



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE Y HORIZONTAL ALIMENTADOS CON PWM Y 6-STEP DE LA MARCA BH

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad
mención sistemas eléctricos de potencia

Autor:

Ing. Diego Ramón Segovia Segovia

Tutor:

MSc. Marco Aníbal León Segovia

LATACUNGA – ECUADOR

2023

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Análisis de la calidad de energía en los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal alimentados con PWM y 6-STEP de la marca BH” presentado por Diego Ramón Segovia Segovia, para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, mayo 19, 2023

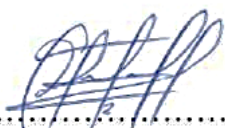


.....
MSc. Marco Aníbal León Segovia
CC. 050230540-2


AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Análisis de la calidad de energía en los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal alimentados con PWM y 6-STEP de la marca BH”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, mayo, 19, 2023



.....
MsC. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa
CC.: 050236581-0
Presidente del tribunal



.....
MsC. Carlos Francisco Pacheco Mena
CC.: 050307290-2
Lector 2



.....
MsC. Carlos Iván Quinatoa Caiza
CC.: 050328786-4
Lector 3

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida, mi familia por estar siempre presentes y a mis mentores quienes con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

Diego Ramón Segovia Segovia

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, mayo 19, 2023

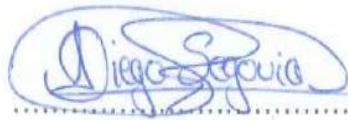


Ing. Diego Ramón Segovia Segovia
CC.: 050306278-8

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, mayo 19, 2023



.....
Ing. Diego Ramón Segovia Segovia
CC.: 050306278-8

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Análisis de la calidad de energía en los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal alimentados con PWM y 6-STEP de la marca BH”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, mayo 19, 2023


.....
MSc. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa
CC.: 050236581-0

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Título: Análisis de la calidad de energía en los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal alimentados con PWM y 6-STEP de la marca BH

Autor: Ing. Diego Ramón Segovia Segovia

Tutor: MsC. Marco Aníbal León Segovia

RESUMEN

Gran parte del desarrollo y aplicación industrial de los convertidores de potencia se debe al avance experimentado en la generación de cualquier forma de onda de tensión deseada. La aparición de las técnicas de modulación, unido a la posibilidad de implementarlas en modernos microprocesadores o dispositivos electrónicos configurables, ha favorecido el uso de los variadores de frecuencia y el desarrollo de los mismos en el sector hidrocarburífero para aplicaciones de Levantamiento Artificial implementadas en los procesos de producción y transporte de petróleo mediante los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal. Diferentes topologías de inversores de frecuencia y métodos de modulación permiten que un convertidor de potencia imponga cualquier forma de onda de tensión a la carga a la que se encuentra conectado. En este trabajo se analizan y comparan los 2 métodos implementados en los variadores de frecuencia de la marca B.H. mediante las técnicas de modulación PWM y 6-STEP, utilizando una metodología experimental de mediciones de calidad potencia eléctrica suministrada a la carga, herramientas de simulación basadas en Matlab – Simulink y cálculo de potencia armónica de carga en los sistemas de bombeo estudiados. El objetivo es plantear un análisis comparativo, que permita entender el funcionamiento de cada técnica de modulación, observando las ventajas e inconvenientes de los diferentes métodos presentados.

PALABRAS CLAVE: Variador de frecuencia, modulación por ancho de pulso (PWM), SIX – STEP, bombeo electrosumergible, petróleo, calidad de energía, armónicos.

**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
DIRECCION DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Topic: “Energy quality analysis in the pumping electrosubmersible systems and supplied horizontal systems with PWM and 6-STEP from BH brand”.

Autor: Segovia Segovia Diego Ramón
Tutor: MsC. Marco Aníbal León Segovia

ABSTRACT

Great part from power converters development and industrial application is due to the experienced advance in the generation of any desired voltage waveform. The modulation techniques appearance, united to the possibility by implementing them into modern microprocessors or configurable electronic devices, they have favored the frequency inverters use and development by same in the hydrocarbon sector for Artificial Lift applications, they implemented in the production processes and oil transportation, through electrosubmersible and horizontal pumping systems. Different frequency inverter topologies and modulation methods allow a power converter to impose any voltage waveform on the load, which it is found connected. This work, it is analyzed and compared the 2 methods implemented in the frequency variators from brand B.H., through the PWM and 6-STEP modulation techniques, by using an experimental methodology for measuring the electrical power quality supplied to the load, simulation tools based on Matlab - Simulink and the load harmonic power calculation in the studied pumping systems. The aim is to propose a comparative analysis, what allows understanding the operation each modulation technique, by observing the presented different methods advantages and issues.

KEYWORDS: Frequency drive variator, pulse width modulation (PWM), SIX – STEP), electric submersible pumping, oil, power quality, harmonics.

Yo, Marco Paúl Beltrán Semblantes con cédula de identidad número 0502666514 Magíster en Lingüística Aplicada a la Enseñanza del Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT: 1020-2021-2354162; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **“ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE Y HORIZONTAL ALIMENTADOS CON PWM Y 6-STEP DE LA MARCA BH”** de: **Segovia Segovia Diego Ramón**, aspirante a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CC: 0502666514



**CENTRO
DE IDIOMAS**

Latacunga, Mayo del 2023.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes.....	1
Planteamiento del problema	2
Formulación del problema.....	2
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos	3
Justificación.....	4
Hipótesis.	4
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEORICA METODOLÓGICA	5
1.1 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.	5
1.2 Fundamentación Teórica.....	9
1.2.1 Sistema de bombeo electrosumergible y horizontal	9
1.2.1.1 Equipo de fondo para sistema de bombeo electrosumergible	11
1.2.1.2 Equipo para sistema de bombeo horizontal reinyección de agua.....	17
1.2.1.3 Equipos de superficie para sistema de bombeo electrosumergible y horizontal.....	25
1.2.2 Fundamentos Teóricos de Armónicos	39
1.3 Normativa sobre la calidad de energía eléctrica	46
1.4 Fundamentación metodológica	47
1.5 Conclusiones	48
CAPÍTULO II. PROPUESTA	50
2.1 Título del proyecto.....	50
2.2 Objetivo del proyecto.....	50
2.3 Justificación de la propuesta	50
2.4 Fundamentación de la propuesta.....	51
2.5 Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados	52
2.5.1 Método para caracterizar la calidad de energía	53
2.5.2 Procedimiento de investigación de calidad de energía de los VSD	53
2.5.3 Procedimiento de evaluación e implementación de lineamientos propios de calidad de energía de los VSD.....	54
2.6 Instrumentación y aplicaciones informáticas usadas	54
2.6.1 Simulink – Matlab	54

2.6.2	Analizador de energía FLUKE 435 SII	55
2.7	Conclusiones	55
CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACION DE LA PROPUESTA.....		56
3.1	Descripción y modelación de los de los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal	56
3.1.1	Descripción de componentes del sistema de bombeo electrosumergible .	57
3.1.1.1	Variador Vector Plus unidad SCH-007	57
3.1.1.2	Variador Electrospeed III GCS.....	59
3.1.1.3	Transformador Elevador Multifrecuencial	60
3.1.1.4	Cable de potencia.....	61
3.1.1.5	Motor de fondo sistema BES	62
3.1.2	Descripción de componentes del sistema de bombeo horizontal	62
3.1.2.1	Variador Vector Plus	62
3.1.2.2	Motor de superficie sistema de bombeo horizontal HPS	63
3.2	Descripción de ensayos realizados en los sistemas F-PWM y 6 STEP	64
3.3	Ensayo experimental.....	66
3.3.1	Conexión del analizador de energía FLUKE 435 SII.....	66
3.3.2	Configuración del analizador de energía FLUKE 435 SII	67
3.4	Modelación de los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal	68
3.5	Análisis y comparación de resultados de ensayos realizados vs simulación ...	70
3.5.1	VSD Vector PLUS salida F-PWM en sistema BES unidad SCH-007.....	70
3.5.1.1	Distorsión armónica de tensión VSD Vector PLUS (F-PWM) SCH-007	71
3.5.1.2	Distorsión armónica de corriente VSD Vector PLUS (F-PWM) SCH-007	78
3.5.2	Ensayos realizados con VSD Electrospeed GCS 6-STEP en sistema de bombeo electrosumergible.....	84
3.5.2.1	Distorsión armónica de tensión VSD Electrospeed GCS (6-STEP) SCHAA-301	84
3.5.2.2	Distorsión armónica de corriente VSD Electrospeed GCS (6-STEP) SCHAA-301..	91
3.5.3	Ensayos realizados con VSD Vector PLUS en sistema HPS SCHN-002...	98

3.5.3.1	Distorsión armónica de tensión VSD Vector Plus (F-PWM) SCHN-002...	98
3.5.3.2	Distorsión armónica de corriente VSD Vector PLUS (F-PWM) SCHN-002	102
3.6	Potencia armónica de carga en los sistemas de bombeo horizontal y electrosumergible con alimentación F-PWM y 6-STEP.....	105
3.6.1	Potencia armónica de carga en el equipo de superficie	105
3.6.1.1	Potencia armónica en el núcleo magnético del transformador	105
3.6.1.2	Potencia armónica debido al efecto piel.....	106
3.6.1.3	Potencia armónica por circulación de corrientes de Eddy.....	106
3.6.1.4	Potencia armónica de carga total en el transformador.....	106
3.6.1.5	Potencia armónica de carga total en “Por Unidad”	107
3.6.1.6	Factor K del motor.....	108
3.6.2	Potencia armónica de carga en el equipo de fondo	109
3.6.2.1	Efecto del contenido armónico de voltaje en sistemas de bombeo electrosumergible.....	109
3.6.2.2	VSD Electrospeed III GCS con tecnología de inversión de voltaje 6-STEP	111
3.6.2.3	VSD Vector Plus con tecnología de inversión de voltaje F-PWM.....	113
3.6.3	Potencia armónica de carga debido al THDi	114
3.6.3.1	Potencia de carga debida al Efecto Piel en el Cable Eléctrico de Potencia ...	114
3.6.3.2	Potencia armónica de carga debido al Efecto Piel en el Motor	115
3.6.3.3	Torque en el Motor	115
3.6.4	Cálculo de la potencia armónica de carga en los equipos electrosumergibles con inversor de salida F-PWM y 6-STEP	115
3.6.4.1	Potencia armónica de carga en transformador elevador multifrecuencial ...	115
3.6.4.2	Potencia armónica de carga en el equipo de fondo	125
3.6.4.2.1	Cable eléctrico de potencia sistema electrosumergible	125
3.6.4.2.2	Motor sistema electrosumergible BH	131
3.6.5	Porcentaje de carga equipos BES con inversor de salida F-PWM y 6-STEP	132

3.6.6	Análisis de resultados distorsión armónica total en el punto de acoplamiento	
	VSD-SUT	134
	CONCLUSIONES	138
	RECOMENDACIONES	140
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
	ANEXOS	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Onda sin contenido armónico.....	5
Figura 2. Onda con contenido armónico.....	6
Figura 3. Factor de reducción para motores de redes con armónicos.....	8
Figura 4. Diagrama de componentes del sistema BES	10
Figura 5. Diagrama de componentes de sistema de bombeo horizontal.....	10
Figura 6. Diagrama y componentes bomba multietapas.....	11
Figura 7. Intake / Separador de gas	12
Figura 8. Componentes y diagrama del sello.....	13
Figura 9. Motor BES.....	14
Figura 10. Estator motor BES.....	14
Figura 11. Rotor motor BES	15
Figura 12. Cabezal y cojinete de empuje motor BES	16
Figura 13. Motor Lead Extension	16
Figura 14. Partes del cable de potencia BES	17
Figura 15. Bomba horizontal HPump	18
Figura 16. Diagrama cámara de empuje	18
Figura 17. Cámara de succión / Sello mecánico.....	19
Figura 18. Skid ESM Baker Hughes.....	19
Figura 19. Vista exterior y en corte de un motor inducción trifásico	20
Figura 20. Curva par-velocidad típicas para diferentes diseños de rotor	22
Figura 21. Transformador reductor y elevador de sistema BES.....	25
Figura 22. Diagrama funcional de un variador de frecuencia VSD	27
Figura 23. Inversor trifásico VSI de 2 niveles en puente completo.....	28
Figura 24. Esquema de modulación trifásico PWM basado en portadora.....	29
Figura 25. Formas de señal portadora a) Triangular b) Pendiente negativa c) Pendiente positiva d) Aleatoria	30
Figura 26. Formas de onda del conjunto de señales moduladoras V_i^* a) Sinusoidal b) Inyección del tercer armónico, c) Discontinua d) CB-SVPWM.....	30
Figura 27. PWM de muestreo natural.....	31
Figura 28. PWM de muestreo regular simétrico.....	31
Figura 29. PWM regular asimétrico	32
Figura 30. Principio Voltio-segundo (fase A en un periodo de portadora T_s)	33

Figura 31. Forma de onda de modulación 6-STEP.....	34
Figura 32. Sobre modulación de la fase A.....	35
Figura 33. Proceso de modulación SPWM trifásico.....	36
Figura 34. Curva característica del SPWM. Relación del índice de modulación con el porcentaje de utilización del bus DC.....	37
Figura 35. Vectores de conmutación de coordenadas	38
Figura 36. Modulación SVPWM sextantes	38
Figura 37. Secuencia de conmutación técnica SVPWM. a) Continuo b) Discontinuo .	39
Figura 38. Secuencia de conmutación técnica.....	40
Figura 39. Sistema trifásico con diferentes formas de onda.....	44
Figura 40. Interfaz Simulink-Matlab	54
Figura 41. Analizador de energía Fluke 435 II.....	55
Figura 42. Diagrama unifilar sistemas bombeo electrosumergible y de superficie.....	57
Figura 43. VSD Vector Plus	58
Figura 44. VSD Electrospeed III GCS	60
Figura 45. Grupos de conexión transformador elevador sistema BES.....	61
Figura 46. Motor WEG 500 HP sistema HPS F-PWM SCHN-002	63
Figura 47. Conexión del osciloscopio de tensión Fluke 435 SII	66
Figura 48. Conexión del osciloscopio de corriente Fluke 435 SII	67
Figura 49. Programación del analizador de energía Fluke 435 SII	67
Figura 50. Modelo computacional VSD salida F-PWM BES SCH-007	68
Figura 51. Modelo computacional VSD salida F-PWM HPS SCHN-002	68
Figura 52. Modelo computacional Filtro LC VSG.....	69
Figura 53. Modelo computacional VSD salida 6-STEP BES SCHAA-301.....	69
Figura 54. Oscilograma tensión y espectro armónico BES F-PWM a 45 Hz.....	74
Figura 55. Oscilograma tensión y espectro armónico BES F-PWM a 50 Hz.....	75
Figura 56. Oscilograma tensión y espectro armónico BES F-PWM a 55 Hz.....	76
Figura 57. Oscilograma tensión y espectro armónico BES F-PWM a 60 Hz.....	77
Figura 58. Oscilograma corriente y espectro armónico BES F-PWM a 45 Hz.....	80
Figura 60. Oscilograma corriente y espectro armónico BES F-PWM a 50 Hz.....	81
Figura 61. Oscilograma corriente y espectro armónico BES F-PWM a 55 Hz.....	82
Figura 62. Oscilograma corriente y espectro armónico BES F-PWM a 60 Hz.....	83
Figura 63. Oscilograma tensión y espectro armónico BES 6-STEP a 45 Hz.....	87
Figura 64. Oscilograma tensión y espectro armónico BES 6-STEP a 50 Hz.....	88

