaliza normalmente en los cruces por cero de la señal.
- Causas: corto circuito arriba o debajo del punto de acoplamiento, arranque de grandes motores, conexión de transformadores y bloques de carga elevada.

- Fases afectadas: depende de la causa del hundimiento, estas pueden ser de una fase, dos fases o las tres fases de la red.
- Efecto de la carga: Según el tipo de carga conectada previamente, las condiciones del hundimiento pueden cambiar, por ejemplo, en el caso de los motores suavizando los hundimientos en su descenso y su recuperación.

Una vez identificadas las necesidades a atender y los principales requerimientos de este sistema de compensación de hundimientos de tensión que se describen en la sección 1.2, se puede inferir que el sistema requiere las siguientes características:

Aplicabilidad en sistemas trifásicos

Tal como se identificó la problemática en la revisión previa, la aplicabilidad del sistema de compensación de hundimientos de tensión a un sistema trifásico se hace necesaria, con el fin de contribuir en la corrección de factores que afectan la calidad de la potencia. Para evaluar la aplicabilidad del sistema de compensación de hundimientos de tensión a una red de distribución trifásica, se deben tener en cuenta factores como los niveles de tensión requeridos, características de los hundimientos y la identificación de las cargas sensibles.

Se establecen los límites de tensión de operación de los sistemas eléctricos según la normatividad nacional, como la NTC 1340 DE 2004 y la NTC 5001 de 2008 [35]. En la Tabla 3 se consignan los umbrales de tensión en estado estacionario contemplados por las normas anteriormente mencionadas.

Tabla 3. Límites máximo y mínimo de tensión según normatividad [35].

NORMATIVIDAD	TENSIÓN MÁXIMA (pu)	TENSIÓN MÍNIMA (pu)
NTC 1340	1.05	0.9
NTC 5001	1.1	0.9

Sincronización en frecuencia

Para que el sistema realice un acondicionamiento de la tensión entregada a la red de distribución, esta debe permanecer en frecuencia y ángulo de fase de acuerdo con los estándares de operación, de este modo la tensión del lado de la carga tendrá la amplitud y forma de onda deseadas y no se verá afectada la operación de cargas sensibles [36]. Además, como se detalla en la sección 1.2.5, para que el sistema mida las variaciones en la tensión se debe mantener la sincronización de

frecuencia, de no ser así, la detección y el análisis de la señal de tensión con presencia de hundimientos no se podría llevar a cabo de una forma eficaz, lo que entorpecería el proceso de compensación. Por otra parte, mantener el ángulo de fase es necesario, para facilitar una posterior descomposición de la señal que permita la implementación de la estrategia de control.

Conexión en serie con la red

Para realizar la compensación de hundimientos de tensión, se pueden aplicar dos formas de conexión con la red de distribución, estas son: conexión en serie y conexión en paralelo. La conexión en serie es generalmente más utilizada para resolver los problemas relacionados con los hundimientos de tensión por su facilidad de implementación y las características propias que ofrece frente a su contraparte [37] [38]. En la Tabla 4 se describen las principales utilidades de cada estrategia.

Tabla 4. Formas de conexión para la compensación: Utilidades [37].

Compensador	Utilidad (relacionada con problemas de calidad de la energía)
Compensador en serie	Compensación de disminución de la tensión (Hundimientos). Eliminación de la distorsión en la tensión de la red. Mantenimiento de la fase.
Compensador en paralelo	Filtrado de armónicos. Compensación de potencia reactiva. Reducción del fenómeno de parpadeo (Flickering)

Mínimo valor de respuesta

Como se observó en la sección 1.2.3, se considera un hundimiento cuando el valor de la tensión es inferior al 90% o superior al 10% del valor de la tensión nominal, cuya duración está establecida entre medio ciclo y 1 minuto. Así mismo, los hundimientos de tensión pueden ser clasificados en instantáneos, momentáneos y temporales [35], como se observa en la Figura 7.

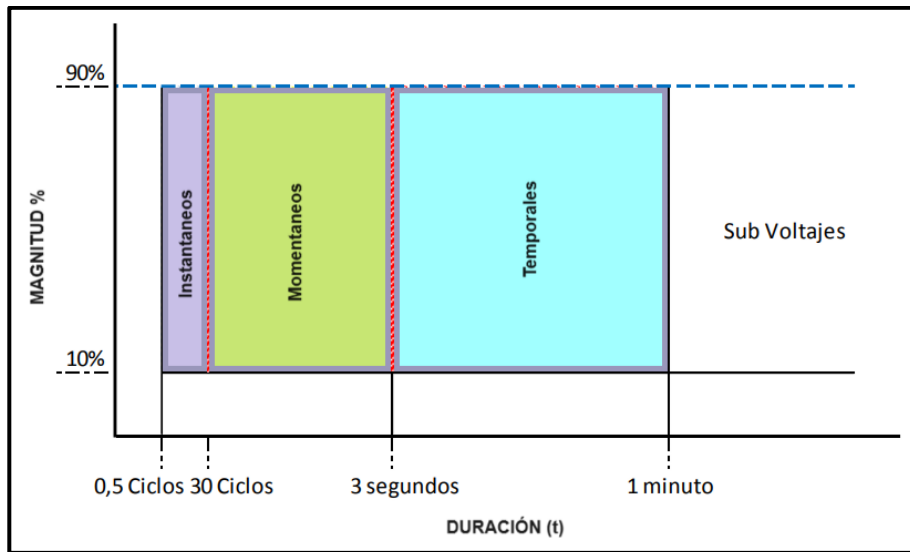


Figura 7. Clasificación de hundimientos según su duración [35].

El tiempo de respuesta de un sistema de compensación de hundimientos de tensión idealmente debe situarse entre los 0.5 ciclos a 1 ciclo. La velocidad de respuesta puede causar perturbaciones de tensión dependiendo de la sensibilidad de la carga conectada a la red de distribución. En la Figura 8 se presentan las curvas de inmunidad, que son aplicables a diferentes tipos de cargas y donde se puede apreciar la duración del hundimiento de tensión que podría soportar cada una de ellas [35].

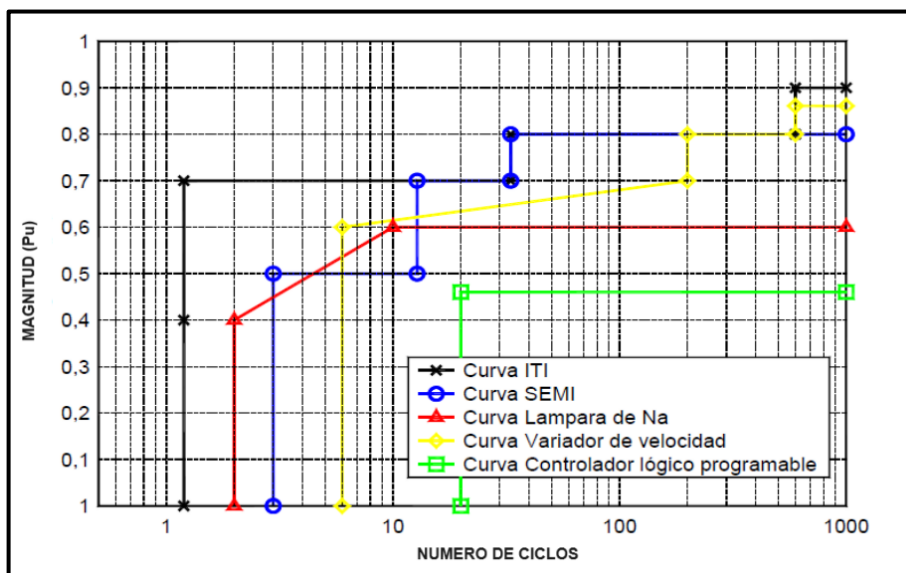


Figura 8. Curvas de inmunidad [35].

Las curvas de inmunidad observadas son aplicables a diferentes tipos de equipos [35]:

- Curva ITI, es propia de equipos de cómputo.
- Curva SEMI, aplica para semiconductores.
- Curva de lámparas de sodio.
- Curva aplicable a variadores de velocidad
- Curva aplicable a PLC (Controlador lógico programable)

Las curvas de inmunidad contempladas hacen referencia a un número reducido de cargas sensibles que pueden estar conectadas a la red de distribución. El análisis realizado a cada gráfica brinda una guía para determinar el tiempo mínimo de respuesta admisible, cuyo valor debe ser inferior a un ciclo. Por lo tanto, el sistema implementado debe tener una velocidad de respuesta inferior a 16.66 ms (un ciclo a 60 Hz), para evitar la afectación del suministro energético en la red de distribución.

Capacidad para integrar sistema BESS

Para realizar la compensación de hundimientos de tensión el sistema requiere de un suministro energético externo. En este sentido se proponen dos enfoques como se detalla en la sección 3.2, el primero se trata de la obtención energética de la misma red de distribución y el segundo enfoque se centra en dotar al sistema de la capacidad de ser conectado a un sistema de almacenamiento energético. Múltiples soluciones de este tipo pueden ser aplicadas a un sistema de compensación de hundimientos, como volantes de inercia, baterías, supercondensadores y superconductores de energía magnética (SMES) [39]. Manteniendo la línea de los objetivos planteados se hace necesaria la aplicación de un sistema de almacenamiento energético por medio de baterías (BESS).

La capacidad de almacenamiento energético determina la duración del hundimiento que se puede compensar, por lo general se requiere de un sistema de carga de corriente continua que mantenga un suministro constante [36]. La Figura 9 ejemplifica una topología ampliamente usada para sistemas de compensación de hundimientos que integran almacenamiento energético por baterías, para este caso se hace uso de un convertidor acoplado a una fuente de tensión (VSI).

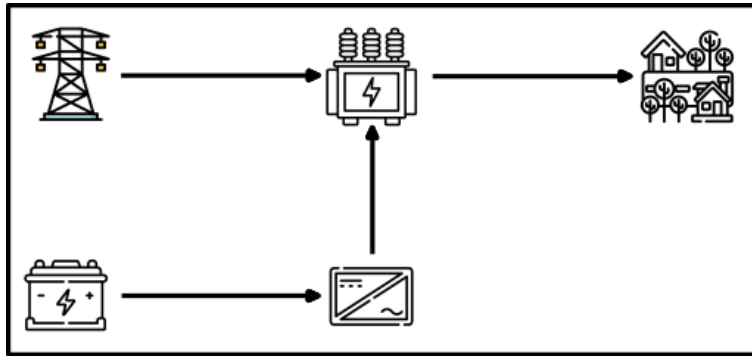


Figura 9. Sistema de compensación con almacenamiento energético.

3.2. DISEÑO

En esta sección se ofrece información detallada de cada una de las etapas que componen el sistema de compensación de hundimientos de tensión. Se enseña la selección de componentes y la estructura diseñada. En la Figura 10 se observa un diagrama de bloques que muestra la topología general del sistema de forma simplificada.

