



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN PARQUES EÓLICOS:
ESTUDIO EN LA CENTRAL EÓLICA HUASCACHACA**

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

AUTORES: ELVIS FERNANDO GÓMEZ AGUILAR

LUIS MIGUEL RIVERA ORELLANA

TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE, MGTR.

Cuenca – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Elvis Fernando Gómez Aguilar con documento de identificación N° 0105888200 y Luis Miguel Rivera Orellana con documento de identificación N° 0106809411; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 15 de Agosto del 2024

Atentamente,



Elvis Fernando Gómez Aguilar

0105888200



firmado electrónicamente por:
LUIS MIGUEL RIVERA
ORELLANA

Luis Miguel Rivera Orellana

0106809411

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA**

Nosotros, Elvis Fernando Gómez Aguilar con documento de identificación N° 0105888200 y Luis Miguel Rivera Orellana con documento de identificación N° 0106809411, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Análisis de calidad de energía en parques eólicos: Estudio en la Central Eólica Huascachaca”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de Agosto del 2024

Atentamente,

Elvis Fernando Gómez Aguilar

0105888200



Luis Miguel Rivera Orellana

0106809411

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N° 0102257482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN PARQUES EÓLICOS: ESTUDIO EN LA CENTRAL EÓLICA HUASCACHACA”, realizado por Elvis Fernando Gómez Aguilar con documento de identificación N° 0105888200 y por Luis Miguel Rivera Orellana con documento de identificación N° 0106809411, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de Agosto del 2024

Atentamente,



FLAVIO ALFREDO
QUIZHPI PALOMEQUE

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque, Mgtr.

0102257482

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a aquellas personas que, cada día de mi vida, me han apoyado y guiado a lo largo de este largo camino llamado vida. Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes, desde el momento en que comencé a estudiar en la universidad, nunca me han dejado solo. Ellos han sacrificado mucho tiempo y dedicación, y espero poder algún día recompensarles por todo lo que han hecho. Son los mejores padres del mundo. También agradezco a mi hermana, en quien siempre puedo confiar y apoyarme. Además, quiero dar las gracias a todas las personas que siempre me han aconsejado en cada momento de mi vida. Estoy muy feliz de tener esta hermosa profesión; desde el momento en que conocí la electricidad, supe que quería dedicarme a ello. A todas las personas que han formado parte de mi proceso, les estaré eternamente agradecido.

Elvis Fernando Gómez Aguilar

El presente proyecto de titulación está dedicado con profundo agradecimiento a las personas que han sido pilares fundamentales en mi camino académico y personal.

En primer lugar, quiero expresar mi sincera gratitud a mi madre, cuyo inquebrantable apoyo y estímulo han sido la fuerza motriz detrás de mi carrera. Su dedicación y sacrificio han sido una fuente inagotable de inspiración. Agradezco a mis hermanos, quienes han compartido conmigo tanto los momentos difíciles como los triunfos, brindándome un apoyo incondicional. Asimismo, reconozco el respaldo continuo de mi padre, cuya confianza en mis habilidades ha sido fundamental para mi desarrollo académico. A mis hermanos scout, les agradezco por haber influido positivamente en mi madurez mental, proporcionándome valiosas lecciones de vida.

En resumen, agradezco a todas estas personas que, de manera incondicional, creyeron en mí y me alentaron a perseguir mis metas. Este logro no solo es mío, sino también de aquellos que han sido parte integral de mi viaje. Su confianza y apoyo han sido un regalo invaluable que siempre atesoraré.

Luis Miguel Rivera Orellana

RESUMEN

El presente trabajo de titulación, desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana, se centra en el análisis de la calidad de energía en parques eólicos, con especial énfasis en la Central Eólica Huascachaca. El objetivo principal es identificar y examinar los problemas asociados con la calidad de la energía generada, considerando normativas y estándares nacionales e internacionales como IEC 61400-21, ARCERNNR-002/20, ANSIC84.1. Así mismo busca mediante simulaciones proporcionar conclusiones claras y proporcionar recomendaciones de mejoras para la calidad de energía.

El análisis de la calidad de energía es fundamental para identificar y solucionar problemas relacionados con la calidad del suministro eléctrico. Algunos de los principales problemas que pueden afectar la calidad de energía son las caídas de voltaje, la presencia de armónicos y las fluctuaciones de voltaje (flicker). Estos problemas pueden ser ocasionados por diversos factores. Como el uso de equipos electrónicos, las variaciones en la demanda de potencia y las maniobras de conexión y desconexión en la red eléctrica. Las empresas encargadas de la transmisión y distribución de energía eléctrica deben monitorear constantemente los parámetros de calidad de energía y tomar las medidas necesarias para mantenerlos dentro de los rangos adecuados. Para la identificación y análisis de problemas de calidad de energía, se pueden utilizar herramientas de simulación como el software "DigSILENT PowerFactory". En este caso, se propone emplear dicho programa para simular el comportamiento de la central eólica Huascachaca. El objetivo de esta simulación es identificar y evaluar los efectos de los armónicos y técnicas de mejoramiento de calidad de energía de acuerdo con las normativas previamente mencionadas. Las simulaciones realizadas permitirán proporcionar un análisis detallado de la central eólica, identificando problemas y proponiendo soluciones.

Este trabajo se centra en un análisis exhaustivo de la calidad de energía en parques eólicos, además de proponer soluciones prácticas y viables para mejorar su desempeño operativo y contribuir al desarrollo sostenible de la energía eólica.

ABSTRACT

This thesis, developed at the Universidad Politécnica Salesiana, focuses on the analysis of power quality in wind farms, with a special emphasis on the Huascachaca Wind Farm. The main objective is to identify and examine the problems associated with the quality of the generated power, considering national and international standards such as IEC 61400-21, ARCERNR-002/20, and ANSI C84.1. Additionally, through simulations, it aims to provide clear conclusions and recommendations for improving power quality.

Analyzing power quality is essential for identifying and addressing issues related to the quality of the electrical supply. Some of the main problems that can affect power quality include voltage sags, the presence of harmonics, and voltage fluctuations (flicker). These issues can be caused by various factors such as the use of electronic equipment, variations in power demand, and connection and disconnection maneuvers in the electrical grid. Companies responsible for the transmission and distribution of electrical energy must constantly monitor power quality parameters and take the necessary measures to maintain them within appropriate ranges.

To identify and analyze power quality issues, simulation tools like the "DigSILENT PowerFactory" software can be used. In this case, it is proposed to employ this program to simulate the behavior of the Huascachaca wind farm. The objective of this simulation is to identify and evaluate the effects of harmonics and power quality improvement techniques in accordance with the aforementioned standards. The simulations carried out will provide a detailed analysis of the wind farm, identifying problems and proposing solutions.

This work focuses on a comprehensive analysis of power quality in wind farms, as well as proposing practical and viable solutions to improve their operational performance and contribute to the sustainable development of wind energy.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	I
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	II
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
1 Central Eólica Huascachca	4
1.1 Introducción	4
1.2 Características técnicas del Parque Eólico Huascachaca	4
1.2.1 Ubicación	4
1.2.2 Historia	5
1.2.3 Localización de los Aerogeneradores	6
1.2.4 Datos Técnicos	7
1.2.5 Aerogeneradores	7
1.2.5.1 Descripción de Componentes del Generador Eólico	8
1.2.5.2 Curva de Potencia	10
1.2.5.3 Control Pitch y Velocidad Variable	11
1.2.6 Circuito Colector de Medio Voltaje	11
1.2.6.1 Transformadores	12

1.2.6.2	Líneas de Medio Voltaje	12
1.2.7	SCADA	13
1.2.8	Impacto Ambiental	13
1.3	Subestaciones de Seccionamiento y Transformación	14
1.3.1	Subestación Uchucay	14
1.3.2	Subestación La Paz	15
1.3.3	Línea de Transmisión	16
1.4	Energía Eólica en el Ecuador	16
1.4.1	SNI(Sistema Nacional Interconectado)	17
1.4.2	Proyectos Eólicos en el Ecuador	17
2	Parámetros para Análisis de Calidad de Energía	18
2.1	Normativas y Estándares	18
2.1.1	ARCERNNR-002/20	18
2.1.2	Normativa IEC 61400-21	19
2.1.3	ANSI C84.1	20
2.2	Problemas de Parques eólicos conectados a la red	21
2.2.1	Niveles de Voltaje	21
2.2.2	Fluctuaciones de voltaje y flicker	22
2.2.2.1	Corte de Viento	24
2.2.2.2	Sombra de torre	24
2.2.3	Armónicos	24
2.2.4	Frecuencia de la red	26
2.2.5	Potencia Activa	26
2.2.6	Factor de Planta	26
2.3	Análisis y Mitigación del Flicker en Sistemas Eléctricos	27
2.3.1	Factores que Causan el Flicker	27
2.3.2	Estrategias para Mitigar el Flicker	28
2.3.3	Emisiones de Flicker según Normativa IEC 61400-21	28
2.3.4	Parámetros para Evaluar el Flicker	28
2.3.5	Cambios Rápidos de Voltaje (RVC)	29
2.3.6	Normativa de Diseño para Aerogeneradores	29
2.4	Equipos para mediciones de calidad de energía	30
2.4.1	Analizadores de Calidad (<i>PQA</i>)	30
2.4.2	Analizadores de Armónicos	30
2.5	DigSILENT PowerFactory ®	31
3	Resultados y Simulación	32
3.1	Datos para simulación	33
3.1.1	Obtención de datos	33

3.1.2	Datos de la Central Eólica Huascachaca	33
3.1.3	Normativa IEC 61400-21	34
3.1.4	Normativa ARCERNNR 002/20	34
3.1.5	Normativa ANSI C84.1	35
3.2	Simulación Parque Eólico Huascachaca	35
3.3	Operación Continua de aerogenerador	37
3.3.1	Variaciones de voltaje	39
3.4	Arranque de aerogenerador	39
3.4.1	Fases del arranque y condiciones óptimas	40
3.4.1.1	Arranque y Operación de Aerogeneradores según IEC 61400-21	40
3.4.1.2	Sistemas de Control en el Arranque de un Aerogene- rador	41
3.4.1.3	Condiciones Óptimas y Procedimiento de Arranque	41
3.5	Análisis y Propuestas de Mejoras	42
3.5.1	Análisis de la simulación	42
3.5.2	Métodos y Técnicas	44
3.5.3	Filtro de Armónicos	44
3.5.3.1	Tipos de Filtros	45
3.5.3.2	Armónicos Recomendados para Mitigar	48
3.5.3.3	Sintonización del Filtro	49
3.5.3.4	Simulación de Filtros de Armónicos en PowerFactory	51
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
4.1	Conclusiones	54
4.2	Recomendaciones	55
	ANEXOS	57
	A Información obtenida del ARC	58
	B Esquema en el programa Power Factory	60
	C Parque eólico: Minas de Huascachaca	64
	D Resultados Simulación	71
	BIBLIOGRAFÍA	79

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Ubicación del Parque Eólico Huascachaca.	5
1.2	Parque Eólico Huascachaca Compuesto por dos ejes.	7
1.3	Partes de un Aerogenerador modelo DEW D4000-148 Direct-Drive [1]	9
1.4	Curva de Potencia del Aerogenerador.	10
1.5	Control Pitch y Velocidad Variable. Fuente: [2]	11
1.6	Circuito Colector de Medio voltaje 34.5kV [3]	12
1.7	Subestación de transformación Uchucay [3]	14
1.8	Subestación de Seccionamiento La Paz [3]	16
2.1	Variaciones de voltaje a la que se puede someter una onda Sinusoidal.	22
2.2	Fluctuación de Voltaje - Flicker. Fuente : [4]	23
2.3	Representación de Onda Sinusoidal y Armónicos.	25
2.4	Conexión del Analizador de 3 fases en Sistemas de Distribución. [5]	30
3.1	Diagrama Unifilar del Parque Eólico Huascachaca	35
3.2	Voltaje de aerogenerador WTG ₁	37
3.3	Voltaje en la barra colectora que alimenta el transformador de 34,5 kV a 138 kV durante la operación a 2 MW.	38
3.4	Voltaje en la barra colectora que alimenta el transformador de 34,5 kV a 138 kV durante la operación a 3.57 MW.	38
3.5	Caídas de Voltaje de la Barra	39
3.6	Rampa de arranque generada por la simulación Fuente : Autor	40
3.7	Plot en el programa DigSilent referente al arranque del aerogenerador	42
3.8	Representación de armónicos sin filtro	52
3.9	Representación de armónicos con filtro	52
A.1	Especificaciones técnica de los aerogeneradores de la Central Eólica Huascachaca [6]	58
A.2	Curva de Potencia y Coeficiente de empuje de acuerdo al sitio de la instalación [6]	59
A.3	Interconexión SNI [6]	59
B.1	Diagrama Unifilar del PEMH en Power Factory	60

B.2	Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory Flujo de potencia FASE DE OPERACIÓN 2MW	61
B.3	Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory Flujo de potencia FASE DE OPERACIÓN 3.57MW	62
B.4	Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory Flujo de potencia FASE DE OPERACIÓN 4.0MW	63
C.1	Harmónicos simulados en PowerFactory	64
C.2	Harmónicos simulados en PowerFactory aplicando filtro de armónicos	65
C.3	Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory en el Quinto armónico	66
C.4	Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory en el Séptimo armónico	67
C.5	Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory en el onceavo armónico	68
C.6	Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory en el Quinceavo armónico	69
C.7	Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory en el cuadragésimo tercero armónico	70
D.1	Simulación arranque aerogenerador, obtención de voltaje y corriente.	71
D.2	Valores de voltaje en arranque de aerogenerador, valor estabilización 0,43kV.	72
D.3	Valores ampliados de voltaje en arranque de aerogenerador, valor es- tabilización 0,43kV.	73
D.4	Rampa de arranque del aerogenerador	74
D.5	Caída de voltaje en la barra 2	75

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Estaciones de Medición [7]	5
1.2	Datos técnicos [7]	7
1.3	Especificaciones técnicas de los modelos de aerogeneradores que operan la Central Eólica Huascachaca [7]	8
1.4	Especificaciones Constructivas de los modelos de aerogeneradores que operan la Central Eólica Huascachaca [7]	8
1.5	Especificaciones Técnicas de los Transformadores [7]	12
1.6	Longitudes Líneas Uchucay [7]	13
1.7	Longitudes Líneas Yuluc [7]	13
1.8	Datos técnicos [3,8]	15
2.1	Limites de de niveles de voltaje establecidos por ARCERNNR 002/20 [9]	22
3.1	Información obtenida de la normativa IEC 61400-21. [10]	34
3.2	Información obtenida de la normativa ANSI C84.1. [11]	35
3.3	Resultados de la Simulación a 4MW sin Operaciones de conexión [7]	36
3.4	Resultados obtenidos en simulación referente a arranque de motor	43
3.5	Resultados Obtenidos de la simulación de armónicos	51

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, la abundancia de centrales hidroeléctricas ha sido la principal fuente de energía, sin embargo, la disponibilidad de energía puede ser un problema durante periodos de escasez. La energía eólica se presenta como una alternativa renovable y sostenible que podría mitigar estos desafíos, ofreciendo una oportunidad para diversificar la matriz energética del país y reducir el impacto ambiental asociado con otras fuentes de energía [12].

Desde sus inicios hace más de 100 años, la electricidad ha enfrentado desafíos constantes en cuanto a su calidad debido a la diversidad de componentes electrónicos, incluyendo aquellos cada vez más pequeños que son susceptibles a perturbaciones en la calidad de energía. De hecho, muchos equipos electrónicos pueden generar sus propios problemas de calidad de energía. Por lo tanto, la preocupación por la calidad de energía ha sido una constante en la historia de la electricidad desde su surgimiento [13].

La central eólica Huascachaca desempeña un papel esencial en la generación de energía sostenible, aprovechando eficientemente la energía cinética del viento. A pesar de los beneficios inherentes a esta tecnología, la mala calidad de energía emerge como un desafío que requiere una atención minuciosa para mejorar la eficiencia y calidad del sistema. El proyecto eólico Minas de Huascachaca (PEMH) con una capacidad instalada de 50 MW comprende unos de los parques eólicos mas grandes del Ecuador es la cuarta central eólica del país. Esta ubicada en los limites de la Provincia de Loja con Azuay en la Parroquia San Sebastián de Yuluc [14].

El proceso de generación de energía eólica implica la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de aerogeneradores. Esta energía eléctrica, inicialmente continua, se transforma en corriente alterna mediante inversores ubicados en las torres eólicas, los cuales pueden generar armónicos que se introducen en la red eléctrica. Además, otros equipos como máquinas eléctricas y

sistemas de control pueden provocar perturbaciones en los niveles de voltaje de la red, afectando así la calidad de la energía suministrada [15]. La energía eólica comprende una de los grandes avances en cuanto energías renovables se habla, además los distintos parques eólicos implementan el uso de las nuevas tecnologías que mejoran la calidad de la energía dentro de las centrales. Aunque la energía eólica se considera una de las fuentes de energía más costosas en términos de fabricación de aerogeneradores, lo que implica costos elevados tanto en la adquisición de los componentes como en el proceso de ensamblaje. Además, los aerogeneradores son estructuras enormes que presentan desafíos significativos en cuanto a transporte e instalación. Estos factores influyen en el costo total de la energía eólica y pueden representar una barrera para su implementación en ciertas regiones [16].

La mala calidad de energía produce perturbaciones que afectan los equipos eléctricos, la eficiencia del sistema y la satisfacción de los usuarios implica consecuencias económicas y técnicas. Las interrupciones en el suministro eléctrico e inestabilidades se manifiestan como resultados directos e indirectos, subrayando la imperiosa necesidad de fortalecer la estabilidad del sistema de generación eólica. Incluso los sistemas eléctricos más avanzados del mundo no siempre son capaces de garantizar los niveles adecuados de disponibilidad de energía para satisfacer las demandas actuales. De hecho, los problemas más comunes en términos de calidad de energía incluyen caídas de voltaje, interrupciones breves y prolongadas, picos de voltaje, distorsión armónica, fluctuaciones de voltaje, ruido eléctrico y desequilibrio de voltaje. Estos desafíos representan obstáculos significativos para garantizar un suministro eléctrico estable y confiable [17].

El objetivo principal de este estudio es abordar estos desafíos mediante la identificación y mitigación de perturbaciones específicas en la central eólica Huasachaca. Para asegurar la validez y aplicabilidad de las soluciones propuestas, se recurrirá a normativas y estándares internacionales y nacionales. Entre ellos, destaca la norma internacional IEC 61400-21, diseñada para evaluar la calidad de energía en sistemas eólicos, así como normativas nacionales que establecen límites precisos para armónicos y fluctuaciones de voltaje [10], [18], [11].

OBJETIVOS

Objetivo General

El objetivo de este estudio es analizar y verificar los parámetros de calidad de energía en una central eólica, siguiendo normativas y estándares. El estudio busca reforzar la fiabilidad y estabilidad del sistema y promover prácticas que mejoren la calidad de la energía en parques eólicos en general, a través del caso de estudio Huasachaca.

Objetivos Específicos

- Definir y Recopilar información en base a la normativa, para el caso de estudio Huasachaca.
- Análisis de la información, caso de estudio Huasachaca comparando con la normativa recopilada.
- Describir y analizar los posibles métodos y técnicas que permitan mejorar los parámetros de calidad de energía en el parque eólico Huasachaca.

CAPÍTULO 1

Central Eólica Huascachca

1.1. Introducción

Ubicada en la provincia de Loja, la Central Eólica Huascachaca representa un hito en el compromiso de Ecuador hacia la diversificación de sus fuentes energéticas. Integrada por 14 aerogeneradores de 4 MW cada uno, esta instalación desempeña un papel significativo al suministrar aproximadamente 50 MW al sistema eléctrico nacional. En este contexto, se examinarán minuciosamente las características técnicas y de construcción de este parque eólico, cuya operatividad total del 100 % se alcanzó en marzo de 2023.

El Proyecto de energía eólica Minas de Huascachaca tiene como propósito proporcionar energía al sector eléctrico de Ecuador mediante una nueva fuente renovable, con la finalidad de disminuir la dependencia del país de la energía hidroeléctrica. Enfocado en diversificar la matriz energética, el PEMH integra la energía eólica, una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad del sistema eléctrico ante posibles fluctuaciones o escasez en la generación hidroeléctrica.

1.2. Características técnicas del Parque Eólico Huascachaca

1.2.1. Ubicación

El parque eólico Huascachaca, ubicado en la provincia de Loja y en las proximidades de la parroquia de San Sebastián de Yuluc a 1100m sobre el nivel del Mar,

como se puede observar en la figura 1.1, inició sus operaciones comerciales el 31 de marzo de 2023, este parque eólico, ostenta el título de ser el parque eólico más grande en Ecuador, cuenta con una capacidad instalada de 50 MW. Este logro se ha alcanzado gracias a la incorporación de 14 aerogeneradores al sistema eléctrico nacional, representando una inversión total de 90 millones de dólares en su desarrollo [14].



Figura 1.1: Ubicación del Parque Eólico Huascachaca.

1.2.2. Historia

En 2004, ELECAUSTRO adquirió los derechos de uso de los estudios de pre-factibilidad del Proyecto Eólico Minas de Huascachaca (PEMH). Fue durante este tiempo cuando se reveló el potencial eólico de la zona que abarca las mesetas de Yuluc y Uchucay. En consecuencia, se tomó la decisión de llevar a cabo nuevas mediciones utilizando equipos especializados y certificados [6], los resultados obtenidos de la medición se presentan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Estaciones de Medición [7]

N°	Nombre	Coordenadas UTM	Fecha Instalación	Fecha Desmontajes
T001	Uchucay 40 m	681.381; 9 629.250	Enero 2009	Mayo 2012
T002	Uchucay 50 m	681.203; 9 628.043	Enero 2009	Octubre 2018
T003	Yuluc 50 m	679.447; 9 628.666	Enero 2009	Operativa
T007	Yuluc 80 m	679.448; 9 628.552	Mayo 2012	Operativa

En el 2011 durante un informe acerca del PEMH luego de obtener las mediciones se propuso que el proyecto contara con alrededor de 25 aerogeneradores con una potencia nominal de 2MW para contar con una potencia instalada de 50MW además se proponía una altura de torre de 68.5 metros y un diámetro de rotor de 92 metros, para los aerogeneradores, se tendrían que incorporar transformadores de potencia de 2.2 MVA, 690/36kV utilizando celdas de protección para la etapa de transmisión se tenía planeada que la subestación Uchucay cuente con 2 transformadores trifásicos de 33.3 MVA para elevar el voltaje de 36 a 138 KV [14].

En 2019, se modificaron los planes originales para la construcción de un parque eólico que inicialmente contemplaba la instalación de 15 aerogeneradores de 84 metros de altura, cada uno con una potencia nominal de 3.465 MW. Sin embargo, en el transcurso de estos estudios, se llevaron a cabo ajustes significativos en la configuración del parque [19].

Finalmente, en 2021, se tomó la decisión de optimizar el diseño del parque eólico, resultando en la instalación de 14 aerogeneradores de mayor envergadura. Estos nuevos aerogeneradores alcanzan una altura de 90 metros y están equipados con torres que poseen una potencia nominal de 4 MW cada una [19]. Este rediseño no solo implica una mayor altura de las estructuras, sino también un aumento significativo en la capacidad de generación de energía de cada torre. Esto refleja la evolución y adaptación continua de los proyectos energéticos a las condiciones y tecnologías más recientes.