Figura 65. Oscilograma tensión y espectro armónico BES 6-STEP a 55 Hz	89
Figura 66. Oscilograma tensión y espectro armónico BES 6-STEP a 60 Hz	90
Figura 67. Oscilograma corriente y espectro armónico BES 6-STEP a 45 Hz	94
Figura 68. Oscilograma corriente y espectro armónico BES 6-STEP a 50 Hz	95
Figura 69. Oscilograma corriente y espectro armónico BES 6-STEP a 55 Hz	96
Figura 70. Oscilograma corriente y espectro armónico BES 6-STEP a 60 Hz	97
Figura 71. Oscilograma tensión y espectro armónico HPS F-PWM a 50 Hz.....	100
Figura 72. Oscilograma tensión y espectro armónico HPS F-PWM a 55 Hz.....	101
Figura 73. Oscilograma corriente y espectro armónico HPS 6-STEP a 50 Hz	103
Figura 74. Oscilograma corriente y espectro armónico HPS 6-STEP a 55 Hz	104
Figura 75. Circuito equivalente simplificado del equipo de fondo	110
Figura 76. Curva de resonancia experimental de equipo de fondo en función de inversión de voltaje PWM en el VSD.....	111
Figura 77. Curva de resonancia experimental sistema BES SCHAA-301 6-STEP	112
Figura 78. Curva de resonancia experimental sistema BES SCH-007 F-PWM.....	113
Figura 79. Respuesta a frecuencia de salida de tensión del VSD Vector Plus con salida F-PWM con $f_c = 2$ KHz con $f_1 = 45$ Hz, 50 Hz, 55 Hz y 60 Hz.....	114
Figura 80. Incremento progresivo de la potencia armónica por efecto piel en SUT ...	123
Figura 81. Incremento progresivo de la potencia armónica por Corrientes Eddy en SUT	124
Figura 82. Incremento progresivo de la potencia armónica por Corrientes Eddy cable BES.....	130
Figura 83. Forma de onda de voltaje y corriente VSD con inversor 6-STEP	134
Figura 84. Forma de onda de voltaje y corriente VSD con inversor F-PWM	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos	3
Tabla 2.	Clases de motor de inducción trifásico AC de acuerdo a NEMA 3	23
Tabla 3.	Secuencia de fases de los componentes armónicos.....	43
Tabla 4.	Principales características del VSD Vector Plus sistema de bombeo electrosumergible	58
Tabla 5.	Principales características del VSD Electrospeed III GCS	59
Tabla 6.	Principales características del transformador elevador	60
Tabla 7.	Características técnicas cable de potencia BES SCH-007 9168.9 pies.....	61
Tabla 8.	Características técnicas cable de potencia BES SCHAA-301 9598.3 pies..	61
Tabla 9.	Principales características del motor electrosumergible marca BH	62
Tabla 10.	Placa característica del VSD Vector Plus Sistema Bombeo Horizontal	63
Tabla 11.	Principales características del motor WEG.....	64
Tabla 12.	Mediciones experimentales desarrolladas en los VSD	66
Tabla 13.	Corriente y voltaje medidos en el punto de acoplamiento VSD-SUT BES F-PWM unidad SCH-007	71
Tabla 14.	Resultado de armónicos individuales de tensión medido vs simulado, unidad SCH-007 (F-PWM)	72
Tabla 15.	Resultado de armónicos individuales de intensidad medido vs simulado, unidad SCH-007 (F-PWM)	79
Tabla 16.	Voltaje y corriente medido en el punto de acoplamiento VSD BES 6-STEP unidad SCHAA-301	84
Tabla 17.	Resultado de armónicos individuales de tensión medido vs simulado, unidad SCHAA-301 (6-STEP).....	85
Tabla 18.	Resultado de armónicos individuales de intensidad medido vs simulado, unidad SCHAA-301 (6-STEP).....	92
Tabla 19.	Voltaje y corriente medido en el punto de acoplamiento VSD HPS F-PWM unidad SCHN-002	98
Tabla 20.	Resultado de armónicos individuales de tensión medido vs simulado, unidad SCHN-002 (F-PWM)	99
Tabla 21.	Resultado de armónicos individuales de intensidad medido vs simulado, unidad SCHN-002 (F-PWM)	102
Tabla 22.	Información técnica de transformador elevador multifrecuencial	115

Tabla 23.	Cálculo para potencia armónica por efecto piel y corrientes de Eddy para el VSD Vector Plus con inversor de salida F-PWM.....	117
Tabla 24.	Cálculo para potencia armónica por efecto piel y corrientes de Eddy para el VSD Electrospeed III GCS con inversor de salida 6-STEP.....	118
Tabla 25.	Potencia y corriente armónica por efecto piel y corrientes de Eddy VSD F-PWM SCH-007 a $F_n = 45 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}, 55 \text{ Hz}, 60 \text{ Hz}$	122
Tabla 26.	Potencia y corriente armónica por efecto piel y corrientes de Eddy VSD 6-STEP SCHAA-301 a $F_n = 45 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}, 55 \text{ Hz}, 60 \text{ Hz}$	122
Tabla 27.	Cálculo para potencia armónica de carga en el cable eléctrico de potencia inversor de salida F-PWM.....	127
Tabla 28.	Cálculo para potencia armónica de carga en el cable eléctrico de potencia inversor de salida 6-STEP	128
Tabla 29.	Factor K motor BES unidad SCH-007 F-PWM.....	132
Tabla 30.	Factor K motor BES unidad SCHAA-301 6-STEP	132
Tabla 31.	Cálculo cargas equipo de fondo y superficie unidad SCH-007 F-PWM ...	134
Tabla 32.	Cálculo cargas equipo de fondo y superficie unidad SCHAA-301 6-STEP	134
Tabla 33.	Análisis de calidad de energía suministrada en sistema BES y HPS con VSD inversor de salida F-PWM.....	136
Tabla 34.	Análisis de calidad de energía suministrada en sistema BES con VSD inversor de salida 6-STEP	137

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Prácticamente en todos los sistemas eléctricos de potencia, los motores de inducción trifásicos son los componentes más utilizados en los procesos industriales, la mayoría de estos se encuentran accionados por variadores de frecuencia, como consecuencia sufren los efectos adversos de los armónicos, este problema es ocasionado por elementos semiconductores de la electrónica que son considerados cargas no lineales, los mismos que son generados por el uso de inversores, histéresis del conductor, convertidores de potencia, etc.

De la misma manera para sistemas de bombeo electrosumergible y horizontales usados en el sector petrolero en donde se requieren velocidades variables, la fuente de alimentación debe suministrar voltajes con amplitud y frecuencia variables; la solución más utilizada para poner en marcha los motores electrosumergibles y de superficie se realiza mediante el uso de inversores.

Las técnicas de modulación PWM (Pulse-Width Modulation) y 6 STEP, que se han diseñado actualmente en casi todos los convertidores, como accionamientos para máquinas eléctricas, no generan una onda de voltaje y corriente perfectamente sinusoidales; el principal motivo que ocasiona este comportamiento es la frecuencia de conmutación a la que trabajan los semiconductores.

Los inversores son sistemas formados por un conjunto de seis transistores de potencia, con seis diodos en antiparalelo alimentados por una fuente de voltaje DC. Cada par transistor-diodo opera en los estados de corte o saturación comportándose como un interruptor que conduce en ambos sentidos; la carga trifásica (el motor de inducción) se conecta entre los puntos a, b y c. A partir del estado de los interruptores, los terminales de salida de cada rama toman los valores de tensión $\frac{V_{dc}}{2}$ o $-\frac{V_{dc}}{2}$ con respecto al terminal central de fuente de DCN. La secuencia de conmutación que siguen los interruptores viene impuesta por un proceso de modulación responsable de determinar la forma de la señal de salida. [1]

La gran mayoría de estudios realizados de los efectos de los armónicos generalmente se lo realiza en las redes de distribución o en subestaciones eléctricas, para determinar la

calidad de energía y el dominio de la frecuencia que se encuentran trabajando y sus posibles consecuencias. Por medio del presente estudio se procederá a determinar el modo adecuado y necesario para el mejor funcionamiento de los motores de inducción utilizados en las aplicaciones del sector de extracción petrolera.

Planteamiento del problema

En la actualidad, la aplicación de variadores de frecuencia en el sector petrolero se encuentra ligado a los motores trifásicos de inducción para los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal. La capacidad de adaptar el régimen de fabricación de los equipos a los diversos caudales demandados en los diferentes procesos de producción y transporte de petróleo, con la facilidad de ajustar las prestaciones de las máquinas eléctricas con velocidades variables a las necesidades de producción de las empresas, vuelve más eficiente al sistema productivo y reduce los costes operativos.

Los procesos de variación de velocidad de motores eléctricos se logran a través de inversores que tienen una salida PWM (Modulación por ancho de pulso) y 6-STEP, los mismos que son construidos con semiconductores controlados más rápidos y eficientes.

Por lo tanto, el análisis e investigación del conjunto variador de frecuencia – motor representa una prioridad, ya que junto a un diseño y selección correcta de las características del sistema debemos estudiar las influencias o solicitaciones que el variador impone al comportamiento del motor, para obtener un óptimo resultado y alargar la vida útil de los equipos.

Formulación del problema

Debido a las características mismas de los sistemas Variador – Motor los principales efectos causados por las corrientes armónicas se pueden tener efectos adversos sobre los sistemas de potencia, sobre la carga y en los circuitos de comunicación. Con respecto a las aplicaciones de bombeo electrosumergible y horizontal del sector petrolero, tanto los motores como los transformadores pueden estar sometidos a estas distorsiones armónicas que pueden ocasionar fallas prematuras y reducción de la vida útil de los sistemas.

De esta forma las consecuencias de las armónicas de tensión y corriente se pueden describir en el incremento de temperatura en el bobinado del estator en las máquinas de inducción, efecto de la frecuencia skin y efecto de inducción por proximidad en cables de potencia, efecto flicker, disparo de alarmas del VSD y dispositivos de protección, daños en semiconductores, disminución de aislamiento y errores en las mediciones eléctricas.

Objetivo General

Desarrollar un análisis operacional de la calidad de energía en los sistemas de bombeo electro sumergible y horizontal alimentados con PWM y 6-STEP de la marca BH, con la finalidad de alargar la vida útil de los equipos.

Objetivos Específicos

Determinar los fenómenos eléctricos que se producen en los sistemas de bombeo electro sumergibles y horizontales alimentados con PWM y 6-STEP.

Realizar un estudio de corrientes armónicas de salida en los sistemas de bombeo electro sumergibles y horizontales alimentados con PWM y 6-STEP.

Evaluar los métodos empleados para la reducción de la distorsión armónica en los sistemas de bombeo electro sumergibles y horizontales alimentados con PWM y 6-STEP.

Tabla 1. Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
1	Investigación bibliográfica y adquisición de datos	Obtención de información y variables para investigación	Consulta de investigaciones previas, tesis, manuales de usuario
2	Estudio de corrientes armónicas de equipos	Recopilación y análisis de datos y resultados de mediciones	Mediciones de calidad de energía y análisis de resultados
3	Evaluación de métodos para e impacto de distorsión armónica	Validación de métodos utilizados de acuerdo a la norma	Comparación de mediciones realizadas

Fuente: El autor

Justificación

Los procesos industriales relacionados a los sistemas de bombeo utilizados para producción y transporte de petróleo, involucran la utilización de motores eléctricos; siendo el motor de inducción trifásico AC el más utilizado en la industria. Sin embargo, su empleo para aplicaciones en donde se requiere variación de velocidad es restringido ya que estos motores giran a velocidades prácticamente fijas, las cuales son determinadas por las características técnicas de fabricación y la fuente de alimentación.

Los VSD surgen de la necesidad de optimizar los procesos industriales mediante la variación de velocidad de motores de inducción de alta eficiencia. La combinación de estos equipos, VSD y motor eléctrico permitió un avance eficiente y económico en aplicaciones industriales que requerían control de velocidades variables; sin embargo, este sistema desde su inicio ha presentado un efecto adverso que se caracteriza por producir corrientes armónicas en el sistema, originando este tipo de alimentación pérdidas adicionales tanto en los devanados del estator como en el rotor del motor eléctrico. Este incremento de pérdidas se transforma en un aumento adicional de la temperatura en puntos de la máquina que no se presentaban cuando se alimentaba con red sinusoidal y siempre comparando a igual potencia mecánica desarrollada y con la misma refrigeración.

Como consecuencia de este fenómeno el aislamiento del motor eléctrico y los cables sufren un gran estrés, lo cual puede conducir a pérdida de aislamiento, sobrecarga y destrucción de los elementos que componen el sistema Variador - Motor, teniendo como meta evaluar la calidad de energía de la alimentación PWM y 6-STEP y los métodos utilizados para mitigar el fenómeno presentado, de esta manera disminuir el tiempo no productivo debido a paradas no programadas y fallas prematuras; así como extender la vida útil de los equipos de bombeo electro sumergible y horizontal.

Hipótesis.

El desarrollo un análisis operacional de la calidad de energía en los sistemas de bombeo electro sumergible y horizontal alimentados con PWM y 6-STEP de la marca BH, permitirá evaluar los métodos usados para contrarrestar los efectos de las corrientes armónicas con la finalidad de mejorar el desempeño y alargar la vida útil de los equipos.

1 CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEORICA METODOLÓGICA

1.1 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.

Los sistemas eléctricos hoy en día trabajan con una gran cantidad de elementos llamados no lineales, estos generan a partir de formas de onda sinusoidales y con la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias ocasionando el fenómeno conocido como armónicos. Un gran porcentaje de motores de inducción trifásicos son accionados por inversores con la finalidad de controlar su par, velocidad o posición. Sin embargo, no se toma en cuenta el efecto adverso que tiene el inversor y la calidad de energía entregada por el mismo sobre el motor, debido a la alta frecuencia de conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia.

Para definir el concepto de armónicos es importante definir primero la calidad de la onda de tensión la cual debe tener amplitud y frecuencia constantes al igual que una forma sinusoidal [2]. A continuación, se representa la forma de la onda sin contenido de armónicos, con una frecuencia constante de 60 Hz y una amplitud constante de 1pu.

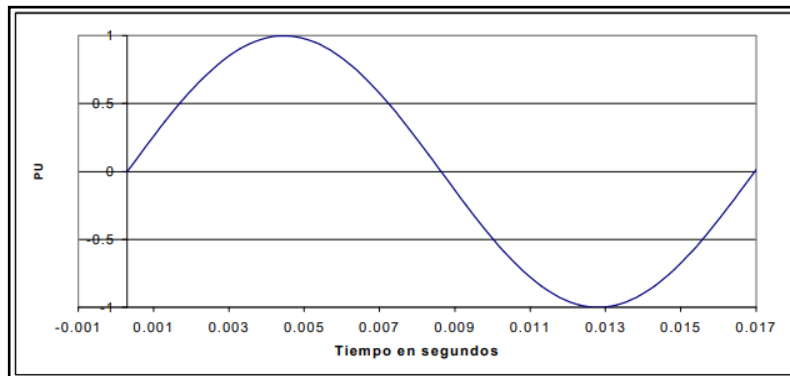


Figura 1. Onda sin contenido armónico

Fuente: [2]

Si en una onda periódica no se evidencia la forma sinusoidal se puede interpretar que la misma presenta contenido armónico, lo que puede alterar su valor pico y/o valor RMS ocasionando anomalías en la operación normal de los equipos que estén sometidos a esta tensión. La frecuencia de la onda periódica se denomina frecuencia fundamental y los armónicos son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de esta frecuencia. En la siguiente **figura 2** se muestra una onda que ha incrementado un 30% su valor pico de 5° armónico [2].