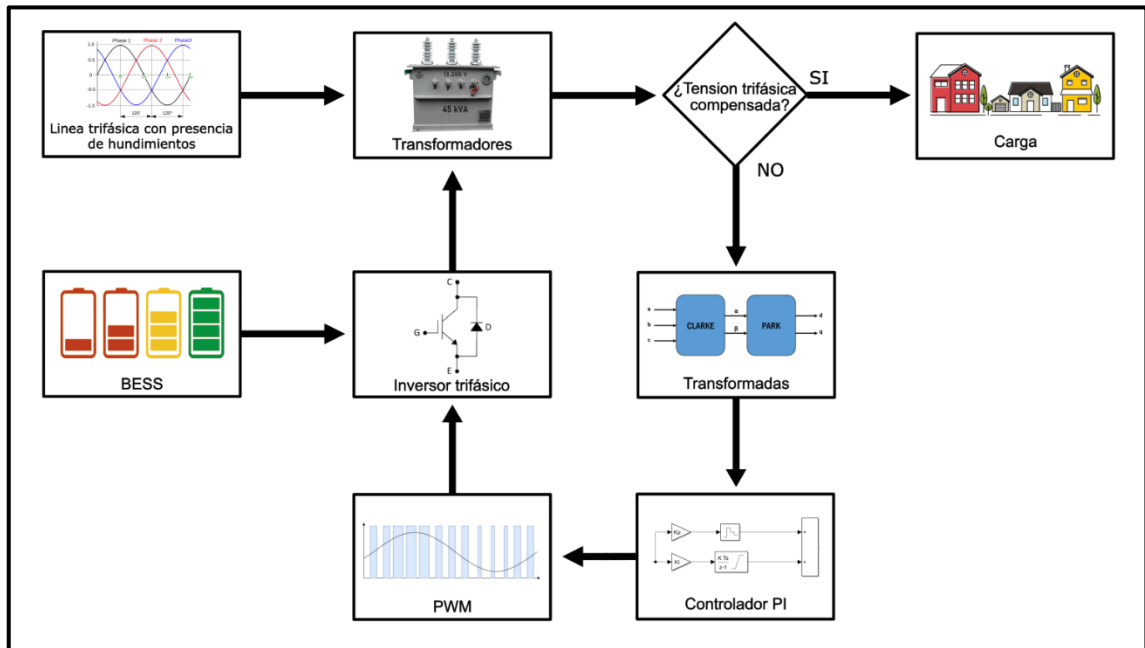


Figura 10. Estructura del sistema.

Cuando el inversor se integra con otros componentes y sistemas específicos para abordar problemas de calidad de energía, se convierte en un dispositivo conocido como DVR. El DVR es usado comúnmente para mitigar los hundimientos de tensión presentes en la red eléctrica. Esta solución ofrece una serie de ventajas

clave, en primer lugar, ofrece una respuesta rápida y eficaz ante las fluctuaciones en la red. Además, el DVR destaca por su versatilidad en la implementación de diferentes estrategias de control, lo anterior lo hace altamente escalable. Por último, otra ventaja significativa radica en un menor consumo energético para solventar la compensación de los hundimientos de tensión [43].

El principio de funcionamiento de un DVR implica la inyección de potencia con la magnitud y el ángulo de fase adecuados para ser conectada en serie a la red. Esto garantiza que la tensión en el lado de carga se mantenga constante, lo que es beneficioso para no afectar a las cargas sensibles a las fluctuaciones bruscas de voltaje. Un factor importante para contrarrestar los hundimientos de tensión se centra en la adquisición de potencia activa por parte del compensador. Existen dos enfoques para realizar la alimentación energética del DVR; el primero implica tomar la potencia directamente de la red y el segundo consiste en adquirir esta potencia de un acumulador de energía externo que almacena energía y la utiliza solo en caso de un hundimiento de tensión. En este trabajo, se optó por implementar el segundo enfoque, a pesar de que conlleva desafíos adicionales, como un costo más elevado de almacenamiento de energía y limitaciones en la capacidad de almacenamiento disponible [14]. Por otra parte, aunque el sistema está diseñado para el almacenamiento de energía generada a partir una FNCER, su versatilidad permite una aplicación adicional para abordar problemas de calidad energética. Esto significa que, además de su función principal, las baterías pueden intervenir para mejorar la calidad de la energía, eliminando la necesidad de invertir en sistemas de compensación energética adicionales.

La inclusión de convertidores electrónicos de potencia (VSI) acoplados en serie con transformadores se ha extendido en diferentes aplicaciones de DVR, debido a que ofrece diversas ventajas, como la flexibilidad y el alto rendimiento. Además, es esencial considerar el método de control empleado para el VSI, en este sentido uno de los enfoques más comunes es la modulación por ancho de pulsos (PWM) [37].

En la Tabla 5 se sintetizan las estrategias utilizadas en este trabajo para la compensación de hundimientos de tensión acopladas a las necesidades del sistema.

Tabla 5 Componentes del sistema según los requerimientos identificados.

Proceso/Estrategia	Descripción
Método de compensación	Pre-Sag
Tipo de inversor	Trifásico dos niveles

Modulación	PWM Unipolar a 120°
Filtro	LC simple
Sincronización de frecuencia	Phase Locked Loop (PLL)
Estrategia de control	Proporcional Integral (PI)

A continuación, se describe el proceso de diseño de cada una de las secciones del sistema, dividiéndose en dos etapas: potencia y control.

3.2.1. Etapa de Control

Diseño del PLL

Para conseguir la sincronización de frecuencia en las líneas, el uso del PLL se ha extendido en el diseño de restauradores dinámicos de voltaje [44]. Como se observó en la sección 1.2.6 donde se describen algunos métodos de sincronización de frecuencia, el uso de un PLL ofrece ventajas como evitar la distorsión de la señal de salida y tener una respuesta rápida frente a los cambios de frecuencia, por esta razón se elige esta técnica para ser implementada. En la Figura 11 se muestra un esquema simplificado del circuito del PLL utilizado en este trabajo.

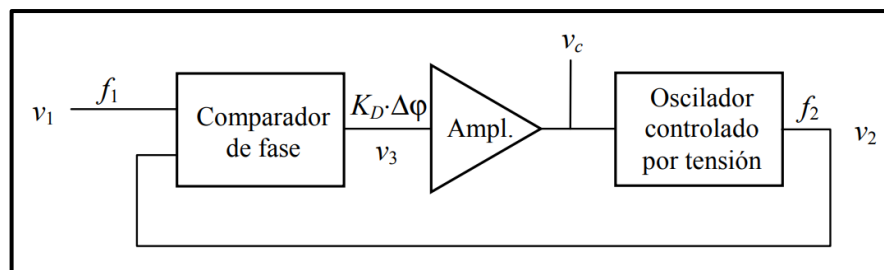


Figura 11. Esquema simplificado del PLL [45].

La frecuencia angular se calcula con la siguiente expresión [46]:

$$\omega = 2\pi fN \quad (4)$$

La frecuencia de entrada (f) se fijó en 60 Hz, ya que es la frecuencia de red en Colombia. La relación de división (N) se estableció en un valor de 1, dado que la frecuencia de entrada no realiza cambios en la señal de salida del PLL. Luego de realizar los respectivos cálculos, se obtuvo un valor de frecuencia angular de 376.991 rad/s.

Por otro lado, para lograr la sincronización del sistema, no se aplicó desfase, teniendo en cuenta el tipo de transformación de Park utilizada (transformada basada en senos). En este caso, el marco giratorio se alinea a 90 grados de la fase a del sistema trifásico.

Diseño de la estrategia de control

Luego de analizar diferentes estrategias de control por medio de la revisión bibliográfica, se definieron el “control de procesos” (PID y sus derivaciones) y la lógica difusa como los métodos más efectivos para incorporar al sistema. Por medio de la Tabla 6 se describen las características de las estrategias seleccionadas y se escoge una de ellas de acuerdo con los requerimientos del sistema

Tabla 6. Características de las estrategias de control [47].

	PI	PID	Lógica difusa
<i>Facilidad de implementación</i>	X		X
<i>Mejora de estabilidad</i>	X	X	X
<i>Respuesta rápida</i>	X		
<i>Reducción de errores en estado permanente</i>		X	
<i>Adaptación a sistemas complejos</i>	X	X	X

La estrategia elegida fue el controlador PI, debido a que cuenta con un tiempo de respuesta más rápido en comparación con un controlador integral, gracias a la acción proporcional. También está en la capacidad de disminuir el número de fluctuaciones de energía considerables, manteniendo el sistema en un rango de ajuste adecuado. Aunque la implementación de un controlador PID podría aumentar la rapidez en la respuesta y mejorar la precisión en la corrección del error del estado estacionario, la complejidad que genera su incorporación inclinó la elección hacia la estrategia de control PI (proporcional integral) [47].

Por otra parte, la implementación de un control PI en un sistema de compensación de hundimientos comprende diferentes ventajas, destacándose la robustez del sistema al trabajar con cargas lineales o en situaciones con una baja distorsión armónica, una excelente respuesta dinámica frente a las perturbaciones en la red

eléctrica y su rápida respuesta para garantizar una compensación eficiente en busca de la estabilidad del sistema [48] [49].

El cálculo de las constantes se realizó con el objetivo de optimizar la señal que permite el funcionamiento del PWM, por medio de la ecuación general de un controlador PI en tiempo discreto y tomando como referencia los valores de las constantes utilizadas en el documento guía [16].

$$K_p + K_i * T_s * \frac{1}{z - 1} \quad (5)$$

Por medio de las diferentes mediciones y pruebas del modelo del compensador, los valores que ofrecieron una mejor respuesta a las necesidades del sistema fueron $K_p = 30$ y $K_i = 150$.

3.2.2. Etapa de Potencia

Diseño del inversor trifásico

En el desarrollo de esta etapa, se eligió la configuración VSI, conformado por un inversor trifásico de dos niveles alimentado por un arreglo de baterías. En esta configuración, la tensión de salida está limitada a dos estados posibles, uno cercano al valor de tensión de las baterías y el otro cercano a cero. La simplicidad en la forma de onda permite aumentar la regulación de energía para la compensación de hundimientos, en comparación con inversores de más niveles. [50]. La secuencia de activación de los transistores del inversor se calcula para mantener la simetría de la señal de salida y lograr la frecuencia y amplitud deseados [36].

La salida del inversor debe ser al menos 25% superior a la tensión de la carga, procurando que se reciba una tensión suficiente incluso en condiciones de alta resistencia o fluctuaciones en la red [51].

Generalmente la tensión de salida del inversor se ajusta mediante la estrategia de modulación PWM; debido a que los componentes del inversor tienen un comportamiento no lineal, es común que exista distorsión en la señal de salida, por lo tanto, se requiere de una unidad de filtrado de armónicos, con el fin de mantener la distorsión armónica en niveles mínimos y mejorar la calidad de la señal generada [36].

Controlador del inversor (PWM)

La técnica PWM se integró como control del inversor, lo que permite regular la cantidad de energía dirigida a la carga. La señal portadora permite el funcionamiento de los IGBTs, por medio de la comparación de valores con la señal de referencia. La señal resultante de control es una serie de pulsos con valores entre alto y bajo, cuya duración se define por el tamaño del error. Un ciclo de trabajo cercano a 0% significa que la señal está inactiva o baja, mientras que un ciclo de trabajo cercano al 100% indica que la señal está activa o alta durante todo el ciclo [52]. Por medio de la revisión, se hace necesario establecer los siguientes índices:

- **Índice de modulación de amplitud (m_a):** cuya expresión está representada por:

$$m_a = \frac{\text{Amplitud moduladora}}{\text{Amplitud portadora}} = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (6)$$

$$m_a = \frac{V_{control}(PICO)}{V_{tri}(PICO)} = \frac{V_{AB}(PICO)}{V_{dc}} \quad (7)$$

Si $m_a \leq 1$, se puede hallar la magnitud de la tensión proporcional a m_a en el armónico fundamental según la expresión (8). Cuando no se cumple la condición, se puede afirmar que existe sobre modulación.

$$V_{AB}(PICO) = \sqrt{3} * m_a * \frac{V_{dc}}{2} = \sqrt{3} * V_{AN,1}(PICO) \quad (8)$$

Los datos para realizar el cálculo del índice m_a son:

$$V_{AB} = 400 \text{ V}$$

$$V_{dc} = 400 \text{ V}$$

Por lo tanto:

$$m_a = \frac{700V}{700V} = 1 \quad (9)$$

- **Índice de modulación de frecuencia (m_f):** está representado por la siguiente expresión:

$$m_f = \frac{f(\text{portadora})}{f_s(\text{moduladora})} \quad (10)$$

En este caso se escogió una ratio de modulación de 2250, por lo tanto, el valor de la frecuencia de la portadora es de 135 kHz y la frecuencia de la moduladora será de 60 Hz.

$$m_f = \frac{135 \text{ kHz}}{60 \text{ Hz}} = 2250 \quad (11)$$

El índice de modulación de frecuencia es un múltiplo de 3 e impar, lo que implica eliminar el armónico m_f y sus múltiplos. En condiciones ideales, es posible trabajar con una alta frecuencia de conmutación. Sin embargo, en implementaciones físicas, se deben considerar los límites de frecuencia de conmutación de los dispositivos semiconductores [52].