1.2.3. Localización de los Aerogeneradores

La central eólica Huascachaca se encuentra a 84 km de la ciudad de Cuenca y está dividida en dos ejes, como se visualiza en la figura 1.2. En el hemisferio oriental se encuentra el eje Uchucay, que consta de 8 aerogeneradores. Por otro lado, en el hemisferio occidental se ubica el eje Yuluc, compuesto por 6 aerogeneradores [19]. Estos ejes para mayor identificación se dividieron en Uchucay 1 y 2 los mismos que tienen 4 aerogeneradores cada uno, Yuluc 1 y 2 que se dividen en 3 aerogeneradores cada uno. La importancia de la división de áreas es para mantener un orden dentro del sistema colector de medio voltaje, como se ve en anexo A.3.

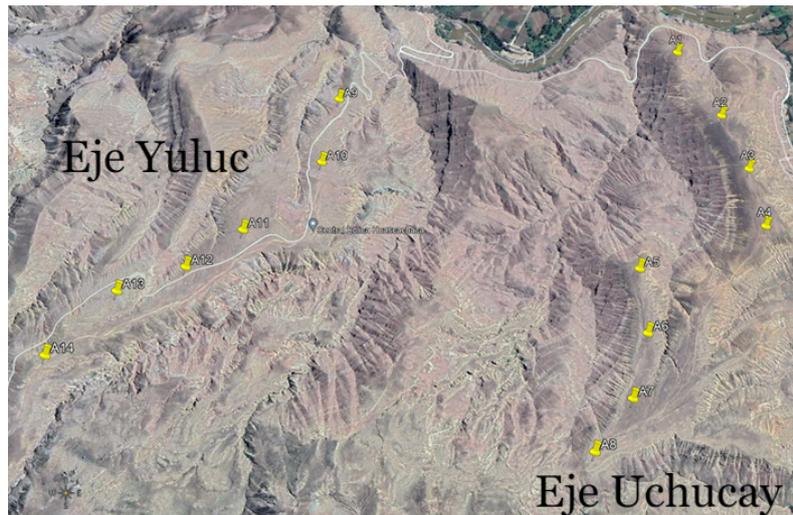


Figura 1.2: Parque Eólico Huascachaca Compuesto por dos ejes.

1.2.4. Datos Técnicos

A continuación, en la tabla 1.2, se presentan los datos técnicos detallados de los componentes principales de la central eólica Huascachaca, proporcionando una visión integral de su capacidad y eficiencia operativa.

Tabla 1.2: Datos técnicos [7]

Característica	Detalle
Capacidad Instalada	50 MW
Número de Turbinas Eólicas	14
Modelo de Turbinas	DEW D4000-148 Direct-Drive
Capacidad por Turbina	4 MW
Diámetro del Rotor	148 metros
Altura del Buje	90 metros
Velocidad de Conexión	2.5 m/s
Velocidad de Desconexión	20 m/s
Producción Anual de Energía	130 GWh
Voltaje Nominal	690 V

1.2.5. Aerogeneradores

La central eólica Huascachaca ha utilizado los aerogeneradores modelo DEW D4000-148 Direct-Drive, los cuales fueron suministrados por la empresa fabricante china Dongdang Electric CO. Ltd. Estos aerogeneradores son reconocidos por su eficiencia y confiabilidad en la generación de energía eólica [6]. En la tabla 1.3 se presenta las especificaciones técnicas de los modelos de aerogeneradores que operan la Central Eólica Huascachaca.

Tabla 1.3: Especificaciones técnicas de los modelos de aerogeneradores que operan la Central Eólica Huascachaca [7]

Especificaciones Técnicas del Aerogenerador			
Potencia nominal	4MW	Control de Potencia	Pitch y velocidad variable
Voltaje de Línea	690V	Temperatura operativa	-10° a 40°C
Velocidad del Viento Nominal	11, 5m/s	Clase de Protección	IP54
Velocidad del Viento de arranque	2, 5m/s	Factor de Potencia	0,95
Velocidad de parada del Viento	20m/s	Clase de Viento	IEC S

El modelo DEW D4000-148 Direct-Drive es una tecnología avanzada que se caracteriza por su diseño robusto y su capacidad para aprovechar de manera óptima la energía del viento. Con una potencia nominal de 3.570MW y un diámetro de rotor de 148 metros, estos aerogeneradores son capaces de capturar una mayor cantidad de energía eólica y convertirla en electricidad. La elección de estos aerogeneradores para la construcción de la central eólica Huascachaca demuestra el compromiso con la utilización de tecnologías de última generación en el campo de la energía renovable. Además, la asociación con Dongdang Electric CO. Ltd., una reconocida empresa fabricante de aerogeneradores, garantiza la calidad y el desempeño de los equipos utilizados en la central. En la tabla 1.4 se presenta las especificaciones constructivas de los modelos de aerogeneradores que operan en la central eólica Huascachaca.

Tabla 1.4: Especificaciones Constructivas de los modelos de aerogeneradores que operan la Central Eólica Huascachaca [7]

Características constructivas de los aerogeneradores			
Rotor		Palas	
Díámetro	148m	Longitud	72,5m
Área de barrido	17.203m ²	Perfil	DEC
Velocidad de giro	5,8-12,375 rpm	Material	GFRP
Torre			
Tipo	Torre Tubular tipo cono	Altura	90m

1.2.5.1. Descripción de Componentes del Generador Eólico

Los generadores eólicos son complejos sistemas de ingeniería diseñados para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica utilizable. Estos sistemas se componen de diversos componentes interdependientes que trabajan en conjunto para optimizar la captación y transformación de la energía eólica. En la Figura 1.3, se presentan los principales componentes de un generador eólico.

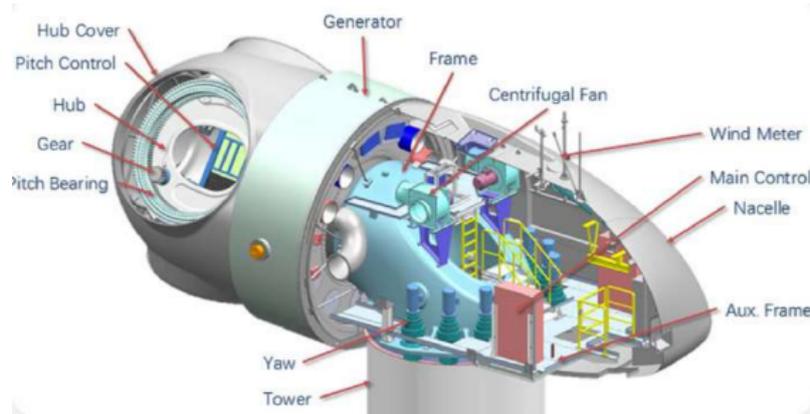


Figura 1.3: Partes de un Aerogenerador modelo DEW D4000-148 Direct-Drive [1]

- **HUB COVER (Cubierta del buje):** Protege el buje, punto central donde se montan las palas, asegurando su integridad frente a elementos externos que podrían afectar su rendimiento.
- **PITCH CABIN (Cabina de paso):** Contiene el sistema para ajustar el ángulo de las palas, optimizando su rendimiento según las condiciones del viento.
- **HUB (Buje):** Conecta las palas al eje principal del generador, transfiriendo eficientemente la energía cinética del viento al generador.
- **PITCH DRIVER (Controlador de paso):** Ajusta dinámicamente el ángulo de las palas para maximizar la captura de energía eólica.
- **PITCH BEARING (Rodamiento de paso):** Facilita el movimiento rotativo del buje y las palas ajustables para optimizar la producción de energía.
- **YAW DRIVER (Controlador de orientación):** Orienta el generador para mantener las palas perpendiculares al viento, maximizando la eficiencia en la captura de energía.
- **TOWER (Torre):** Estructura principal que sostiene y eleva el generador a una altura óptima para capturar eficazmente el viento.
- **GENERATOR (Generador):** Convierte la energía mecánica de las palas en energía eléctrica mediante principios electromagnéticos.
- **MAIN FRAME (Estructura principal):** Sostiene y conecta todos los componentes esenciales del generador, proporcionando la integridad estructural necesaria.

- **CENTRIFUGAL FAN (Ventilador centrífugo):** Refrigerar los componentes internos del generador para evitar el sobrecalentamiento durante la operación.
- **LIGHTNING ROD (Pararrayos):** Protege el generador contra descargas atmosféricas, asegurando la seguridad de los componentes electrónicos.
- **CONTROL CABIN (Cabina de control):** Alberga los sistemas de monitoreo y control del generador para asegurar su funcionamiento óptimo y seguro.
- **NACELLE COVER (Cubierta de la góndola):** Protege la maquinaria interna del generador contra condiciones climáticas adversas, asegurando su operación continua y confiable.
- **REAR FRAME (Estructura trasera):** Proporciona soporte adicional y protección en la parte posterior de la góndola, reforzando la estabilidad del generador.

1.2.5.2. Curva de Potencia

En la figura 1.4, se presenta la curva de potencia que ilustra el rendimiento del aerogenerador. Este dispositivo suele iniciar su funcionamiento a una velocidad de viento de 2.5 m/s y alcanza su máxima eficiencia antes de activar la función de corte a una velocidad de 20 m/s.

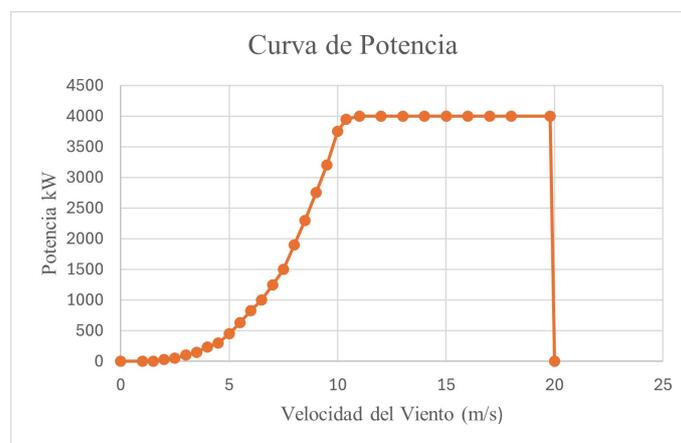


Figura 1.4: Curva de Potencia del Aerogenerador.

La gráfica 1.4 será utilizada en el programa DigSilent PowerFactory para la simulación de un aerogenerador, considerando las mismas especificaciones técnicas de los

aerogeneradores emplazados en la Central Eólica Huascachaca A.2. La curva de potencia de un aerogenerador es importante para determinar su rendimiento energético y su eficiencia. Además, proporciona un valor significativo en la estimación de los ingresos y en el diseño del parque eólico.

1.2.5.3. Control Pitch y Velocidad Variable

El control pitch funciona ajustando el ángulo de paso de la pala, lo mismo que permite que el perfil de la pala coincida con el ángulo de paso, Se modifica de manera similar durante la optimización cuando las velocidades del viento son mínimas. Cuando la velocidad del viento es muy alta, el control ajusta el ángulo de ataque para reducir la carga del rotor y, además, cumple la función de controlar el par de arranque [20], [2]. Mientras que la velocidad variable consiste en controlar la velocidad punta de la turbina, el mismo debe mantener en un valor óptimo el coeficiente de eficiencia utilizando algunos convertidores de potencia electrónicos [21], [2]. En la figura 1.5 se puede observar el proceso que conlleva el control pitch.

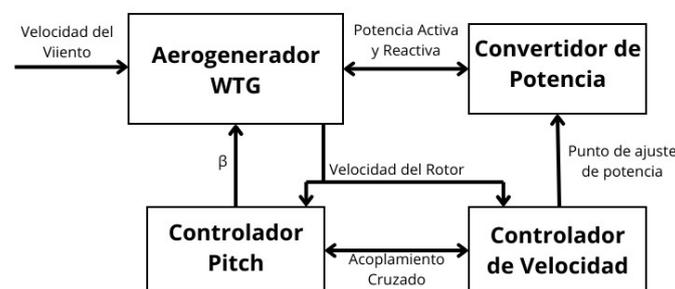


Figura 1.5: Control Pitch y Velocidad Variable. Fuente: [2]

1.2.6. Circuito Colector de Medio Voltaje

El sistema colector de medio voltaje está conformado por una red mixta que incluye segmentos subterráneos y aéreos, se puede visualizar en la figura 1.6 el circuito colector. Desde los aerogeneradores, por una red subterránea 690 V se dirigen a los transformadores de potencia, donde se eleva el voltaje a 34,5 kV. Este incremento permite el transporte eficiente de la energía a través de una línea aérea hacia la central eólica. Además, el sistema incluirá medidas esenciales como un sistema de puesta a tierra y la instalación de un cable de fibra óptica para funciones de comunicación y monitoreo 24 OPGW en paralelo al sistema colector de medio voltaje.

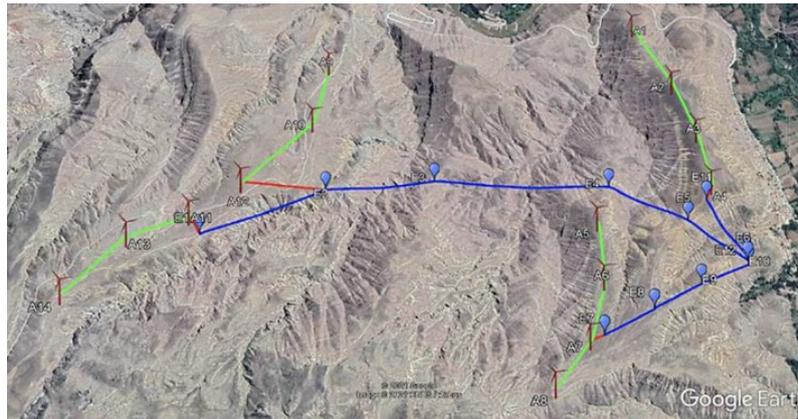


Figura 1.6: Circuito Colector de Medio voltaje 34.5kV [3]

1.2.6.1. Transformadores

Los transformadores de la central eólica Huascachaca, conectados en serie a los aerogeneradores para la red de medio voltaje, cumplen la función de transformar y transmitir energía hacia la central eólica Uchucay. En la tabla 1.5 se pueden observar los datos técnicos correspondientes.

Tabla 1.5: Especificaciones Técnicas de los Transformadores [7]

Especificaciones técnicas Transformador PEMH	
Alto Voltaje	34,5 kV
Bajo Voltaje	0,690 kV
Potencia Nominal	4,4 MVA
Voltaje de Cortocircuito	7 %
Configuración	Dyn11
Número de Fases	3
Perdidas en el Cobre	33 kW

1.2.6.2. Líneas de Medio Voltaje

El diseño del sistema colector del parque eólico Huascachaca, se han seleccionado diferentes tipos de conductores para las líneas de medio voltaje, según las características y requerimientos de cada zona. Para las líneas aéreas, se utilizará conductor de 477 MCM, mientras que para las líneas subterráneas se ha optado por cables XLPE de 30 kV. Estas líneas se dividen en diferentes zonas dentro del sistema colector, denominadas Uchucay 1, Uchucay 2, Yuluc 1 y Yuluc 2. A continuación en las tablas 1.6 y 1.7, se detallarán las longitudes específicas de los cables

y las características de cada zona, proporcionando una visión integral del diseño y la implementación de las líneas de medio voltaje en este proyecto.

Tabla 1.6: Longitudes Líneas Uchucay [7]

Líneas Uchucay 1		Líneas Uchucay 2	
Líneas Subterránea 2-5	0,41 km	Líneas Subterránea 11-14	0,33 km
Líneas Subterránea 5-7	0,31 km	Líneas Subterránea 14-16	0,37 km
Líneas Subterránea 7-9	0,40 km	Líneas Subterránea 16-18	0,35 km
Líneas Subterránea 9-Aérea	0,24 km	Líneas Subterránea 16-Aérea	0,14 km
Líneas Aérea	0,35 km	Líneas Aérea	0,90 km

Tabla 1.7: Longitudes Líneas Yuluc [7]

Líneas Yuluc 1		Líneas Yuluc 2	
Líneas Subterránea 20-22	0,42 km	Líneas Subterránea 29-31	0,4 km
Líneas Subterránea 22-24	0,4 km	Líneas Subterránea 27-29	0,6 km
Líneas Subterránea 24-Aérea	0,45 km	Líneas Subterránea 27-Aérea	0,43 km
Líneas Aérea	3,05 km	Líneas Aérea	2,50 km

1.2.7. SCADA

El control del parque eólico Huascachaca se realiza a través de un sistema SCADA que opera en conjunto con la subestación Uchucay. Este sistema integra Unidades de Transformación Remota (UTR) en cada aerogenerador, en los mástiles meteorológicos y en la propia subestación. La información recopilada por estos UTR se transmite mediante un cable de fibra óptica de 24 hilos, mencionado anteriormente, para su posterior recepción y análisis en la computadora central ubicada en la subestación Uchucay.

1.2.8. Impacto Ambiental

Los parques eólicos necesitan de grandes extensiones de terreno, cerca de 14 hectáreas ocupa el PEMH los alrededores de los mismo se ven afectados debido a la construcción y funcionamiento [22]. Para la construcción y puesta en funcionamiento se requirió la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental del mismo resultado que en la zona ya había cierto nivel de contaminación atmosférica por contaminantes en el aire y nivel de ruido ambiental. Además se realizaron estudios para las líneas de transmisión [23], [22].

La central eólica Huascachaca producirá la energía necesaria para abastecer 90,000 familias ecuatorianas, si bien estos son algunos beneficios económicos por el lado ambiental cerca de 7.300.000 galones de combustibles fósiles al año serán evitados, disminuyendo la producción de Dióxido de carbono, minimizando el impacto ambiental [6].

1.3. Subestaciones de Seccionamiento y Transformación

Las subestaciones de seccionamiento desempeñan un papel fundamental en los sistemas eléctricos de potencia, siendo ampliamente empleadas para operaciones y maniobras. Contribuyen esencialmente a la interconexión de circuitos, siendo una parte crucial en la estructura primordial del sistema. Por otro lado, las estaciones de transformación albergan imponentes transformadores que ajustan el voltaje según su aplicación en distribución o transmisión. En el caso de la distribución, se recurre comúnmente a transformadores que reducen el voltaje, mientras que, para la transmisión, se emplean transformadores diseñados para incrementar el voltaje.

1.3.1. Subestación Uchucay



Figura 1.7: Subestación de transformación Uchucay [3]

La Subestación Uchuca, ubicada en la provincia de Loja, en la figura 1.7 se puede observar dicha subestación, tiene como función principal incrementar el voltaje de 34.5 kV a 138 kV. Esto se logra a través de la interconexión de la subestación de seccionamiento La Paz. En la Subestación Uchuca se encuentra un transformador trifásico de 40/50 MVA con una configuración estrella-estrella. Esta configuración implica que los devanados de alto voltaje y bajo voltaje están conectados en forma de estrella para evitar problemas de eficiencia energética y problemas de caídas de voltaje [6]. Además el transformador utilizado para la transmisión es de 40 MVA aire natural (ONAN) y 50 MVA en aire forzado (ONAF) la razón de la adquisición de un transformador así es debido al comportamiento del viento en el parque eólico Huascachaca [24].

En el núcleo de la subestación, se albergan celdas de 34.5 kV que incorporan barras de cobre encapsuladas con SF6 (Hexafloruro de Azufre), uno de los gases aislantes más frecuentemente empleados en las operaciones de subestaciones [8] estos datos técnicos se presentan en la tabla 1.8.

Tabla 1.8: Datos técnicos [3,8]

Descripción	Datos Técnicos
Voltaje	Incremento de 34.5 kV a 138 kV
Transformador Principal	Trifásico de 40/50 MVA
Configuración del Transformador	Estrella-estrella
Capacidad del Transformador (ONAN)	40 MVA
Capacidad del Transformador (ONAF)	50 MVA
Tipo de Transformador	Aire natural (ONAN) y aire forzado (ONAF)
Ubicación	Provincia de Loja
Interconexión	Subestación de seccionamiento La Paz
Gas Aislante en Celdas de 34.5 KV	SF6 (Hexafloruro de Azufre)
Líneas de 34.5 KV	4 líneas
Transformador de 34.5 KV a 138 KV	1 transformador
Transformadores de potencia de barra tipo enchufable	3 transformadores
Transformador de servicios auxiliares	1 transformador

1.3.2. Subestación La Paz

La subestación de seccionamiento La Paz (misma que se presenta en la figura 1.8), operada por CELEC EP Transelectric, desempeña un rol fundamental al interconectar la central eólica Huascachaca con el SNI (Sistema eléctrico Nacional Interconectado) y al permitir la conexión de las subestaciones Cuenca y Yanacocha. Esto contribuye a la distribución eficiente y segura de la energía generada por la central eólica y a la integración de fuentes de energía renovable en el sistema eléctrico nacional [6].



Figura 1.8: Subestación de Seccionamiento La Paz [3]

1.3.3. Línea de Transmisión

La línea de transmisión desde la subestación Uchucay hasta la subestación de seccionamiento en La Paz se extiende a lo largo de aproximadamente 20.8 kilómetros, contando con un conductor de fase de 477 MCM y un cable de guarda OPGW de 48 fibras. La gestión y mantenimiento de esta línea están a cargo de la Empresa Generadora del Austro [6].

Las pérdidas que se generan en la línea son evaluadas y equilibradas mediante el uso de tecnologías avanzadas en colaboración con el CENACE. En este proceso, la subestación La Paz se desempeña como el punto frontera de venta, destacando la importancia de una coordinación eficaz entre la infraestructura de transmisión y la entidad reguladora para garantizar una eficiente gestión de pérdidas y un suministro eléctrico confiable [6].

1.4. Energía Eólica en el Ecuador

Los sistemas eólicos están compuestos por una red de bajo voltaje (BV), la cual es responsable de la generación de energía por parte del aerogenerador y posteriormente se dirige hacia el transformador. Algunos aerogeneradores están equipados con

transformadores instalados en la propia góndola. Existen diversos tipos de transformadores, siendo los más comunes, en la actualidad, aquellos que operan a una frecuencia de entre 50 y 60 Hz, y a un voltaje de 690V, con el fin de evitar el uso de aislantes costosos [25].

1.4.1. SNI(Sistema Nacional Interconectado)

El Sistema Eléctrico Nacional constituye la red nacional de interconexión, donde diversos tipos de sistemas eléctricos se integran para posibilitar la transferencia y producción de energía eléctrica a nivel nacional [26]. La responsabilidad de supervisar y gestionar tanto la oferta como la demanda de generación eléctrica recae en el CENACE, el Operador Nacional de Electricidad. Este organismo desempeña un papel crucial al asegurar el equilibrio entre la producción y el consumo de energía eléctrica, garantizando así la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico a nivel nacional.

1.4.2. Proyectos Eólicos en el Ecuador

En Ecuador, se están desarrollando numerosos proyectos con el objetivo de implementar fuentes de energía renovable en todo el país. Destacan iniciativas como Villonaco II y el proyecto eólico Pimo, entre otros, que buscan establecer a Ecuador como una potencia en la producción de energía renovable. Además de los proyectos mencionados, Ecuador está trabajando en la implementación de tecnologías innovadoras y políticas públicas destinadas a promover el uso de energías limpias y renovables en todo el territorio. Estas iniciativas no solo tienen el potencial de generar empleo y fomentar el crecimiento económico en el país, sino que también contribuyen a la seguridad energética y al cumplimiento de compromisos internacionales en materia de mitigación del cambio climático. El desarrollo de la energía renovable en Ecuador representa una oportunidad para impulsar la autosuficiencia energética y avanzar hacia un futuro más sostenible y resiliente.

CAPÍTULO 2

Parámetros para Análisis de Calidad de Energía

Este estudio se centra en aspectos fundamentales relacionados con la calidad de la energía, con un enfoque especial en la operación de parques eólicos. Se explorará los principales desafíos que enfrentan estos parques en términos de calidad eléctrica, desde la variabilidad de la generación eólica hasta los fenómenos específicos como el flicker por sombra de pala. Además, se examinarán detalladamente las normativas que regulan la calidad de la energía, abarcando tanto estándares internacionales como normativas nacionales, destacando su importancia en la planificación, diseño y operación de instalaciones eólicas para garantizar la confiabilidad y la compatibilidad con los sistemas eléctricos globales.