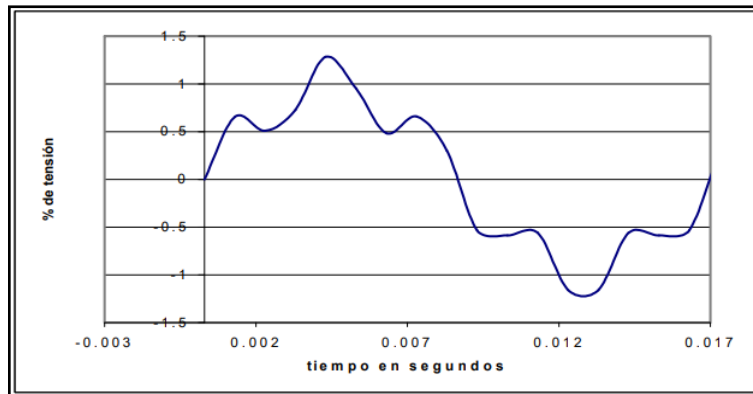


Figura 2. Onda con contenido armónico

Fuente: [2]

Las armónicas son corrientes y/o voltajes presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y séptima (420 Hz). Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes armónicas de corrientes y voltajes en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente. Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito [3] y en general la calidad en el suministro de energía eléctrica se ha ido deteriorando por la distorsión presente en los voltajes y corrientes.

Las armónicas fundamentalmente producen los siguientes efectos en las máquinas de corriente alterna, entre estos un aumento en sus pérdidas y la disminución en el torque generado [3]. Este tema de análisis por su importancia ha sido bastante estudiado en la industria y a continuación se mostrará un breve resumen de estos efectos en base a las referencias citadas. La distorsión armónica de tensión puede usarse como un referente en el aumento de temperatura de los motores eléctricos trifásicos y una pérdida en las condiciones de operación y vida útil del motor [4]. Así el voltaje que alimenta a un motor de inducción contiene componentes armónicas, entonces se incrementarán sus pérdidas I^2R en el rotor y estator, pérdidas de núcleo (eddy e histéresis) y pérdidas adicionales, en tanto que las pérdidas de fricción y ventilación no son afectadas por las armónicas. En forma más detallada, tenemos el siguiente análisis de las pérdidas [5].

- Pérdidas I^2R en el estator: Las pérdidas en el estator son determinadas utilizando la resistencia a corriente directa de la máquina, corregida a la temperatura especificada. Al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico no sólo aumentan estas pérdidas por el efecto skin que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas I^2R [5].
- Pérdidas I^2R en el rotor: éstas aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto skin para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.
- Pérdidas de núcleo: estas pérdidas son función de la densidad de flujo en la máquina. Éstas aumentan con excitación de voltaje no senoidal puesto que se tienen densidades de flujo pico más elevadas, sin embargo, su aumento es aún menor que el de las pérdidas mencionadas anteriormente e incluso son más difíciles de cuantificar.
- Pérdidas adicionales: son muy difíciles de cuantificar aún bajo condiciones de voltaje senoidal. Al aplicar voltaje no senoidal, éstas aumentan en forma particular para cada máquina.

Torque en el motor de inducción. Las armónicas de secuencia positiva producen en el motor de inducción un torque en el mismo sentido de la dirección de rotación, en tanto que las de secuencia negativa tienen el efecto opuesto. En caso de que se tenga conectado el neutro, el par producido por las armónicas “triplen” es igual a cero [5]. Dependiendo del contenido armónico del voltaje aplicado, el par promedio de operación puede verse disminuido considerablemente, sin embargo, en la mayoría de los casos el efecto producido por las armónicas de secuencia negativa se cancela con el efecto de las de secuencia positiva, por lo que su efecto neto en el par promedio puede despreciarse.

La interacción de las corrientes armónicas del rotor con el flujo en el entrehierro de otra armónica resulta torques pulsantes en los motores, los que pueden afectar la calidad del producto donde las cargas de los motores son sensibles a estas variaciones [6]. Estos torques pulsantes también pueden excitar una frecuencia de resonancia mecánica lo que resultaría en oscilaciones que pueden causar vibración, fatiga de la flecha y otras partes mecánicas conectadas. Por lo general la magnitud de estos torques es generalmente

pequeña y su valor promedio es cero [7]. Los armónicos de corriente en motores pueden aumentar la emisión de ruidos audibles comparado con la excitación sinusoidal. También pueden producir distribuciones de flujo resultante en el gap de aire las cuales pueden causar o aumentar el fenómeno llamado “cogging” (la negativa al arranque suave) o el llamado “crawling” (alto deslizamiento) en los motores de inducción [2].

Los armónicos de corriente en pareja tales como el quinto y el séptimo tienen el potencial de producir oscilaciones mecánicas en sistemas motor carga. Estas resultan cuando el torque oscila y es causado por una interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de frecuencia fundamental [2]. Se puede decir que el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir una torsión en el rotor del generador a la frecuencia del sexto armónico. Si existe una resonancia mecánica de frecuencia cercana a la eléctrica, altas fuerzas mecánicas pueden ser desarrolladas en algunas partes del motor.

Debido a que las corrientes armónicas se combinan y afectan el flujo giratorio de la máquina es necesaria más corriente para producir el mismo trabajo, como consecuencia la eficiencia disminuye. Cuando se trabaja con motores alimentados con tensiones no sinusoidales, debe tenerse en cuenta que no pueden operar a su capacidad nominal. La **figura 3** muestra el factor de reducción de la capacidad del motor de acuerdo con el factor de tensión armónica.

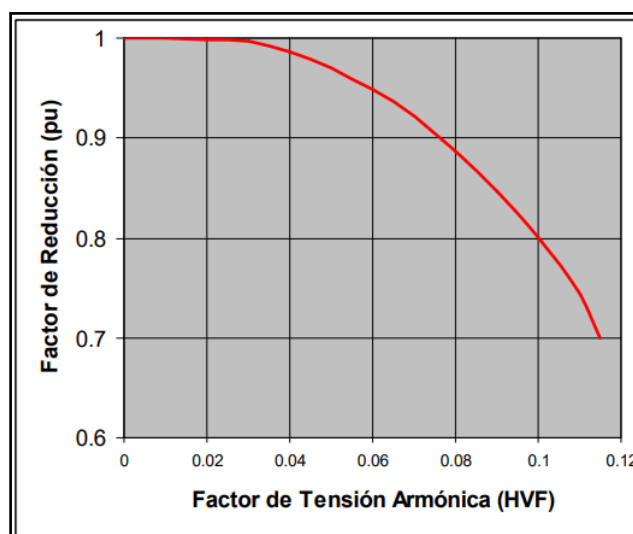


Figura 3. Factor de reducción para motores de redes con armónicos

Fuente: [2]

Donde:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{(V)^2}{n}} \quad (1)$$

1.2 Fundamentación Teórica

La presente investigación busca realizar un análisis de la calidad de energía entregada por los variadores de frecuencia de marca BH en los motores trifásicos de inducción CA utilizados en aplicaciones de bombeo electrosumergible y de superficie del sector de extracción petrolera. A la fecha de realización de esta investigación se tuvo acceso a información de investigaciones y mediciones realizadas acerca de este tema, En este capítulo se dará a conocer la información teórica necesaria para poder realizar el análisis, lo que se detalla a continuación:

1.2.1 Sistema de bombeo electrosumergible y horizontal

El sistema de bombeo electrosumergible para petróleo consta una bomba centrífuga en un arreglo de múltiples etapas, cada etapa consta de un impulsor rotativo y de un difusor estacionario. La producción deseada, la configuración mecánica del pozo, entre otros parámetros determinan el tipo, serie y cantidad de etapas a usar utilizadas. El número de etapas determina el total de cabeza generada (H) y la potencia (HP) requerida. Las etapas se clasifican por la forma como manejan el fluido y por su funcionamiento dentro de la bomba, básicamente existen dos, de flujo radial y flujo mixto [8]. El sistema de bombeo electrosumergible es un método de levantamiento artificial muy automatizable y propenso a mejorar, constituido por equipos complejos y de alto costo que requieren de herramientas efectivas para su análisis, control y supervisión [9]. Este sistema se divide en dos grupos de componentes: equipos de superficie y equipos de fondo.

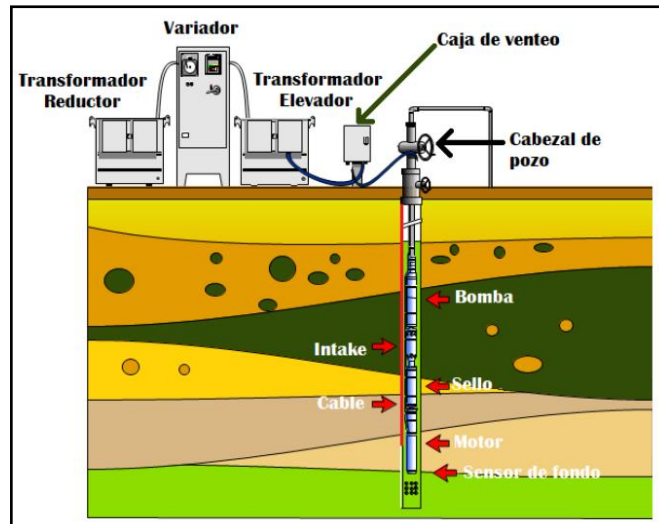


Figura 4. Diagrama de componentes del sistema BES

Fuente: [10]

El sistema de bombeo horizontal posee un sistema combinado por una bomba centrífuga multietapa que se ubica de manera horizontal sobre un banco rígido, usa como elemento de poder un motor y se manejan para mover grandes caudales a una presión de entrada relativamente baja y con presiones de descarga elevadas. Para realizar el control del sistema HPS de acuerdo con la aplicación que vaya a tener el equipo y a los requerimientos del sistema, la opción que ofrece mayor versatilidad son los variadores de frecuencia, ya que controlan y protegen al motor de eventos inesperados. Según estudios realizados son las mejores alternativas para el control de sistemas de bombeo horizontal ya que permiten trabajar dentro de amplios rangos de presión y flujo adaptándose a los requerimientos del sistema [11].

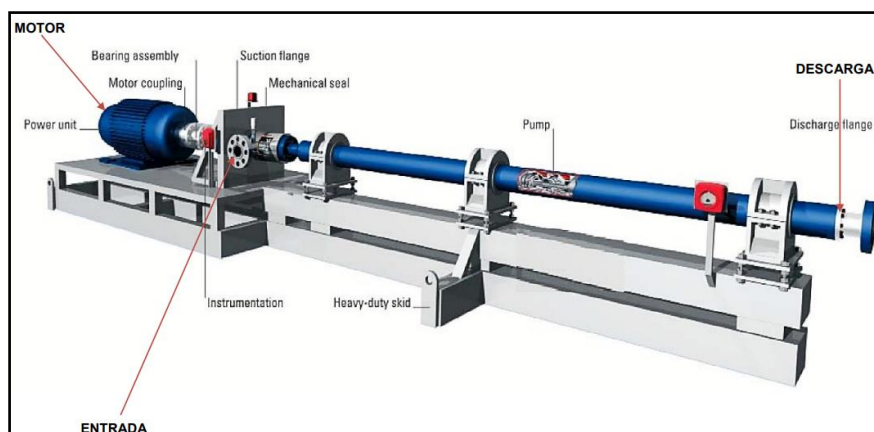


Figura 5. Diagrama de componentes de sistema de bombeo horizontal

Fuente: [11]

1.2.1.1 Equipo de fondo para sistema de bombeo electrosumergible

El equipo de fondo proporciona la energía necesaria al yacimiento para levantar la columna de fluido y que pueda llegar a superficie. Sus componentes son los siguientes:

Bomba

Las bombas utilizadas en el sistema ESP, se basa en el funcionamiento de una bomba centrífuga, que transfiere energía mecánica a un fluido por la acción rotativa de una turbina que gira dentro de una cavidad. La bomba se compone de etapas que son conformadas por el impulsor y el difusor, A medida que el impulsor gira, todo el fluido que entra en él es expulsado hacia afuera por acción de la fuerza centrífuga. Debido a la forma de los alabes del impulsor, el fluido es levantado hacia el difusor, quien lo encamina al impulsor de la siguiente etapa. A mayor número de etapas en una bomba ESP, mayor es la presión a la salida [12].

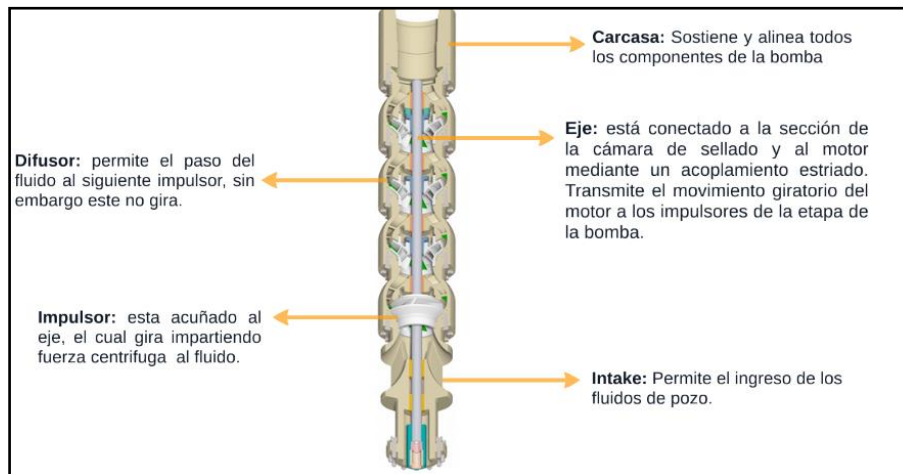


Figura 6. Diagrama y componentes bomba multietapas

Fuente: [12]

Succión / Separador de gas

Permite el ingreso de los fluidos del pozo a la bomba y transmite el movimiento del eje en el extremo del cabezal del sello al eje base de la bomba. Su uso se verá reflejado cuando el GOR del pozo en estudio sea menor al 10%, cuando esta condición se cumpla, podrá instalarse el Intake [12].

La presencia del Separador de Gas en el ensamblaje de una BES, se debe a un GOR superior del 10 %. Esta herramienta nos ayudara a minimizar la presencia de burbujas de

gas, modificando el tamaño de las mismas y la bomba no llegue a sufrir de una parada repentina por presencia del gas. La rotación del impulsor genera que, por medio de la fuerza centrífuga, el fluido con mayor gravedad específica, sea llevado a las paredes del equipo, internamente. El gas ocupará el centro de los impulsores y será expulsado para seguir su flujo por el anular entre la parte exterior de la bomba y el interior del casing [12].

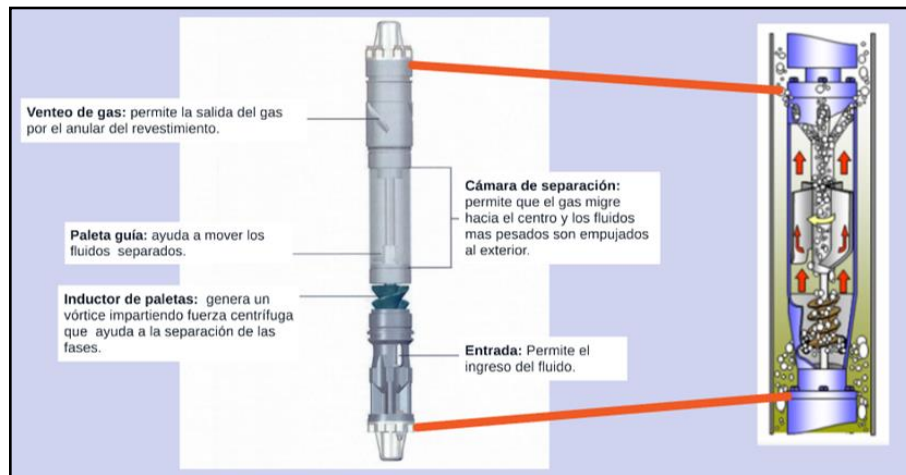


Figura 7. Intake / Separador de gas

Fuente: [12]

Sello o protector

El sello conecta el eje del motor con intake o el eje del separador de gas. Sus funciones son las siguientes [12]:

- Ecualiza la presión interna del motor con la externa del pozo.
- Aísla hidráulicamente el motor de los fluidos del pozo.
- Absorbe el empuje descendente de la bomba.
- Transfiere la potencia del motor a la bomba.
- Permite la expansión térmica del aceite del motor a la bomba.