Diseño de filtros LC

En el diseño del sistema se utiliza un filtro de segundo orden LC, conformado por un inductor conectado en serie y un capacitor paralelo a la carga [53]. La incorporación de un filtro LC permite atenuar las componentes armónicas no deseadas presentes en la señal de salida del inversor, evitando posibles interferencias y problemas en la red eléctrica. Además, la configuración permite suavizar la forma de onda de la señal de salida. En la Figura 12 se muestra la configuración del filtro LC utilizado.

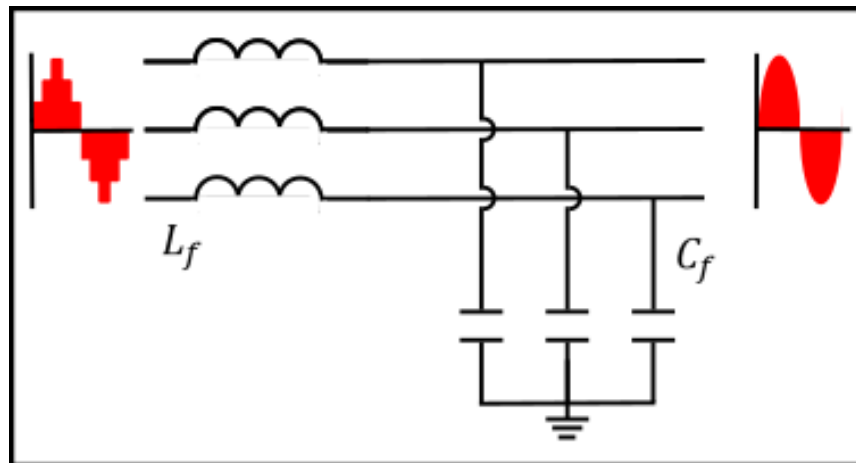


Figura 12. Filtro LC [53].

Para seleccionar los valores adecuados de capacitancia e inductancia, se requiere conocer la frecuencia de corte de la señal de salida del inversor. Por medio de la herramienta *Fast Fourier Transform* de Matlab, se realizó el análisis de Fourier. En la Figura 13 se presenta la gráfica resultante.

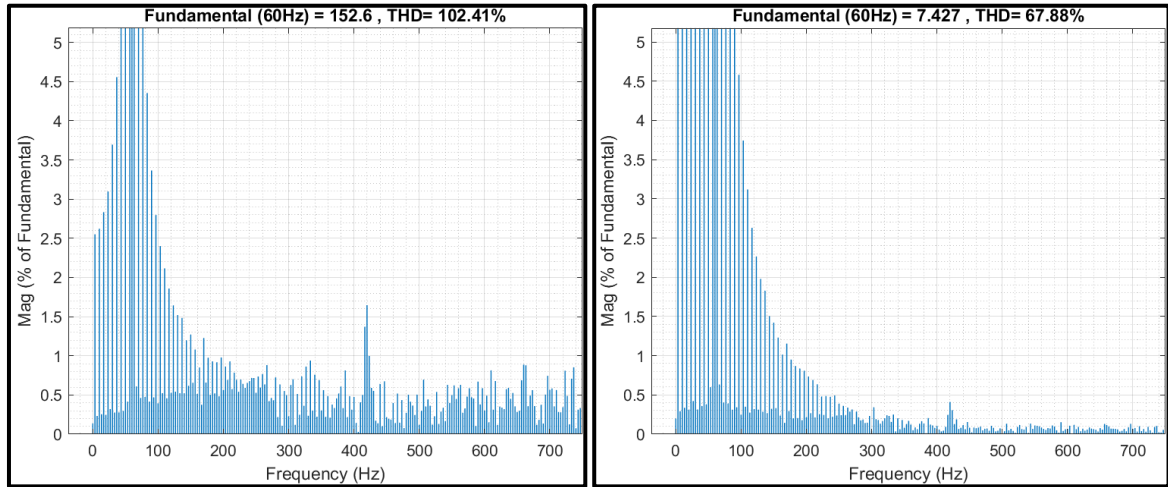


Figura 13. Análisis de Fourier de la señal de salida del inversor.

Luego de analizar los resultados, por conveniencia de cálculos, se decidió hallar el valor del inductor del filtro. Se asume una frecuencia de corte de 275 Hz y una capacitancia de $20 \mu\text{F}$.

$$f_{\text{corte}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (12)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 275)^2 \cdot (20 \cdot 10^{-6})} \rightarrow L = 16.74 \text{ mH} \quad (13)$$

Transformadores de inyección

Para esta sección, se definió la conexión en serie del DVR con la red de distribución a través del devanado secundario de transformadores monofásicos, uno por cada fase de la red. Estos transformadores cumplen dos funciones esenciales. En primer lugar, aumentan la tensión proporcionada por el VSI después de la filtración de las señales, cumpliendo los requisitos que demande la red eléctrica o la carga. En segundo lugar, aíslan la red de distribución del sistema de compensación de hundimientos, protegiendo el circuito del DVR de fallos en la red de distribución, descargas atmosféricas, entre otros [36].

La relación de devanados de los transformadores se determinó teniendo en cuenta la tensión del devanado secundario, que suele mantenerse en un rango muy cercano a la tensión de la red convencional [54]. Dado que la tensión nominal de la red es de 155 V, se adopta la siguiente relación de espiras:

$$K = \frac{N1}{N2} \quad (14)$$

Tomando como referencia los cálculos observados en [16] y luego de realizar diferentes pruebas de funcionamiento, se estableció un valor de 1 para el devanado primario y 10.281 para el devanado secundario, por medio de la evaluación de tensiones en los devanados.

Devanado primario: 15.13V
Devanado secundario: 155.56 V

Debido a la tensión requerida en el devanado secundario, se establece la siguiente relación:

$$K = \frac{155.56 V}{15.13 V} = 10.281 \rightarrow \frac{1}{10.281} \quad (15)$$

3.3. IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se detallan las herramientas empleadas en la implementación del sistema, describiendo las librerías, secciones de ejemplos y bloques, propios del entorno de simulación seleccionado, utilizados en el proceso de implementación.

3.3.1. Entorno de simulación

Simulink

La herramienta de simulación que se escogió para la implementación del sistema de control fue Matlab Simulink, por la amplia variedad de librerías y bloques prediseñados que facilitaron la implementación de las diferentes etapas. Además, el simulador permite el análisis y la visualización de resultados en tiempo real de cada uno de los procesos, así como la capacidad de ajustar parámetros, permitiendo la mejora del rendimiento del sistema en cuanto a la compensación de caída de tensión en la red eléctrica [55].

A continuación, se mencionarán algunas de las librerías y secciones de SIMULINK que comprenden los bloques implementados en la sección 3.3.2.

Specialized Power Systems

La biblioteca “Specialized Power Systems” de Simulink comprende componentes que contienen algoritmos avanzados para el modelado de sistemas de energía eléctrica y electrónica de potencia. Los bloques están diseñados para representar los componentes en condiciones ideales, permitiendo al usuario agilizar el proceso de diseño y evaluar el comportamiento del sistema antes de su construcción física. Dentro de esta librería, se encuentran diversos bloques utilizados en la implementación del sistema, como la fuente trifásica programable, la configuración de transformadores y PWM [56].

Electrification

La sección de ejemplos “Electrification” presenta aplicaciones de diversas tecnologías eléctricas, teorías y transformadas con el objetivo de mejorar la eficiencia de procesos energéticos y mitigar los efectos del cambio climático. Dentro de esta sección se encuentran modelos predefinidos por otros usuarios, ejemplos de simulación y tutoriales que facilitan la implementación de etapas de potencia, almacenamiento de energía o control. El esquema de las transformadas de Clarke y Park presentado se tomó como referencia de una de las aplicaciones encontradas en este espacio [57].

Simscape Electrical

La librería “Simscape Electrical”, en su sección de ejemplos, incorpora una gran cantidad de bloques prediseñados de sistemas eléctricos y electrónicos de alta complejidad. La diversidad de ejemplos en las diferentes áreas de aplicación permite al usuario encontrar modelos precisos y realistas que puede utilizar en un diseño propio. En la revisión de los ejemplos presentes en la librería, se tomaron como referencia dos proyectos específicos que contenían información acerca del PLL y el controlador PI, respectivamente [58].

3.3.2. Estructura

La estructura del sistema de compensación de hundimientos se encuentra dividida en diferentes partes. Su forma de implementación en el entorno de simulación se describe a continuación:

Fuente programable de tensión

La fuente de energía empleada es una fuente de tensión trifásica programable, que satisface los requisitos previamente definidos, simulando las condiciones de la tensión de línea entregada al consumidor. Además, cuenta con un modo de

operación para la simulación de diferentes tipos de hundimientos de tensión, en términos de amplitud y duración [59].

Para el sistema se definió una tensión rms de línea de 110 V y una frecuencia de 60 Hz, debido a que son las características de la red eléctrica presente en Colombia [60]. Además, los hundimientos de tensión programados se visualizan en la sección 3.4. La Figura 14 presenta un hundimiento programado en la fuente trifásica.

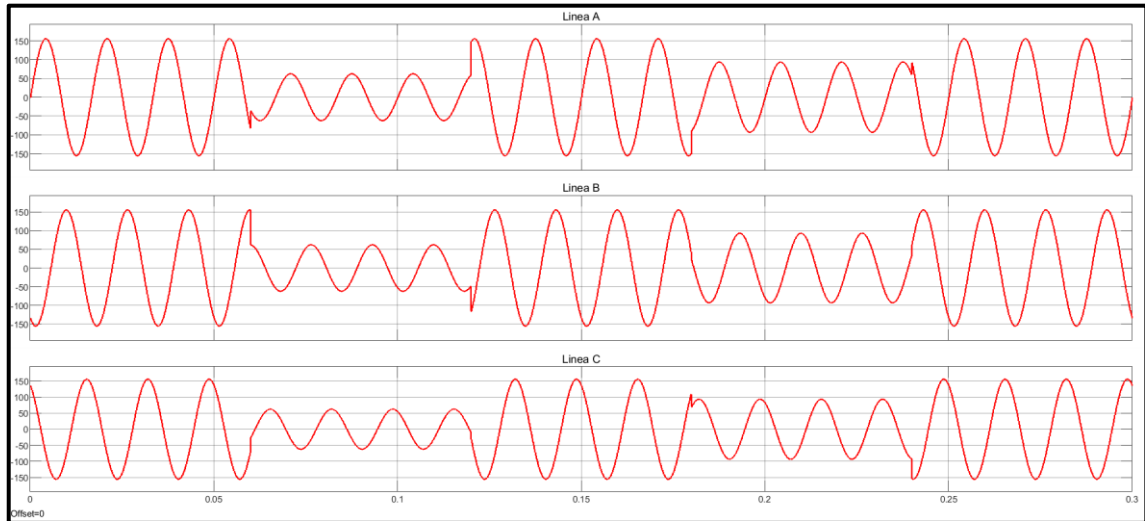


Figura 14. Comportamiento fuente programada con hundimientos de tensión.

Transformadores

Luego de la revisión, se identificaron ventajas técnicas al utilizar tres transformadores monofásicos comparándolo con un transformador trifásico, en aspectos como eficiencia, distribución de carga, mantenimiento y escalabilidad. Por ello, se tomó la decisión de adoptar la configuración de tres transformadores conectados en serie con la red luego del paso por el inversor [61]. El bloque utilizado para el sistema es transformador trifásico lineal de 12 terminales, debido a que cuenta con la configuración previamente definida, además de permitir el ajuste de los valores de impedancias internas y devanados.