2.1. Normativas y Estándares

En esta sección, se sumerge en una investigación detallada de estándares y normativas internacionales y nacionales que rigen la generación de energía eólica. La Central Eólica Huascachaca se presenta como un caso específico para este análisis, ya que representa un componente vital de la matriz energética en la región de Loja, Ecuador. El propósito fundamental de este capítulo es evaluar y comparar las normativas que regulan la calidad de la energía generada por esta central, identificando áreas de convergencia y divergencia entre estándares internacionales y nacionales.

2.1.1. ARCERNNR-002/20

La normativa ARCERNNR-002/20 también denominada ARCONEL 002/20, en cuestión aborda la regulación de la calidad de servicio eléctrico, estableciendo niveles

apropiados para la prestación de dicho servicio. Además, proporciona procedimientos específicos para la evaluación de las empresas de distribución eléctrica.

Los aspectos fundamentales relacionados con la calidad del producto técnico se centran en los niveles de voltaje, las perturbaciones y el factor de potencia. La normativa define criterios y estándares para asegurar que estos aspectos cumplan con los requisitos adecuados, contribuyendo así a mantener niveles óptimos de calidad en la entrega de energía eléctrica a los consumidores [9].

2.1.2. Normativa IEC 61400-21

La normativa IEC 61400-21, también conocida como “Especificaciones para la medición y evaluación de la calidad de la energía en sistemas de energía eólica”, es una norma internacional desarrollada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) que establece los requisitos y métodos para medir y evaluar la calidad de la energía generada por sistemas de energía eólica [10]. La versión más reciente de esta norma, la UNE-EN IEC 61400-21-1:2021, fue publicada el 9 de junio de 2021 y está vigente actualmente. Esta norma es idéntica a la EN IEC 61400-21-1:2019 y a la IEC 61400-21-1:2019 a nivel internacional. Además, se presentó una modificación a esta norma, conocida como UNE-EN IEC 61400-21-1:2021/A11:2021, que también debe ser considerada.

El propósito principal de la IEC 61400-21-1 es establecer un marco uniforme para la evaluación de las características eléctricas de los aerogeneradores, incluyendo aspectos como la calidad de la energía, la respuesta a las perturbaciones de la red y la compatibilidad con los requisitos de conexión a la red. Esto es crucial para la integración efectiva de la energía eólica en el sistema de energía y para el funcionamiento armonioso con otras formas de generación de energía.

Los objetivos de la normativa IEC 61400-21-1 son:

- Establecer un marco uniforme para la medición y evaluación de las características eléctricas de los aerogeneradores. Esto incluye la calidad de la energía, la respuesta a las perturbaciones de la red y la compatibilidad con los requisitos de conexión a la red.
- Garantizar que los aerogeneradores puedan integrarse adecuadamente en la red eléctrica sin causar perturbaciones o inestabilidad.

- Proporcionar directrices para la evaluación de la calidad de la energía generada por los aerogeneradores, incluyendo la distorsión armónica, el flicker y otros factores relevantes.
- Evaluar la respuesta de los aerogeneradores ante eventos como cortes de voltaje y sobre voltajes, asegurando que puedan soportar y adaptarse a tales eventos sin dañar la red o el equipo.
- Medir la capacidad de los aerogeneradores para controlar la potencia reactiva y contribuir a la estabilidad de la red eléctrica.
- Evaluar la capacidad de los aerogeneradores para contribuir al control de la frecuencia de la red, un aspecto crucial para el funcionamiento armonioso del sistema eléctrico.

La normativa IEC 61400-21-1 establece una serie de parámetros y valores que deben ser medidos y evaluados para caracterizar las propiedades eléctricas de los aerogeneradores conectados a la red.

Algunos de los parámetros clave incluyen:

- Calidad de la energía: Esto se refiere a la evaluación de la distorsión armónica, el flicker, y otros factores que afectan la calidad de la energía suministrada por el aerogenerador.
- Respuesta a perturbaciones de la red: Se evalúa cómo el aerogenerador responde a eventos como cortes de voltaje y sobre voltajes.
- Control de potencia reactiva: Se mide la capacidad del aerogenerador para controlar la potencia reactiva y su contribución a la estabilidad de la red.
- Control de frecuencia: Se evalúa la capacidad del aerogenerador para contribuir al control de la frecuencia de la red.

2.1.3. ANSI C84.1

La norma ANSI C84.1 establece valores nominales de voltaje y tolerancias para la operación de sistemas eléctricos a 60 Hz con voltajes superiores a 100 V. En su esencia, la norma se centra en identificar niveles de voltaje apropiados para prevenir

problemas en la operación de estos sistemas. Define criterios específicos para asegurar la compatibilidad y la eficiencia eléctrica, proporcionando pautas fundamentales para el diseño, la instalación y el mantenimiento de equipos eléctricos, contribuyendo así a la fiabilidad y seguridad de las redes eléctricas [11].

2.2. Problemas de Parques eólicos conectados a la red

Esta investigación se adentra en los desafíos clave que enfrenta la generación eólica en cuanto a la calidad eléctrica. Desde los niveles de voltaje, que pueden comprometer la estabilidad del sistema, hasta fenómenos como el flicker por sombra de pala, con impactos notorios en la calidad de vida en las proximidades de parques eólicos. Analizaremos la presencia de armónicos, capaces de distorsionar la forma de onda eléctrica, así como la resonancia, la potencia reactiva y la frecuencia de la red. Estos elementos críticos influyen de manera significativa en la operación eficiente y confiable de los parques eólicos. El propósito de este estudio es comprender y abordar estos desafíos, con el objetivo de avanzar hacia una generación eólica que no solo sea sostenible, sino también compatible con los rigurosos estándares de calidad eléctrica exigidos en las modernas infraestructuras de redes eléctricas.

2.2.1. Niveles de Voltaje

Dentro del sistema eléctrico de potencia, es crucial mantener una vigilancia constante de los niveles de voltaje. Las caídas de voltaje pueden causar fallos en los equipos eléctricos conectados a la red, mientras que niveles de voltaje elevados pueden resultar en una sobrecarga de los equipos. Por lo tanto, es esencial que las empresas distribuidoras realicen revisiones mensuales de los niveles de voltaje del sistema eléctrico para garantizar su estabilidad y evitar daños en los equipos conectados.

La figura 2.1 presenta la variación de voltaje que se puede someter una onda sinusoidal.

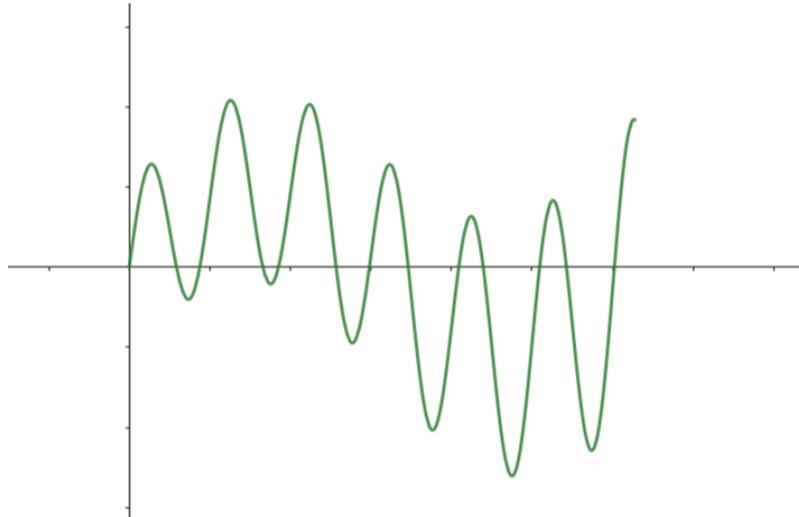


Figura 2.1: Variaciones de voltaje a la que se puede someter una onda Sinusoidal.

En la tabla 2.1, se presenta los niveles de voltaje que rigen en las empresas de distribución según la normativa nacional ARCERNNR 002/20:

Tabla 2.1: Limites de de niveles de voltaje establecidos por ARCERNNR 002/20 [9]

Nivel de Voltaje	Rango Admisible
Alto Voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5.0\%$
Medio Voltaje	$\pm 6.0\%$
Bajo Voltaje	$\pm 8.0\%$

Para calcular la variación de voltaje que existe en un punto del sistema eléctrico de potencia se utiliza la formula 2.1:

$$\Delta V_k(\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100 \quad (2.1)$$

Donde:

ΔV_K = Variación de voltaje en un punto

V_K = Nivel de voltaje en el punto a encontrar la variación

V_N = Nivel de voltaje nominal en el sistema eléctrico

2.2.2. Fluctuaciones de voltaje y flicker

EL flicker causa una sensación de intensidad luminosa al observador originada por la variación cíclica debido a la variación del voltaje, las turbinas eólicas producen

flicker de régimen permanente los cuales producen una alteración de velocidad [15], en la figura 2.2 representa la fluctuación de voltaje.

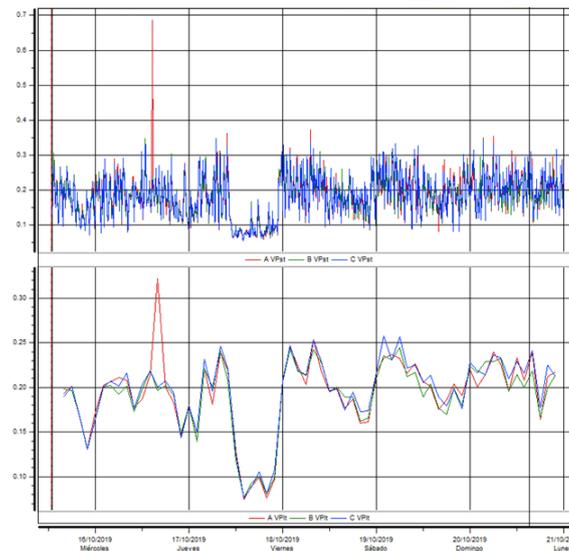


Figura 2.2: Fluctuación de Voltaje - Flicker. *Fuente :* [4]

Este efecto se produce cuando la rotación de las palas proyecta sombras intermitentes en el suelo o estructuras cercanas, especialmente bajo ciertas condiciones de luz solar. Estas fluctuaciones pueden generar molestias visuales, y para minimizar su impacto, los desarrolladores se esfuerzan en ubicar estratégicamente los aerogeneradores, considerando la proximidad a áreas residenciales. Además, las regulaciones y estándares establecen límites para mitigar el efecto del flicker y preservar la calidad de vida de las comunidades cercanas a parques eólicos. Para la evaluación de la calidad se considerara el Índice de Severidad por flicker de Corta Duración (P_{st}) con intervalos de alrededor de 10 minutos por medición según la normas IEC, a lo cual se debe tener en cuenta la siguiente formula.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (2.2)$$

Donde:

P_{st} = Índice de Severidad por flicker de Corta duración.

$P_{0,1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$ = Niveles de efecto flicker durante el 0,1 %, 1 %, 3 %, 5 %, 10 %, 50 % del tiempo total del periodo de observación.

2.2.2.1. Corte de Viento

Las ráfagas de viento, conocidas como corte de viento, generan perturbaciones en la velocidad que pueden resultar desafiantes de controlar mediante el sistema de control de un aerogenerador. Estas perturbaciones provocan variaciones en la salida de potencia, lo cual puede afectar la calidad y estabilidad del suministro eléctrico. Para contrarrestar eficazmente estas fluctuaciones, se recurre a la aplicación de electrónica de potencia avanzada en la operación y control de los aerogeneradores. La implementación de sistemas electrónicos actualizados permite una respuesta más rápida y precisa a las variaciones en las condiciones del viento, contribuyendo así a mantener niveles de potencia más estables y a optimizar el rendimiento de la generación eólica [15].

2.2.2.2. Sombra de torre

La sombra de torre en aerogeneradores se origina porque la torre actúa como una barrera que amplía la turbulencia generada por el viento. Este fenómeno, conocido como "flicker por sombra de pala", se produce una vez por revolución, es decir, con cada giro de las palas de la turbina. En aerogeneradores modernos con tres palas y velocidades típicas [15].

2.2.3. Armónicos

En la generación eléctrica a partir de energía eólica, que en general no produce armónicos significativos, es fundamental el uso de inversores para convertir la energía de corriente continua a corriente alterna. Estos inversores, equipados con sistemas avanzados, están diseñados para minimizar la presencia de armónicos de bajo orden [15]. Sin embargo, algunos problemas pueden surgir, incluyendo:

- Calentamiento Excesivo: El calor generado por los armónicos puede afectar el rendimiento y la longevidad de los componentes del sistema.
- Operación Inestable: La presencia de armónicos puede llevar a una operación inestable de los equipos, afectando la calidad de la energía.

- Resonancia y Amplificación de Armónicos: En algunos casos, la resonancia en el sistema eléctrico puede amplificar los armónicos, creando problemas adicionales.

La figura 2.3 ilustra la onda sinusoidal y los armónicos asociados, proporcionando una representación visual de cómo los armónicos pueden influir en la forma de onda de la corriente alterna.

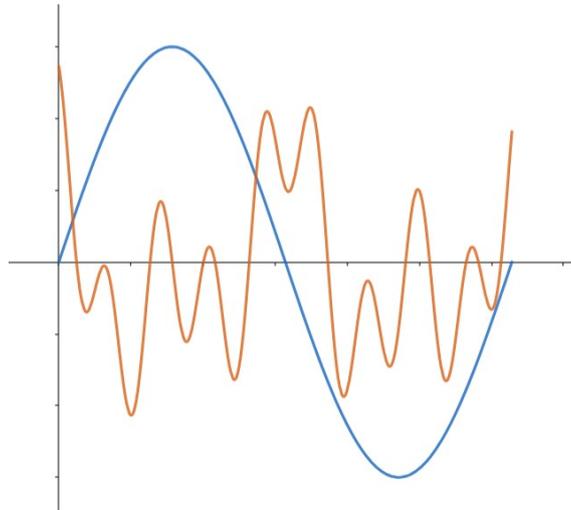


Figura 2.3: Representación de Onda Sinusoidal y Armónicos.

La regulación ARCONEL 002/20 establece índices de calidad en el ámbito eléctrico, y para calcular estos índices, se emplean las fórmulas 2.4 y 2.3.

$$V'_i = \frac{V_i}{V_n} * 100 \quad (2.3)$$

$$\text{THD} = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} V_i^2}}{V_1} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

V'_i = Factor de Distorsión Armónica individual de Voltaje

THD = Factor de Distorsión por armónicos

V_i = Voltaje del Armónico i (donde $i=2\dots50$)

V_n = Voltaje Nominal del Punto de medición

2.2.4. Frecuencia de la red

En los sistemas eólicos, la frecuencia de la red se refiere a la velocidad de oscilación de la corriente alterna en un sistema eléctrico conectado a la red, la cual está estandarizada en Ecuador a 60 Hz. Uno de los principales desafíos en estos sistemas es el control de la oferta y la demanda de energía. Para abordar estos desafíos, se emplea electrónica de potencia. El control preciso de la frecuencia y la potencia es crucial tanto en las subestaciones como en los parques eólicos, ya que asegura la estabilidad y eficiencia del suministro eléctrico.

2.2.5. Potencia Activa

La potencia activa en parques eólicos se refiere a la parte de la potencia eléctrica generada que realiza trabajo útil. Depende de la velocidad del viento y la capacidad de los generadores, aumentando a medida que el viento incrementa su velocidad para lo cual es útil la curva de potencia de los aerogeneradores, especificada en el Anexo A. La gestión eficiente de la potencia activa es esencial para garantizar un suministro eléctrico estable. Los sistemas de control en los aerogeneradores ajustan la velocidad de las palas para optimizar la generación de potencia activa en función de las condiciones del viento y la demanda eléctrica [27].

2.2.6. Factor de Planta

En los parques eólicos, el factor de planta está directamente relacionado con la velocidad del viento y su disponibilidad. Este factor es crucial para evaluar la eficiencia de un proyecto, ya que tiene en cuenta la variabilidad del viento, las pérdidas por histéresis en los transformadores y otras pérdidas en las líneas de transmisión [28]. Para un aerogenerador en operación normal, el rango adecuado del factor de planta suele estar entre el 30 % y el 40 % [29].

Existen tres tipos de factores de planta según el tipo de empresa: generadoras, distribuidoras y auto-generadoras. Sin embargo, el factor de planta que se debe utilizar para evaluar la eficiencia de un proyecto eólico es el de las empresas generadoras.

El factor de planta se calcula mediante la fórmula 2.5:

$$Fp(\%) = \left[\frac{Ep[kWh]}{Pa[kW] * Horas} \right] * 100 \quad (2.5)$$

Donde:

- $Fp(\%)$ = Factor de Planta
- Pa = Potencia Activa(kW)
- Ep = Energía Producida en un periodo de tiempo(kWh)
- $Horas$ = Horas de totales del periodo

La fórmula 2.5 permite evaluar la eficiencia de producción de un parque eólico en función de la energía producida en relación con la capacidad instalada y el tiempo de operación.

2.3. Análisis y Mitigación del Flicker en Sistemas Eléctricos

El *flicker* se refiere a las variaciones en el voltaje del sistema que pueden provocar cambios perceptibles en la salida del sistema, normalmente visibles en el brillo de las lámparas debido a estas fluctuaciones de voltaje. Estos cambios suelen ocurrir en redes eléctricas con baja resistencia de cortocircuito y como resultado de la rápida conexión o desconexión de cargas. También se conoce como *efecto estroboscópico*, refiriéndose a un efecto visible cuando un objeto en movimiento se ilumina y apaga rápidamente, generando una sensación de parpadeo [30]. Un nivel alto de *flicker* se considera perjudicial y molesto para las personas.

2.3.1. Factores que Causan el Flicker

El *flicker* puede ser causado por varios factores:

- **Tecnología de la fuente de luz:** Algunas tecnologías, como los LEDs, pueden generar más *flicker* debido a su modulación de corriente o diseño interno.

- **Diseño del controlador:** El diseño del circuito de control de la fuente de luz también influye. Por ejemplo, los controladores PWM (modulación por ancho de pulso) pueden causar *flicker* si no están bien diseñados.

2.3.2. Estrategias para Mitigar el Flicker

Para mitigar el *flicker*, se recomienda considerar lo siguiente:

- **Métricas objetivas:** Utilizar métricas como LMst (Long-Term Stroboscopic Effect) para evaluar el *flicker*. LMst mide la probabilidad de que una fuente de luz cause molestias visuales.
- **Estándares y regulaciones:** Adoptar las publicaciones de la CIE (Comisión Internacional de Iluminación) e IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) que establecen límites aceptables para el *flicker*.
- **Investigación y diseño:** Definir criterios de aceptación para las métricas y diseñar sistemas de iluminación que cumplan con estos estándares.

2.3.3. Emisiones de Flicker según Normativa IEC 61400-21

La Norma IEC 61400-21 establece el método para calcular la emisión de *flicker* producida por fuentes de energía renovable, como los parques eólicos. Tanto los productores como los consumidores pueden ser responsables de este fenómeno y afectar la red eléctrica. Esta norma calcula la caída de voltaje interna considerando la impedancia de la red y el flujo de corriente.

2.3.4. Parámetros para Evaluar el Flicker

La norma IEC 61000-4-15 proporciona parámetros específicos para evaluar el *flicker*:

- **Pinst:** Sensación de *flicker* instantáneo.
- **Pst:** *Flicker* a corto plazo (medido cada 10 minutos para señales de entrada de voltaje).

- **Plt:** *Flicker* a largo plazo (medido cada 2 horas, basado en los 12 valores anteriores de Pst) [10].

Además, se definen valores de *flicker* para corriente (I_Pinst, I_Pst, I_Plt) y para ángulos de fase específicos (por ejemplo, I_Pinst_L1_30).

2.3.5. Cambios Rápidos de Voltaje (RVC)

Los RVC se definen como variaciones rápidas del valor eficaz del voltaje entre dos niveles consecutivos, mantenidos durante periodos definidos, aunque no especificados. La norma EN 50160 y la IEC 61000-3-3 establecen criterios para evaluar estos cambios de voltaje.

2.3.6. Normativa de Diseño para Aerogeneradores

La Norma UNE-EN IEC 61400-1 especifica los requisitos esenciales de diseño para garantizar la seguridad de los aerogeneradores durante su vida útil planificada. Para reducir el *flicker* en aerogeneradores, se pueden aplicar las siguientes medidas:

- **Control de Fase del Rotor:** Controlar la fase del rotor de un número específico de turbinas en el parque para que sus fluctuaciones de voltaje se cancelen entre sí, total o parcialmente.
- **Análisis y Evaluación:** Realizar un análisis detallado de las fluctuaciones de voltaje producidas por los parques eólicos y evaluar la emisión de *flicker* en funcionamiento continuo, así como durante operaciones de conmutación a diferentes velocidades de viento.
- **Optimización de Operación:** Asegurarse de que exista suficiente viento para que los aerogeneradores estén en funcionamiento durante el día y evitar condiciones de baja visibilidad (como cielos nublados o niebla) para minimizar el efecto de parpadeo de sombras (*“Shadow Flicker”*) [31].

2.4. Equipos para mediciones de calidad de energía

En esta sección se detallarán los equipos, comúnmente empleados, para detectar problemas de calidad de energía, subrayando que se trata de instrumentos típicamente utilizados en el terreno. Sin embargo, en este estudio, se procederá a examinar los instrumentos y su conexión requeridos para llevar a cabo pruebas y mediciones, aunque no se utilizarán en un entorno de campo.

2.4.1. Analizadores de Calidad (*PQA*)

Los analizadores de calidad de energía son herramientas fundamentales en la industria eléctrica, ya que proporcionan una visión detallada del estado y eficiencia de un sistema eléctrico. Además de detectar problemas relacionados con la calidad de la energía, estos dispositivos pueden ayudar a identificar áreas de mejora en la eficiencia energética y a optimizar el rendimiento de los equipos eléctricos [32], [33], [5]. Gracias a su capacidad para medir parámetros energéticos clave y calcular pérdidas económicas, los analizadores de calidad de energía son una herramienta valiosa para operadores de red, empresas de servicios públicos y usuarios industriales que buscan mejorar la confiabilidad y eficiencia de sus sistemas eléctricos. En el siguiente gráfico se observa la conexión de un equipo de medición en un sistema trifásico.

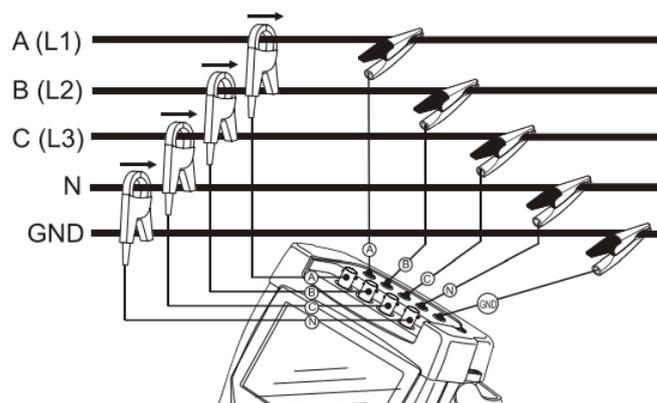


Figura 2.4: Conexión del Analizador de 3 fases en Sistemas de Distribución. [5]

2.4.2. Analizadores de Armónicos

Los dispositivos de análisis de espectro son herramientas especializadas diseñadas para evaluar la presencia y características de armónicos en un sistema eléctrico. Estos

analizadores pueden capturar datos sobre armónicos de corriente y voltaje, calcular la distorsión armónica total (THD), identificar armónicos individuales y proporcionar información detallada sobre la calidad de la energía eléctrica. Los analizadores de armónicos suelen ser equipos sofisticados que combinan hardware y software para realizar mediciones precisas y análisis detallados de la distorsión armónica en un sistema eléctrico [34].