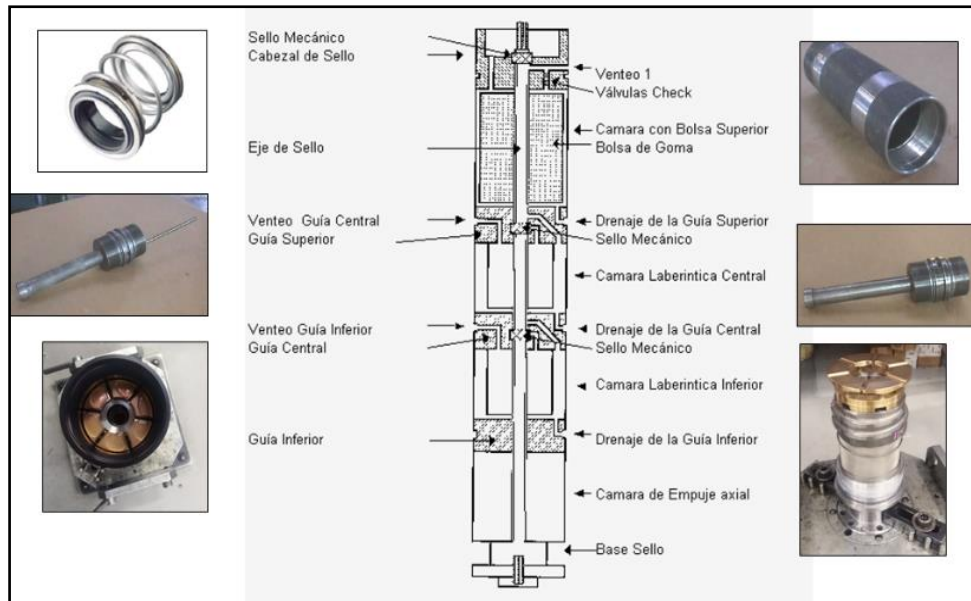


Figura 8. Componentes y diagrama del sello

Fuente: [12]

Motor de fondo

El propósito del motor BES es convertir la energía eléctrica en energía cinética que hace mover el eje. El eje del motor se conecta con los ejes del sello, separador de gas y bomba, permitiendo girar los impulsores de esta última. A continuación, se detalla las características principales de un motor BES [12]:

- Los motores BES son diseñados para una determinada potencia, voltaje, corriente y frecuencia.
- Son del tipo de inducción, jaula de ardilla, de dos polos, y corriente alterna trifásica.
- Pueden girar a 3500 RPM a 60 Hz o (equivalente a 2916 RPM a 50 Hz).
- El conjunto rotórico está conformado por rotores y cojinetes de rotor ensamblados a lo largo de un eje, insertado dentro de un estator bobinado.
- Contiene aceite dieléctrico para garantizar correcta lubricación de los cojinetes.
- Para su correcta refrigeración, necesita de un flujo circulando a través de su diámetro.



Figura 9. Motor BES

Fuente: [12]

Los siguientes son los componentes de un motor para una aplicación de bombeo electrosumergible:

Estator

El estator es el núcleo que produce el campo eléctrico del motor. Está compuesto por el material de la carcasa laminados de acero de grado eléctrico y los devanados.

Carcasa: forma la cubierta del motor y está roscado en ambos extremos para los componentes de la cabeza y la base

Núcleo del estator: está compuesto de laminaciones apiladas bajo presión para asegurar un núcleo compacto.

Devanados del estator: están hechos con un cable imantado el cual es aislado con poliamida o PEEK, el cual se enrolla a través de las ranuras troqueladas en el núcleo del estator.

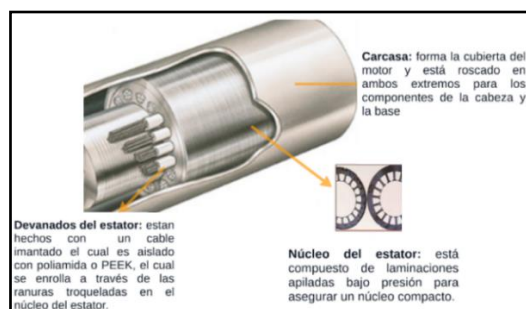


Figura 10. Estator motor BES

Fuente: [12]

Rotor

El rotor es un dispositivo que gira dentro del núcleo del estator. Debido a que la estructura se asemeja a la jaula utilizada para el ejercicio de las ardillas, los rotores de este tipo se denominan "rotores jaula de ardilla" [12]. Compuestos por:

Anillo de cobre: en los extremos de cobre de soporte.

Laminaciones del rotor: El rotor está formado por laminaciones del rotor que tienen un diámetro menor a las laminaciones del estator.

Barras de cobre: Dentro de cada ranura hay barras de cobre con anillos extremos de cobre de soporte.

Los rodamientos de rotor: Son una de las partes más importantes del motor. Permitiendo la circulación de aceite uniformemente en toda la longitud de la superficie del rotor.

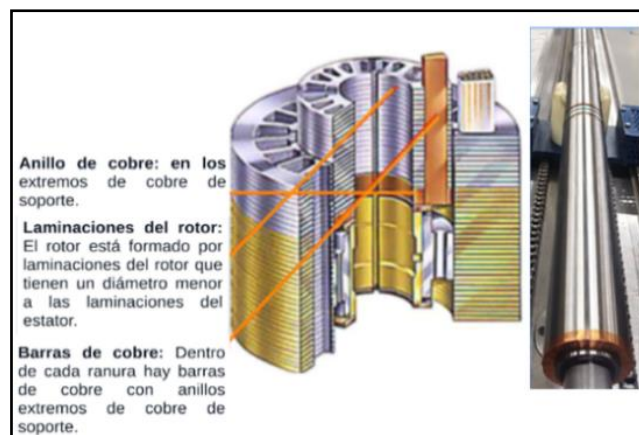


Figura 11. Rotor motor BES

Fuente: [12]

Cojinete de empuje del motor: Está instalado en la parte superior del rotor. Diseñado para soportar el peso de todo el conjunto rotórico.

El cabezal: es una pieza clave para conectar el motor con el cable de alimentación; Su cierre mecánico garantiza el funcionamiento a largo plazo del motor.

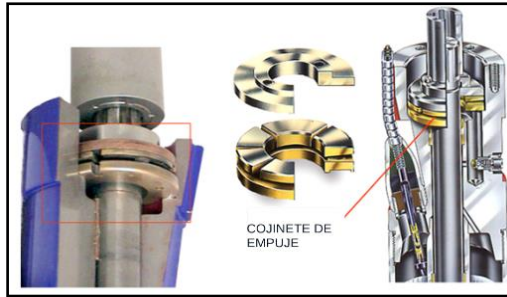


Figura 12. Cabezal y cojinete de empuje motor BES

Fuente: [12]

Cable de extensión de motor MLE

El cable de extensión del motor, es un cable plano especialmente diseñado, de perfil bajo. Está empalmado en el extremo inferior del cable de alimentación principal redondo o plano, y tiene la terminación macho o hembra para enchufarlo a la conexión eléctrica del motor [12]. Tiene las siguientes características:

- Mejora las conexiones de fase a fase y de fase a tierra.
- Previene la contaminación del motor con los fluidos.
- Resiste la descompresión rápida de gas.
- Previene daños en la instalación.
- Reduce el tiempo de montaje.
- Minimiza la contaminación.
- Elimina el empalme del cable en conexión del motor



Figura 13. Motor Lead Extension

Fuente: [12]

Cable de potencia BES

La potencia es transmitida al motor por medio de un cable de potencia trifásico el cual se fija a la tubería. Este es pequeño en diámetro, bien protegido y resistente al deterioro de sus características físicas y eléctricas por efecto de los ambientes calientes y agresivos de los pozos [12]. El cable de potencia está compuesto por las siguientes partes:

Armadura: Protege mecánicamente al cable. Contiene al cable durante la descompresión. Construido de acero galvanizado, inoxidable o Monel

Chaqueta: Amortiguador para los conductores. Construido de termoplástico, nitrilo o EPDM.

Capa Protectora: Plomo o flurobarrera protege al aislante de los fluidos durante la descompresión. Materiales: Cinta o hilo trenzado.

Aislamiento: La temperatura es el factor primordial. Materiales: Polipropilén-Etileno o EPDM.

Conductor: Conduce la energía eléctrica al motor. Materiales: Cobre, sólido o Multi-Filar.

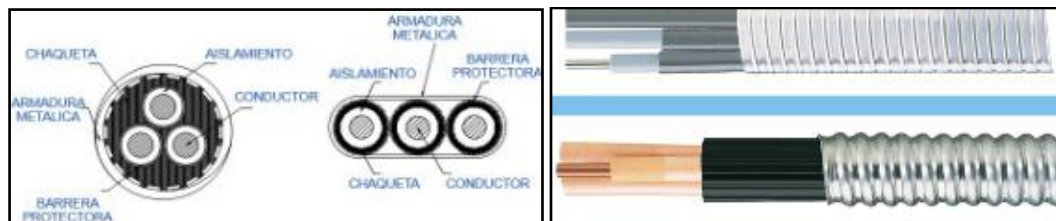


Figura 14. Partes del cable de potencia BES

Fuente: [12]

1.2.1.2 Equipo para sistema de bombeo horizontal reinyección de agua

Bomba

Los sistemas de bombeo horizontal para reinyección de agua y transferencia de petróleo se desarrollaron como una extensión de la tecnología BES que utiliza bombas centrifugas de etapas múltiples de fondo del pozo. La norma API 610 no cubre totalmente el sistema HPS ya que no cubre este tipo de máquinas, por lo que existen diferencias que deben tomarse en cuenta en el diseño, instalación y operación [13]. La bomba centrifuga

multietapa está montada sobre una plataforma y utiliza un sello mecánico, un acoplamiento y un motor eléctrico, los sistemas HPS son capaces de manejar flujos de hasta 80000BPD y desarrollar presiones de hasta 6000Psi.



Figura 15. Bomba horizontal HPump

Fuente: [12]

Cámara de empuje

La cámara de empuje se encuentra entre el motor y la bomba. Sus funciones son transmitir el par motor a la bomba, absorber el empuje de la bomba y sellar la presión de admisión alrededor del eje de la cámara de empuje. Debe estar diseñada para soportar una carga intermitente de al menos 1.5 veces el empuje generado por la bomba en condiciones de operación [13].

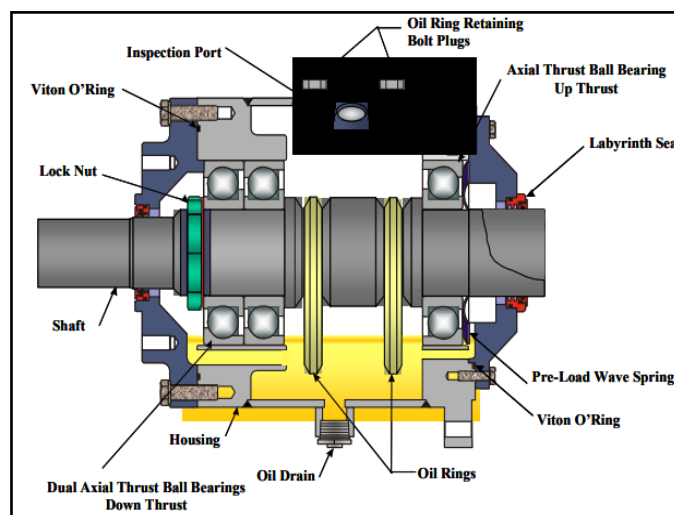


Figura 16. Diagrama cámara de empuje

Fuente: [13]

Succión / Sello mecánico

La cámara de succión está conectada a la base de la bomba construida en acero inoxidable 316SS, la misma que incorpora el sello mecánico que aísla el fluido a bombear del exterior [13]. El sello mecánico está diseñado para ser compatibles con el fluido del pozo, temperaturas y presiones de operación.

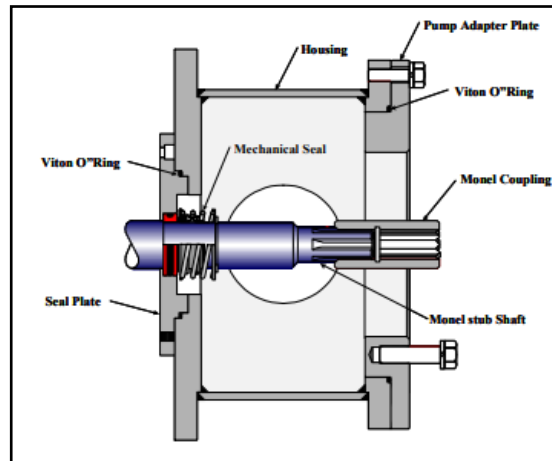


Figura 17. Cámara de succión / Sello mecánico

Fuente: [12]

Skid o base del sistema

La base para el montaje de todo el sistema es un Skid convencional, que consiste en una base modular que facilita la modificación del sistema en la medida que ocurren cambios operacionales [13].

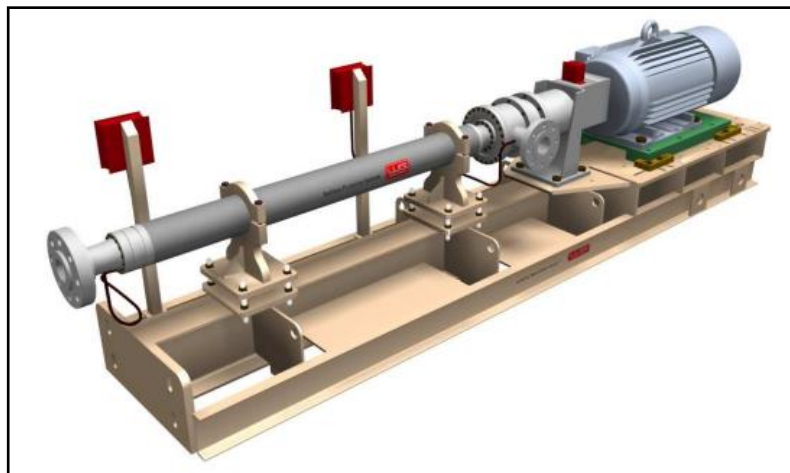


Figura 18. Skid ESM Baker Hughes

Fuente: [13]

Motor Eléctrico

Según Chapman [14] los motores eléctricos tienen como objetivo la transformación de energía eléctrica en mecánica; se los utiliza para impulsar distintos equipos y se conectan, mediante los elementos adecuados y necesarios, a las instalaciones eléctricas. Los motores asíncronos tienen una aplicación más generalizada gracias a su facilidad de utilización, corto mantenimiento y bajo coste de fabricación. Este tipo de motor eléctrico es también denominado motor asincrónico trifásico, ya que una de sus características distintivas es que la velocidad de su campo estatórico, bajo condiciones de régimen permanente, nunca será igual a la velocidad mecánica de giro del eje del motor.