PLL

La función PLL se centró en la sincronización entre las señales de tensión trifásicas generadas por el sistema de baterías y la red eléctrica. La sincronización es esencial para prevenir problemas de desfase que podrían afectar la calidad de la energía entregada. El bloque elegido fue un generador de PLL, diseñado por SIMULINK, que permite el ajuste de la frecuencia de operación y el desfase de la

señal [61]. La Figura 15 presenta la estructura del PLL utilizado en el sistema. Los valores de parámetros del PLL se definieron previamente en la sección 3.2.1.

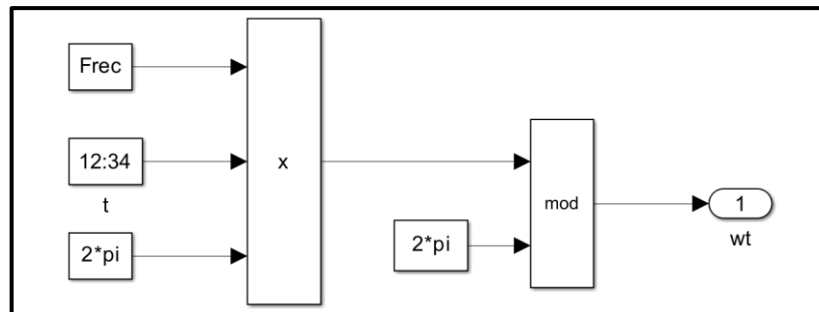


Figura 15. Modelo del PLL [61].

Transformada Clarke y Park

En esta sección, se determinó la aplicación de las transformadas de Clarke y Park. Estas transformadas adquieren relevancia ya que realizan un acondicionamiento a las señales eléctricas adquiridas que facilitan la implementación de la etapa de control definida previamente. Además, cuentan con la capacidad de eliminar componentes no deseados, como la secuencia cero, producida por desequilibrios en la simetría de las líneas lo que puede dificultar la detección y compensación de hundimientos de tensión [62]. En la Figura 16 se observa la configuración interna del bloque de las transformadas utilizadas.

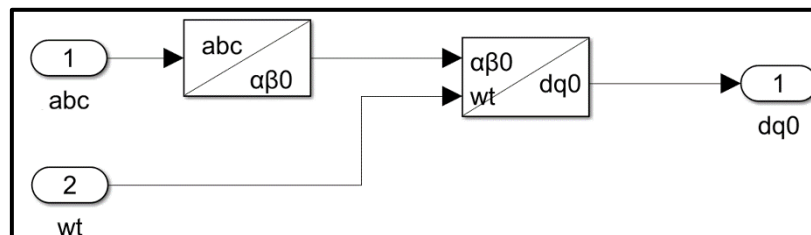


Figura 16. Modelo de las transformadas Clarke y Park [63]

Los valores de ángulo de fase y frecuencia de operación que se utilizan en las transformadas están determinadas por el PLL buscando mantener la sincronización con las líneas trifásicas, garantizando una conversión adecuada y mejorando la respuesta del controlador [64], [65].

Control proporcional integral

Para la etapa de control, la estrategia elegida consiste en la implementación de un controlador PI, tal como se menciona en la sección de dimensionamiento del controlador 3.2.1. La incorporación se llevó a cabo por medio del bloque

prediseñado por la biblioteca “Simscape Electrical” de SIMULINK. La estructura del controlador se muestra en la Figura 17 [66].

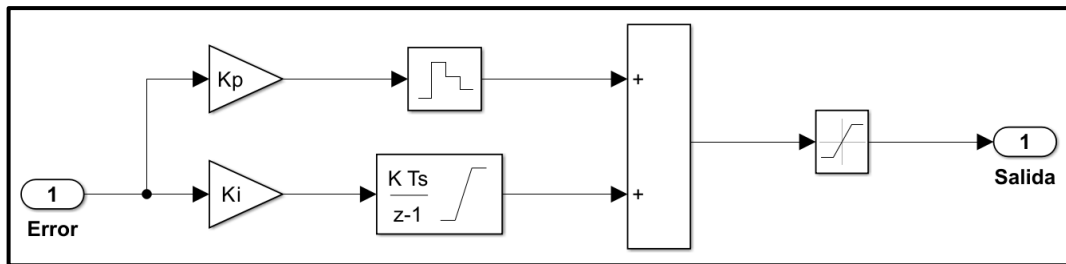


Figura 17. Modelo del controlador PI [66].

PWM

La incorporación de modulación por ancho de pulsos se volvió necesaria para el control efectivo del inversor trifásico. Esta técnica permite regular con precisión la tensión AC de salida suministrada por el banco de baterías, para contrarrestar los efectos de los hundimientos de la red y mantener la estabilidad del sistema ante posibles corrientes o tensiones excesivas. El bloque que se utilizó para esta sección es un PWM unipolar, este se encarga del control de los dispositivos de conmutación (MOSFET o IGBT) [67]. En la Figura 18 se presenta la configuración interna del bloque PWM.

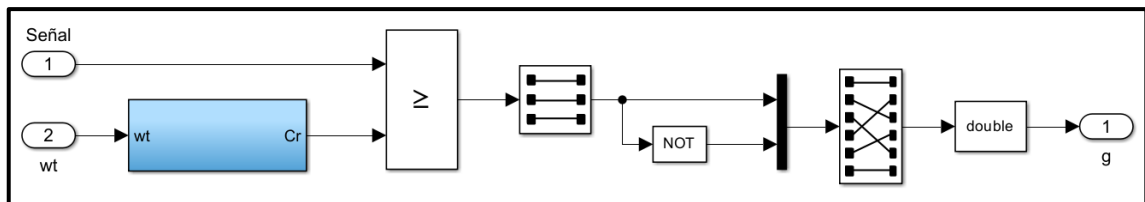


Figura 18. Modelo del PWM [67]

Inversor Trifásico

La función del inversor trifásico es incorporar el sistema de almacenamiento BESS para compensar las caídas en la red, mediante la excitación en las compuertas de los IGBTs de la configuración del inversor. La regulación del voltaje de salida fue realizada por el método de control que actúa sobre el PWM, descrito en la sección de diseño. El bloque que se implementó es un convertidor de 2 niveles, que permite diferentes tipos de modelos de operación [68].

3.3.3. Topología

La disposición de los elementos anteriormente descritos se establece teniendo en cuenta las etapas diseñadas, la operación del compensador de tensión requiere de dos etapas, que son reseñadas a continuación:

Etapa de control

La etapa de control garantiza la calidad y estabilidad de la energía suministrada a la red eléctrica. La Figura 19 muestra de la etapa de control implementada en Simulink.

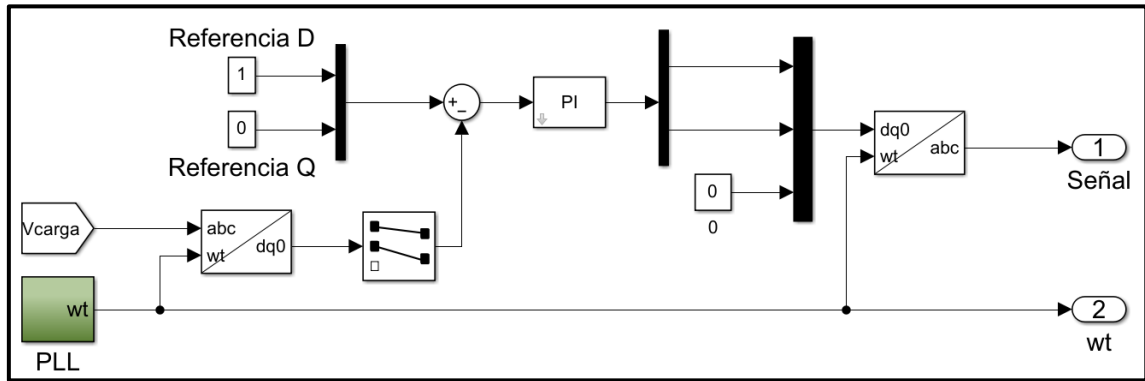


Figura 19. Etapa de control.

La salida del sistema es la señal de tensión medida en la carga, esta señal es normalizada (rango de tensión entre 0 y 1) para reducir errores en el ajuste y la respuesta. Luego, se sincroniza la señal mediante la incorporación de un PLL, garantizando una respuesta eficaz a las variaciones en la tensión de la red eléctrica. Después, la señal trifásica se transforma en coordenadas dq, por medio de la implementación de las transformadas de Clarke y Park, simplificando los cálculos y el análisis de la estrategia de control.

La señal generada por las transformadas de Clarke y Park se modifica por medio del controlador PI. La parte proporcional responde de manera inmediata a las variaciones, mientras la parte integral permite corregir errores acumulativos a lo largo del tiempo. El ajuste de las constantes K_p y K_i permite mejorar la eficiencia de la compensación en la etapa de potencia. Posteriormente, el controlador genera la corrección en la señal, haciéndose necesario realizar una transformación inversa para llevarla de nuevo al marco original. Finalmente, la señal de control resultante se utiliza para modular el PWM.

Etapa de potencia

La etapa de potencia se encarga del acondicionamiento de la tensión que será suministrada a la red eléctrica, con base en los valores nominales de funcionamiento. La Figura 20 muestra la etapa de potencia implementada en Simulink.

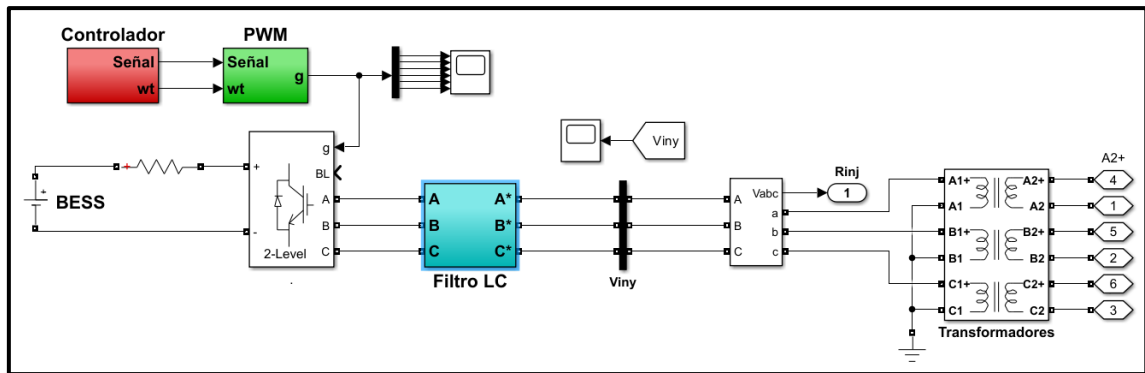


Figura 20. Etapa de potencia.

La etapa de potencia inicia con el PWM. Cuando se detecta un hundimiento de tensión, la amplitud de la señal se ajusta para que el PWM module el ancho de los pulsos. Luego, el inversor convierte la energía almacenada del sistema BESS en corriente alterna trifásica, para incrementar la energía inyectada a la red eléctrica, manteniendo los estándares de eficiencia y calidad.

Mediante el filtro LC se reducen los armónicos y componentes no deseados presentes en la señal de salida, además de suavizar la forma de onda. Por último, la configuración de transformadores adapta la tensión mediante la relación de devanados. Cada transformador maneja una fase de la corriente trifásica y se ajusta a los requerimientos de la red eléctrica. El devanado primario está conectado a la salida del filtro LC y recibe la señal de corriente alterna trifásica filtrada, mientras el secundario está conectado a la red eléctrica y entrega la señal para compensar el hundimiento.

Vista general

La Figura 21 representa el esquema de la red eléctrica con presencia de hundimientos de tensión. Se evidencia la conexión del devanado secundario de los transformadores a las líneas trifásicas. Además, se coloca cada uno de los medidores de tensiones para facilitar el desarrollo de las respectivas pruebas mencionadas en la sección 3.4. La Figura 22 presenta las formas de onda de tensión V_{abc} , V_{iny} y V_{carga} donde, V_{abc} hace referencia a la tensión de la línea con presencia de hundimientos, V_{iny} se refiere a la tensión inyectada por el sistema DVR y V_{carga} hace referencia al nivel de tensión a la que está sometida la carga.