2.5. DigSILENT PowerFactory [®]

Se emplea el software DIgSILENT PowerFactory, una herramienta avanzada para la modelización, simulación y análisis de sistemas eléctricos de potencia. La versión empleada es la 2024, que incorpora mejoras significativas y una licencia completa para su uso proporcionada por la Universidad Politécnica Salesiana. PowerFactory 2024 permite realizar análisis detallados de flujo de carga, cortocircuito, estabilidad transitoria y armónicos, entre otros. La elección de este software se fundamenta en su precisión y aceptación en la industria y academia, proporcionando una base sólida para las simulaciones y análisis realizados en esta investigación.

Licencia del Software: La versión utilizada cuenta con una licencia completa, la cual permite el uso de todas sus funcionalidades. La licencia fue adquirida a través de Universidad Politécnica Salesiana, bajo el contrato número 2024-0415-0033724, y tiene una validez hasta 16/04/2025.

CAPÍTULO 3

Resultados y Simulación

En este capítulo, se revisan las simulaciones realizadas con el software DigSilent, con un enfoque en las torres eólicas de la central eólica Huascachaca. Se examinan los datos recolectados, la simulación del parque eólico, las variaciones de voltaje y el arranque de los aerogeneradores.

El análisis comienza con la recopilación de los valores fundamentales para el modelado en DigSilent, detallando la configuración específica de la máquina eólica Huascachaca. Se definen parámetros clave como la capacidad nominal, las curvas de potencia y las características de control, estableciendo las bases para una simulación precisa.

La simulación juega un papel crucial en el análisis, describiendo los procedimientos para configurar casos de prueba, definir escenarios operativos y ejecutar simulaciones dinámicas. Esto permite observar el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones y comprender mejor su rendimiento.

Posteriormente, se realiza una evaluación técnica de los resultados obtenidos, abarcando aspectos como la estabilidad del sistema. Además, se consideran posibles mejoras, como la implementación de un filtro de armónicos, y se comparan los resultados con las normas aplicables para asegurar la conformidad y eficacia del sistema.

Este enfoque garantiza que las pruebas sean relevantes y efectivas en el contexto específico de operación, ofreciendo una valiosa contribución al sector energético en Ecuador.

3.1. Datos para simulación

3.1.1. Obtención de datos

La obtención de datos proporcionados por la empresa generadora del Austro, ELECAUSTRO, es fundamental para realizar un análisis detallado e identificar las características de la Central Eólica Huascachaca. Este análisis no se limitará únicamente a evaluar la producción y eficiencia del parque, sino que también se centrará en una evaluación minuciosa de los parámetros de calidad de energía, con el objetivo de identificar posibles áreas de mejora y optimización en el funcionamiento de la central. La obtención y análisis de estos datos proporcionarán una visión integral del desempeño de la Central Eólica Huascachaca. Es importante destacar que estos datos son de carácter reservado y no pueden ser divulgados libremente.

3.1.2. Datos de la Central Eólica Huascachaca

- Capacidad Máquina = $4000kW$
- Cut in y Cut out = $2,5 - 20m/s$
- Velocidad Nominal = $11,5m/s$
- Altura de hub (90 diámetro de rotor) = $148m$
- Densidad Aire = $1,044kg/m^3$
- frecuencia = $60Hz$
- Voltaje media tensión = $34,5kV$
- Voltaje de los Aerogeneradores = $690V$

Dentro del campo energético, es importante cumplir con normativas y estándares específicos que se basan en las condiciones de uso, las cuales pueden variar según el país y las condiciones ambientales, como la presión atmosférica, temperatura y humedad, así como las estaciones del año. En el Proyecto Eólico Minas de Huascachaca (PEMH), los aerogeneradores deben cumplir con la normativa IEC, que establece estándares internacionales para la industria eólica, garantizando su eficacia y seguridad. El PEMH debe cumplir con la normativa ARCERNR 002/20, la cual establece condiciones específicas para identificar problemas de calidad de

energía y proporciona directrices sobre cómo realizar mediciones precisas. Es importante que las empresas cumplan con estos estándares para evitar sanciones y multas, por lo que se recomienda realizar mediciones regulares de calidad de energía. Se ha tenido en cuenta la normativa americana, que, aunque similar a la ecuatoriana, presenta diferencias en temas como fluctuaciones y caídas de voltaje. Esta normativa se ha utilizado como referencia adicional para asegurar el cumplimiento adecuado de los estándares de calidad de energía en el proyecto eólico Huascachaca.

3.1.3. Normativa IEC 61400-21

Tabla 3.1: Información obtenida de la normativa IEC 61400-21. [10]

Voltaje nominal	690V
Corriente maxima	1500A
Frecuencia nominal	50Hz o 60Hz
Distorsión armónica total	<5 %
Potencia Nominal	2MW
Flicker de corto plazo (Pst)	<1
Flicker de largo plazo (Plt)	<0.65
Factor de Potencia	0.95

3.1.4. Normativa ARCERNNR 002/20

La normativa ARCERNNR 002/20 establece directrices precisas para los niveles de voltaje en las instalaciones eléctricas, con el fin de asegurar un funcionamiento seguro y eficiente. De acuerdo con esta normativa, los rangos admisibles para diferentes niveles de voltaje son los siguientes: para el alto voltaje, que abarca tanto el Grupo 1 como el Grupo 2, se permite una variación de $\pm 5.0\%$ en relación al valor nominal. Para el voltaje de nivel medio, la variación admisible es de $\pm 6.0\%$. Finalmente, para el voltaje de bajo nivel, se acepta una variación de $\pm 8.0\%$. Estos rangos son cruciales para garantizar que las instalaciones eléctricas funcionen dentro de los límites seguros, minimizando los riesgos y asegurando la calidad y estabilidad del suministro eléctrico [9].

3.1.5. Normativa ANSI C84.1

Tabla 3.2: Información obtenida de la normativa ANSI C84.1. [11]

Bajo Voltaje	Menor o igual a 1kV
Frecuencia nominal	60Hz
Medio voltaje	Mayor a 1kV y menor de 100kV
Alto voltaje	Igual o mayor que 100 kV e igual que 230 kV

Las normativas y estándares relacionados con la calidad de energía abarcan una amplia gama de temas cruciales para garantizar la confiabilidad y eficacia de los sistemas eléctricos. Entre estos temas, se destacan la Normativa IEC 61400-21, que se centra específicamente en la generación eólica y la identificación de problemas de calidad en estas instalaciones, así como la integración de energías renovables en la matriz energética. Además, es esencial que estas normativas aborden la estabilidad del sistema eléctrico, la protección de equipos y sistemas, la gestión de la demanda de energía y el monitoreo y diagnóstico continuo de la calidad de energía. Al considerar estos temas importantes en las normativas y estándares relacionados con la calidad de energía, se puede promover un sistema eléctrico más seguro, confiable, eficiente y sostenible para todos los usuarios y partes interesadas involucradas.

3.2. Simulación Parque Eólico Huascachaca

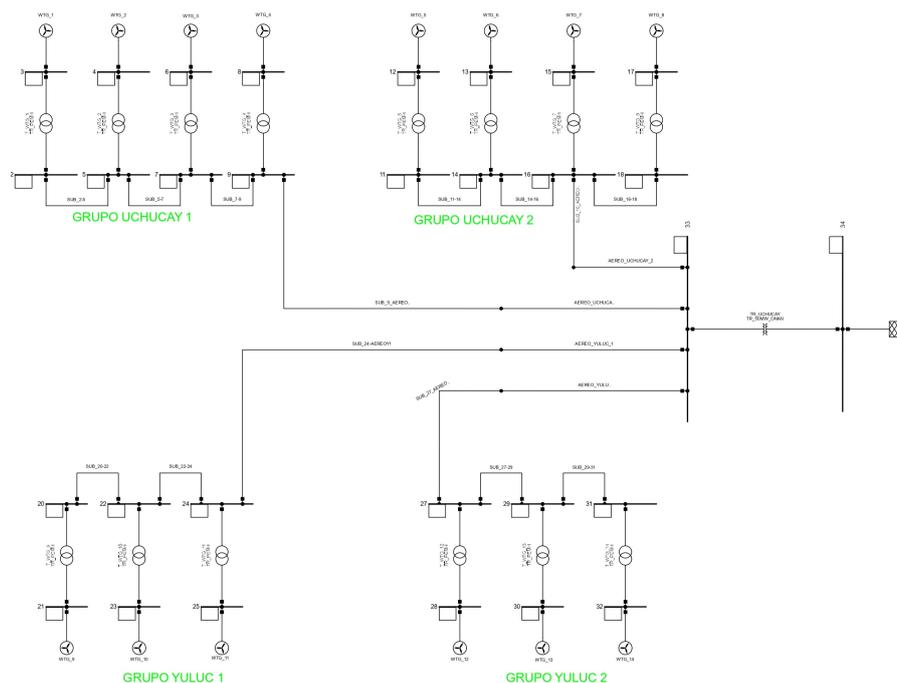


Figura 3.1: Diagrama Unifilar del Parque Eólico Huascachaca

Dentro de la realización de la simulación, es fundamental considerar los datos constructivos y técnicos de los aerogeneradores. Estos datos se utilizan para crear un modelo de aerogenerador basado en el modelo de la central eólica Huascachaca, que cuenta con 14 aerogeneradores, en la figura 3.1 se representa el modelo planteado.

Para la simulación de la evaluación de parpadeo (flicker) en PowerFactory, se utilizó el modelo de la red colectora de medio voltaje descrito en el capítulo 1. Este modelo permitió estructurar el diagrama unifilar que representa el parque eólico Huascachaca. En el diagrama, la red de medio voltaje se representaba con intervalos tanto aéreos como subterráneos. Además, se consideró que cada aerogenerador estaba equipado con un transformador, lo que facilitó una simulación detallada y precisa de los efectos del parpadeo en la red.

Tabla 3.3: Resultados de la Simulación a 4MW sin Operaciones de conexión [7]

Aerogenerador	THD	HD
WTG_1	4,07 %	0,56 %
WTG_2	4,07 %	0,56 %
WTG_3	4,06 %	0,56 %
WTG_4	4,05 %	0,56 %
WTG_5	4,14 %	0,57 %
WTG_6	4,13 %	0,57 %
WTG_7	4,13 %	0,57 %
WTG_8	4,13 %	0,57 %
WTG_9	4,60 %	0,61 %
WTG_10	4,60 %	0,61 %
WTG_11	4,59 %	0,61 %
WTG_12	4,53 %	0,60 %
WTG_13	4,55 %	0,60 %
WTG_14	4,55 %	0,60 %

La tabla 3.3 presenta los resultados de THD y HD en la simulación. Se analizaron los datos de calidad de energía de catorce aerogeneradores (WTG), evaluando dos parámetros clave: el total de distorsión armónica (THD) y la Distorsión armónica (HD). Los resultados mostraron un promedio de THD del 4.33 %, indicando el nivel de distorsión armónica total en la energía generada por los WTG. Por otro lado, el promedio de HD fue del 0.58 %, reflejando la distorsión armónica presente en la energía generada. Dentro de este contexto, se identificó específicamente el armónico de orden 11, el cual representa aproximadamente el 0.33 % de la corriente RMS total, con una corriente de armónicos de 10.71 A y una corriente RMS de 3.271 kA. Este armónico, aunque de baja magnitud en comparación con la corriente RMS general, puede contribuir a la distorsión armónica total observada. La potencia asociada con el armónico de orden 11 dependería del voltaje eficaz del sistema, siendo

esencial para evaluar su impacto preciso en la operación de la red eléctrica y equipos conectados.

3.3. Operación Continua de aerogenerador

La operación continua de aerogeneradores debe garantizar una calidad de energía estable y conforme a estándares específicos. Esto implica mantener los niveles de armónicos, interarmónicos, y fluctuaciones de voltaje dentro de los límites aceptables, evitando impactos negativos en la red eléctrica. La medición y control de estos parámetros aseguran que el aerogenerador funcione de manera eficiente y fiable durante períodos prolongados, contribuyendo a una operación estable y segura del sistema eléctrico en su conjunto.

En la figura 3.2 se puede apreciar los voltajes sinusoidales de la salida de los aerogeneradores.

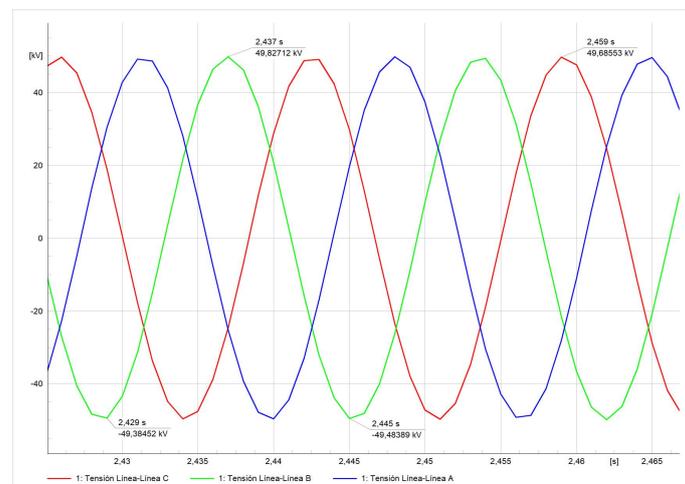


Figura 3.2: Voltaje de aerogenerador WTG₁

La evaluación de la calidad de la energía en parques eólicos es fundamental para asegurar un suministro eléctrico confiable y eficiente. En este proyecto, se utiliza el software PowerFactory para simular la operación continua de aerogeneradores y analizar los parámetros de calidad de la energía. Se consideran tres valores de potencia para los aerogeneradores: 2 MW, 3.57 MW, y 4 MW. Los resultados muestran que el voltaje RMS en la barra 1 es de 0.739 kV, con un voltaje pico máximo y mínimo de aproximadamente 1.045 kV y -1.045 kV respectivamente. Esto indica que la forma de onda del voltaje es sinusoidal y se mantiene estable sin fluctuaciones significativas, cumpliendo con los parámetros de operación normal de 4MW.

En el gráfico 3.3 se observa que, al operar a 2 MW, el voltaje, según el flujo de potencia, es de 0,725 kV. Se estima que el voltaje máximo alcanzará aproximadamente 1,031 kV. Además, el gráfico ilustra claramente la relación entre el voltaje y la potencia suministrada por el aerogenerador.

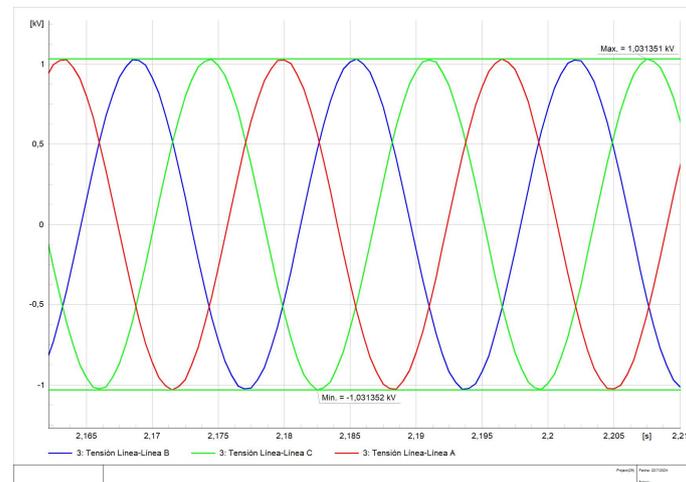


Figura 3.3: Voltaje en la barra colectora que alimenta el transformador de 34,5 kV a 138 kV durante la operación a 2 MW.

En el gráfico 3.4 se muestra el comportamiento de los aerogeneradores operando a 3.57 MW, que es el punto de operación establecido para asegurar que la potencia total de los 14 aerogeneradores del PEMH no exceda los 50 MW. Este proyecto también incluye una previsión futura en la que se espera que cada aerogenerador opere a una potencia nominal de 4 MW, lo que resultaría en un voltaje de 0,735 kV según el flujo de potencia.

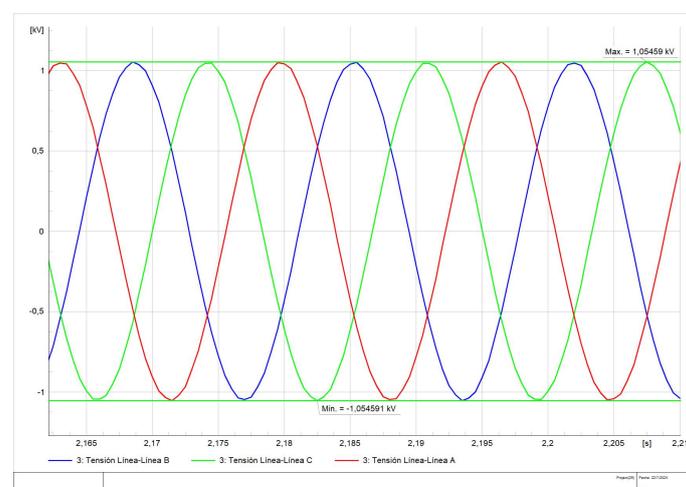


Figura 3.4: Voltaje en la barra colectora que alimenta el transformador de 34,5 kV a 138 kV durante la operación a 3.57 MW.

3.3.1. Variaciones de voltaje

Cuando se analiza la variación de voltaje en términos de por unidad (pu), el enfoque permite estandarizar las mediciones y evaluar el desempeño de manera relativa a los valores nominales del sistema. La variación de voltaje en pu se calcula como la diferencia entre el voltaje real y el voltaje nominal, normalizada por el voltaje base del sistema. Si las variaciones de voltaje están disminuyendo, esto indica que el sistema está estabilizándose y adaptándose a las condiciones de operación. Un análisis detallado muestra que, cuando las variaciones en pu disminuyen, el sistema está logrando una mayor estabilidad en el voltaje, lo que refleja una mejora en la calidad de la energía. Este comportamiento es crucial para garantizar que el sistema eléctrico no experimente fluctuaciones significativas que puedan afectar el rendimiento de los equipos conectados o la eficiencia general del sistema. La disminución de estas variaciones sugiere que los mecanismos de regulación y compensación del voltaje, como los reguladores de voltaje y los dispositivos de compensación reactiva, están funcionando eficazmente. En la Figura 3.5 se observa las variaciones de voltaje que hay dentro del sistema eléctrico en la salida del transformador.

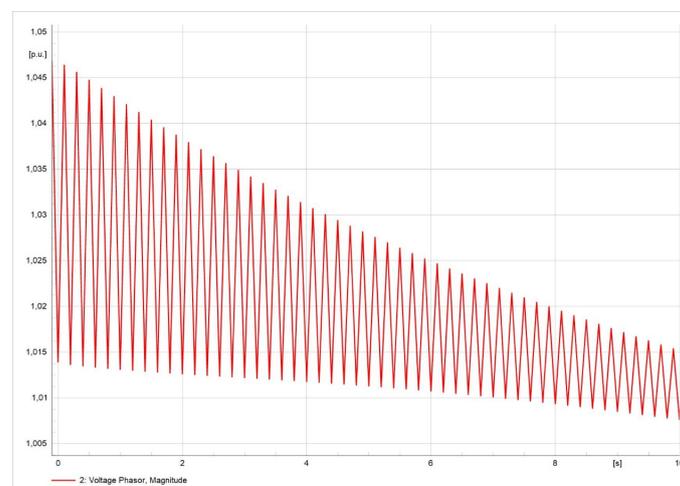


Figura 3.5: Caídas de Voltaje de la Barra

3.4. Arranque de aerogenerador

El arranque es una fase crítica para un aerogenerador, desde el encendido inicial hasta la producción estable de energía. Se describirán las fases claves del arranque, que implican la activación de los sistemas de control, las comprobaciones de las condiciones operativas y la secuencia de encendido del aerogenerador. Con la ayuda de

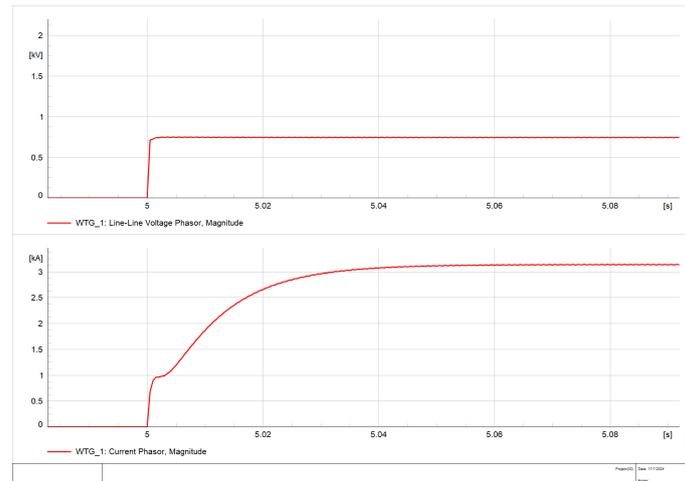


Figura 3.6: Rampa de arranque generada por la simulación *Fuente : Autor*

simulaciones, se obtendrán gráficas que permitirán observar el rendimiento del aerogenerador durante el arranque, como se puede observar en la figura 3.6, asegurando que se mantenga dentro de las normativas establecidas.

3.4.1. Fases del arranque y condiciones óptimas

3.4.1.1. Arranque y Operación de Aerogeneradores según IEC 61400-21

La norma IEC 61400-21 establece que el arranque de los aerogeneradores debe llevarse a cabo de manera que se minimice el impacto tanto en la red eléctrica como en el propio sistema del aerogenerador. Entre los parámetros clave especificados se encuentra la velocidad mínima de arranque, que es la velocidad del viento a la cual el aerogenerador comienza a generar energía, típicamente en el rango de 3,5 m/s. Además, se define la velocidad de corte, que es el umbral de viento a partir del cual el aerogenerador deja de operar para evitar daños por vientos excesivamente fuertes, usualmente entre 20 y 25 m/s. El ciclo de arranque debe asegurar que el aerogenerador pueda entrar en operación de manera segura y eficiente en una amplia gama de condiciones de viento. El sistema de control de pitch, encargado de ajustar el ángulo de las palas, juega un papel crucial en la regulación de la velocidad de rotación del aerogenerador y en la protección del sistema durante condiciones extremas [35].

3.4.1.2. Sistemas de Control en el Arranque de un Aerogenerador

1. Controlador Principal (PLC)

- Coordina el arranque y la operación del aerogenerador.
- Analiza y controla todos los subsistemas mediante CPU, módulos de entrada/salida y interfaces de comunicación.

2. Sistema de Control del Rotor

- Ajusta el ángulo de las palas (pitch) para captar eficientemente la energía eólica.
- Utiliza motores de paso, sensores de posición y controlador de pitch.
- Comienza a moverse con vientos de aproximadamente 3,5 m/s y alcanza máxima potencia cerca de 11 m/s.

3. Sistema de Control del Generador

- Sincroniza el generador con la red eléctrica y regula la producción de energía.
- Incluye controlador de excitación, regulador de voltaje y sistemas de protección.
- En vientos fuertes (25 m/s), las palas se colocan en bandera y se frena el aerogenerador para evitar voltajes excesivos.

4. Sistema SCADA (Supervisión y Control)

- Monitorea el aerogenerador a nivel macro.
- Recopila datos en tiempo real, permitiendo el control remoto y facilitando decisiones basadas en el rendimiento [36], [35].

3.4.1.3. Condiciones Óptimas y Procedimiento de Arranque

1. Velocidad del Viento

- Rangos Típicos:
 - Arranque: Alrededor de 3,5 m/s.
 - Máxima Potencia: Alrededor de 11 m/s.
 - Apagado (velocidad de corte): 25 m/s.