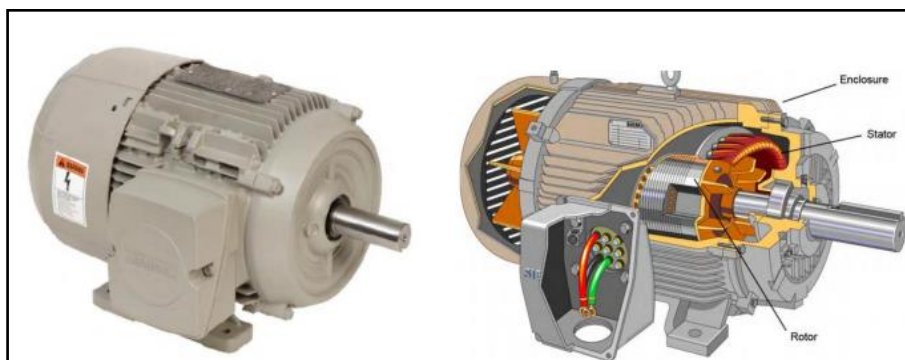


Figura 19. Vista exterior y en corte de un motor inducción trifásico

Fuente: [15]

Componentes de un motor eléctrico

Un ME del tipo que se está tratando en esta nota está compuesto por las partes que se describen a continuación [16].

- a. **Carcasa.** Contiene a todos los componentes del motor eléctrico: estator, rotor, eje, etcétera.
- b. **Estator.** Es un bloque de chapas de acero especial ranuradas para alojar los bobinados.
- c. **Rotor.** Junto al propio ventilador, son las partes giratorias del motor eléctrico. Existen dos tipos constructivos basados en el mismo principio de funcionamiento: bobinados y en cortocircuito o jaula de ardilla. A continuación, solo se verá este último porque es el más comúnmente empleado. La **figura 19** muestra un estator y un rotor de este último tipo.

- d. Eje.** Soportado por los rodamientos alojados en las tapas, es el elemento sobre el cual se encuentran fijados el rotor y el ventilador. Por sus extremos, se acopla al equipo al cual debe impulsar.
- e. Chavetero.** Ubicado en el extremo del eje, aloja la chaveta, que es un elemento destinado a mejorar la fijación del acople entre el motor propiamente dicho y el equipo impulsado.
- f. Ventilador.** Montado sobre el eje, fuera de la carcasa, genera el aire para la refrigeración.
- g. Cubre ventilador.** Se utiliza para proteger el ventilador mecánicamente y evitar contactos directos con él.
- h. Tapas.** Son dos, una anterior y otra posterior. Cierran el estator y alojan los rodamientos del eje. En algunos tipos constructivos, la fijación del MET al equipo impulsado se hace mediante una tapa delantera especialmente diseñada, llamada brida.
- i. Rodamientos.** Son dos y se encuentran alojados en cada una de las tapas; son los que sostienen y a su vez permiten el giro del eje. El tipo constructivo varía si el tipo MET funciona en posición horizontal o vertical.
- j. Base.** Se utiliza para fijar el motor propiamente dicho a una fundación o base; forma parte de la carcasa.
- k. Cáncamo de izaje.** Se provee a partir de una determinada potencia. Está fijado a la carcasa, se utiliza cuando es necesario movilizarlo.
- l. Cajas de conexiones.** Se fija a la parte externa de la carcasa y es el lugar donde se conectan los cables de alimentación a los extremos de los bobinados que están en el estator.
- m. Chapa característica.** Fijada a la superficie externa de la carcasa, contiene los datos característicos del MET, tales como potencia eléctrica nominal, corriente eléctrica nominal, grado de protección mecánica, etc. Cierta información corresponde por norma, pero algunos fabricantes la amplían.

n. **Anillos o-rings.** Se sitúan junto a los rodamientos en las tapas y ofician como sello mecánico para evitar la fuga del lubricante.

Principio de funcionamiento

Bajo condiciones normales de operación están presentes dos campos magnéticos en las máquinas de corriente alterna: un campo magnético del circuito del rotor y el otro campo magnético del circuito del estator. La interacción de estos dos campos magnéticos produce el par de la máquina, así como la cercanía de dos imanes permanentes ocasiona un par que los tiende a alinear [14] . Como el rotor puede girar libremente, el par hará que se mueva en la dirección del campo del estator. Esto hace que un motor de inducción trifásico sea de arranque automático [17].

Se puede producir una gran variedad de curvas par-velocidad si se cambian las características del rotor de los motores de inducción. Para ayudar a la industria a seleccionar los motores apropiados para las diferentes aplicaciones en la gama completa de caballos de fuerza, NEMA e IEC han definido una serie de diseños estándar con diferentes curvas de par-velocidad. La **figura 20** muestra las curvas par-velocidad típicas de las cuatro clases estándar de diseño NEMA.

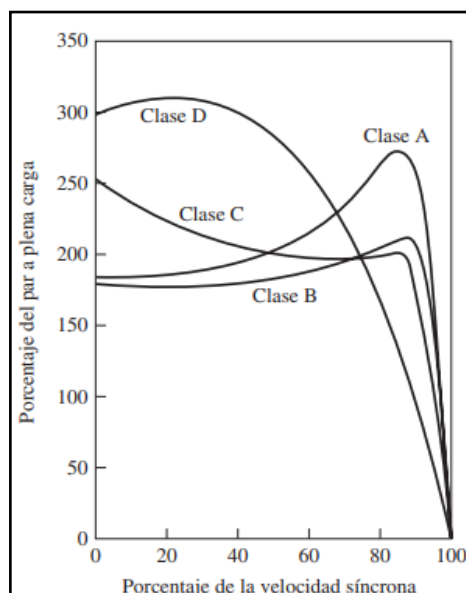


Figura 20. Curva par-velocidad típicas para diferentes diseños de rotor

Fuente: [14]

A la siguiente tabla se describen las características distintivas de cada clase estándar de diseño.

Tabla 2. Clases de motor de inducción trifásico AC de acuerdo a NEMA 3

	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D	Clase F
Par de arranque	1,5 a 1,75	1,4 a 1,6	2 a 2,5	2,5 a 3	1,25
Corriente de arranque	5 a 7	4,5 a 5	3,5 a 5	3 a 8	2 a 4
Regulación de velocidad %	2 a 4	3,5	4 a 5	5 a 8 8 a 13	Mayor de 5
Nombre de clase de motor	Normal	De uso general	Doble jaula, Alto par	Alto par, Alta resistencia	Doble jaula, Bajo par y baja corriente de arranque

Fuente: [14]

Al día de hoy, los fabricantes producen nuevas gamas de motores de inducción de alta eficiencia logrando mayor participación en el mercado de los motores de inducción. Las técnicas para mejorar la eficiencia a saber son [14]:

- Se utiliza más cobre en los devanados del estator para reducir las pérdidas.
- Se incrementa la longitud del núcleo del rotor y del estator para reducir la densidad de flujo magnético en el entrehierro de la máquina, disminuye la saturación magnética y reduce las pérdidas en el núcleo.
- Se utiliza más acero en el estator, permite que se transfiera una mayor cantidad de calor hacia afuera del motor y se reduce su temperatura de operación. Rediseño de ventilador del rotor para reducir las pérdidas por rozamiento con el aire.
- El metal que se utiliza en el estator es acero eléctrico de alto grado con bajas pérdidas por histéresis.
- El acero, de muy alta resistividad interna, se lamina en calibres especialmente delgados, reduce las pérdidas por corrientes parásitas en el motor.
- El rotor se maquina cuidadosamente para producir un entrehierro uniforme, lo que reduce las pérdidas misceláneas en el motor.

Criterios para la selección de motor para sistema bombeo horizontal

Los motores deben dimensionarse para servicio continuo a la máxima potencia de freno en el rango de operación de la bomba, incluidas las pérdidas mecánicas de otros

componentes. Dentro de los diversos tipos funcionales, los que se tratarán a continuación son los del tipo trifásico de inducción o asincrónico utilizados para aplicaciones de bombeo horizontal HPS de la marca BH de acuerdo a los siguientes requerimientos [13]:

- Cumplir con los requisitos más recientes de NEMA MG1
- Servicio severo y de alta eficiencia.
- Diseñado para 3600 rpm (síncronas) a 60 Hz y calificado para uso con VSD con onda de salida PWM de 45 Hz a 63 Hz.
- Los motores serán TEFC para tamaños de estructura “449” e inferiores y TEFC o WPII para tamaños de estructura superiores a “449”.
- Los motores de media tensión (4000 V/4160 V) deben estar diseñados para una onda de salida PWM filtrada adecuada para usar con VSD marca BH.
- Temperatura nominal ambiente de y una altitud de 3300 *pies* (1000m) o menor.
- Motor con factor de servicio de 1,15.
- Como estándar los motores utilizaran rodamientos de bolas lubricados con grasa.
- El ventilador de enfriamiento debe ser resistente a la corrosión, a prueba de chispas, bidireccional, enchavetado, sujeto con abrazaderas y con reborde en el eje del motor.
- Los motores deberán ser NEMA diseño B con torque y corriente de arranque de acuerdo a NEMA MG1
- El sistema de aislamiento del motor NEMA debe ser clase F como mínimo.
- Motores diseñados para un incremento de temperatura de 80 °C a 1*pie*².
- Los motores de baja tensión (460 V/480 V) por encima de NEMA deben estar provistos por RTD de cojinetes y devanado, calentador de espacio y cojinete aislado en NDE (No Drive End, Lado del ventilador, para cuidar los rodamientos de armónicos y corrientes parasitas).

- Los motores de media tensión (4000 V/4160 V) por encima de NEMA deben estar provistos por RTD de cojinetes y devanado, calentador de espacio y cojinete aislado en NDE.
- Los motores WPII deberán contar con un interruptor de presión diferencial y filtros resistentes a la corrosión.
- Pruebas de fabrica según norma NEMA.

1.2.1.3 Equipos de superficie para sistema de bombeo electrosumergible y horizontal

La principal función del equipo de superficie es proveer la energía eléctrica al equipo de bombeo horizontal y de fondo, además de monitorear su desempeño. Sus componentes son los siguientes.

Transformadores

El suministro adecuado de energía eléctrica para el motor de la bomba inicia desde una red de alta tensión o a través de un generador, por este motivo, es indispensable la presencia de un Conjunto de Transformadores Elevadores (SUT) y Reductores (SDT) que conviertan el voltaje al necesario. El voltaje apropiado para el variador y por consiguiente para el motor de fondo se encuentra entre 220 y 5.000 voltios según sus condiciones de fabricación [18].



Figura 21. Transformador reductor y elevador de sistema BES

Fuente: [18]

Variador de frecuencia

Dos técnicas posibles existen para controlar la velocidad de un motor de inducción. Una consiste en la variación de la velocidad síncrona, que es la velocidad de los campos magnéticos del estator y del rotor, puesto que la velocidad del rotor siempre permanece cerca de n_{sync} . La otra técnica consiste en la variación del deslizamiento del rotor para una carga dada. La fórmula de la velocidad síncrona de un motor se define como:

$$n_{sync} = \frac{120 * f}{p} \quad (2)$$

De aquí deducimos que las formas de cambiar la velocidad síncrona de un motor eléctrico son: cambiando la frecuencia eléctrica y cambiando el número de polos de la máquina [14].

La velocidad síncrona del motor en condiciones nominales se conoce como velocidad base. Si se utiliza el control de frecuencia variable, se puede ajustar la velocidad del motor por arriba o por debajo de la velocidad base. El controlador de la frecuencia variable de un motor de inducción debidamente diseñado puede ser muy flexible. Puede controlar la velocidad de un motor de inducción dentro de un intervalo que va desde tan poco como 5% de la velocidad base hasta el doble de ella. Sin embargo, es importante mantener ciertos límites en el voltaje y par del motor conforme se varía la frecuencia para asegurarse de que la operación es segura. Cuando se opera a velocidades menores a la velocidad base es necesario reducir el voltaje en los terminales aplicado al estator para obtener una operación adecuada. El voltaje en los terminales aplicado al estator debe disminuir linealmente con el decremento de la frecuencia del estator. A este proceso se le llama degradación. Si no se lleva a cabo, se saturará el acero en el núcleo del motor de inducción y fluirán corrientes de magnetización excesivas en la máquina [14].

Como ya se indicó, hoy en día para controlar la velocidad de los motores de inducción se utilizan los controladores de frecuencia variable para motores de inducción. Modifican la velocidad de un motor eléctrico mediante diferentes etapas:

- Etapa rectificadora la cual mediante diferentes componentes electrónicos como diodos y tiristores convierte la tensión alterna en tensión continua,

- Etapa intermedia mejora el factor de potencia y reduce la generación de armónicos mediante la filtración del voltaje rectificado,
- Etapa inversora utiliza IGBTs para la generación de pulsos mediante los cuales se podrá obtener un manejo de frecuencia variable,
- Etapa de control regula, maneja los transistores (Insulated Gate Bipolar Transistor IGBTs) en la generación de pulsos en función variable del voltaje y la frecuencia al motor de AC.

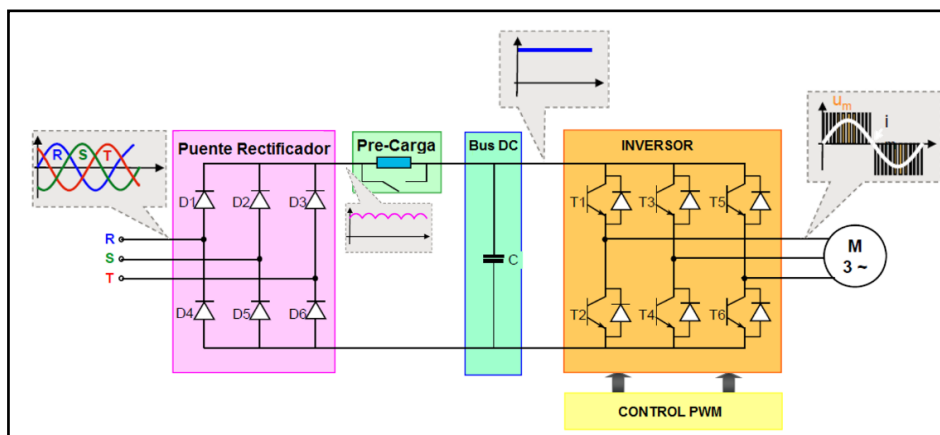


Figura 22. Diagrama funcional de un variador de frecuencia VSD

Fuente: [12]

Inversor PWM

El VSD con inversor PWM es un circuito de fácil topología, contiene un puente de diodos a la entrada, una etapa media de voltaje DC fijo y por último seis transistores de salida. Para realizar el control y modificación de la tensión y frecuencia de salida del equipo se lo hace a través de la modulación de los transistores. El voltaje de la etapa DC se aplica a la carga en pulsos de muy corta duración al encender y apagar los interruptores. El espectro armónico de salida es controlado mediante la duración de los pulsos y su espaciado. La meta es tener una gran cantidad fundamental y tan insignificante de armónicos como sea posible. El controlador del inversor establece la amplitud y frecuencia de la tensión del motor y el consumo de corriente del mismo estará determinado por los parámetros del motor y la carga [19].