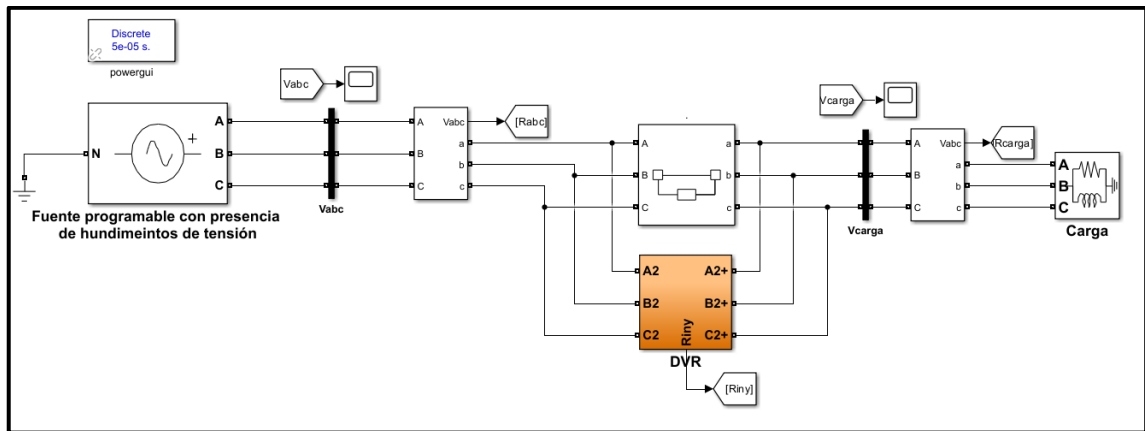


Figura 21. Vista general.

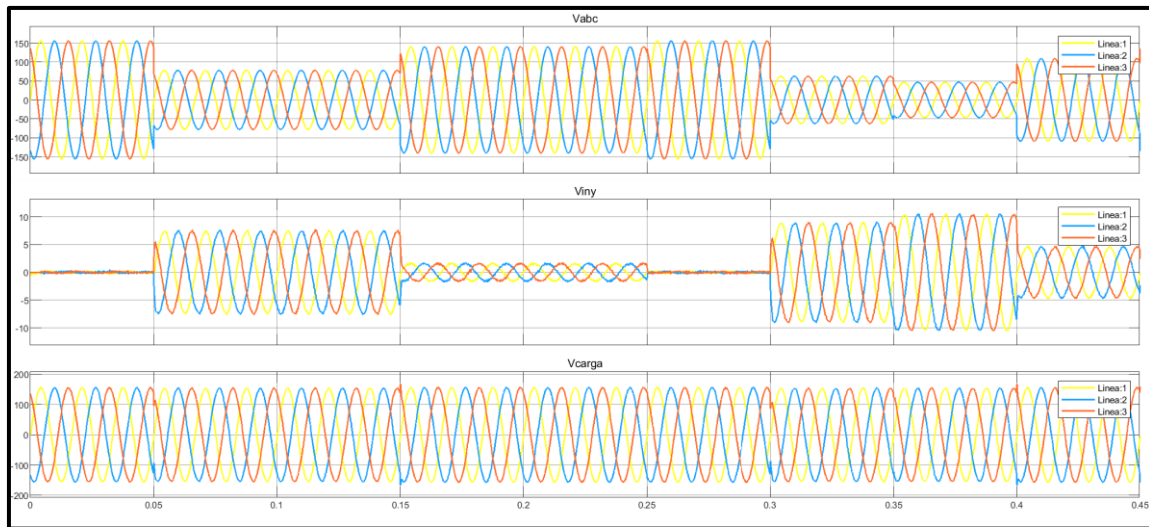


Figura 22. Funcionamiento preliminar

3.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y/O DESEMPEÑO

En esta sección se describen las pruebas practicadas al sistema en diversas condiciones. Estas se diseñan teniendo en cuenta los requisitos y las posibles perturbaciones que pueden surgir en la red de distribución. Su propósito es evaluar las capacidades y limitaciones del sistema frente diferentes escenarios. A continuación, se detalla cada una de las pruebas realizadas, junto con los resultados obtenidos. Para facilitar la comprensión de los datos y los gráficos resultantes se establece que V_{abc} hace referencia a la tensión de la línea con presencia de hundimientos, V_{iny} es la tensión inyectada por el sistema DVR y V_{carga} hace referencia a la tensión a la que está sometida la carga.

3.4.1. Sincronización de la compensación

La sincronización precisa de la señal de compensación es esencial para garantizar la estabilidad del sistema, la eficiencia energética y la vida útil de las baterías. Además, asegura una respuesta oportuna a las perturbaciones en la red eléctrica y evita interrupciones no deseadas. La Figura 23 presenta la sincronización del sistema con respecto a la señal de la red convencional ante la presencia de un hundimiento de tensión.

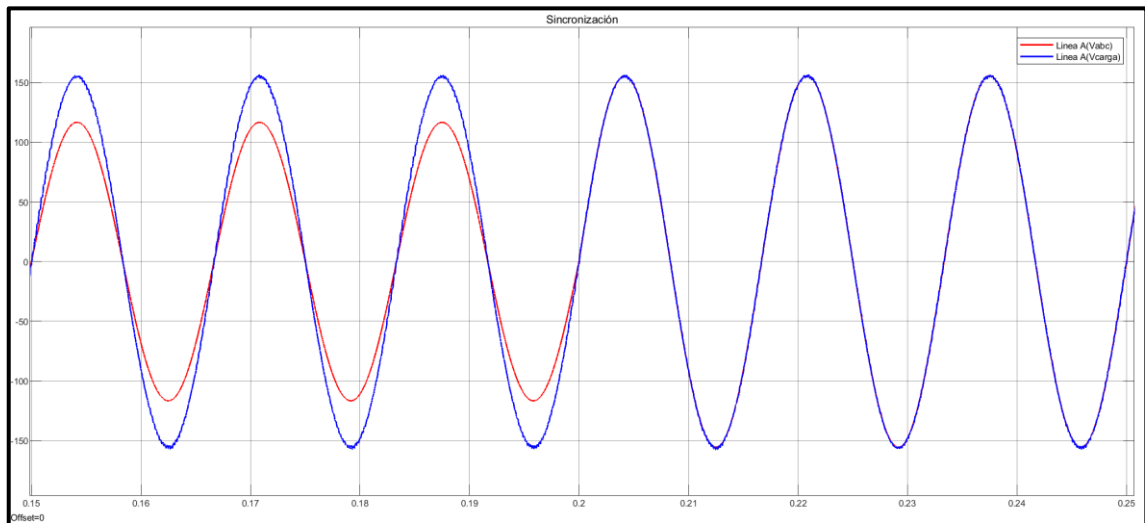


Figura 23. Prueba de funcionamiento: sincronización.

3.4.2. Hundimientos de tensión simétricos.

Un hundimiento de tensión simétrico se produce cuando todas las fases de la red experimentan una disminución de la tensión de manera proporcional. A sí mismo, pueden presentar variaciones tales como la amplitud del hundimiento, la duración la frecuencia de ocurrencia, entre otras. Los casos estudiados para hundimientos de tensión se presentan a continuación:

Caso 1: amplitud

La amplitud de un hundimiento de tensión es la diferencia entre el valor nominal de la tensión de la red y el nivel más bajo que alcanza durante un período específico de tiempo. En la Figura 24 se observa el gráfico resultante de un hundimiento de 0.6pu, con los parámetros V_{abc} , V_{iny} y V_{carga} .

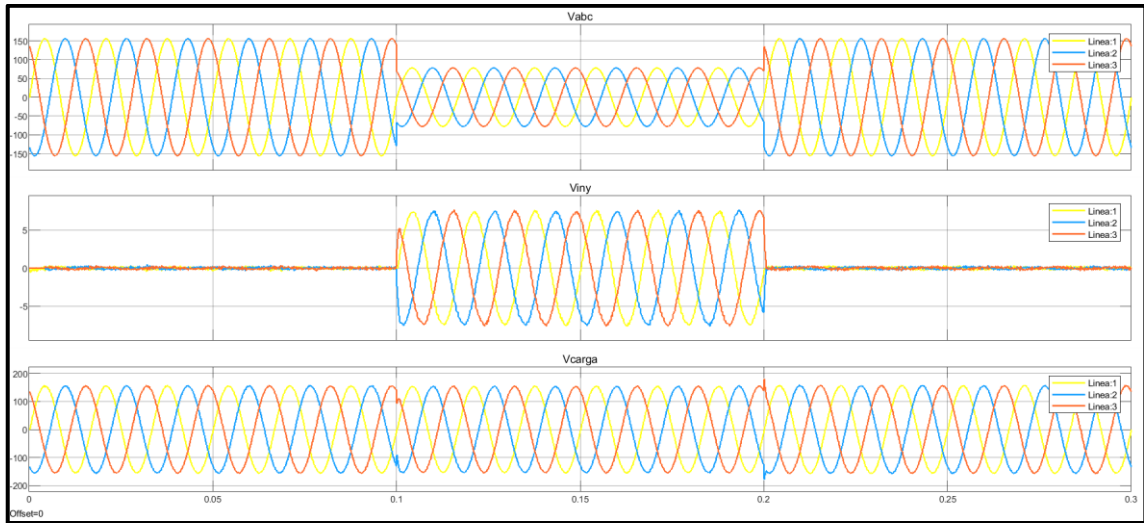


Figura 24. Prueba de funcionamiento: amplitud 60%

La Tabla 7 presenta la información del comportamiento del sistema al realizar diferentes escenarios de prueba, con una variedad de amplitudes de hundimientos simétricos.

Tabla 7. Pruebas de funcionamiento: amplitud

Amplitud del hundimiento (%)	Duración del hundimiento(ms)	Tiempo de respuesta (ms)	Valor mínimo (V)	Valor máximo (V)
20	100	0.442	-157.5	157.4
40	100	0.619	-154.6	156
60	100	0.803	-152	152.9
80	100	1.39	-151.8	153.1

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la amplitud del hundimiento está estrechamente ligada con el tiempo de recuperación del nivel de energía de la red, denotándose un mayor tiempo de respuesta cuando la amplitud del hundimiento es mayor.

Caso 2: duración

Como se observó en la sección 1.2.3, los hundimientos pueden presentar tiempos de duración variables. El objetivo de esta prueba es medir el tiempo de respuesta desde el inicio del hundimiento hasta que el sistema corrige la disminución. También se busca identificar el valor máximo de tensión que alcanza la carga cuando el DVR se encuentra en funcionamiento. Se llevaron a cabo mediciones en cuatro escenarios de hundimientos, con duraciones que variaron entre 100 ms

hasta 400 ms. En la Figura 25 se presenta un hundimiento con una duración de 200 ms. Se observan las gráficas resultantes V_{abc} , V_{iny} y V_{carga} correspondientes.