- Asegura un arranque suave y eficiente del aerogenerador.
2. Temperatura Ambiental
 - Debe mantenerse entre -20°C y 40°C para evitar efectos adversos en lubricantes y componentes electrónicos.
 3. Condiciones Climáticas
 - Evitar arranques en condiciones extremas como tormentas, hielo o niebla densa que puedan afectar la operación segura.
 4. Estado de los Componentes
 - Mantener todos los componentes en buen estado y realizar mantenimientos regulares para prevenir fallos mecánicos o eléctricos.
 5. Estado de la Red Eléctrica
 - Garantizar que la red esté estable y lista para la sincronización con el aerogenerador [36], [35].

3.5. Análisis y Propuestas de Mejoras

3.5.1. Análisis de la simulación

En la simulación del arranque de un aerogenerador en PowerFactory, como se muestra en la 3.7, se modela el proceso desde el estado de reposo hasta la generación estable.

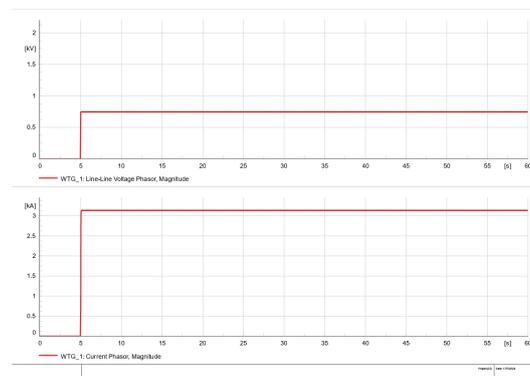


Figura 3.7: Plot en el programa DigSilent referente al arranque del aerogenerador

Dentro del contexto de la simulación de arranque de aerogenerador se logra obtener lo siguiente:

Tabla 3.4: Resultados obtenidos en simulación referente a arranque de motor

Voltaje máximo	0.4330 kV
Voltaje [Normaliza la onda]	0.431 kV
Corriente máxima	3.14 kA
Corriente [Normaliza la onda]	3.13 kA
Ciclos a trabajar	20 ciclos
Tiempo de arranque	5 segundos
Tiempo de inicio de Rampa de Arranque	5.0015 s
Corriente al inicio de Rampa de Arranque	0.960 kA

- **Parámetros de voltaje:** El voltaje máximo observado durante el arranque del aerogenerador es de 0.4330 kV. Este valor representa el pico de voltaje al que el sistema está expuesto y es esencial que todos los componentes puedan soportar este nivel sin fallos. El voltaje normalizado de la onda, que es de 0.431 kV, indica que el sistema es capaz de estabilizar el voltaje durante el proceso de arranque, asegurando una operación segura y controlada.
- **Parámetros de Corriente:** La corriente máxima registrada es de 3.14 kA. Este valor refleja la alta demanda inicial de corriente necesaria para superar la inercia del rotor y comenzar la generación de energía. La corriente normalizada de la onda, que es de 3.13 kA, muestra una estabilización efectiva de la corriente, similar a la normalización del voltaje, lo que sugiere que el sistema está bien diseñado para manejar estos picos iniciales.
- **Duración del Arranque:**

El tiempo estipulado para el arranque es de 5 segundos, un valor que se ha seleccionado para equilibrar eficiencia y seguridad. La norma IEC 61400-1 [10], aunque no especifica un valor exacto, establece que el tiempo de arranque debe ser suficiente para permitir una integración segura del aerogenerador con la red eléctrica. Este tiempo de 5 segundos se emplea en la simulación como un valor referencial, asegurando una sincronización adecuada además beneficiando la disponibilidad y productividad del aerogenerador.
- **Inicio de la Rampa de Arranque:** El inicio de la rampa de arranque se produce a los 5.0015 segundos, casi inmediatamente después del arranque inicial.

Esto muestra un control preciso y rápido, asegurando que el aumento de la corriente se gestione de manera controlada para evitar picos perjudiciales. La corriente al inicio de la rampa de arranque es de 0.960 kA, significativamente menor que la corriente máxima, indicando un manejo efectivo de la corriente al comienzo de la rampa y reduciendo el riesgo de sobrecargas y daños a los componentes.

3.5.2. Métodos y Técnicas

1. Reducción de corrientes armónicas:

- Reactores de línea: Estos dispositivos se colocan en serie con las cargas para limitar las corrientes armónicas. Funcionan como filtros y reducen la distorsión armónica.
- Transformadores en serie: Similar al reactor de línea, un transformador en serie puede reducir las corrientes armónicas. Se conecta en serie con la carga y proporciona una impedancia adicional para las componentes armónicas.

2. Análisis profundo de armónicos:

- Realiza un estudio detallado de los armónicos presentes en la red. Esto implica medir y analizar las formas de onda para identificar las componentes armónicas y sus frecuencias.
- Dispositivos de atenuación: Basándose en los resultados del análisis, considerar la instalación de dispositivos como filtros activos, filtros pasivos o reactores sintonizados para mitigar los efectos de la polución armónica.

3.5.3. Filtro de Armónicos

El filtro de armónicos se presenta como una solución efectiva para eliminar los armónicos de la red eléctrica. Estos filtros utilizan circuitos RLC (Resistor, Inductor, Capacitor) para diseñar un circuito sintonizado que se ajusta a las frecuencias específicas de la red. Su función principal es filtrar los armónicos de frecuencias particulares, reduciendo así las distorsiones y mejorando la calidad de la energía. La implementación de filtros de armónicos no solo protege los equipos eléctricos y electrónicos de posibles daños, sino que también mejora la eficiencia general del sistema eléctrico, asegurando un funcionamiento más estable y fiable.

3.5.3.1. Tipos de Filtros

En los sistemas eléctricos, los filtros de armónicos son componentes cruciales para la mitigación de distorsiones causadas por armónicos no deseados. Los filtros se dividen en dos categorías principales: filtros pasivos y filtros activos [37]. A continuación se detallan las características técnicas y aplicaciones de cada tipo.

1. Filtros Pasivos

Los filtros pasivos están constituidos por componentes pasivos tales como resistencias (R), inductancias (L) y capacitores (C). Su diseño permite que resuenen a frecuencias específicas, eliminando así armónicos indeseados. Entre los filtros pasivos más comunes se encuentran:

- **Filtro LC Sintonizado:** Este filtro utiliza una combinación de inductancias y capacitores para formar un circuito resonante. Se ajusta para resonar a la frecuencia de un armónico particular, como el 5^o o el 7^o armónico. La frecuencia de resonancia se determina mediante la fórmula 3.1:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Donde:

- f_r = Frecuencia de resonancia (Hz)
Es la frecuencia a la que el circuito LC oscila con máxima eficiencia, donde la reactancia inductiva iguala a la reactancia capacitiva.
- L = Inductancia (H)
Representa la capacidad del inductor para almacenar energía en un campo magnético cuando la corriente pasa a través de él. Medida en henrios.
- C = Capacitancia (F)
Representa la capacidad del capacitor para almacenar energía en un campo eléctrico. Medida en faradios.
- π = Constante matemática (3.14159)
Es una constante matemática utilizada para convertir la frecuencia angular a la frecuencia en hertzios. Aparece en muchos cálculos relacionados con círculos y ondas.

- **Filtro Pasabajo:** Emplea capacitores para bloquear frecuencias altas, permitiendo que únicamente las frecuencias fundamentales sean transmitidas. Este filtro es eficaz para reducir armónicos de alta frecuencia y se diseña con una frecuencia de corte específica para cada aplicación.
- **Filtro Trampa de Armónicos:** Consiste en una inductancia y un capacitor dispuestos en serie o en paralelo, ajustados para filtrar un armónico específico. Por ejemplo, un filtro trampa sintonizado para el 5^o armónico puede eliminar eficazmente esa frecuencia particular de la señal.

Aplicación: Los filtros pasivos son eficaces para armónicos de orden bajo y se utilizan comúnmente en sistemas industriales con condiciones de carga relativamente estables.

Ventajas:

- **Costo Relativamente Bajo:** Los componentes pasivos son generalmente menos costosos que los componentes activos.
- **Simplicidad en el Diseño:** Su diseño es más sencillo y no requiere ajustes complejos.
- **Bajo Mantenimiento:** Requieren poco mantenimiento una vez instalados, debido a la ausencia de componentes electrónicos activos que puedan fallar.

2. Filtros Activos

Los filtros activos utilizan tecnología electrónica avanzada para inyectar corrientes que contrarrestan los armónicos presentes en el sistema [37]. Estos filtros detectan los armónicos y generan una señal de corriente en oposición de fase para neutralizarlos.

- **Filtros Activos Paralelos:** Conectados en paralelo con la carga, estos filtros generan corrientes de compensación que eliminan los armónicos presentes en el sistema. Son capaces de mitigar armónicos de múltiples frecuencias simultáneamente y se adaptan dinámicamente a cambios en la carga y la frecuencia.
- **Filtros Activos Serie:** Instalados en serie con la carga, estos filtros generan voltajes de compensación para eliminar los armónicos. Son particularmente útiles en aplicaciones que requieren alta precisión en la eliminación de armónicos, mejorando significativamente la calidad de la energía.

Aplicación: Los filtros activos son ideales para sistemas con cargas no lineales, donde se requiere una respuesta dinámica a las variaciones de carga y la eliminación de múltiples armónicos simultáneamente.

Ventajas:

- **Adaptabilidad a Cambios en la Carga:** Los filtros activos pueden ajustarse automáticamente a las variaciones en la carga y los armónicos presentes en el sistema.
- **Eficacia en la Eliminación de Múltiples Armónicos:** Son capaces de eliminar múltiples armónicos simultáneamente, lo que es particularmente útil en sistemas con diversas cargas no lineales.
- **Mejora de la Calidad de la Energía:** Contribuyen a una mejora significativa en la calidad de la energía al reducir la distorsión armónica en tiempo real.
- **Control de Potencia Reactiva:** Algunos filtros activos también permiten el control de la potencia reactiva, optimizando el factor de potencia del sistema.

3. Filtros Híbridos

Los filtros híbridos combinan elementos de filtros pasivos y activos para aprovechar las ventajas de ambos tipos. Integran la capacidad de los filtros pasivos para tratar armónicos de baja frecuencia con la flexibilidad de los filtros activos para manejar armónicos de alta frecuencia y condiciones variables.

Aplicación: Se utilizan en sistemas que requieren una mitigación eficaz de armónicos en un rango amplio de frecuencias y en situaciones donde las cargas varían considerablemente.

Ventajas:

- **Eficiencia Mejorada:** Combinan la eficacia de los filtros pasivos para armónicos de baja frecuencia con la adaptabilidad de los filtros activos para armónicos de alta frecuencia y condiciones variables.
- **Reducción de Costos Operativos a Largo Plazo:** Aunque el costo inicial puede ser mayor, la combinación de tecnologías pasivas y activas puede reducir los costos operativos debido a una mayor eficiencia y menor necesidad de ajustes frecuentes.
- **Mitigación en un Rango Amplio de Frecuencias:** Permiten tratar un rango más amplio de frecuencias armónicas, proporcionando una solución más completa para la mitigación de armónicos.

- **Optimización del Desempeño del Sistema:** Al combinar ambas tecnologías, se minimizan las desventajas de cada tipo de filtro individual, optimizando el desempeño general del sistema [37].

3.5.3.2. Armónicos Recomendados para Mitigar

1. Armónicos de Orden Bajo (3^o, 5^o, 7^o)

Se recomienda enfocar los esfuerzos en la mitigación de armónicos de orden bajo, como el tercero, quinto y séptimo, como se presenta en los siguientes fundamentos.

- **Prevalencia en Sistemas Industriales:** Estos armónicos son comúnmente generados por equipos industriales y cargas no lineales típicas, tales como motores, variadores de velocidad y equipos electrónicos.
- **Impacto en el Sistema:** Los armónicos de orden bajo tienen un impacto significativo en la eficiencia y estabilidad del sistema, pudiendo causar sobrecalentamiento en transformadores y conductores, aumentar las pérdidas y reducir la vida útil de los equipos.
- **Compatibilidad con Filtros Pasivos:** Los filtros pasivos son particularmente efectivos para la eliminación de estos armónicos específicos debido a su diseño de resonancia a frecuencias concretas.

2. Armónicos de Orden Alto

Se sugiere la utilización de filtros activos o híbridos para la mitigación de armónicos de orden alto, como se presenta en los siguientes fundamentos.

- **Generación por Cargas Electrónicas:** Los armónicos de orden alto son típicamente generados por cargas electrónicas modernas, como fuentes de alimentación conmutadas y dispositivos electrónicos de alta frecuencia.
- **Dificultad para Filtros Pasivos:** Los filtros pasivos son menos efectivos para tratar armónicos de orden alto debido a la dificultad de diseñar resonadores eficientes a frecuencias muy altas.
- **Requieren Adaptabilidad:** Los armónicos de orden alto pueden variar significativamente con las condiciones de carga, por lo que se requiere la adaptabilidad de los filtros activos para una mitigación eficaz [37].

3.5.3.3. Sintonización del Filtro

La sintonización de filtros es esencial para el diseño de sistemas de filtrado armónico, permitiendo la mitigación de armónicos específicos y la mejora de la calidad de la energía. A continuación se detallan los pasos y consideraciones para la sintonización de filtros utilizando DIgSILENT PowerFactory:

1. Identificación de Armónicos

■ Análisis de Espectro:

- **Herramientas en PowerFactory:** Se deben utilizar las herramientas de análisis de armónicos en PowerFactory para realizar un estudio detallado del espectro de frecuencias en el sistema. Este análisis permite identificar los armónicos presentes en el voltaje y en la corriente.
- **Proceso:** Se generan gráficos del espectro de frecuencias para observar la amplitud y frecuencia de los armónicos. Este análisis ayuda a identificar los armónicos predominantes.
- **Interpretación:** Es necesario evaluar los resultados para identificar los armónicos que tienen mayor impacto. Los armónicos de bajo orden (3^o, 5^o, 7^o) suelen ser los más significativos debido a su mayor presencia en los sistemas de potencia.

■ Selección de Armónicos:

- **Prioridades:** Basado en el análisis espectral, se seleccionan los armónicos que deben ser mitigados, considerando su impacto en el sistema y las normativas de calidad de energía aplicables.

2. Cálculo de Componentes del Filtro

Filtro Pasivo:

■ Cálculo de Inductancias y Capacitancias:

Para comprender el cálculo de componentes de un filtro, se plantea el siguiente ejemplo. Si se desea diseñar un filtro para mitigar el 5^o armónico en un sistema de 60 Hz, la frecuencia del 5^o armónico es 300 Hz. Si se elige una capacitancia de 10 F, la inductancia necesaria se calcula utilizando la fórmula

3.1, reemplazando los valores y despejando la formula, se obtendrá la formula 3.2:

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 300)^2 \cdot 10 \times 10^{-6}} \approx 0,01 \text{ H} \quad (3.2)$$

Donde L es la inductancia necesaria para mitigar el 5^o armónico.

- **Elección de Componentes:** Es necesario seleccionar inductores y capacitores comerciales que se aproximen a los valores calculados, considerando las tolerancias y el rango de operación.
- **Diseño del Filtro:**
 - **Configuración del Filtro:** Los filtros LC pueden ser diseñados en configuraciones serie o paralelo, de acuerdo con los requisitos específicos del sistema.
 - **Validación:** Se debe verificar el diseño del filtro mediante simulaciones para asegurar que la frecuencia de resonancia esté correctamente alineada con el armónico objetivo.

Filtro Activo:

- **Ajuste de Parámetros del Controlador:**
 - **Algoritmos de Control:** Los filtros activos emplean diversos algoritmos de control, como el control de corriente predictivo o el control por retroalimentación, cada uno con sus características particulares.
 - **Configuración de Parámetros:**
 - **Ganancia del Controlador:** Se ajusta la ganancia del controlador para lograr una respuesta rápida y estable. Una ganancia demasiado alta puede causar oscilaciones, mientras que una ganancia demasiado baja puede resultar en una respuesta lenta.
 - **Frecuencia de Muestreo:** Es crucial asegurar que la frecuencia de muestreo del sistema de control sea adecuada para captar variaciones rápidas en la distorsión armónica.
 - **Filtros Internos:** Se deben ajustar los filtros internos para suavizar las señales y evitar el sobre ajuste, lo que podría llevar a una respuesta ineficiente [37].

3.5.3.4. Simulación de Filtros de Armónicos en PowerFactory

Los armónicos que, por lo general, suelen ser perjudiciales en la mayoría de los casos son el quinto, séptimo, undécimo, decimoquinto y cuadragésimo tercero. Para identificar problemas relacionados con estos armónicos, se procederá con la simulación en Power Factory de los cinco armónicos mencionados, obteniendo el THD y la corriente en las frecuencias correspondientes. Las pruebas se realizarán en el aerogenerador WTG_1, el cual forma parte del proyecto Uchucay 1. En la tabla 3.5, se podrán observar los niveles perjudiciales para el sistema. Basándose en estos resultados, se seleccionará el filtro más adecuado, ya sea pasivo o activo, para suprimir los armónicos detectados, ya sea en su totalidad o de forma específica para un armónico en particular.

Tabla 3.5: Resultados Obtenidos de la simulación de armónicos

WTG_1		
Armónico	THD	Corriente
5	0,43 %	30,457 A
7	0,37 %	18,743 A
11	0,27 %	10,710 A
15	0,13 %	3,682 A
43	0,99 %	5,020 A

Durante el análisis de los resultados de la tabla anterior, se observa que un filtro pasivo puede influenciar de manera significativa todo el sistema. Por ende, se utilizará un filtro pasivo para el análisis y la mitigación de los armónicos. Los filtros pasivos presentan ventajas significativas para la implementación en una central eólica debido a su bajo costo de fabricación y mantenimiento. Además, los filtros pasivos son muy eficaces para tratar armónicos de bajo orden.

Sintonizar únicamente el quinto armónico se justifica porque tiene la mayor corriente (30.457 A) y un THD significativo (0.43 %) entre los armónicos presentes, lo que indica un mayor impacto en el sistema. Los filtros pasivos son especialmente eficaces para armónicos de bajo orden como el quinto, ofreciendo una solución de bajo costo y fácil mantenimiento en comparación con los filtros activos. Considerando que la Central Eólica Huascachaca aporta al sistema nacional una cantidad constante de energía cuando el viento es nominal, la implementación de un filtro pasivo es beneficiosa, ya que no hay variaciones de carga que superen la potencia de la central. Esto asegura una operación estable y eficiente del sistema, aprovechando las ventajas de los filtros pasivos en la mitigación de armónicos.

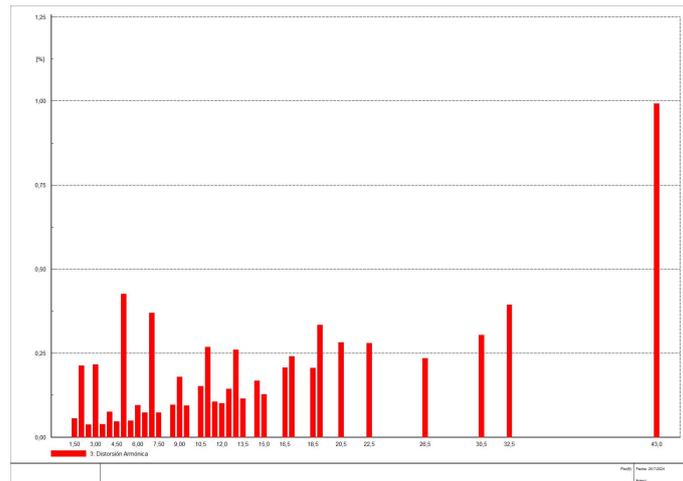


Figura 3.8: Representación de armónicos sin filtro

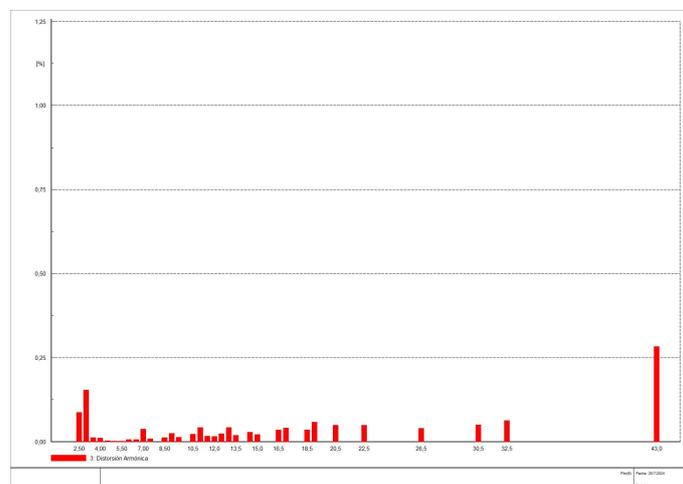


Figura 3.9: Representación de armónicos con filtro

En las figuras 3.9 y 3.8 se observan una reducción significativa de los armónicos en comparación con la situación anterior. Es importante recalcar que, aunque los demás armónicos no se eliminan por completo, suelen verse afectados de manera positiva. Como se puede observar en el gráfico con el filtro, los valores de los armónicos cercanos al quinto son casi imperceptibles. Esto indica que el filtro pasivo no solo reduce eficazmente el quinto armónico, sino que también contribuye a la atenuación de otros armónicos, mejorando así la calidad de la energía del sistema en general..

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el contexto de la creciente importancia de las energías renovables en la matriz energética global, la central eólica Huascachca, compuesta por 14 aerogeneradores con una potencia total de 50 MW, representa un activo significativo en la contribución al suministro de energía limpia y sostenible en Ecuador . Con una inversión de 90 millones de dólares, esta infraestructura desempeña un papel crucial en el Sistema Nacional de Interconexión (SNI), generando oportunidades para reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables y mitigar los impactos ambientales asociados.