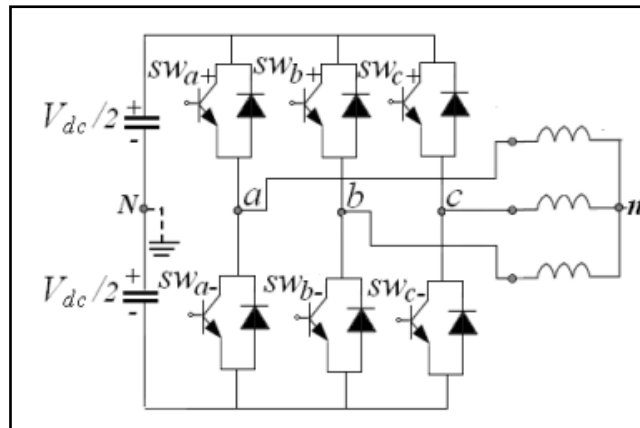


Figura 23. Inversor trifásico VSI de 2 niveles en puente completo

Fuente: [20]

EL control sobre la frecuencia y voltaje de salida se realiza por medio de las técnicas de modulación de amplitud de pulso (PWM). Tanto la frecuencia como el voltaje de salida se pueden controlar de manera independiente por medio de la modulación de la amplitud de pulso [14]. Dentro de esta técnica se han propuesto diversos algoritmos de modulación, cada uno pretendiendo mejorar alguna característica dentro del proceso, por ejemplo: las pérdidas por conmutación, la eficiencia de la conversión o el contenido armónico presente en la onda de salida. Los algoritmos PWM actuales abren y cierran rápidamente los semiconductores de potencia (frecuencias mayores 1 kHz para transistores; y mayores a 10 kHz para IGBTs) para que se obtengan los armónicos de bajo orden como corriente de motor sinusoidal. Las mejores maniobras de modulación requieren una lógica combinatoria bastante compleja o un procesamiento informático bastante veloz en tiempo real, características que hoy por hoy están disponibles en equipos PWM [21].

En inversores ideales las formas de onda de voltaje de salida deberían ser senoidales. Sin embargo, en los inversores reales no son senoidales y contienen ciertas armónicas. Para aplicaciones de baja potencia, se pueden aceptar los voltajes de onda cuadrada o casi cuadrada, para aplicaciones de alta potencia, son necesarias las formas de onda senoidales con baja distorsión. Con disponibilidad de los semiconductores de potencia de alta velocidad, es posible minimizar o reducir significativamente el contenido armónico de voltaje de salida mediante las técnicas de conmutación [19]. Los métodos PWM se dividen en dos tipos principales [22]:

La modulación PWM basada en portadora (CB-PWM) es simple, presenta bajo tiempo computacional y fácil implementación, las señales de conmutación por fase son

independientes [19]. En este las señales de activación de los interruptores superior S_a e inferior $\overline{S_a}$, se consiguen del proceso de cálculo de comparación entre las amplitudes de una señal de alta frecuencia denominada portadora y una señal de baja frecuencia denominada moduladora o de referencia. En el caso del inversor trifásico, son necesarios 3 procesos de comparación simultáneos, uno para cada fase como se muestra [22].

Las señales de entrada del modulador son el conjunto trifásico de moduladoras V_a^* , V_b^* , V_c^* y la señal portadora V_{tri} ; la salida está compuesta por las señales lógicas de compuerta de los interruptores: S_a , S_b y S_c . El bloque inversor toma como señal de entrada al conjunto S_i ($i = a, b, c$) y entrega a la salida un tren de pulsos $V_{iN}(t)$ con amplitud $\pm \frac{V_{dc}}{2}$ y ancho variable. El proceso de modulación se describe solamente para la fase A, tomando en cuenta que las fases B y C presentan las mismas formas de onda, pero desfasadas -120° y -240° respectivamente.

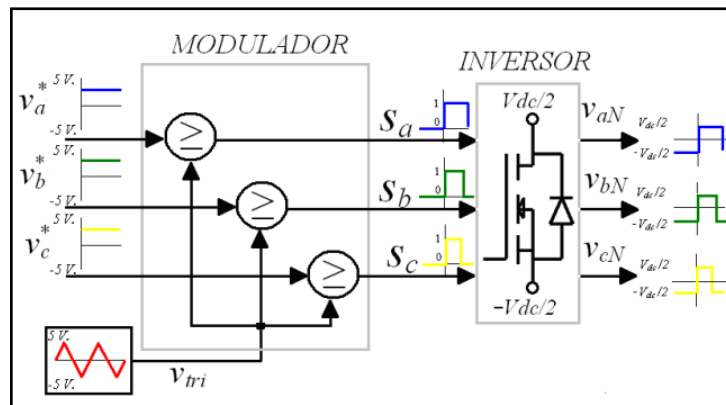


Figura 24. Esquema de modulación trifásico PWM basado en portadora

Fuente: [20]

La señal portadora es periódica su forma más común es la triangular, sin embargo, otras variantes son diente de sierra con pendiente positiva, pendiente negativa y versiones aleatorias que varían entre las tres anteriores [23]. La frecuencia está dada por diversos criterios como son el nivel de pérdidas por conmutación permitido, la velocidad de conmutación de los dispositivos semiconductores de la etapa de potencia y las regulaciones de compatibilidad electromagnética vigentes, entre otras [24].

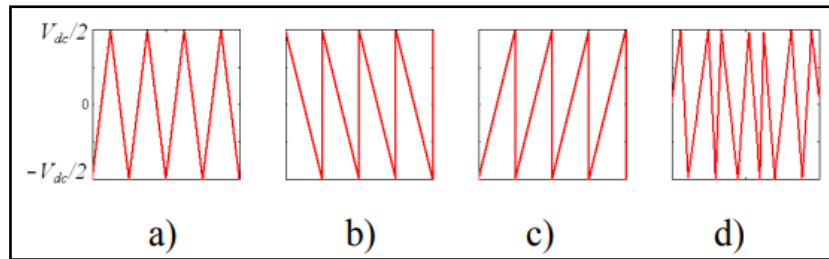


Figura 25. Formas de señal portadora a) Triangular b) Pendiente negativa c) Pendiente positiva d) Aleatoria

Fuente: [20]

La señal moduladora contiene la información de amplitud, frecuencia y fase deseadas y por esta razón se conoce también como señal de referencia. Su forma puede tomar diversos perfiles. En la PWM sinusoidal el conjunto de señales moduladoras V_i^* ($i = a, b, c$) y otras formas empleadas en las aplicaciones de accionamientos eléctricos se ilustran en la **figura 26**. Adicional las señales de fase están desfasadas 120° y su amplitud, en el esquema normalizado, varía en el rango $\left[-\frac{V_{dc}}{2} \leq A \leq \frac{V_{dc}}{2}\right]$ [20].

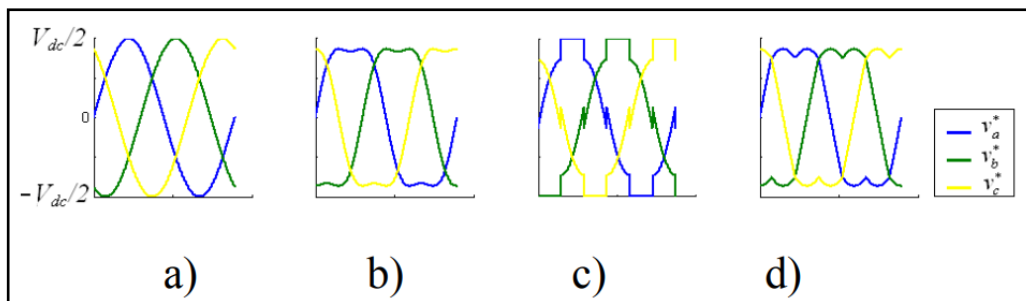


Figura 26. Formas de onda del conjunto de señales moduladoras V_i^* a) Sinusoidal b) Inyección del tercer armónico, c) Discontinua d) CB-SVPWM.

Fuente: [20]

El índice de modulación de frecuencias (N) relaciona la frecuencia de la señal portadora f_s con la frecuencia de la señal moduladora f_m . Generalmente en accionamientos eléctricos de velocidad variable, f_m varía en función de la velocidad deseada mientras f_s se mantiene constante. Esto implica que el índice de frecuencias N es variable. Si N adquiere un valor entero es un modulador sincrónico, apropiado para aplicaciones que exigen un bajo índice de frecuencia $N < 21$. Cuando N no es entero se habla de un modulador asincrónico que produce pulsos de voltaje no periódicos en la salida, este produce sub-armónicos a frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia moduladora, pero para $N > 21$ la amplitud de estos sub-armónicos es muy pequeña [20].

$$N = \frac{f_s}{f_m} = \frac{W_s}{W_m} \quad (3)$$

Las señales de apertura y cierre de los interruptores se generan en los instantes en que las amplitudes de la señal portadora y la señal moduladora son iguales. Tenemos dos métodos para obtener el valor de la amplitud de la señal moduladora V_i^* . Es así que el modulador puede ser PWM natural o PWM regular.

En el modulador PWM natural, la conmutación ocurre por la intersección instantánea entre la moduladora y la portadora.

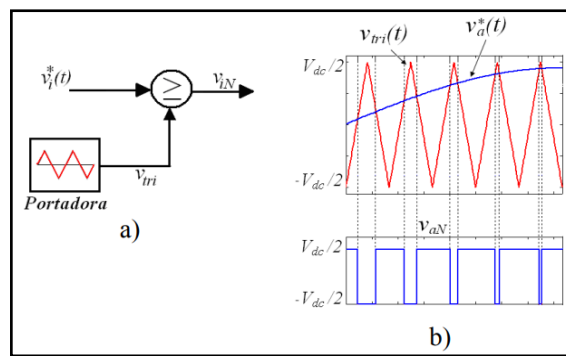


Figura 27. PWM de muestreo natural

Fuente: [20]

En tanto que la PWM uniforme o regular la amplitud de referencia se obtiene a partir del muestreo de la señal moduladora en el instante del pico negativo o positivo de la señal portadora. Puede ser PWM regular simétrico y asimétrico.

En la **figura 28** en el PWM regular simétrico la comparación se realiza entre la amplitud de la moduladora $V_a^*(t_k)$, tomada en el instante del pico negativo de la portadora, y la amplitud de la portadora V_{tri} en el instante t

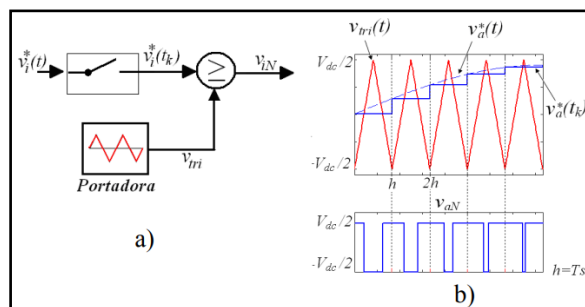


Figura 28. PWM de muestreo regular simétrico

Fuente: [20]

El PWM regular asimétrico se da cuando el muestreo de la señal moduladora se realiza en los instantes de los picos negativos y positivos de la señal portadora (al doble de la frecuencia portadora), los flancos de bajada y los de subida son determinados empleando muestras diferentes de la señal moduladora. Produciendo un tren de pulsos asimétrico [20]. La PWM regular es más apropiada para las implementaciones digitales puesto que en sus dos variaciones es posible calcular los ciclos útiles en tiempo real empleando ecuaciones algebraicas sencillas [25]. Se menciona también que la PWM regular se caracteriza por generar un bajo contenido armónico en el voltaje de salida del inversor.

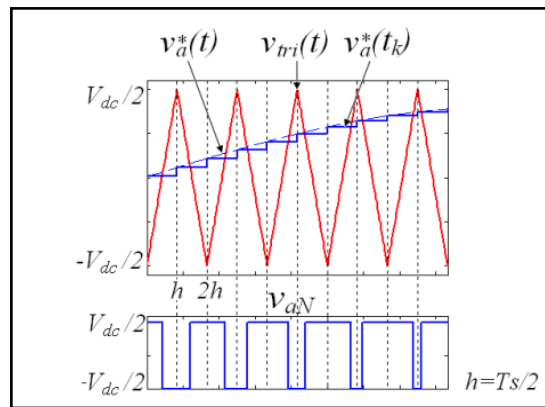


Figura 29. PWM regular asimétrico

Fuente: [20]

El principio de balance Voltio-Segundo El objetivo principal de la modulación PWM es conseguir que la información de amplitud de la señal moduladora esté contenida en el valor medio del tren de pulsos generado. Expresado como:

$$\overline{V_{iN}} = V_i^*, (i = a, b, c) \quad (4)$$

Considerando a la fase A, en un periodo de portadora el área bajo la curva de la señal de modulación V_a^* debe ser igual al área total neta de la onda PWM V_{aN} ; Este es el denominado principio del balance voltio-segundo [26].

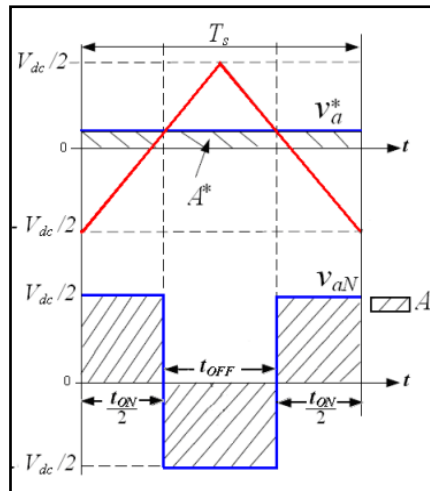


Figura 30. Principio Voltio-segundo (fase A en un periodo de portadora T_s)

Fuente: [26]

El índice de modulación de amplitud (M) Una característica importante en la modulación PWM es el nivel de utilización del bus de DC. Este índice se define como la amplitud de la señal moduladora, normalizada con respecto a la amplitud máxima de la portadora V_{tri} .

$$M = \frac{A}{V_{tri}} = \frac{A}{V_{dc}/2} \quad (5)$$

Siendo A la amplitud máxima de la señal moduladora.

Conformación y regulación de la salida mediante 6-STEP.

Una definición que toma como referencia la amplitud máxima de la componente fundamental del voltaje línea-línea de la salida del inversor en el modo 6-STEP (V_{6-step}), donde el índice de modulación se define como:

$$M' = \frac{A}{V_{6-step}} \quad (6)$$

Donde $V_{6-step} = \frac{2V_{dc}}{\pi}$

La importancia del modo 6-STEP radica en que con esta configuración es posible obtener la máxima utilización del voltaje de bus DC, sin embargo, esta técnica solo permite un

control sobre la frecuencia de la señal fundamental y no sobre su amplitud. En este modo de operación de un inversor trifásico, la amplitud de V_{aN} es $\frac{V_{dc}}{2}$ durante los primeros 180° de la fundamental $-\frac{V_{dc}}{2}$ en los últimos 180°, las otras dos fases operan de igual manera con la excepción de un desplazamiento de -120° y -240° . Respectivamente como se puede observar a continuación.

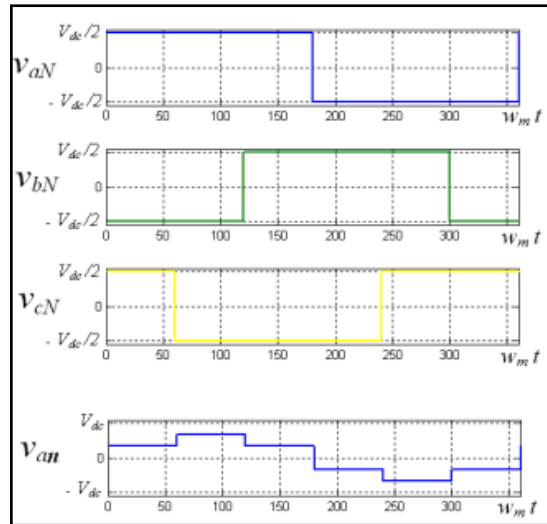


Figura 31. Forma de onda de modulación 6-STEP

Fuente: [20]

En concordancia con el valor del índice de modulación de amplitud M , se tiene dos modos de operación de la modulación PWM: el modo de operación lineal y el modo no lineal.