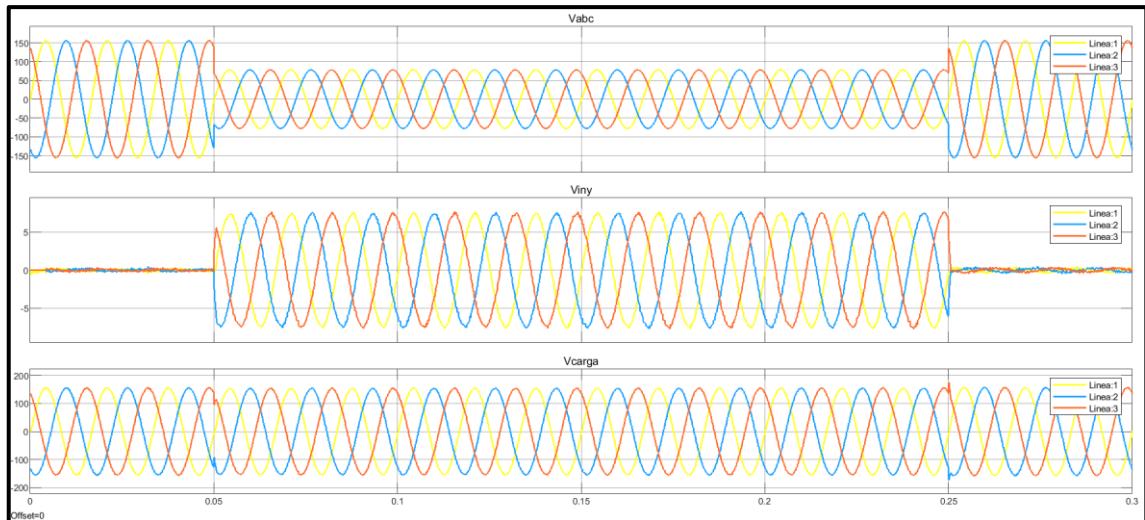


Figura 25. Prueba de funcionamiento: duración 200 ms

En la Tabla 8 se muestran los datos recopilados para cada uno de los casos mencionados anteriormente.

Tabla 8. Pruebas de funcionamiento: duración

Duración del hundimiento(ms)	Amplitud del hundimiento (%)	Tiempo de respuesta (ms)	Valor mínimo (V)	Valor máximo (V)
100	50	0.617	-154.7	153.8
200	50	0.810	-154.1	152.6
300	50	0.813	-155	153.9
400	50	0.825	-155	154

Los resultados obtenidos presentan el funcionamiento del sistema bajo diversas condiciones de duración de los hundimientos de tensión teniendo en cuenta la normatividad. El sistema compensa eficazmente la falencia en la red, a una velocidad de respuesta en promedio de 700 - 800 μ s. Por lo tanto, se puede inferir que las perturbaciones de tensión en las cargas sensibles son casi imperceptibles.

Caso 3: Hundimientos repetitivos

La prueba se diseñó con el objetivo de evaluar el sistema cuando se presentan hundimientos de tensión de forma consecutiva en lapsos cortos de tiempo. Para ello se simulan 4 hundimientos en un espacio de tiempo de 30 ms, con una duración de 0.05 ms cada uno. La amplitud de todas las disminuciones en la

tensión de la red de distribución se definió en 0.5 pu. En la Figura 26 se observan las gráficas resultantes de V_{abc} , V_{iny} y V_{carga} , con las condiciones anteriormente mencionadas.

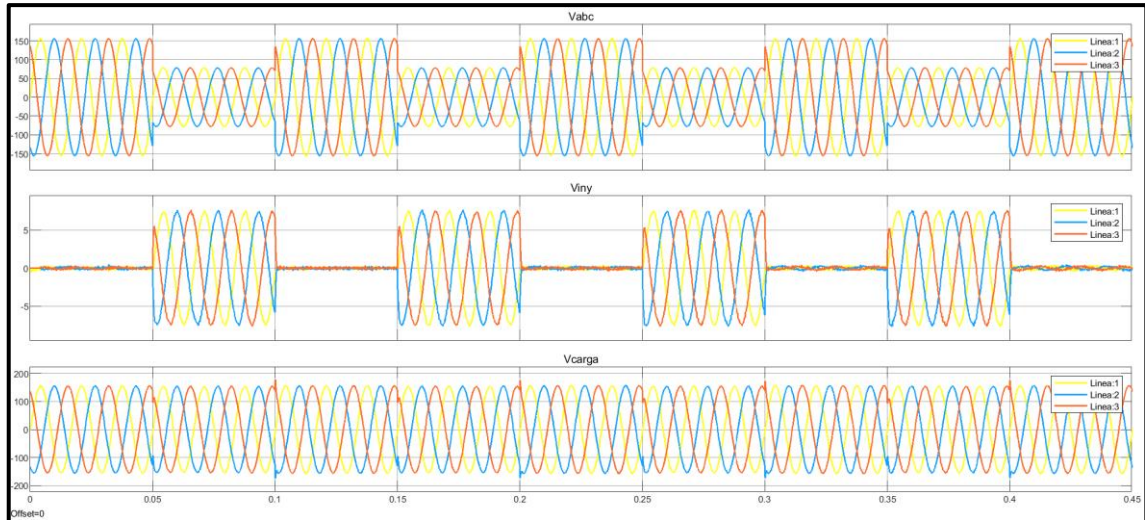


Figura 26. Prueba de funcionamiento: repetición de hundimientos.

Se observa una respuesta rápida y eficaz ante los escenarios propuestos, recuperando la amplitud necesaria sin importar los intervalos de tiempo entre cada falla, demostrando la alta capacidad de compensación ante los hundimientos. Así mismo, se observa que la compensación no tiene ningún cambio de frecuencia o desfase, por lo tanto, la carga conectada no sufrirá variaciones en su funcionamiento.

Caso 4: Hundimiento dentro de un hundimiento

Como se ha observado en anteriores secciones, los hundimientos de tensión pueden tener diversas clasificaciones. En este caso, se presenta una disminución temporal durante el período en que se presenta el hundimiento principal. Para esta prueba, se establece el hundimiento principal con una amplitud de 0.2 pu, y luego se aplica una reducción adicional de 0.2 pu en cada “sub-hundimiento” con respecto al anterior, hasta alcanzar una disminución de 0.8pu con respecto al valor rms de la red. En la Figura 27 se presentan las gráficas resultantes de V_{abc} , V_{iny} y V_{carga} donde se puede apreciar el caso mencionado anteriormente sobre la red de distribución.

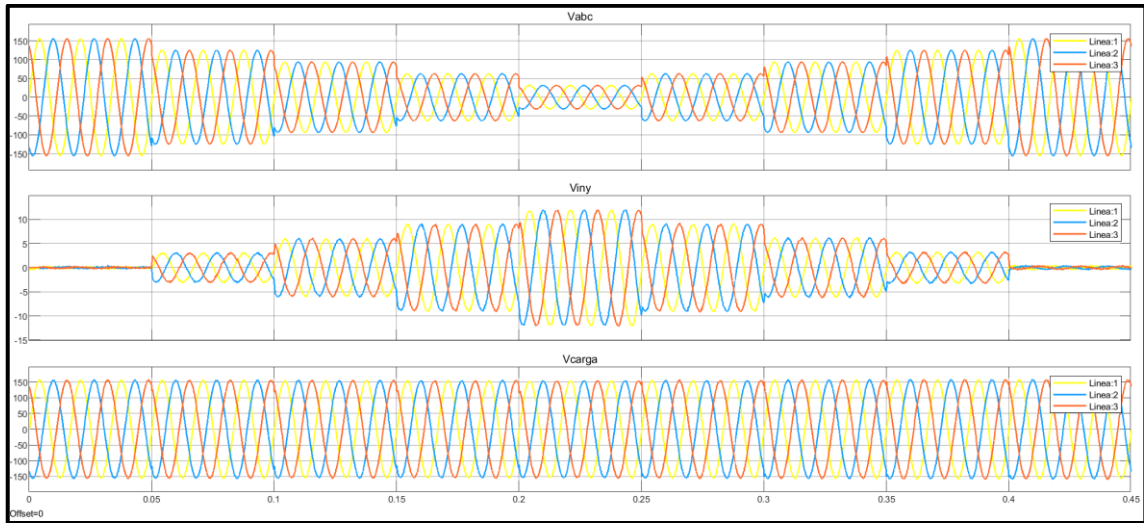


Figura 27. Prueba de funcionamiento: hundimiento dentro de un hundimiento.

En la Tabla 9 se muestran los datos recopilados del sistema, se tiene en cuenta la velocidad de respuesta medida en tiempo y la amplitud de tensión máxima inyectada por el DVR para cada caso.

Tabla 9. Pruebas de funcionamiento: Hundimiento dentro de un hundimiento.

Tiempo de inicio (ms)	Amplitud (%)	Tiempo de respuesta (ms)	Valor mínimo (V)	Valor máximo (V)
50	20	0.390	-156	155.1
100	40	0.388	-156.7	155.5
150	60	0.390	-156.9	155.6
200	80	0.404	-156.2	155
250	60	0.394	-156.8	154.9
300	40	0.385	-156.5	155.2
350	20	0.384	-157.4	156.4

Después de visualizar la gráfica, se puede afirmar que el sistema reestablece la tensión en la red trifásica de manera satisfactoria para el caso propuesto, sin importar la amplitud o la duración de los hundimientos. Además, cada compensación se establece en un valor de tensión aceptable con respecto a la red, demostrando la correcta inyección de energía.

3.4.3. Hundimientos de tensión asimétrico

Un hundimiento de tensión asimétrico es un hundimiento caracterizado por una disminución en la tensión que afecta de manera desigual a las fases de un sistema trifásico. En este fenómeno, la tensión en las tres fases no disminuye de la misma

manera, lo que resulta en un desequilibrio en la magnitud de las tensiones de fase. En la Figura 28 se presenta un hundimiento monofásico, es decir, con la carencia en una sola línea.

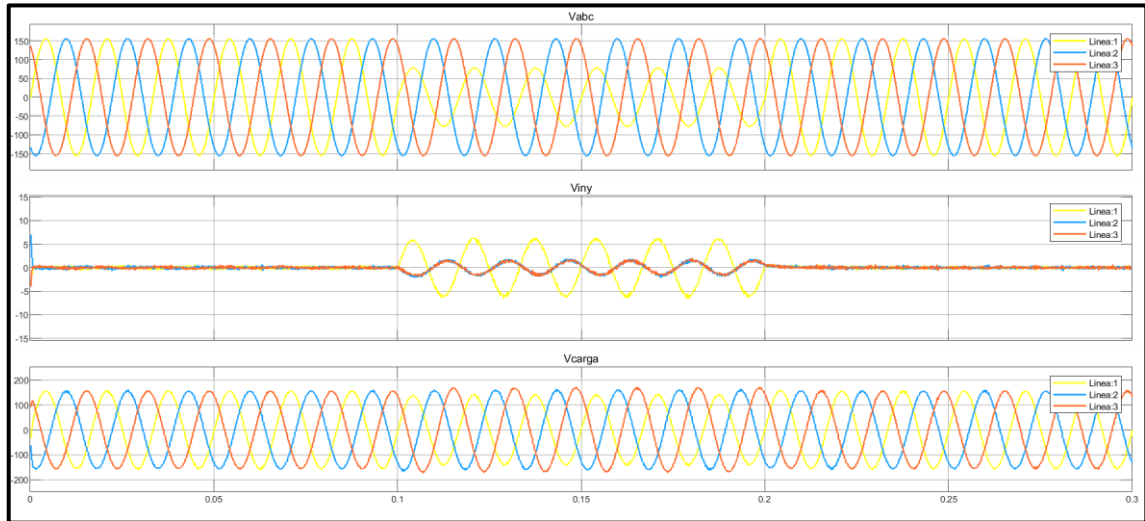


Figura 28. Prueba de funcionamiento: hundimiento asimétrico

El sistema no corrige el nivel de tensión satisfactoriamente debido a que el enfoque de compensación de la estrategia es simétrico. La fase que se debe compensar no alcanza el valor nominal, debido a que el valor de tensión aumenta en las tres líneas, por el comportamiento de las transformadas de Clarke y Park.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se describen los logros alcanzados y los desafíos presentados para la implementación del sistema de compensación de hundimientos de tensión que utiliza como soporte el almacenamiento energético por medio de un sistema BESS.