4.1. Conclusiones

- Referente a la posibilidad de simulación y diseño, se concluye que es posible simular y diseñar la central eólica Huascachca utilizando el software PowerFactory. Esta herramienta se ha demostrado efectiva para modelar el comportamiento de la central bajo diversas condiciones operativas, lo que permite una planificación detallada y la identificación de posibles problemas antes de la implementación física. La capacidad de PowerFactory para representar el sistema con precisión es esencial para optimizar tanto el diseño como la operación de la central.
- Los estándares tanto nacionales como internacionales son la prioridad de las diferentes centrales para medir la calidad de las mismas, por lo que se concluye que los valores obtenidos de las simulaciones están en conformidad con los estándares establecidos tanto a nivel internacional como nacional 3.2, 3.1 y 3.4. Las técnicas de reducción de armónicos dentro de la simulación de la central eólica resultan bastante efectivas. Estas técnicas logran reducir los armónicos que se producen dentro del propio aerogenerador, los cuales se habían atribuido principalmente al funcionamiento del inversor. Además, como se observa los valores de armónicos y voltajes se encuentran establecidos por la normativa nacional e internacional.
- Referente a las limitaciones en la simulación de procesos específicos, se concluye que, aunque la simulación proporcionó información útil sobre armónicos y la implementación de filtros de armónicos, se encontraron limitaciones en la simulación de otros fenómenos eléctricos, como subtensiones y sobretensiones. Los resultados para estos procesos no mostraron cambios significativos, y algunas simulaciones no se pudieron realizar debido a restricciones técnicas o a la falta de datos específicos. Estas limitaciones sugieren que, aunque la simulación es una herramienta valiosa, algunos aspectos pueden requerir enfoques adicionales o métodos complementarios.
- Las normativas nacionales para parques eólicos son limitadas, por lo que se concluye que no existe una normativa específica y completa a nivel nacional que regule los parques eólicos en el país. La falta de regulación específica puede dar lugar a inconsistencias en la calidad y seguridad de los proyectos eólicos. Se destaca la necesidad de desarrollar políticas y normativas nacionales que aborden adecuadamente las características y requisitos particulares de la energía eólica, para asegurar una operación segura y eficiente de los parques eólicos.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda llevar a cabo investigaciones adicionales para mejorar la simulación de fenómenos eléctricos complejos como subtensiones, sobretensiones y utilización de técnicas para el mejoramiento de la calidad de energía, en el parque eólico Huascachaca. Aunque las simulaciones actuales han sido útiles, se han encontrado limitaciones, como tiempo límite para la presente investigación. Futuras investigaciones podrían centrarse en la integración de modelos más detallados o el uso de software complementario, tales como la implementación de matlab o python que permita una simulación más precisa de estos fenómenos. Además, se podría considerar la incorporación de datos operativos adicionales y la calibración del modelo para reflejar mejor las condiciones reales del sistema.
- Se sugiere llevar a cabo un estudio exhaustivo para desarrollar y establecer normativas nacionales específicas que regulen los parques eólicos en el país. Este estudio debería involucrar la colaboración con organismos reguladores, expertos en energía eólica y otras partes interesadas para identificar y definir estándares que aborden de manera adecuada las características y necesidades particulares de la energía eólica. La creación de estas normativas contribuiría a una mayor consistencia en la calidad y seguridad de los proyectos eólicos a nivel nacional, promoviendo así una integración más eficiente y segura de la energía eólica en el sistema eléctrico del país.
- Si bien la simulación de la central eólica minas de Huascachaca se basa en valores reales y proporciona una estimación precisa de su impacto en la calidad de la energía, es importante reconocer que las condiciones de operación en la vida real pueden diferir de las condiciones simuladas. Factores como variaciones en las condiciones climáticas, fluctuaciones en la demanda de energía y el desgaste de los componentes del sistema pueden influir en el rendimiento real del filtro de armónicos. Por lo tanto, se recomienda complementar los resultados de la simulación con un monitoreo continuo y ajustes periódicos en el sistema para asegurar que la calidad de la energía se mantenga dentro de los estándares deseados. Esto garantizará una operación eficiente y confiable de la central eólica Huascachaca, maximizando sus beneficios a largo plazo.
- Para aplicar filtros de armónicos en PowerFactory, es fundamental seguir una serie de pasos recomendados. Primero, se debe identificar los armónicos problemáticos mediante un análisis de espectro en PowerFactory. Luego, se debe

seleccionar el tipo de filtro adecuado: pasivo para frecuencias específicas y económico, o activo para una mayor flexibilidad en la mitigación de múltiples armónicos. Es crucial modelar el sistema con precisión en PowerFactory, incluyendo todos los componentes relevantes y configurando correctamente los parámetros del filtro. Posteriormente, se realizan simulaciones para evaluar el rendimiento del filtro en diferentes condiciones y ajustar los parámetros según sea necesario. Además, se debe asegurar el cumplimiento con las normas de calidad de energía, como las siguientes normas [37], [11], [18], [10]. La documentación completa del proceso de diseño y ajustes, así como el monitoreo continuo del rendimiento del filtro, son esenciales.

ANEXOS

ANEXO A

Información obtenida del ARC



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Datos Generales	
Potencia nominal	3,570 MW
Clase de viento	IEC S
Control	Pitch y velocidad variable
Temperatura operativa estándar	Rango desde -10°C a +40°C
Rotor	
Diámetro	148 m
Área de barrido	17,203 m ²
Velocidad de giro	5,8 - 12,375 rpm
Altura del cubo	90 m
Palas	
Longitud	72,5 m
Perfil	DEC
Material	GFRP "Glass Fiber Reinforced Plastics"
Torre	
Tipo	Torre Tubular tipo cono
Altura	90 m
Generador	
Tipo	Direct-Drive
Tensión	690 v
Frecuencia	8,4 Hz
Clase de protección	IP 54
Factor de potencia	0,95

Figura A.1: Especificaciones técnica de los aerogeneradores de la Central Eólica Huascachaca [6]

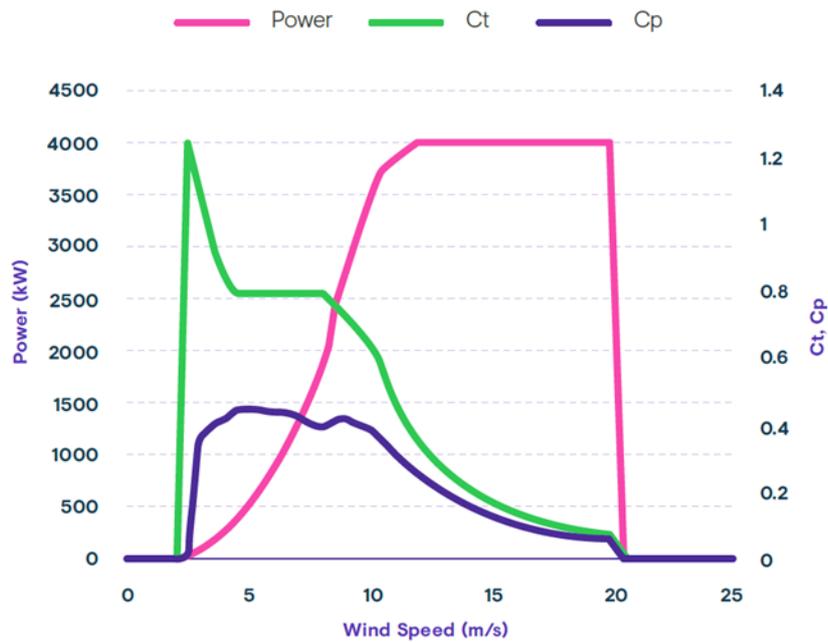


Figura A.2: Curva de Potencia y Coeficiente de empuje de acuerdo al sitio de la instalación [6]

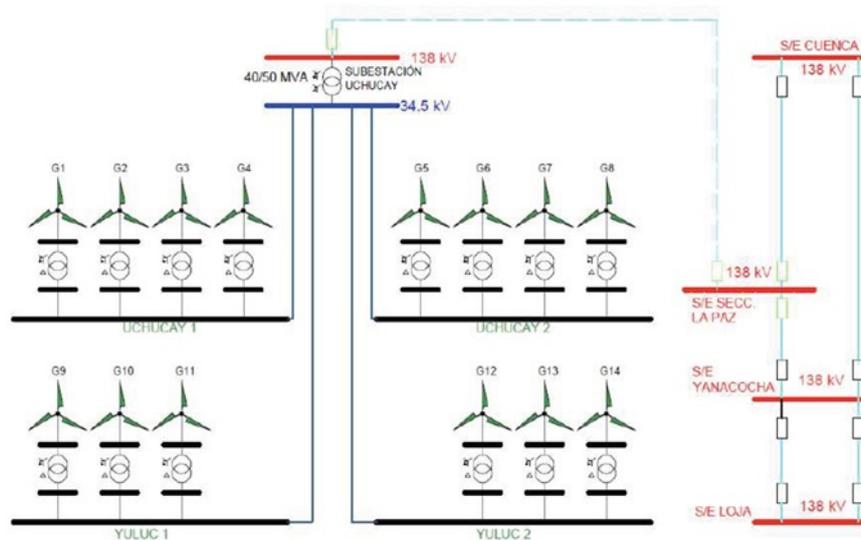


Figura A.3: Interconexión SNI [6]

ANEXO B

Esquema en el programa Power Factory

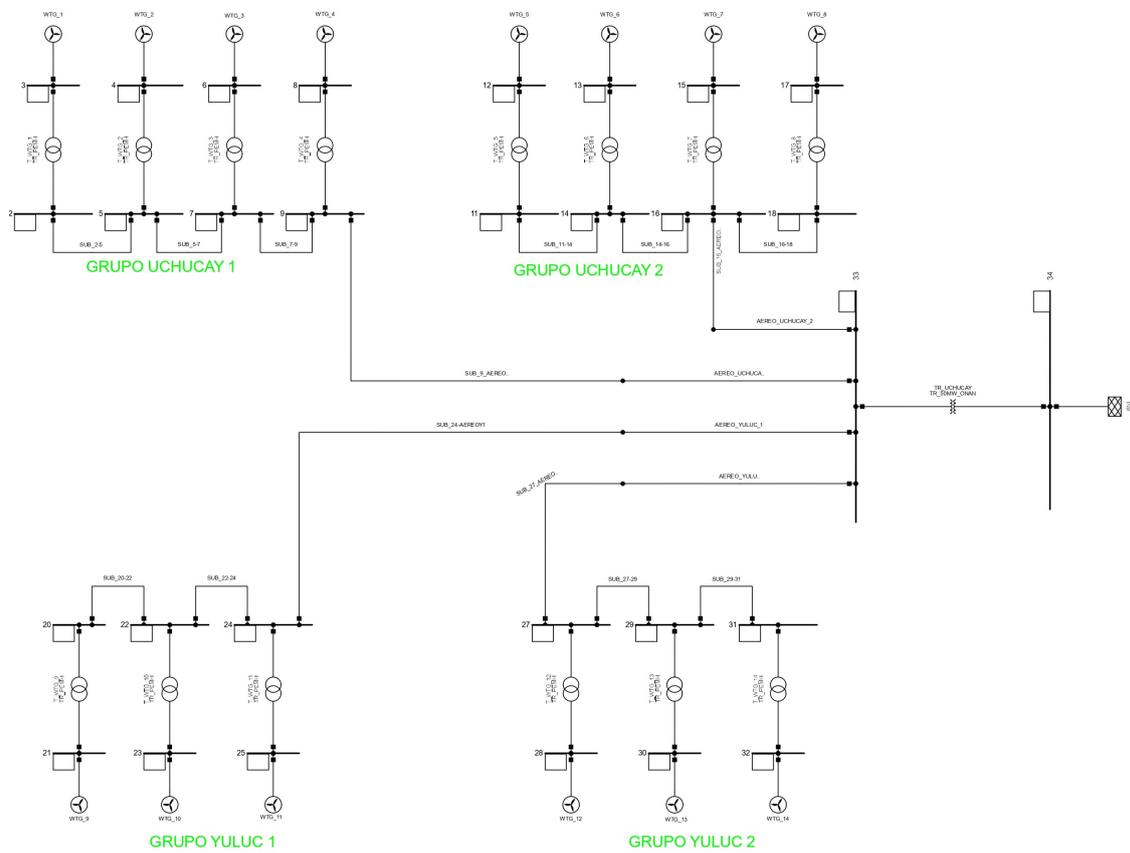


Figura B.1: Diagrama Unifilar del PEMH en Power Factory

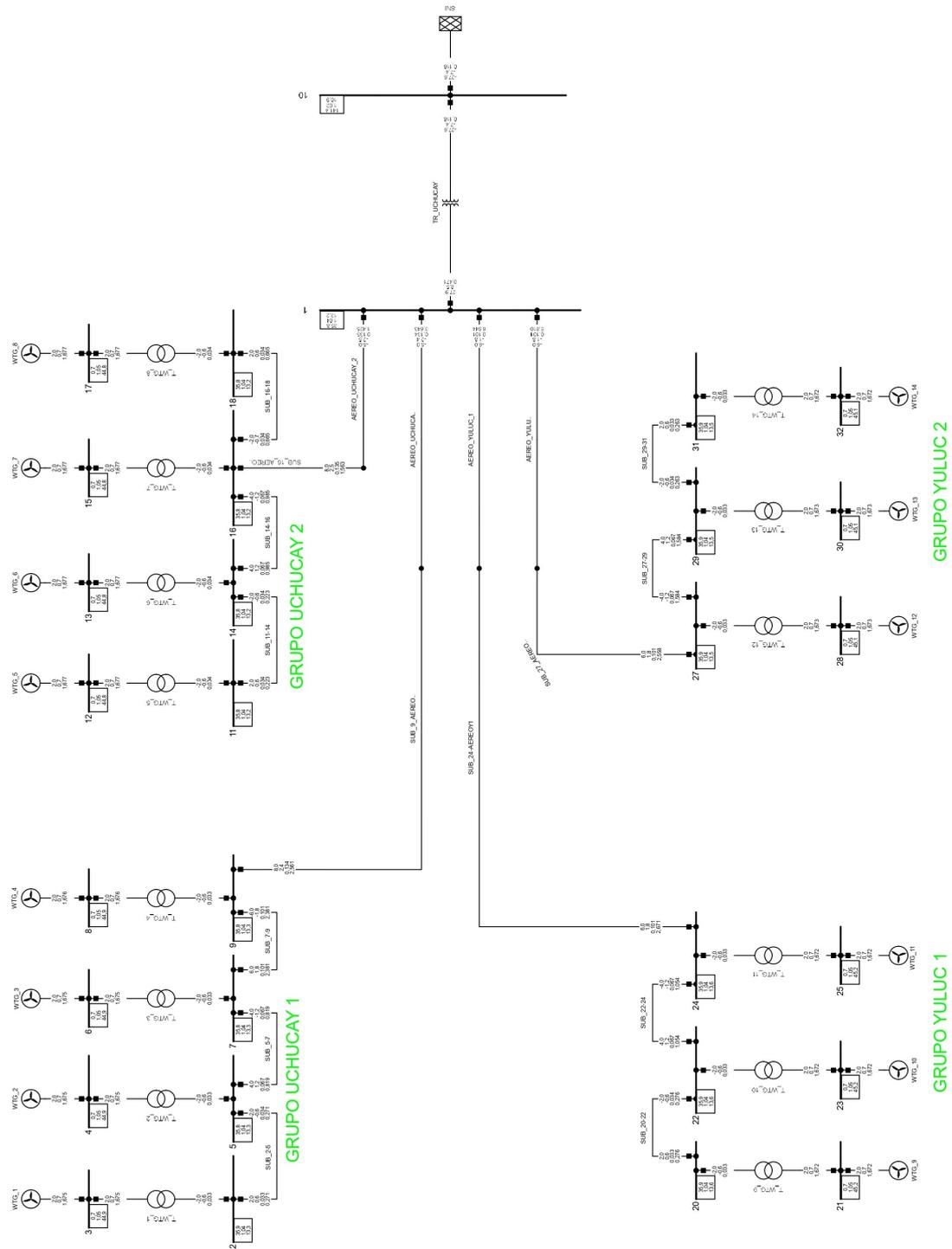


Figura B.2: Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory Flujo de potencia FASE DE OPERACIÓN 2MW

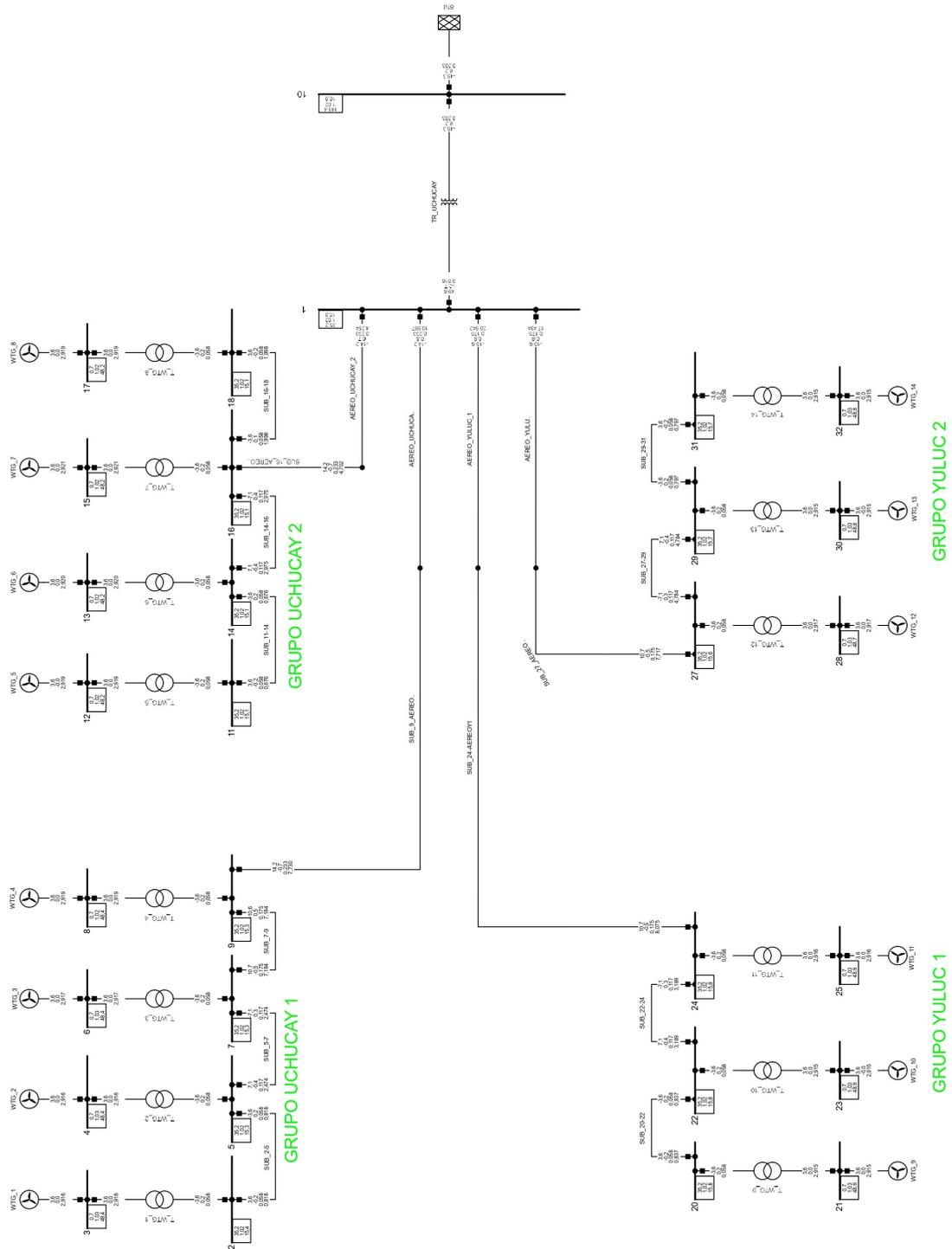


Figura B.3: Central Eólica: Minas de Huasachaca en Programa Power Factory Flujo de potencia FASE DE OPERACIÓN 3.57MW

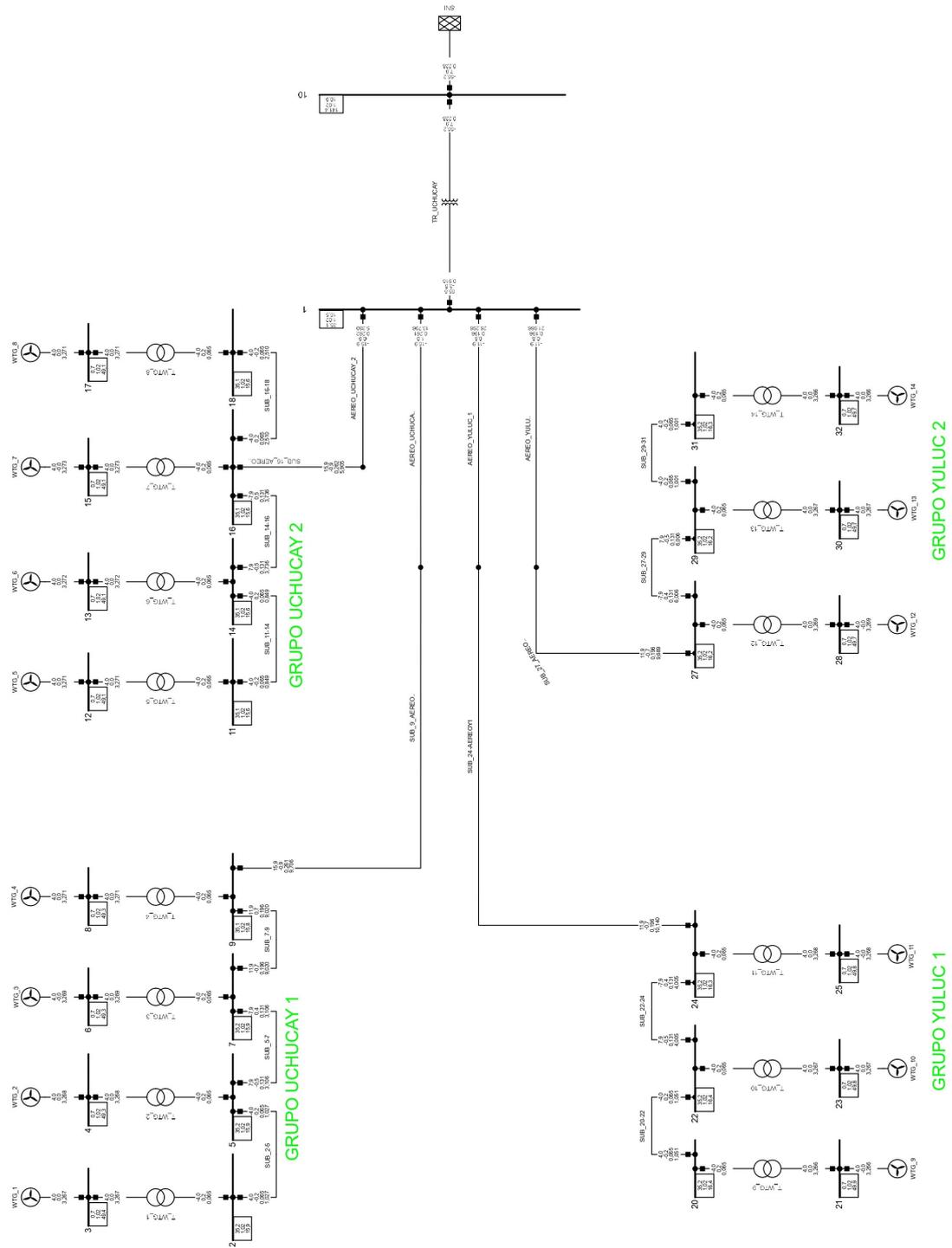


Figura B.4: Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory Flujo de potencia FASE DE OPERACIÓN 4.0MW