Modo de operación lineal el pico de la señal moduladora es menor o igual al pico de la señal portadora $M \leq 1$. Este se caracteriza porque la relación entre el valor instantáneo de la moduladora y el valor medio de la señal modulada $V_i^* / \overline{V_{iN}}$ (denominada la ganancia PWM), se aproxima a la unidad $G \cong 1$ CITATION Zho02 \l 2058 [22]. Aquí el máximo índice de modulación permitido por un algoritmo PWM es un indicador de eficiencia en el proceso.

Modo no lineal el pico de la señal moduladora es mayor al pico de la señal portadora $M > 1$. Esta condición es conocida como sobre modulación. Cuando la amplitud del voltaje de referencia $V_a^*(t)$ supera el nivel $\frac{V_{dc}}{2}$ las intersecciones entre portadora y moduladora desaparecen y los pulsos generados en la comparación permanecen en un único nivel durante aquellos ciclos de portadora en que no ocurren intersecciones.

Durante la sobre modulación en el semiciclo positivo, el conmutador SW_{a+} opera con un ciclo útil del 100%, no obstante, el voltaje de salida $\overline{V_{aN}}$ no alcanza a igualar el valor de referencia $V_a^*(t)$, generando relaciones no lineales entre las amplitudes y los ángulos de fase de la señal de referencia y la señal de salida del inversor [27].

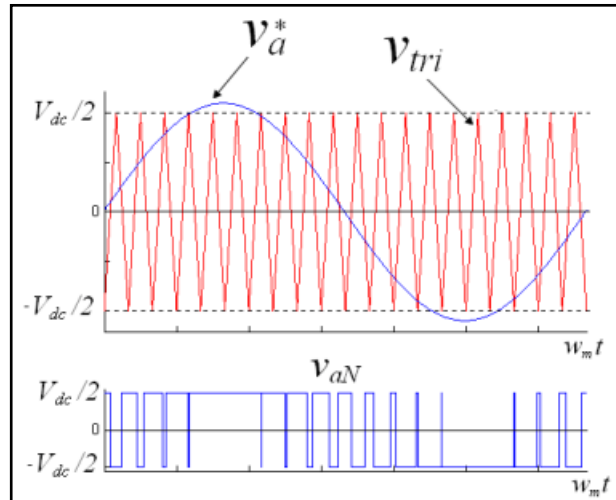


Figura 32. Sobre modulación de la fase A

Fuente: [26]

El caso extremo de la sobre modulación se alcanza cuando el índice de modulación M aumenta lo suficiente hasta el punto en que la pendiente de la señal moduladora supera a la pendiente de la portadora; en esta situación se entra al modo de operación 6-STEP.

La modulación PWM sinusoidal (SPWM) las señales moduladoras son un conjunto trifásico sinusoidal balanceado encargado de configurar la amplitud, frecuencia y fase a la salida del inversor. El conjunto de moduladoras algebraicamente se expresa [20]:

$$V_a^*(t) = A * \sin(W_m t) \quad (7)$$

$$V_b^*(t) = A * \sin\left(W_m t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (8)$$

$$V_c^*(t) = A * \sin\left(W_m t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (9)$$

$$V_a^*(t) + V_b^*(t) + V_c^*(t) = 0 \quad (10)$$

Donde A es la amplitud máxima de las moduladoras y W_m su frecuencia angular. A continuación, se puede ver el proceso de modulación SPWM basado en portadora trifásica

junto con los voltajes línea a línea resultantes. El rango lineal de modulación se puede expresar mediante el máximo índice de modulación dentro de zona lineal, en el caso del modulador SPWM este corresponde a $M_{líneal\ max} = 1$.

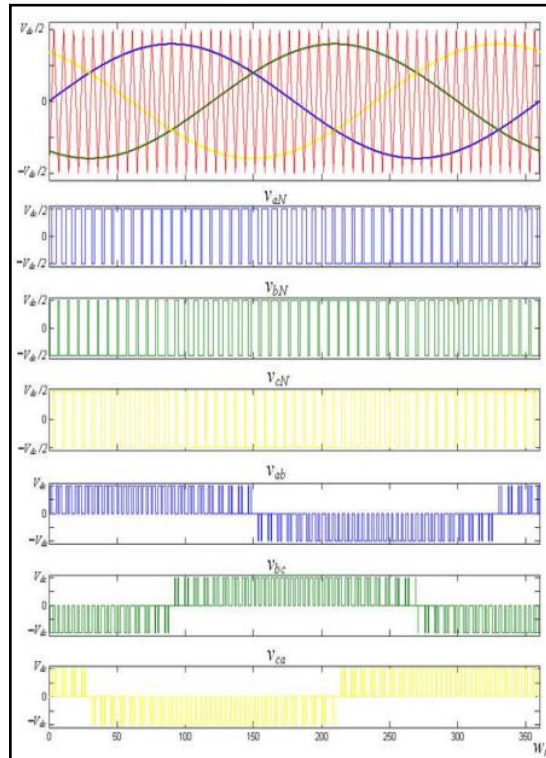


Figura 33. Proceso de modulación SPWM trifásico

Fuente: [20]

La relación entre el índice de modulación M y la amplitud normalizada del voltaje de línea-línea V_{ab} ; en la **figura 34** se aprecia cómo el límite superior de la zona lineal del SPWM genera una utilización aproximada del 61.2% del bus DC. Mas allá se encuentra la región de sobre modulación que permite una mayor utilización del bus DC a cambio de una no linealidad. Cuando el índice M toma el valor 3.24 se alcanza el modo de operación 6-STEP, generándose la máxima disponibilidad del bus DC, aproximadamente 78%.

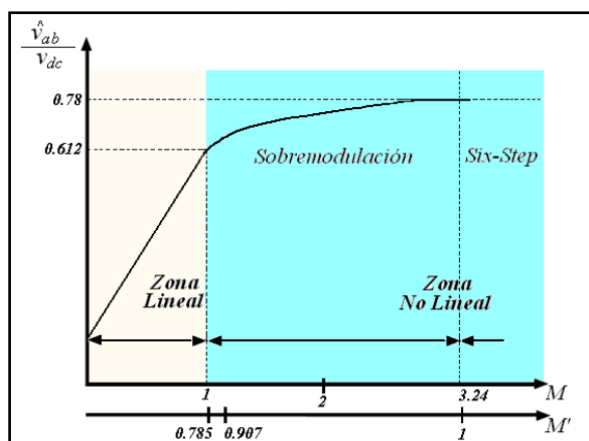


Figura 34. Curva característica del SPWM. Relación del índice de modulación con el porcentaje de utilización del bus DC

Fuente: [20]

La modulación PWM basada en vectores espaciales (SV-PWM) presenta mejor desempeño: menor contenido armónico, secuencias de conmutación óptimas y mayores voltajes. En esta técnica se obtiene un mayor aprovechamiento del voltaje del bus DC, el vector espacial de referencia explota la interacción de las señales entre las tres fases y en lugar de usar un modulador para cada fase, integra un algoritmo que procesa un único modulador para el vector espacial de voltaje del conjunto trifásico. Actualmente, la modulación SV-PWM se ha convertido en una técnica popular para inversores trifásicos, en particular en aplicaciones de control de motores de inducción [22]. La técnica más manejada en la modulación basada en portadora es la modulación sinusoidal PWM (SPWM). En esta técnica la señal de referencia de naturaleza sinusoidal es comparada con una señal triangular de alta frecuencia. Así, las señales PWM obtenidas para cada rama guardan en forma implícita la frecuencia y la forma de la señal de referencia. En la modulación vectorial PWM (SVPWM), se obtiene una secuencia de conmutación asociada a vectores adyacentes según la posición del fasor del voltaje de referencia [20].

La modulación SVPWM, se basa en los vectores de conmutación que son los posibles estados de los dispositivos del puente inversor. El vector está formado por tres dígitos binarios, uno asociado a cada rama. El estado de los dispositivos inferiores es contrario al del dispositivo superior, para evitar cortocircuitar el elemento almacenador de energía. Con los posibles estados de conmutación se obtiene el espacio vectorial definido en el plano complejo $\alpha\beta$, donde se ubica el vector voltaje de referencia.

v	S_1	S_2	S_3	$v_{\alpha\beta}$
v_0	0	0	0	0
v_1	1	0	0	$\frac{2}{3}V_{dc}$
v_2	1	1	0	$(\frac{1}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3})V_{dc}$
v_3	0	1	0	$(-\frac{1}{3} + j\frac{\sqrt{3}}{3})V_{dc}$
v_4	1	0	0	$-\frac{2}{3}V_{dc}$
v_5	0	0	1	$(-\frac{1}{3} - j\frac{\sqrt{3}}{3})V_{dc}$
v_6	1	0	1	$(\frac{1}{3} - j\frac{\sqrt{3}}{3})V_{dc}$
v_7	1	1	1	0

Figura 35. Vectores de conmutación de coordenadas

Fuente: [20]

La modulación SVPWM tiene tres pasos fundamentales: selección de vectores, tiempos de aplicación y diseño de la secuencia en el período de conmutación. La posición del vector de referencia se evalúa en cada período de muestreo, precisando los vectores de conmutación activos, que con los vectores nulos y los tiempos de conducción correspondientes, finalmente definen la secuencia de conmutación para el próximo período. Existen varias secuencias de conmutación posibles que se justifican por la libertad de distribuir el tiempo de aplicación del vector nulo entre los vectores nulos V_0 y V_7 , y por los diferentes órdenes posibles para la aplicación de los vectores en un mismo período de conmutación. [28]

En la **figura 36** se observa cómo el vector de referencia V_s se descompone en los vectores adyacentes V_1 y V_2 . El vector V_1 actúa durante un tiempo t_a y el vector V_2 durante el tiempo t_b para sintetizar el vector V_s . El vector nulo (V_0 ó V_7) actúa durante el tiempo t_0 que corresponde al intervalo faltante del período de conmutación T , ($t_0 = T_s - t_a - t_b$).

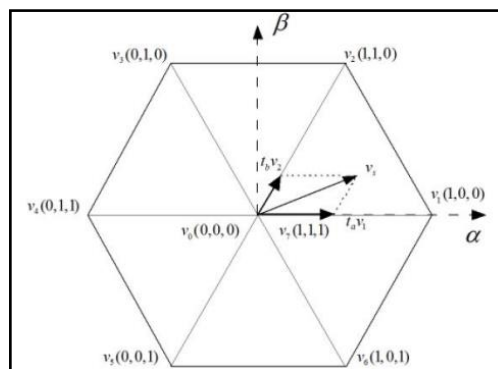


Figura 36. Modulación SVPWM sextantes

Fuente: [20]

Según el método de cálculo de la secuencia de conmutación, la técnica SVPWM se puede clasificar como continua o discontinua. La diferencia consiste en que en la modulación discontinua una de las ramas del inversor no se controla durante el período de conmutación, mientras que en la modulación continua sí hay control sobre cada rama en cada intervalo.

La modulación discontinua tiene la ventaja de disminuir las pérdidas de conmutación, pero incrementa el contenido armónico de las señales de salida. Después de seleccionar entre conmutación continua o discontinua, aún queda pendiente definir el orden de aplicación de los vectores. Se utilizan secuencias centradas en el intervalo de conmutación para minimizar pérdidas. En la **figura 37** se describe una secuencia de conmutación continua y una secuencia discontinua, válidas para el vector de referencia V_5 mostrado en **figura 36**. En la secuencia discontinua se usó el vector nulo V_7 . Una señal de conmutación diferente se hubiera obtenido con el vector nulo V_0 . Las 2 secuencias pueden utilizarse [29].

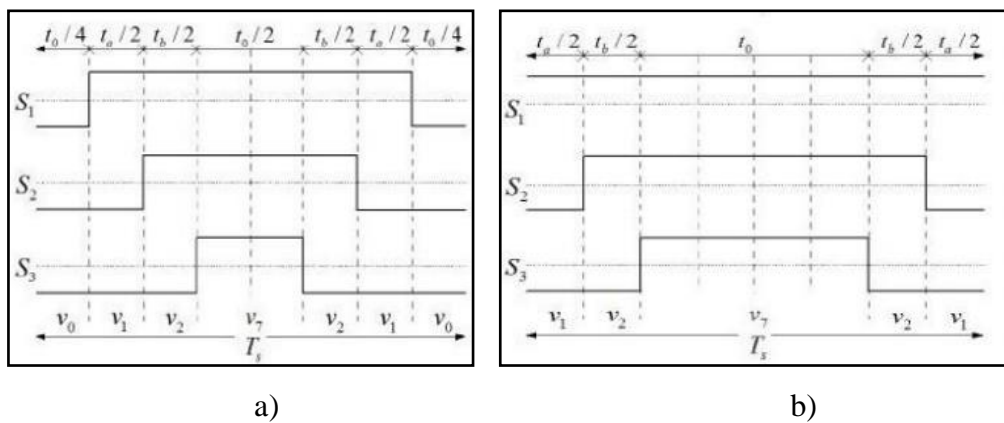


Figura 37. Secuencia de conmutación técnica SVPWM. a) Continuo b) Discontinuo

Fuente: [29]

1.2.2 Fundamentos Teóricos de Armónicos

En concordancia con la norma IEEE 519 los armónicos son una componente senoidal de una onda periódica que posee una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental [30]. La energía eléctrica soporta una serie de perturbaciones durante su transporte y distribución, de la que los clientes pueden verse afectados. Asimismo, al conectarse los equipos de los usuarios a la red de distribución se originan circulaciones de intensidades eléctricas proporcionales a la demanda de estos dispositivos. Al circular por la red estas intensidades dan lugar a caídas de voltaje, haciendo que el valor eficaz

del voltaje suministrado en un determinado lugar e instante dependa de las caídas de voltaje distribuidas por todos los elementos de la red. Entonces se puede decir que las frecuencias armónicas son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de alimentación. Matemáticamente lo anterior se expresa de la siguiente manera:

$$f_{armónica} = n f_{fundamental} \quad (11)$$

En donde n es un entero positivo que representa el orden del armónico, es decir, para una frecuencia fundamental de 50 Hz, la tercera armónica tendría una frecuencia de 150 Hz y la quinta armónica una frecuencia de 250 Hz. La **figura 38** muestra una onda senoidal fundamental con la 2°, 3° y 4° componentes armónicas.

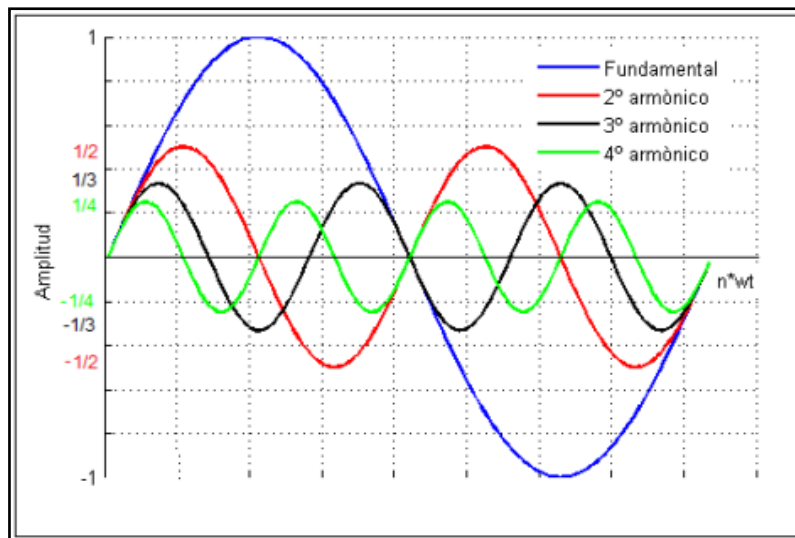


Figura 38. Secuencia de conmutación técnica

De acuerdo a [31] las variaciones se conocen a ciertas modificaciones leves en la intensidad o en la tensión con relación a su valor nominal, que suelen estar continuamente presentes. Como ejemplo se puede mencionar que la distorsión armónica, la variación de la frecuencia o bien el cambio del valor eficaz de la señal con relación al valor nominal asignado. Por otra parte, los eventos son alteraciones que sólo ocurren esporádicamente, como las sobretensiones transitorias o los huecos de tensión. A veces es difícil catalogar un fenómeno como evento o como variación. Las variaciones pueden analizarse en cualquier momento, pero sin embargo los eventos necesitan esperar a que una intensidad o una tensión sobrepasen un umbral prefijado como límite.