La identificación de los requerimientos del sistema se realiza por medio de la revisión bibliográfica de diferentes autores. Se definió la importancia de sincronizar la frecuencia de operación de la red para garantizar que el sistema responda efectivamente a los hundimientos de tensión sin causar desequilibrios en la red. La conexión en serie asegura que el sistema pueda contrarrestar la caída de tensión de manera efectiva y mantiene la calidad de la energía suministrada. Un tiempo de respuesta mínimo garantiza que el sistema pueda corregir la caída de tensión de manera rápida y eficiente, evitando interrupciones prolongadas en el suministro eléctrico. Por otro lado, la capacidad de integrar un sistema BESS es valiosa, debido a la posibilidad de proporcionar la energía necesaria para compensar los hundimientos.

4.1 Análisis de sincronización de la compensación

Los resultados de las pruebas confirman que la estrategia de control implementada ha logrado mantener una sincronización con la red eléctrica. En el escenario de prueba diseñado para evaluar la sincronización, se ha observado que el sistema de compensación responde de manera rápida y precisa a los hundimientos de tensión simétricos sin generar desfases en la señal.

4.2 Análisis del comportamiento de la compensación

En este apartado se realiza el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al sistema, se divide en dos partes: análisis de pruebas simétricas y análisis de pruebas asimétricas.

Pruebas simétricas

Después de llevar a cabo una serie de escenarios de prueba y analizar los resultados, es posible realizar un análisis detallado de la compensación de hundimientos de tensión simétricos en la red eléctrica trifásica. Esta fase ha proporcionado información valiosa sobre la efectividad de la estrategia de control implementada.

Amplitud del hundimiento

En este caso, se realiza una revisión de los resultados obtenidos en Tabla 7. Una vez realizadas diferentes pruebas al sistema, donde la única variación fue la amplitud de los hundimientos, se observó que la amplitud de la tensión entregada a la carga se mantuvo en un promedio de 154.85 V. Sin embargo, donde se aprecia una variación es en el tiempo de respuesta del sistema, que depende de la amplitud del hundimiento. Así, para un hundimiento de 20% de amplitud, el tiempo de respuesta es 0.442 ms, para un hundimiento de amplitud 40 V el tiempo de respuesta es 0.619 ms, por último, llegando a realizar la evaluación del sistema con la presencia de un hundimiento del 80% de amplitud, en cuyo caso el tiempo de respuesta fue de 1.36 ms.

De los datos anteriormente mencionados se puede inferir que existe una relación directa, lo que quiere decir que entre mayor sea la amplitud del hundimiento, mayor será el tiempo de respuesta del sistema.

Duración del hundimiento

La prueba se realizó cambiando la duración del hundimiento, pero manteniendo la amplitud en el mismo valor en todos los casos. Los resultados obtenidos permiten inferir que el sistema de compensación no sufre ninguna variación de tensión que pueda afectar a la carga conectada a la red, pues el tiempo de respuesta en un promedio es 0.766 ms. Sin embargo, el valor de tensión se ve reducido cuando la duración del hundimiento es de 100 ms, aun así, la diferencia es casi imperceptible, lo que no afecta a la carga conectada a la red.

Por otro lado, el valor de amplitud de tensión es estable, manteniéndose en un promedio de 153.5 V, impidiendo relacionar el comportamiento de la tensión que observa la carga con el tiempo de duración del hundimiento.

Hundimientos de tensión multiestado

El análisis de los resultados de los escenarios de prueba reveló que el sistema de control diseñado muestra una eficacia en la compensación de hundimientos de tensión simétricos repetitivos que ocurren en un período corto de tiempo. Estos eventos, caracterizados por la rápida oscilación de la tensión en un patrón repetitivo, pueden representar un desafío para la calidad del suministro eléctrico y la operación de equipos sensibles.

El sistema pudo detectar y corregir estos hundimientos de tensión de manera efectiva, garantizando una respuesta rápida a las fluctuaciones de la tensión. Esto

es esencial para mantener una tensión en línea con los valores normales, incluso en situaciones de perturbación repetitiva.

Hundimiento dentro de un hundimiento

En esta prueba se propuso un escenario donde se simulan varios hundimientos consecuentes, es decir que exista un hundimiento dentro de otro, se establecieron hundimientos de 50 ms, las amplitudes de estos se establecieron en referencia al valor de la tensión nominal, para ver detalladamente los valores de amplitud de cada hundimiento véase la Tabla 9. Los resultados de esta prueba demostraron que el valor de tensión visto desde la carga siempre se mantuvo en un promedio de 155 V, por lo tanto, el sistema compensó la tensión en todos los casos de una forma correcta. Por otra parte, en cuanto al tiempo de respuesta se puede apreciar el mismo fenómeno, las variaciones entre hundimientos son menores, aunque se puede apreciar un ligero incremento, cuando el hundimiento tiene el 80% de amplitud.

Los resultados de las pruebas demuestran de manera concluyente que la estrategia de compensación de hundimientos de tensión simétricos ha tenido un desempeño sobresaliente. En cada uno de los escenarios de prueba diseñados para evaluar esta capacidad, la estrategia de control ha detectado y corregido con éxito los hundimientos de tensión simétricos, garantizando que la tensión en todas las fases de la red se mantenga dentro de los límites aceptables.

Pruebas asimétricas.

El análisis de los resultados de los escenarios de prueba reveló que el sistema de control diseñado, altamente eficiente para abordar hundimientos de tensión simétricos, enfrenta limitaciones para compensar hundimientos asimétricos. A pesar de que el sistema tiene la capacidad de responder de manera efectiva a variaciones simétricas de la tensión de línea trifásica, se requiere un ajuste en la etapa de detección con el fin de mejorar su capacidad para corregir disminuciones de tensión monofásicas y bifásicas.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En esta sección se presentan las conclusiones del trabajo. Se describen los resultados obtenidos y se destacan los aspectos más relevantes en el desarrollo del sistema de compensación de hundimientos. Por último, se realiza un análisis de posibles trabajos futuros que se podrían realizar a partir de los datos surgidos de este proyecto.

5.1. CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo se centró en el diseño de un sistema de compensación de hundimientos con la integración de un sistema BESS, mediante el análisis, diseño, implementación y pruebas se permitieron satisfacer los objetivos propuestos.

Por medio de la revisión bibliográfica se determinó la estrategia de control adecuada para la aplicación de convertidores en sistemas de compensación de tensión, luego de una comparación con las características de diferentes métodos de control. Los resultados obtenidos con la estrategia implementada consistieron en bajo tiempo de respuesta del sistema y una mejor capacidad de compensación.

La estrategia de control implementada fue diseñada tomando en consideración los artículos mencionados en la sección 1.1. El controlador PI ofreció ventajas en la estabilidad, tiempo de respuesta y disminución del error de estado permanente. En la sección 3.4, los resultados obtenidos permiten afirmar que la implementación del método de control es idónea para el sistema diseñado.

Se diseñaron e implementaron escenarios de prueba para diferentes requerimientos del sistema. Se ejecutaron mediante el entorno de simulación SIMULINK para comprobar el funcionamiento del sistema. Se evaluó la capacidad de sincronización con la red de distribución, la capacidad para mantener la compensación ante diferentes amplitudes de hundimientos, la velocidad de respuesta y la amplitud de tensión suministrada a la carga. Luego, se simuló hundimientos con duraciones variables, repetitivos, hundimientos contenidos en otros hundimientos y, por último, hundimientos asimétricos.

El sistema tiene la capacidad de mantener la sincronización de frecuencia con la red de distribución, de una manera precisa, ayudando a mejorar la estabilidad, incrementando la vida útil del sistema BESS y evitando las perturbaciones en la carga debido a los cambios de frecuencia.

Por otra parte, se logra un resultado satisfactorio en las pruebas con hundimientos simétricos como se aprecia en la sección 3.4.2, el sistema realiza una

compensación de hundimientos, dentro del umbral que enmarca la normatividad, en ningún caso se observa una disminución en el valor de la tensión en la carga por debajo de 0.9 pu, así mismo tampoco se observa una sobretensión por encima del valor permitido de 1.1pu. Además, en todos los casos se mantiene una velocidad de respuesta por debajo del umbral permitido, que es de 16.66 ms o 1 ciclo. Por lo tanto, se puede deducir que el sistema realiza una compensación de hundimientos de tensión simétricos de manera satisfactoria en el 100% de los casos.

Finalmente, el sistema no logra un resultado satisfactorio en las pruebas con hundimientos de tensión asimétricos, el caso evaluado contempló un hundimiento de tensión de la fase A con una amplitud de 50%, alcanzando una amplitud en la tensión de salida del 90% del valor eficaz. Por lo tanto, se puede concluir que el sistema requiere de un ajuste en todos sus niveles para lograr dicho objetivo.

En definitiva, con la elaboración de este trabajo de grado se proporciona una guía que permite la implementación de un sistema de compensación de hundimientos de tensión, que mantengan las características propias del diseño desarrollado. Así mismo, sirve como punto de partida para futuros desarrollos que busquen solucionar diversos problemas de calidad de la energía en las redes de distribución.

5.2. PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO

Actualmente, se han logrado avances en la implementación de una estrategia de control para la corrección de hundimientos en una red trifásica. Sin embargo, existen áreas de trabajo que promuevan el desarrollo para futuras investigaciones.

Una ampliación de este proyecto sería abordar la compensación de hundimientos de tensión asimétricos. Actualmente, la estrategia de control se enfoca en hundimientos de tensión simétricos, pero abordar esta clase de hundimientos es un desafío que podría mejorar la eficacia del sistema. Para la compensación, se necesita una investigación adicional y ajustes en la estrategia de control actual. Esto podría incluir el desarrollo de algoritmos que detecten y corrijan asimetrías, así como posibles ajustes en la topología y componentes del sistema.

Otro aspecto para explorar es la posibilidad de corregir elevaciones de voltaje. Estos eventos también pueden afectar la calidad de la potencia eléctrica y la estabilidad de la red. Desarrollar una estrategia de control que aborde tanto los hundimientos como las elevaciones de voltaje sería un paso importante hacia una solución completa de calidad de la potencia. Para la corrección de elevaciones de voltaje, se debe investigar y desarrollar una estrategia de control que permita identificar y mitigar estos eventos. Esto podría involucrar la implementación de un

controlador adicional que detecte elevaciones de voltaje y ajuste la operación del sistema BESS en consecuencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNAL, “Racionamiento de energía en varias regiones de Colombia, una posibilidad que no se descarta”, Bogotá, el 31 de julio de 2023. Consultado: el 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://periodico.unal.edu.co/articulos/racionamiento-de-energia-en-varias-regiones-de-colombia-una-posibilidad-que-no-se-descarta>
- [2] ENEL, “En 2022 Enel Colombia recibió alrededor de 4.000 denuncias por hurto de energía”, Bogotá, el 1 de junio de 2023. Consultado: el 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/es/prensa/news/d202306-resultados-denuncia-hurto-de-energia.html>
- [3] S. A. Mohammed, A. García Cerrada, A. M. Mohammed Abdel-Rahim, y B. Hasanin, “Dynamic voltage restorer (DVR) system for compensation of voltage sags, state-of-the-art review”, 2013.
- [4] A. Bendre, D. Divan, W. Kranz, y W. E. Brumsickle, “Are voltage sags destroying equipment?”, *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 12, núm. 4, 2006, doi: 10.1109/MIA.2006.1678326.
- [5] S. Arias-Guzman *et al.*, “Hundimientos de tensión: diseño y construcción de un prototipo virtual para su medición Voltage sags: design and construction of a virtual prototype for his measurement”, *a a*, vol. 2, núm. 2, p. 2.
- [6] S. Arias Guzmán, “TESIS DE MAESTRÍA HUNDIMIENTOS DE TENSIÓN Un enfoque de análisis a partir del álgebra tensorial”, 2015.
- [7] M. H. Bollen, “Voltage SagsCharacterization”, en *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, 2000, pp. 139–251. doi: 10.1109/9780470546840.ch4.
- [8] G. ORDOÑEZ, “Perturbaciones en la onda de tensión huecos y sobretensiones”, *Programa ALURE-CREG, Cartagena de Indias*, 2002.
- [9] C. Nucamendi Canelas, “Diseño de la instrumentación y protección de restaurador dinámico de voltaje”, 2015.