ANEXO C

Parque eólico: Minas de Huascachaca

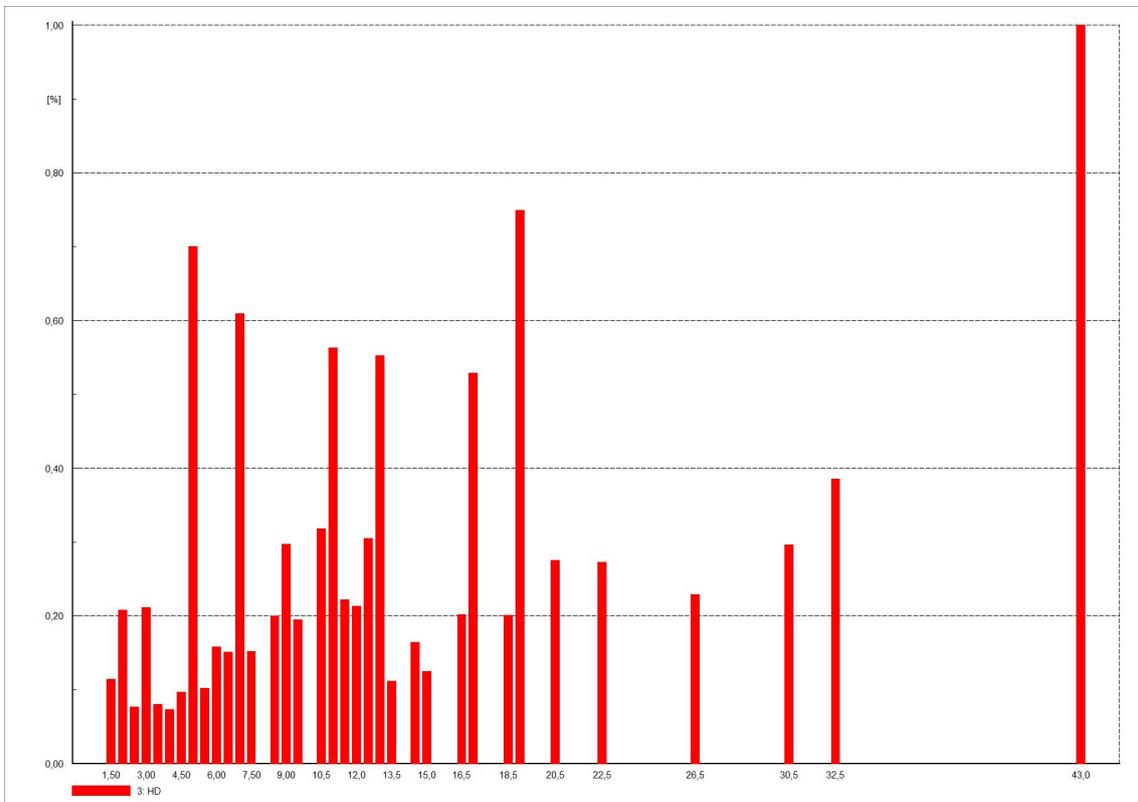


Figura C.1: Harmónicos simulados en PowerFactory

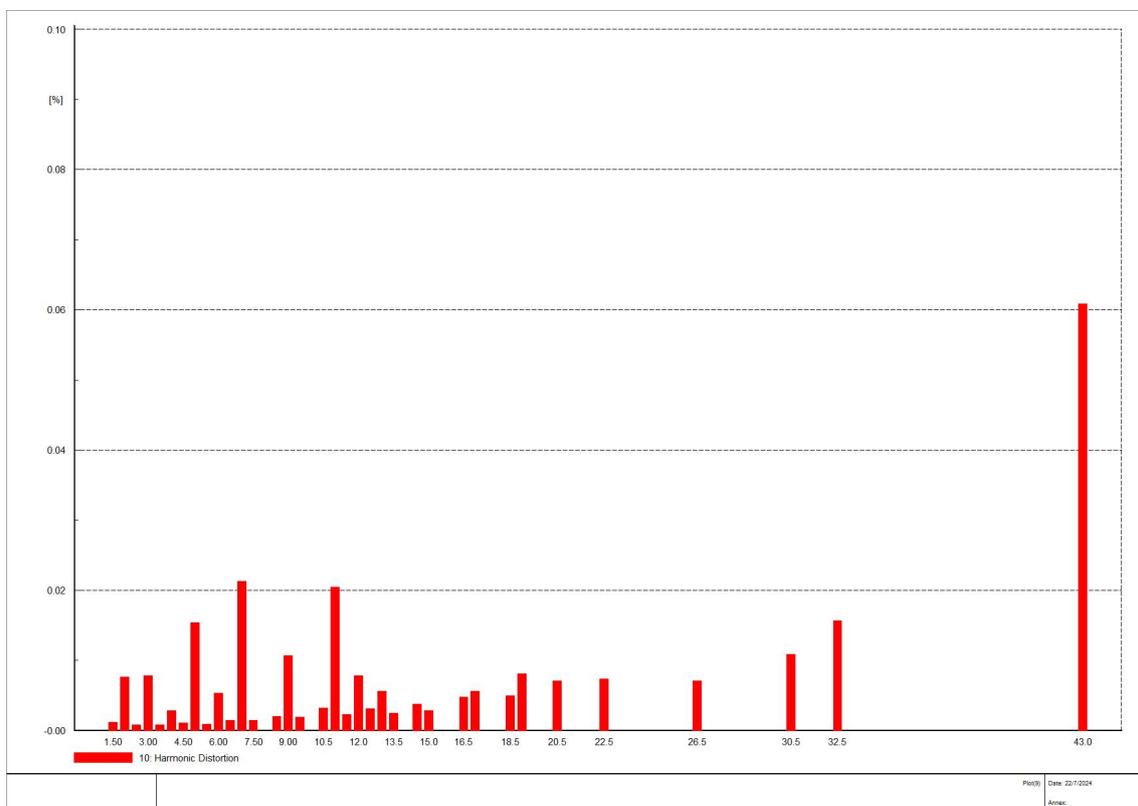


Figura C.2: Harmónicos simulados en PowerFactory aplicando filtro de armónicos

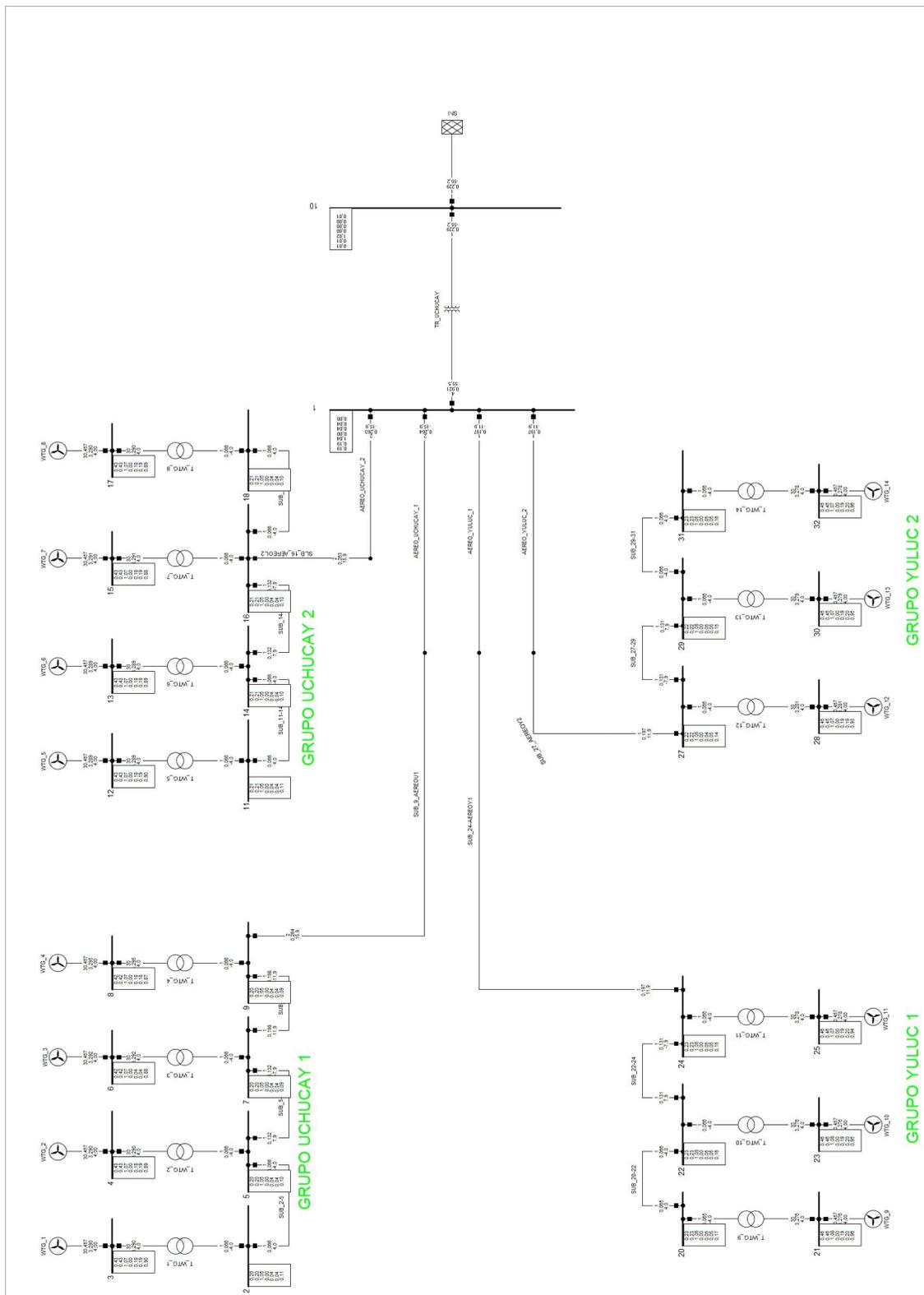


Figura C.3: Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory en el Quinto armónico

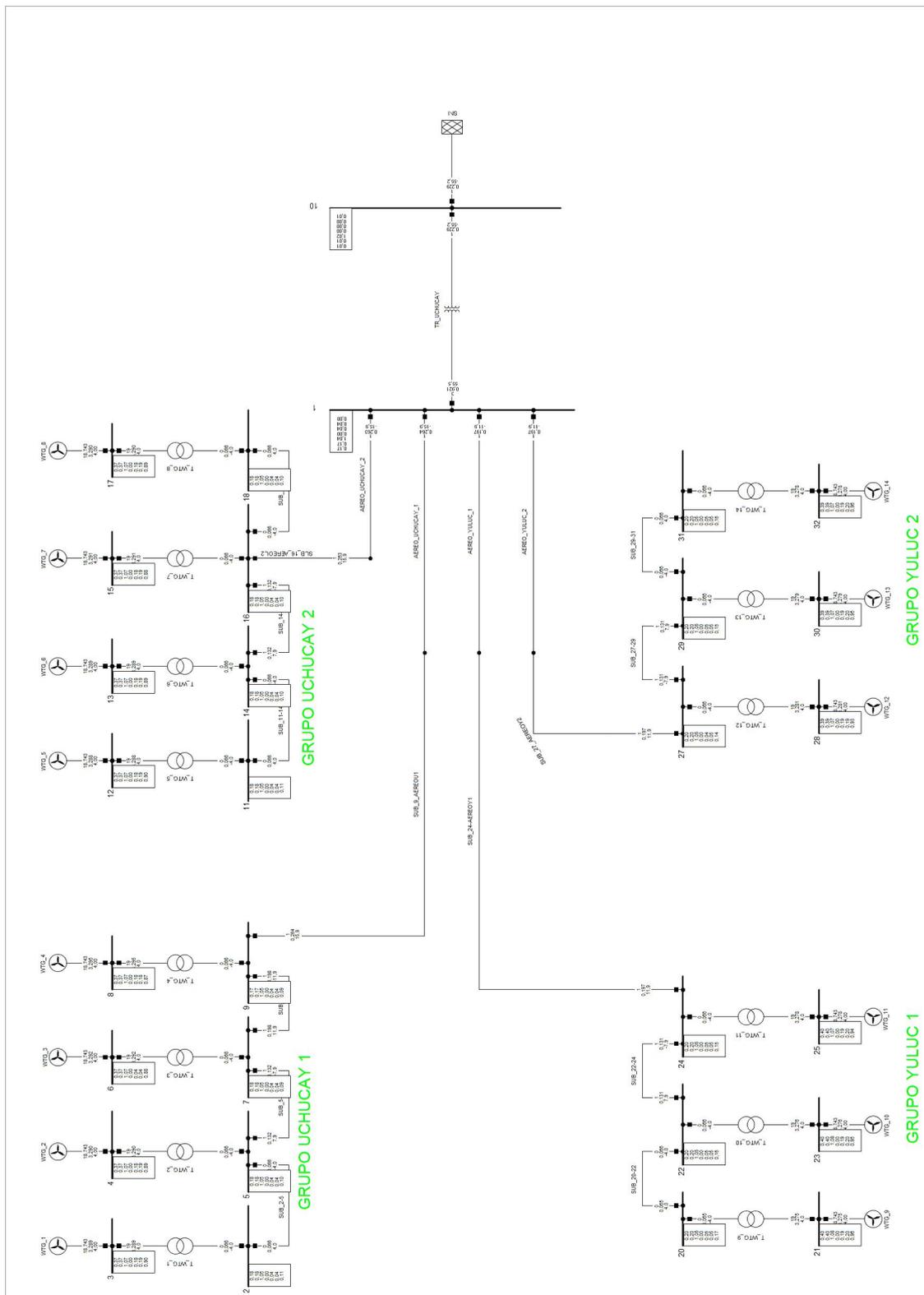


Figura C.4: Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory en el Séptimo armónico

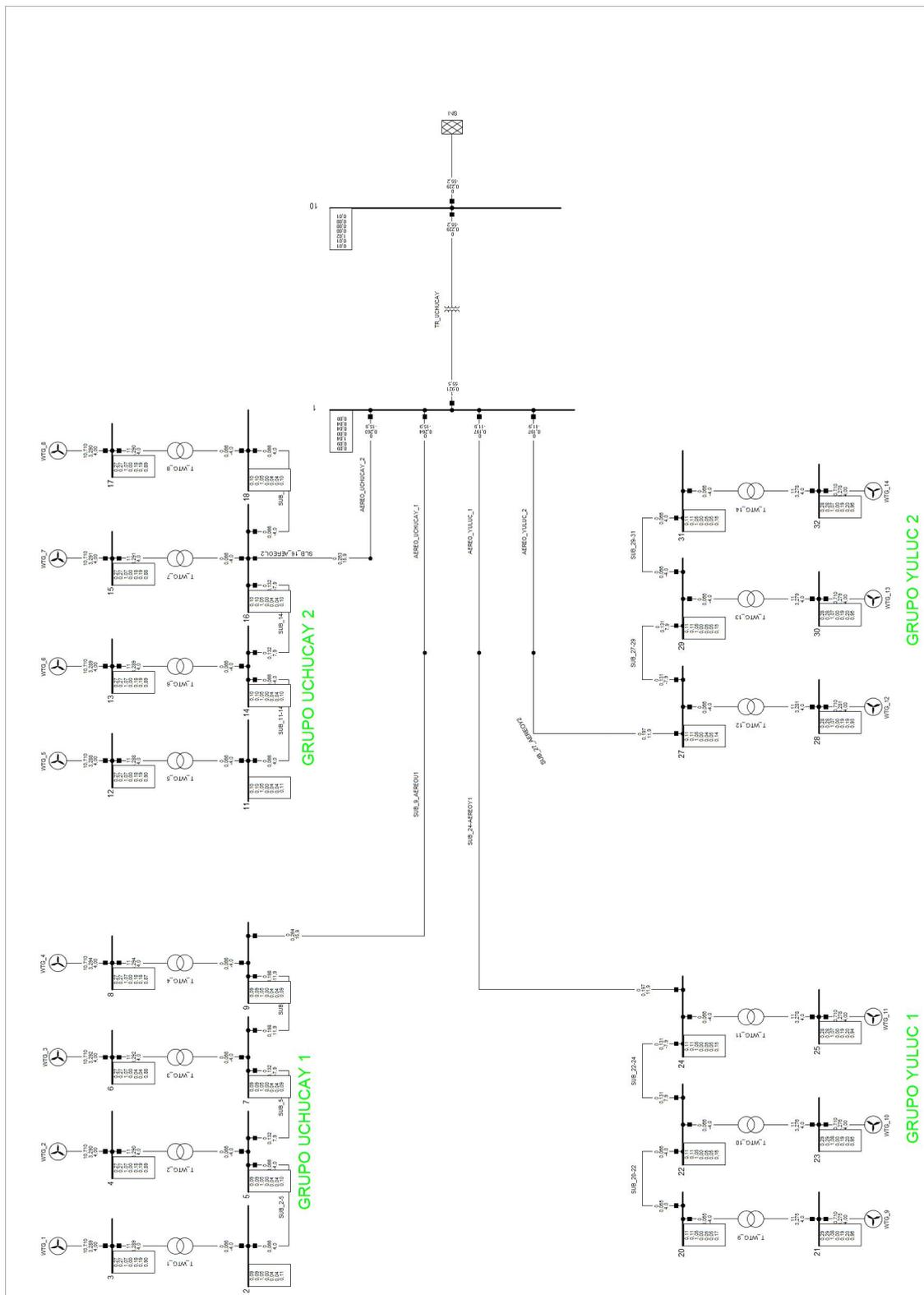


Figura C.5: Central Eólica: Minas de Huaschaca en Programa Power Factory en el onceavo armónico

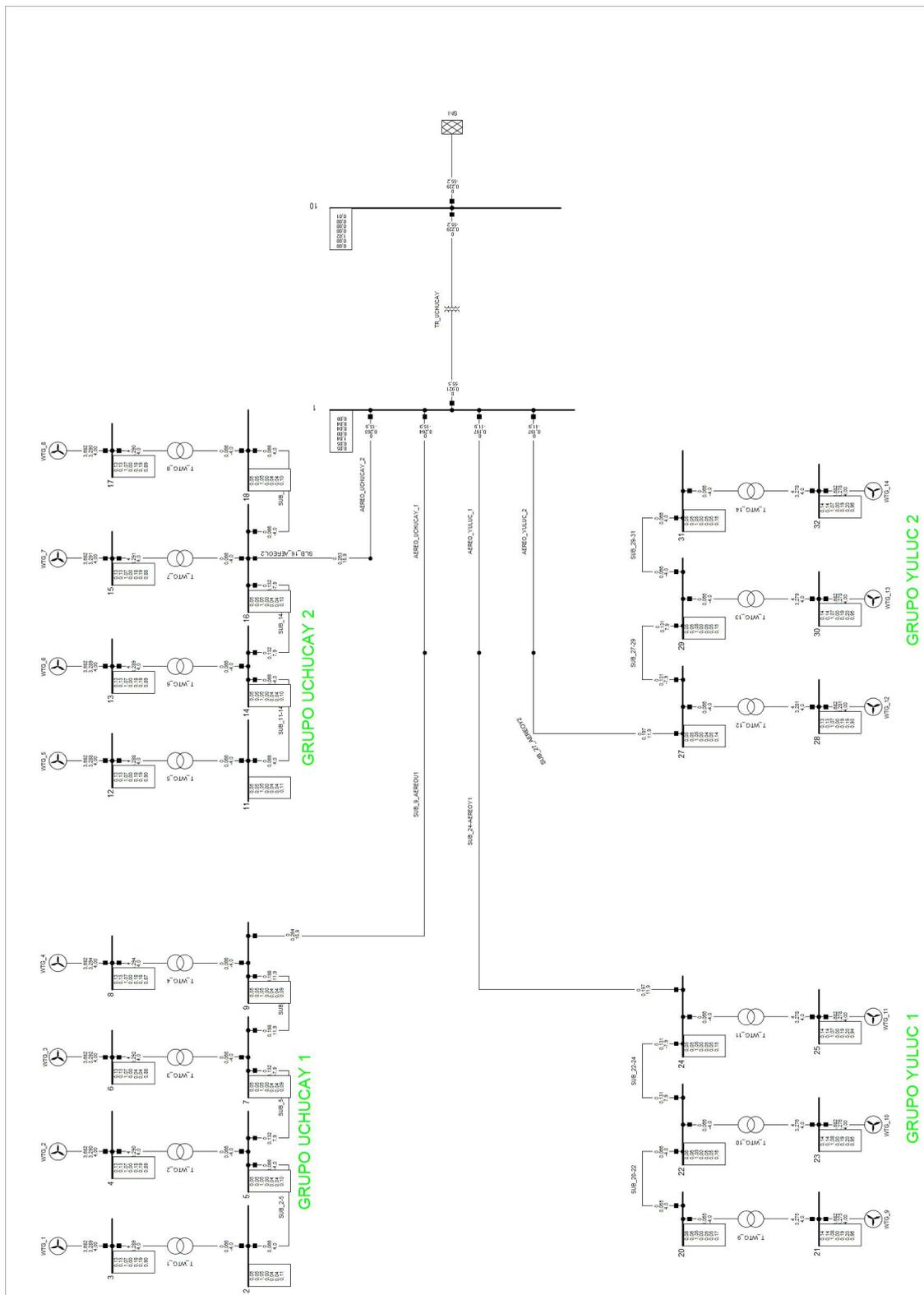


Figura C.6: Central Eólica: Minas de Huascachaca en Programa Power Factory en el Quinceavo armónico

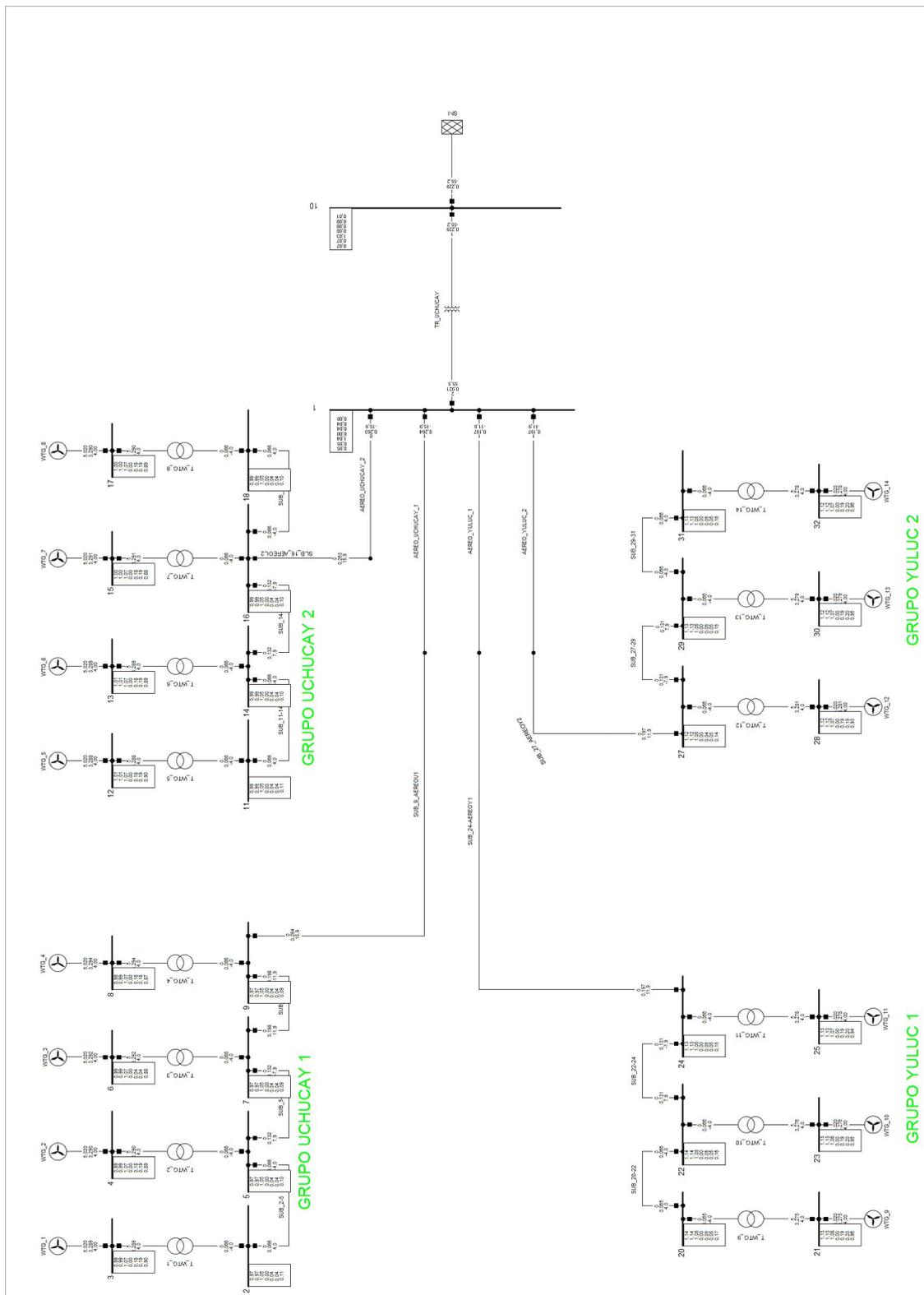


Figura C.7: Central Eólica: Minas de Huaschaca en Programa Power Factory en el cuadragésimo tercero armónico

ANEXO D

Resultados Simulación

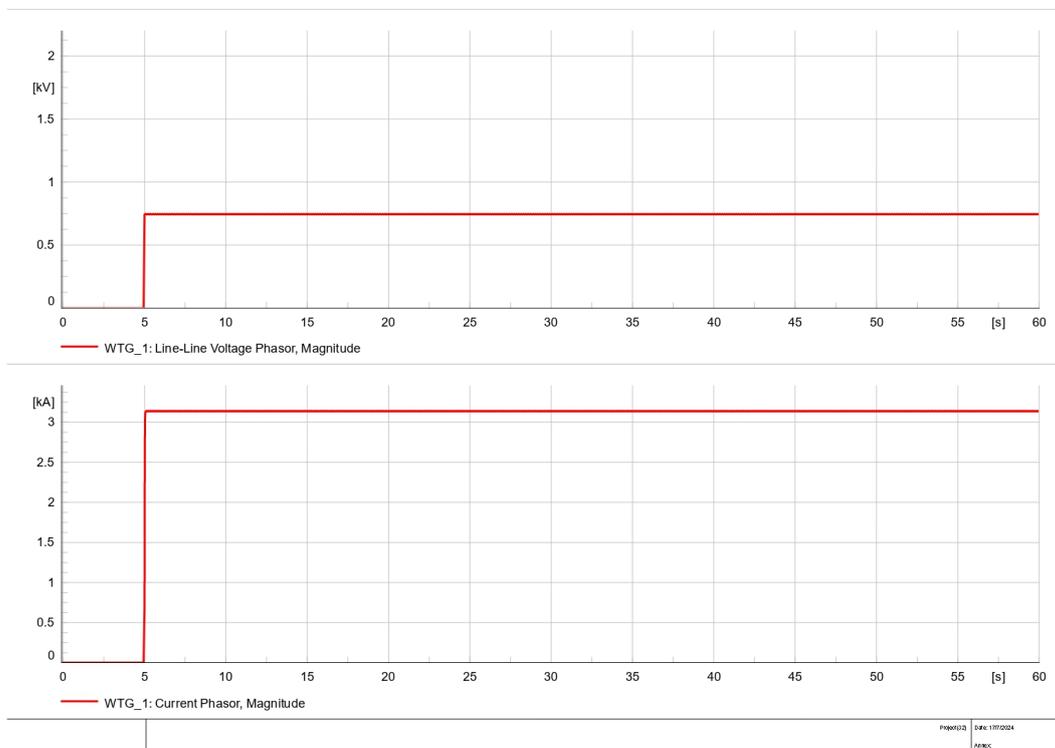


Figura D.1: Simulación arranque aerogenerador, obtención de voltaje y corriente.