- [10] N. Z. Xu, M. Ding, y C. Y. Chung, “Control strategies of BESS for compensating renewable energy fluctuations”, en *9th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2012)*, 2012, pp. 1–5. doi: 10.1049/cp.2012.2178.
- [11] ENEL, “Conoce los resultados financieros del primer semestre de 2023”. Consultado: el 29 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/es/prensa/news/d202307-resultados-financieros-primer-semestre.html>
- [12] J. A. Aguirre Díaz y C. A. Chiquito Manso, “Análisis y diseño de un puente inversor trifásico VSI controlado mediante SVM utilizando un microcontrolador”, 2014.
- [13] E. Babaei y M. Farhadi Kangarlu, “Three-phase cross-phase voltage sag compensator to compensate balanced/unbalanced voltage sags and phase outages in distribution systems”, en *2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, 2011, pp. 128–133. doi: 10.1109/EPEC.2011.6070182.
- [14] J. E. Celis Montero, “Metodología para la estimación de hundimientos de tensión en sistemas eléctricos empleando una cantidad limitada de medidores de calidad de potencia.”, 2016.
- [15] A. F. Guerrero-Guerrero *et al.*, “Voltage sags: energy and severity index assessment”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, núm. 1, pp. 141–148, 2019.
- [16] P. Jayaprakash, B. Singh, D. P. Kothari, A. Chandra, y K. Al-Haddad, “Control of reduced-rating dynamic voltage restorer with a battery energy storage system”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 50, núm. 2, 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2272669.
- [17] S. D. Mangate, A. D. Kanase, y A. A. Dharme, “Sag compensation in smart grid with distributed generation”, en *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS 2017*, 2018. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8389504.
- [18] C. Tu *et al.*, “Dynamic voltage restorer with an improved strategy to voltage sag compensation and energy self-recovery”, *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 4, núm. 3, pp. 219–229, 2019, doi: 10.24295/CPSSTPEA.2019.00021.

- [19] M. Brenna, F. Foiadelli, y D. Zaninelli, "Voltage sags compensation through a DVR supplied by V2G vehicles charging stations", en *2013 4th IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT Europe 2013*, 2013. doi: 10.1109/ISGTEurope.2013.6695334.
- [20] D. Moya-López *et al.*, "Control de la tensión del bus de continua de un filtro activo mediante un convertidor DC-DC", 2015.
- [21] A. K. Sadigh y K. M. Smedley, "Review of voltage compensation methods in dynamic voltage restorer (DVR)", en *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345153.
- [22] C. N. M. Ho, H. S. H. Chung, y K. T. K. Au, "Design and implementation of a fast dynamic control scheme for capacitor-supported dynamic voltage restorers", *IEEE Trans Power Electron*, vol. 23, núm. 1, 2008, doi: 10.1109/TPEL.2007.911780.
- [23] L. Meng, M. Savaghebi, F. Andrade, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, y M. Graells, "Microgrid central controller development and hierarchical control implementation in the intelligent microgrid lab of Aalborg University", en *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2015. doi: 10.1109/APEC.2015.7104716.
- [24] D. Rodríguez, R. Gómez, y A. Campos, "Sistemas de gestión de baterías (BMS) y su importancia para los sistemas de almacenamiento de baterías (BESS)", *Tecnura*, 2015.
- [25] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Guide for Voltage Sag Indices*. 2014.
- [26] D. Gallo, C. Landi, y M. Luiso, "Accuracy analysis of algorithms adopted in voltage dip measurements", *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 59, núm. 10, 2010, doi: 10.1109/TIM.2010.2045256.
- [27] J. J. Vera, F. Santamaria, y A. Jaramillo, "Power Quality Analysis in an Industrial System from Multipoint Measurements", *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 17, núm. 32, pp. 179–192, 2018.
- [28] U. B. Mujumdar y J. S. Joshi, "Microcontroller based true RMS current measurement under harmonic conditions", en *2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET 2010*, 2010. doi: 10.1109/ICSET.2010.5684468.

- [29] Matias Diazd, *Transformadas de Clarke y Park*, (el 6 de enero de 2021). Consultado: el 28 de septiembre de 2023. [En línea Video]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=_Zu9b6ubFFI
- [30] C. J. O'Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin, y J. L. Kirtley, "A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, núm. 4, pp. 2070–2083, 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2941175.
- [31] "Clarke and Park Transforms - MATLAB & Simulink". Consultado: el 28 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/solutions/electrification/clarke-and-park-transforms.html>
- [32] C. P. Aedo Paredes, "Algoritmos de detección de fase para sincronización y control de frecuencia de Central Micro Hidráulica Plug & Play", 2014.
- [33] V. K. Remya, P. Parthiban, V. Ansal, y B. Chitti Babu, "Dynamic voltage restorer (DVR) –areview", *Journal of Green Engineering*, vol. 8, núm. 4. River Publishers, pp. 519–572, el 1 de octubre de 2018. doi: 10.13052/jge1904-4720.844.
- [34] C. Zhan, C. Fitzer, V. K. Ramachandaramurthy, A. Arulampalam, M. Barnes, y N. Jenkins, "Software phase-locked loop applied to dynamic voltage restorer (DVR)", en *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, 2001, pp. 1033–1038 vol.3. doi: 10.1109/PESW.2001.917210.
- [35] L. Castillo Barvo, D. Alejandro Ossa Urrea, L. Fernanda Camargo Sánchez, y J. Arley González Vásquez Oscar Fabio Vélez Cano Jhon Cristian Giraldo, "Diagnóstico de la calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia 2021", 2021.
- [36] Energía Estratégica, "Enel fortalece alianzas para mejorar el servicio de energía en Bogotá y Cundinamarca - Energía Estratégica". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.energiaestrategica.com/enel-fortalece-alianzas-para-mejorar-el-servicio-de-energia-en-bogota-y-cundinamarca/>
- [37] D. F. Paris Valencia y others, "Simulación y análisis de los diferentes tipos de Sags producidos en sistema trifásicos de distribución", 2004.

- [38] A. F. Salazar Jiménez y others, “Guía metodológica para el análisis de hundimientos de tensión en el sistema de distribución de la CHEC”, 2015.
- [39] L. F. Ccama Juño, “Análisis comparativo del control de modulación de un restaurador dinámico de voltaje monofásico para la determinación de armónicos”, 2022.
- [40] O. Viktorin, J. Driesen, y R. Belmans, “Shunt-connected dynamic voltage restorer with decoupling inductors”, en *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.*, 2004, pp. 679–682 vol.2. doi: 10.1109/PSCE.2004.1397584.
- [41] J. M. Asanza Moreira, M. I. Quimis Quim\`i, y others, “Diseño del control y simulación de un restaurador dinámico de voltaje trifásico”, ESPOL. FIEC, 2018.
- [42] L. F. Ccama Juño, “Análisis comparativo del control de modulación de un restaurador dinámico de voltaje monofásico para la determinación de armónicos”, 2022.
- [43] S. Naetiladdanon, “Voltage sag compensation performance by DSTATCOM with series inductor and energy storage”, en *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007.* doi: 10.1109/PEDS.2007.4487755.
- [44] V. Kaura y V. Blasko, “Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions”, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 33, núm. 1, 1997, doi: 10.1109/28.567077.
- [45] Federico Miyara, “PLL LAZOS DE FIJACIÓN DE FASE”, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, 2005.
- [46] G. Bianchi, *Phase-Locked Loop Synthesizer Simulation*. McGraw Hill LLC, 2005.
- [47] W. Y. Svrcek, D. P. Mahoney, y B. R. Young, “A Real-Time Approach to Process Control Third Edition”, 2014.
- [48] B. P. Ganthia, S. Mohanty, P. K. Rana, y P. K. Sahu, “Compensation of voltage sag using DVR with PI controller”, en *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, 2016. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755068.

- [49] A. Hameed Soomro, A. Sattar Larik, M. Ahmed Mahar, A. Ali Sahito, y I. Ahmed Sohu, "Simulation-based Analysis of a Dynamic Voltage Restorer under Different Voltage Sags with the Utilization of a PI Controller", 2020. [En línea]. Disponible en: www.etasr.com
- [50] J. C. Paredes Acosta, M. X. Moyano Pinos, y E. R. Serrano Veloz, "Análisis, diseño e implementación de un restaurador dinámico de voltaje (dvr) basado en un convertidor trifásico modulado por ancho de pulso con la técnica de vector espacial (svpwm) controlado por DSP", Escuela superior politécnica del Litoral, Guayaquil, 2009.
- [51] A. R. Vargas Serrano, "Diseño e implementación de un prototipo de inversor trifásico orientado a redes de distribución", Santiago, abr. 2010. Consultado: el 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103945/cf-vargas_as.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [52] J. Gala García, "ANÁLISIS Y DIMENSIONADO DE LOS CONVERTIDORES CC/CA ", UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, Valladolid, 2022.
- [53] Omar Antonio Lara, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RESTAURADOR DINÁMICO DE VOLTAJE (DVR) SOPORTADO POR PANELES SOLARES", INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO, Madero, Tamaulipas, 2022.
- [54] J. C. Paredes Acosta, M. X. Moyano Pinos, y E. R. Serrano Veloz, "Análisis, diseño e implementación de un restaurador dinámico de voltaje (dvr) basado en un convertidor trifásico modulado por ancho de pulso con la técnica de vector espacial (svpwm) controlado por DSP", Escuela superior politécnica del Litoral, Guayaquil, 2009.
- [55] Mathworks, "Simulink - MATLAB". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>
- [56] Mathworks, "Specialized Power Systems - MATLAB & Simulink". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/specialized-power-systems.html>
- [57] Mathworks, "Sistemas de electrificación con MATLAB, Simulink y Simscape". Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/solutions/electrification.html>

- [58] Mathworks, “Simscape Electrical - MATLAB”. Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>
- [59] Mathworks, “Three-phase voltage source with programmable time variation of amplitude, phase, frequency, and harmonics - Simulink”. Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/threephaseprogrammablevoltage.html>
- [60] CREG. Comisión de Regulación de Energía y Gas, “Resolución CREG 024 de 2005”, *Resolución CREG-024*, 2005.
- [61] M. Del Rocio Ricardez-Trejo, C. Gutierrez-Martinez, J. A. Torres-Fortiz, y J. Meza-Perez, “Modeling and simulation of phase-locked loops (PLL) microwave generators using Matlab/Simulink® basic blocks”, en *2017 IEEE URUCON, URUCON 2017*, 2017. doi: 10.1109/URUCON.2017.8171854.
- [62] C. J. O'Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin, y J. L. Kirtley, “A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: Dq0, Clarke, and Park”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, núm. 4, 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2941175.
- [63] Mathworks, “Clarke and Park Transforms - MATLAB & Simulink”. Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/solutions/electrification/clarke-and-park-transforms.html>
- [64] S. Ali, I. Setiawan, y S. Handoko, “Design and Performance Test of Three Phased Synchronous Reference Frame-Phase Locked Loop (SRF-PLL) using DSPIC30F4011”, en *Proceedings - 2018 5th International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering, ICITACEE 2018*, 2018. doi: 10.1109/ICITACEE.2018.8576978.
- [65] I. Setiawan, M. Facta, A. Priyadi, y M. H. Purnomo, “Comparison of three popular PLL schemes under balanced and unbalanced grid voltage conditions”, en *Proceedings of 2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering: Empowering Technology for Better Future, ICITEE 2016*, 2017. doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863282.
- [66] Mathworks, “Simple 6-Pulse HVDC Transmission System - MATLAB & Simulink”. Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en:

<https://la.mathworks.com/help/sps/ug/simple-6-pulse-hvdc-transmission-system.html>

- [67] Mathworks, “Generate pulses for PWM-controlled 2-level converter - Simulink”. Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pwmgenerator2level.html>
- [68] Mathworks, “Implement three-phase two-level power converter - Simulink”. Consultado: el 12 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/twolevelconverter.html>