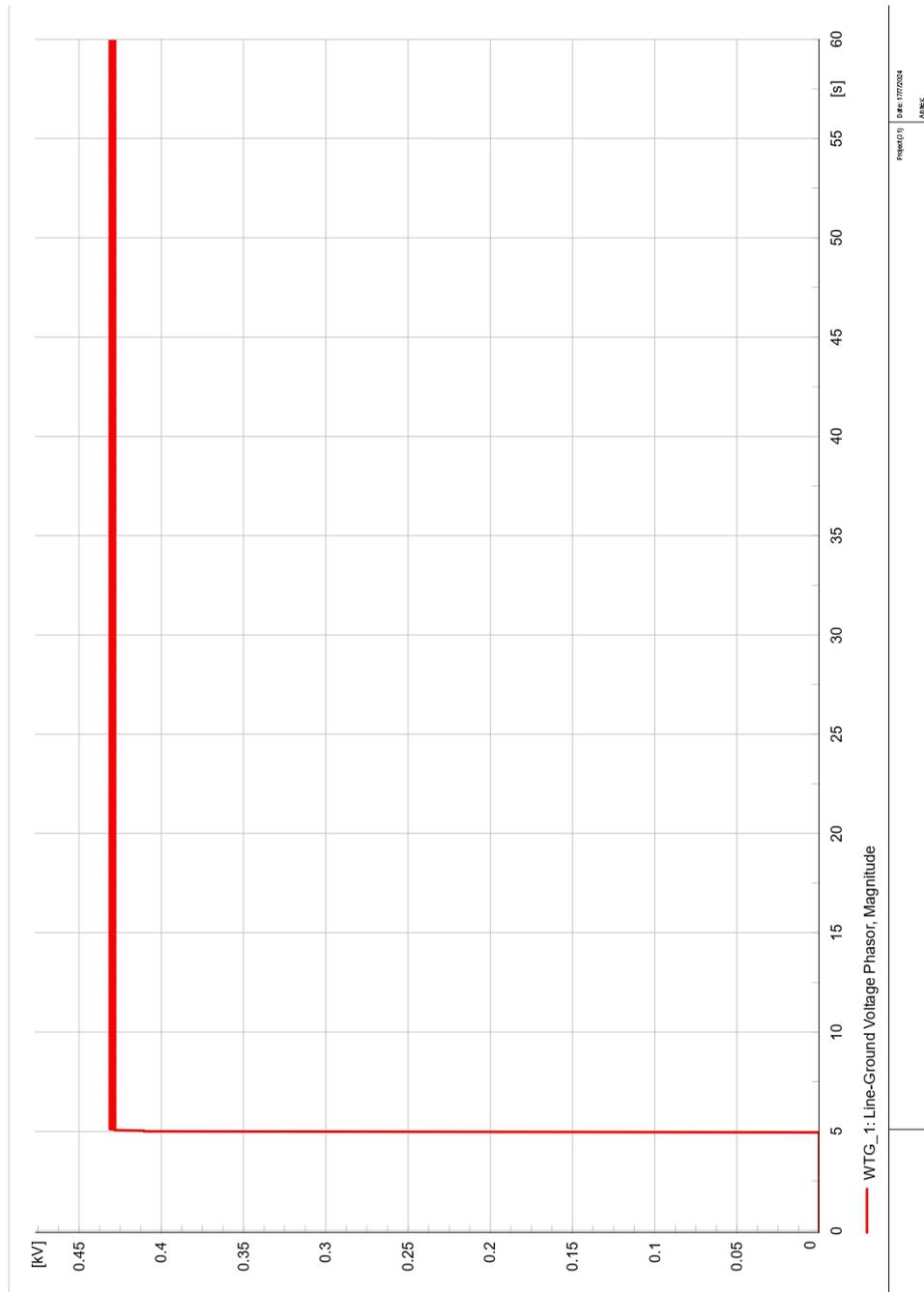


Figura D.2: Valores de voltaje en arranque de aerogenerador, valor estabilización 0,43kV.

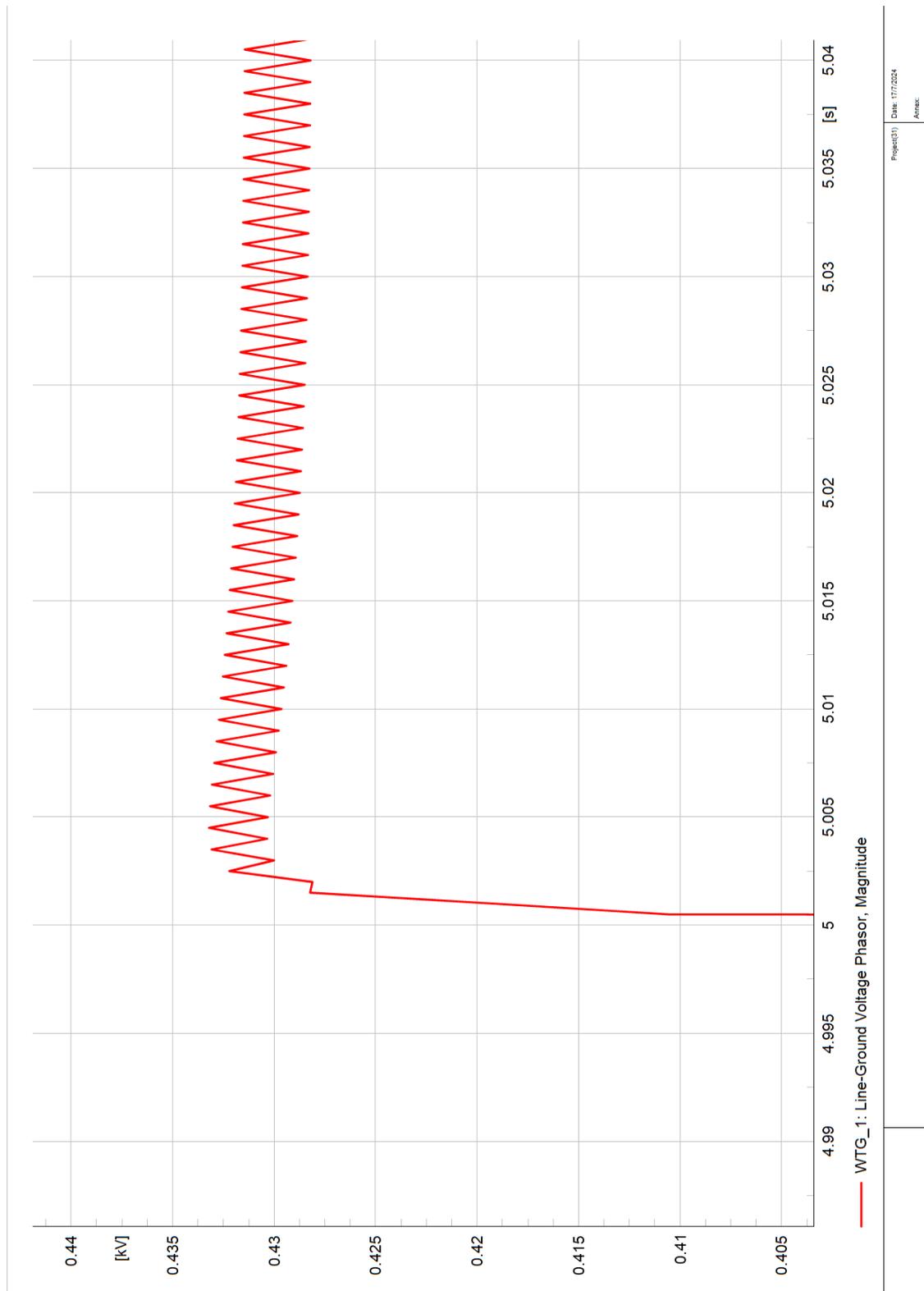


Figura D.3: Valores ampliados de voltaje en arranque de aerogenerador, valor estabilización 0,43kV.

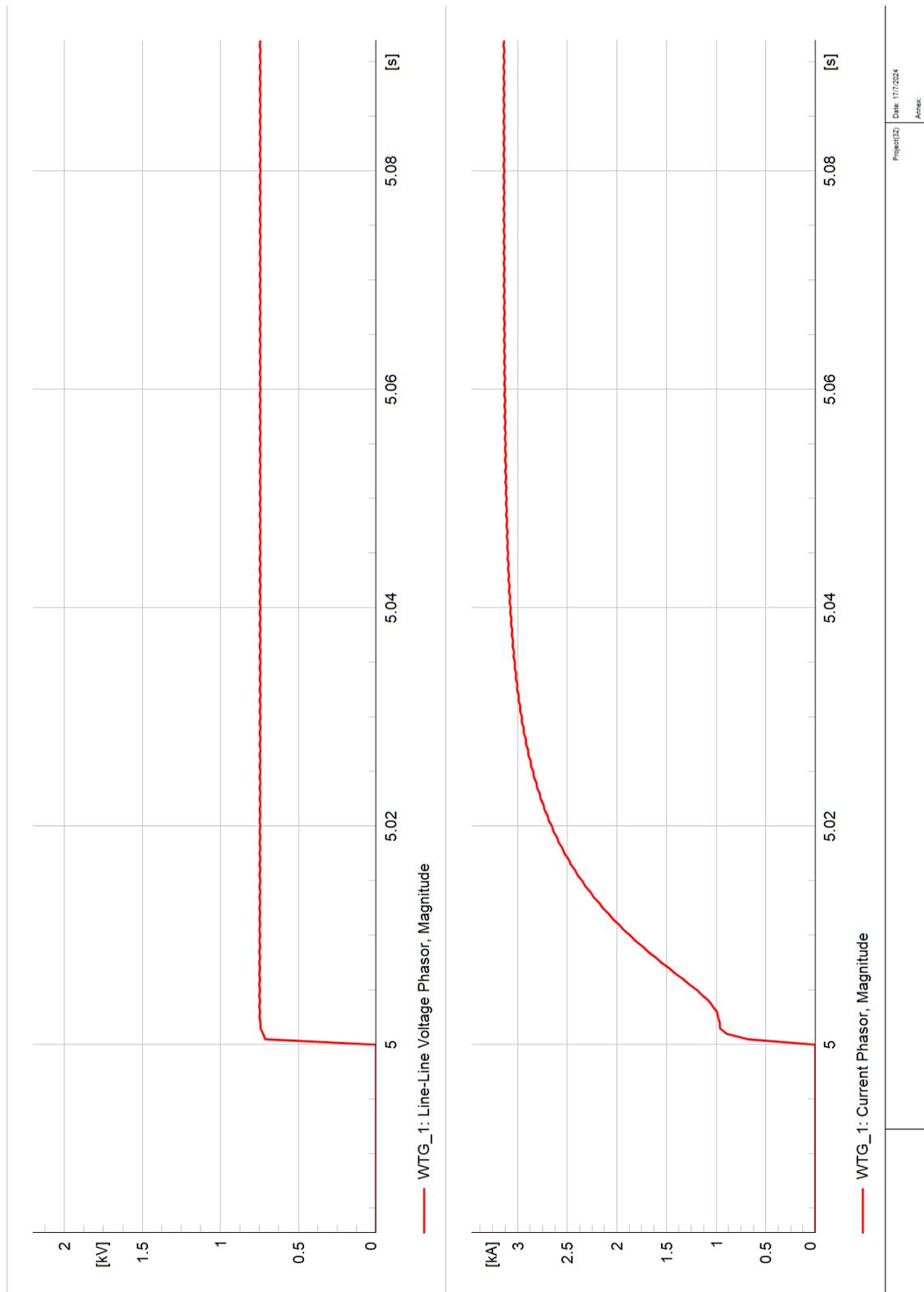


Figura D.4: Rampa de arranque del aerogenerador

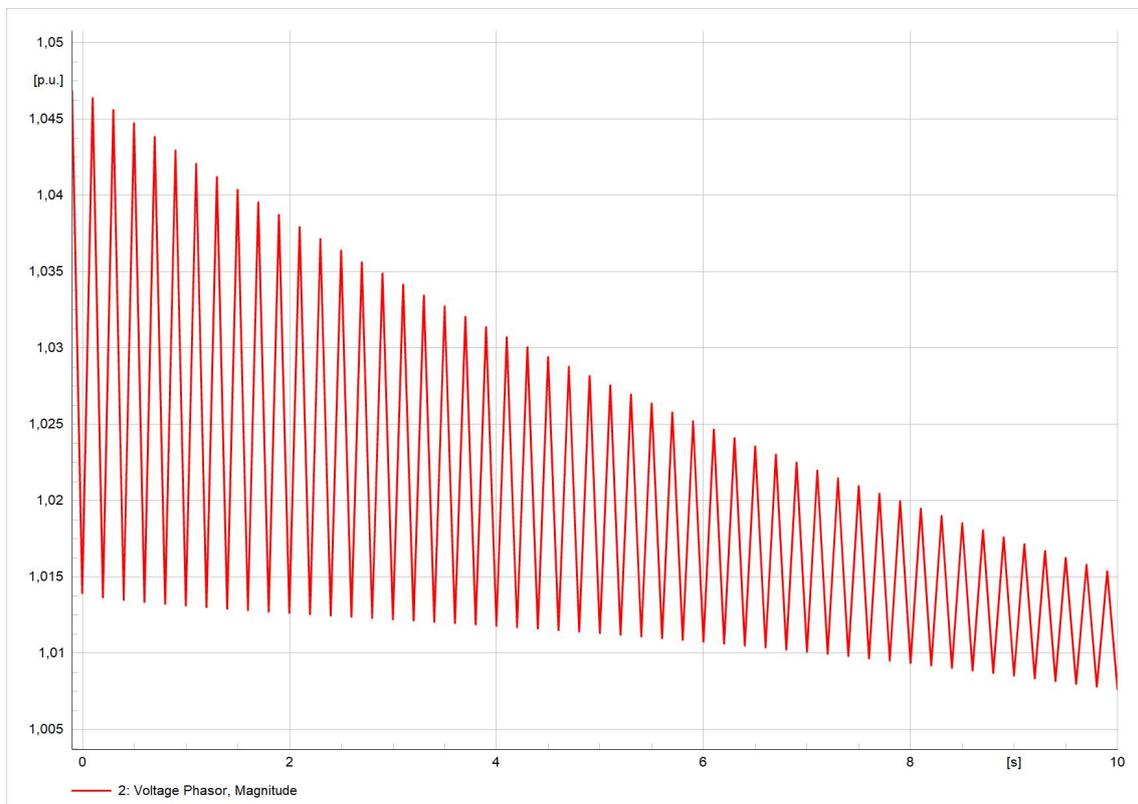


Figura D.5: Caída de voltaje en la barra 2

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dongdang Electric Co., Ltd., “Dec wind power solution,” <https://www.beltandroadassociates.com/wp-content/uploads/2021/04/Dongfang-Wind-Power-Business-Introduction1.pdf>, s/f, recuperado el 27 de junio de 2024. [En línea]. Recuperable: <https://www.beltandroadassociates.com/wp-content/uploads/2021/04/Dongfang-Wind-Power-Business-Introduction1.pdf>
- [2] J. Zhang, M. Cheng, Z. Chen, y X. Fu, “Pitch angle control for variable speed wind turbines,” in *2008 Third international conference on electric utility deregulation and restructuring and power technologies*. IEEE, 2008, pp. 2691–2696.
- [3] “80 de avance presenta Minas de Huascachaca, el proyecto eólico más grande del Ecuador,” 3 2021. [En línea]. Recuperable: <https://www.elecaustro.gob.ec/80-de-avance-presenta-minas-de-huascachaca-el-proyecto-eolico-mas-grande-del-ecuador/>
- [4] Admin, “Código de red, calidad de la potencia (Parte 2: Flicker),” 12 2019. [En línea]. Recuperable: <https://radthink.com.mx/codigo-de-red-calidad-de-la-potencia-parte-2-flicker/>
- [5] F. Corporation, “Power quality logger user’s manual,” USA, Apr. 2006.
- [6] ARCERNNR, “Panorama eléctrico,” ARCERNNR, techreport 9, Mar. 2022. [En línea]. Recuperable: <https://controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/04/PanoramaElectricoIX-Marzo-Baja.pdf>
- [7] Eleaustro, “Con energía hacia el futuro,” *Revista Informativa*, 2009.
- [8] H. I. Chamba Parra, “Coordinación de protecciones de la s/e la paz y s/e uchucay con sus líneas asociadas,” 2021.
- [9] Control Recursos y Energía, “Anexo 003-2023 codificación regulación 002-20,” 2023, accedido: 2024-07-22. [En línea]. Recuperable:

- https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/02/Anexo-003-2023-Codificacion-Regulacion-002-20_rev-DE-signed.pdf
- [10] *IEC 61400-21*, IEC International Standard, 2019.
- [11] *ANSI C84.1, Electric Power Systems Voltage Ratings*, ANSI Standar, 2020.
- [12] I. I. O. Valdivieso y R. L. Romero, “Estudio preliminar de un parque eólico complementario en ecuador: caso pimo provincia del azuay,” *Cuenca, Universidad de Cuenca*, 2019.
- [13] C. Sankaran, *Power quality*. CRC press, 2017.
- [14] CIE, “Proyecto eólico minas de huascachaca,” Elecaustro, Tech. Rep., 2011. [En línea]. Recuperable: <https://energia.org.ec/docs/proyecto-eolico-huascachaca.pdf>
- [15] J. GIMENEZ ALVAREZ y J. C. Gómez Targarona, “Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia,” *Dyna*, vol. 78, no. 169, pp. 95–104, 2011.
- [16] J. J. Pico Llerena, “Determinación del potencial eólico disponible en el sector mechahuasca en la parroquia de pilahuín, cantón ambato, provincia de tungurahua,” B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica . . . , 2019.
- [17] A. Traca de Almeida, L. Moreira, y J. Delgado, “Power quality problems and new solutions,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 01, pp. 25–33, Apr. 2003.
- [18] *004/01, CALIDAD DEL SERVICIO ELECTRICO DE DISTRIBUCION*, CO-NELEC Regulación, 2001.
- [19] J. D. Astudillo Feijoo y J. A. Serrano Mora, “Análisis crítico del diseño geotécnico de cimentaciones para aerogeneradores en el sector minas de huascachaca,” B.S. thesis, Universidad del Azuay, 2022.
- [20] J. Legerén Álvarez, “Diseño de sistema de pitch pasivo para aerogeneradores en entornos urbanos,” 2014.
- [21] A. González y S. Morales, “Control de velocidad de aerogenerador mediante realimentación de variables de estado,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, no. 2, pp. 123–130, 2017.

- [22] P. Peralta y Y. Pesántez, “Estudio de factibilidad para la implementación de un centro de interpretación ambiental en el parque eólico minas de huascachaca,” Ph.D. dissertation, Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniería en Turismo. Director . . . , 2014.
- [23] C. F. Estrella Nieto y F. R. Guamán Quilli, “Impacto de la integración de generación eléctrica no convencional al sistema de transmisión de energía,” Master’s thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
- [24] F. X. A. Rojas, “Modelo multiestado para estudios de confiabilidad del parque eólico minas de huascachaca,” Ph.D. dissertation, UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2015.
- [25] M. V. López, *Ingeniería de la energía eólica*. Marcombo, 2012, vol. 5.
- [26] “Factor de emisión de CO₂ del sistema nacional interconectado de Ecuador,” SNI, Tech. Rep., 2019. [En línea]. Recuperable: https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/11/factor_de_emision_de_co2_del_sistema_nacional_interconectado_de_ecuador_-_informe-2019.pdf
- [27] R. D. Fernández, “Parques eólicos con conexión a redes débiles,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de La Plata, 2007.
- [28] E. A. Barragán, “Generación eólica en Ecuador: Análisis del entorno y perspectivas de desarrollo,” *Revista Técnica “Energía”*, vol. 10, no. 1, Jan. 2014.
- [29] J. L. Rodríguez Amenedo, J. C. Burgos Díaz, y S. Arnalte Gómez, *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*. Rueda, 2003.
- [30] “Definición de flicker,” Recuperado de <https://blog.energygo.es/glosario/definicion-flicker/>, s.f., energyGO.
- [31] K. Redondo, J. J. Gutiérrez, I. Azcarate, P. Saiz, L. A. Leturiondo, y S. Ruiz de Gauna, “Experimental study of the summation of flicker caused by wind turbines,” *Energies*, vol. 12, no. 12, p. 2404, 2019.
- [32] A. Daza Urrego, C. I. Buriticá Arboleda, y Y. Garzón Rodríguez, “Estudio experimental de potencias, factor de potencia y energía eléctrica en cargas industriales tomando como referencia la norma IEEE Std 1459-2010,” *Tecnura*, vol. 19, no. SPE, pp. 41–54, 2015.
- [33] C. González Sanmartín, “Simulación de un analizador de calidad eléctrica,” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2019.
- [34] J. D. Arcila, “Armónicos en sistemas eléctricos,” *Ieb Sa*, pp. 1–26, 2010.

-
- [35] ACCIONA Energía, “Aerogeneradores,” 2024, accessed: 2024-07-17. [En línea]. Recuperable: <https://www.accion.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/>
- [36] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, y E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011.
- [37] I. of Electrical y E. Engineers, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, Std. IEEE Std 519™-2014, 2014.