Los convertidores estáticos de potencia conectados a la red, tales como variadores de frecuencia para control de motores, fuentes conmutadas de ordenadores y lámparas de

bajo consumo, convertidores de interfase entre los generadores de energías renovables y la red eléctrica, etc., afectan al incremento de la distorsión armónica, puesto que el consumo y producción a otras frecuencias diferentes a la fundamental del sistema motiva el incremento del contenido armónico. [28]

Secuencia de armónicos

Para los sistemas trifásicos balanceados en condiciones de operación normal, las ondas de corriente o tensión tienen un desfase entre sí de 120° , y su secuencia de fases es positiva (A, B, C). Los armónicos de cada una de las fases, dado que su frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental, presentan unos ángulos de desfase diferentes a las formas de onda fundamentales, por lo cual estos pueden presentar diferentes secuencias de fase. Tomando como referencia la componente fundamental de la fase A, tenemos que las componentes fundamentales las están dadas por [2, 5]:

$$\begin{aligned} V_a &= A \angle 0^\circ \\ V_b &= A \angle -120^\circ \\ V_c &= A \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (12)$$

Siendo A la amplitud de la componente fundamental.

Para el armónico de orden k su desfase φ_k respecto a la fundamental es igual para las tres fases, esto es indispensable para que las formas de onda sean iguales. Por lo tanto, las componentes armónicas de orden k están dadas por:

$$\begin{aligned} V_{AK} &= A_k \angle \varphi_k \\ V_{BK} &= A_k \angle (\varphi_k + \varphi_{AB}) \\ V_{CK} &= A_k \angle (\varphi_k + \varphi_{AC}) \end{aligned} \quad (13)$$

Siendo:

A_k Amplitud del armónico k

φ_{AB} Angulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y B expresado en grados de armónico k

φ_{AC} Angulo de desfase entre las componentes fundamentales de las fases A y B expresado en grados de armónico k

Un periodo de la componente fundamental es igual a k periodos del armónico de orden k , lo cual permite expresar en grados del armónico k los desfases dados en grados de la componente fundamental utilizando la ecuación:

$$\varphi_k = k\varnothing \quad (14)$$

φ_k Ángulo de desfase dado en grados del armónico k

\varnothing Ángulo de desfase dado en grados de la componente fundamental

Donde se tiene que las componentes de la orden k están dadas por:

$$V_{AK} = A_k \angle \varphi_k$$

$$V_{BK} = A_k \angle (\varphi_k + k(-120^\circ)) \quad (15)$$

$$V_{CK} = A_k \angle (\varphi_k + k(120^\circ))$$

Para los armónicos de orden $3n$ (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n)} = A_{(3n)} \angle \varphi_{(3n)} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_{B(3n)} &= A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n) * (-120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n * (-360^\circ)) \\ &= A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} V_{C(3n)} &= A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n) * (120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n * (360^\circ)) \\ &= A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)}) \end{aligned} \quad (18)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases se encuentran en fase entre sí, por consiguiente, los armónicos de orden $3n$ son de secuencia cero. Para los armónicos de orden $(3n + 1)$ (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle \varphi_{(3n+1)} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} V_{B(3n+1)} &= A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n + 1) * (-120^\circ)) \\ &= A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n * (-360^\circ) - 120^\circ) \\ &= A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} - 120^\circ) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} V_{C(3n+1)} &= A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n + 1) * (120^\circ)) \\ &= A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n * (360^\circ) + 120^\circ) \\ &= A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + 120^\circ) \end{aligned} \quad (21)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de 120° con la misma secuencia seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden $(3n + 1)$ son de secuencia positiva.

Para los armónicos de orden $(3n - 1)$ (con n entero) las componentes armónicas están dadas por:

$$V_{A(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle \varphi_{(3n-1)} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} V_{B(3n-1)} &= A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n - 1) * (-120^\circ)) \\ &= A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (-360^\circ) + 120^\circ) \\ &= A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + 120^\circ) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} V_{C(3n-1)} &= A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n - 1) * (120^\circ)) \\ &= A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (360^\circ) - 120^\circ) \\ &= A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} - 120^\circ) \end{aligned} \quad (24)$$

Lo anterior muestra que las componentes armónicas de las tres fases presentan desfases entre sí de 120° con una secuencia contraria a la seguida por las componentes fundamentales, es decir, que los armónicos de orden $(3n - 1)$ son de secuencia negativa.

Tabla 3. Secuencia de fases de los componentes armónicos

Número Armónico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Fuente: [2]

La secuencia seguida por los armónicos es importante para analizar sus efectos, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- En sistemas trifásicos, los armónicos de orden $3n$ de corriente solo se pueden propagar cuando es posible un retorno por neutro.
- Los armónicos de orden $(3n + 1)$ en tensión generan en los motores un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental.
- Los armónicos de orden $(3n - 1)$ en tensión generan en los motores un campo giratorio en sentido contrario al generado por la componente fundamental.

Debe tenerse en cuenta que las conclusiones sobre secuencia de los armónicos solo son válidas cuando el sistema trifásico está balanceado y las formas de onda de las tres fases son idénticas. En la práctica, pueden encontrarse diferencias entre las tres fases del sistema, tal como se muestra a continuación. Lo anterior conduce a que los armónicos puedan tener componentes de diferentes secuencias a las obtenidas en el caso ideal planteado. [32]

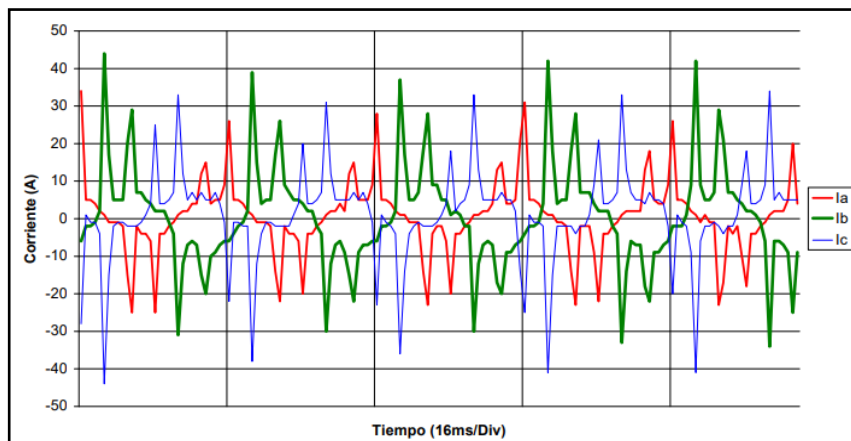


Figura 39. Sistema trifásico con diferentes formas de onda

Fuente: [2]

En la mayoría de aplicaciones la potencia de salida debida a la corriente de la componente fundamental es la potencia útil y la potencia debida a las corrientes armónicas es disipada en forma de calor aumentando la temperatura de la carga [20]. Escoger un tipo u otro de modulación determinará el valor de la componente fundamental, así como los valores de los diferentes armónicos [32]. Además, en la mayoría de aplicaciones industriales, se necesita un control de la tensión de salida del inversor para hacer frente a las variaciones

de la tensión DC de entrada, o para cumplir mantener constante la relación voltios/frecuencia. La calidad del inversor se evalúa en términos de los siguientes parámetros:

Factor armónico HF_n de la n ésima componente se define como una medida de la contribución armónica individual y se expresa como:

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (25)$$

Donde V_1 es el valor rms de la componente fundamental y V_n es el valor rms de la n ésima componente armónica.

Distorsión armónica total THD Medida de la similitud entre la forma de onda y su componente y su componente fundamental, se expresa como:

$$THD = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2} \quad (26)$$

Factor de Distorsión (DF): El THD muestra el contenido armónico total, pero no detalla el nivel de cada uno de sus componentes. Así si en la salida del inversor se instala un filtro, las armónicas de mayor orden se atenuarán con mayor eficacia, por lo que es primordial conocer la magnitud y frecuencia de cada componente [22]. Es decir, el DF proporciona la cantidad de distorsión armónica que queda en una forma de onda particular después de que las armónicas de esa forma de onda hayan sido sujetas a una atenuación de segundo orden (es decir divididas por n^2) [26]. Entonces DF es una medida de la eficacia en la reducción de las componentes armónicas no deseadas, sin necesidad de especificar los valores de un filtro de carga de segundo orden, y se define como:

$$DF = \frac{1}{V_1} * \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2}\right)^2} \quad (27)$$

siendo el factor de distorsión de una componente individual expresándose de la siguiente manera:

$$DF_n = \frac{V_n}{V_1 * n^2} \quad (28)$$

Armónica de menor orden LOH Se indica como como la componente cuya frecuencia se encuentra más cercana a la fundamental y cuya amplitud es mayor o igual a 3% de la componente fundamental.

1.3 Normativa sobre la calidad de energía eléctrica

Las normas para evaluar la señal de suministro, y las respectivas limitaciones en los armónicos de intensidad y de tensión y cómo deben medirse, etc., interesan más de cara a la implementación técnica de la norma. Los IEEE e IEC son las principales fuentes de las que proceden estas normas.

Según el estándar IEEE 1159 [33] es, a nivel americano, el encargado de establecer la normativa relativa a la monitorización de la calidad energética. Primero define los tipos de perturbaciones según las desviaciones de su contenido espectral, duración y amplitud respecto de los valores nominales, y se divide en siete tipos de fenómenos: transitorios, variaciones de corta y de larga duración del valor eficaz (toma en cuenta las sobretensiones e interrupciones), desequilibrios de tensión y corriente, distorsiones de forma de onda (armónicos), variaciones de voltaje y de la frecuencia de alimentación. En este estándar se indica las practicas recomendadas para realizar la medición y monitorización de la calidad de la energía eléctrica, así como diversas notas de aplicación sobre la forma de conectar y usar los equipos de medida.

La normativa EN 50160 [34, 35], como norma europea establece los límites en baja y media tensión entre los que deben estar los índices que caracterizan la forma de onda de tensión, como son la amplitud, las variaciones de la tensión de red, la frecuencia nominal, los cambios rápidos del voltaje en relación a la magnitud del flicker, las interrupciones de suministro cortas y prolongadas, los huecos de tensión, el desequilibrio de la tensión de red, las sobretensiones transitorias y temporales, los protocolos de medida, los voltajes armónicos.

En vista de que esta tesis tiene como objetivo caracterizar la calidad de potencia de variadores de frecuencia con inversor de salida F-PWM y 6-STEP los mismos que excitan motores trifásicos de inducción electrosumergibles y de superficie para sistemas de bombeo en el sector petrolero, se ha definido de mayor importancia las normas que definen los niveles

armónicos que pueden generar los dispositivos acoplados a la red de suministro para bajas tensiones acorde [30, 36]. Estos niveles armónicos son debidos a que los dispositivos de cargas no lineales, los mismos que están excitados por un voltaje senoidal, crean en su entrada de intensidad armónicos que motivan a su vez en la red de suministro armónicos de tensión. La IEC ha definido una serie de normas de Compatibilidad Electromagnética (EMC), para tratar de resolver los problemas de calidad de energía. La serie IEC 61000 incluye a los armónicos como fenómeno electromagnético de baja frecuencia. La norma IEEE 519 [30] es otra alternativa a la serie IEC, que también indica lineamientos acerca de calidad de energía.

1.4 Fundamentación metodológica

El presente trabajo de titulación utiliza las siguientes metodologías de investigación:

Enfoque cuantitativo: Utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar una o varias preguntas de investigación y probar las hipótesis establecidas previamente. Mide y define las variables en un determinado contexto. Establece conclusiones respecto a la hipótesis [37].

El tema de investigación seleccionado presentará un enfoque cuantitativo, ya que se procederá a realizar la investigación con los datos de los variadores de frecuencia seleccionados y el respectivo análisis de la calidad de energía que aportan para el accionamiento de motores trifásicos de inducción a diferentes velocidades.

Tipo de investigación

- **Método descriptivo:** El método descriptivo busca un conocimiento inicial de la realidad que se produce de la observación directa del investigador y del conocimiento que se obtiene mediante la lectura o estudio de las informaciones aportadas por otros autores. Se refiere a un método cuyo objetivo es exponer con el mayor rigor metodológico, información significativa sobre la realidad en estudio con los criterios establecidos por la academia [38].

Bajo este concepto se describe la estructura y el principio de operación de los inversores de tipo F-PWM y 6-STEP y la interacción que estos tienen en la operación de los motores eléctricos trifásicos de inducción.

- **Método explicativo:** Este método se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué dos o más variables están relacionadas. Las investigaciones explicativas son más estructuradas que las demás clases de estudios, busca hallar las razones y/o causas que producen ciertos fenómenos [39].

Con este método se pretende explicar cómo se realizan las técnicas de modulación en los inversores F-PWM y 6-STEP y su incidencia en la calidad de energía entregada a la carga por los mismos.

Método de investigación directa: Es la que se efectúa en el lugar y tiempo en que ocurren los fenómenos objeto de estudio. La investigación mixta es aquella que participa de la naturaleza de la investigación documental y de la investigación de campo [39].

Con este método se realiza mediciones experimentales de calidad de energía obteniendo la información de los sistemas de bombeo electrosumergibles y horizontales instalados con inversores con algoritmos de modulación F-PWM y 6-STEP

- **El método analítico:** Este método de investigación descompone un todo en sus partes para estudiar en forma intensiva cada uno de sus elementos, así como las relaciones entre sí y con el todo [39].

Con este estudio se analiza la calidad de energía entregada por las técnicas de modulación F-PWM y 6-STEP, se caracterizan los inversores en software y se realiza una comparación de espectros armónicos THD_v y THD_i .

1.5 Conclusiones

Con la realización del marco teórico, Capítulo 1, se encontró una secuencia lógica que permite el análisis de la teoría obtenida procedente de fuentes bibliográficas confiables e investigaciones realizadas, sobre las distorsiones armónicas que entregan a la carga los variadores con inversor de modulación F-PWM y 6-STEP, fundamento del planteamiento del problema y que sirven para el análisis del proyecto de investigación planteado.

En base a la investigación es posible definir y delimitar de acuerdo a un criterio sólido la fundamentación teórica con nociones claras de las variables involucradas en la

investigación y que se consolidan dentro del presente estudio, para evaluar las características de los parámetros que influyen en la calidad de energía entregada por los inversores F-PWM y 6-STEP.

La metodología aplicada en este trabajo reúne los requerimientos indispensables, a través de los tipos y métodos de investigación que sumado a las técnicas e instrumentos utilizados evaluarán a las técnicas de modulación F-PWM y 6-STEP.

2 CAPÍTULO II. PROPUESTA

2.1 Título del proyecto.

Análisis de calidad de energía en los sistemas de bombeo electro sumergible y horizontal alimentados con PWM y 6-STEP de la marca BH.

2.2 Objetivo del proyecto.

Caracterizar los convertidores ensayados para conocer la calidad de energía por ellos suministrada, mediante datos simulados y mediciones experimentales realizadas.

Evaluar y realizar un análisis comparativo entre las tasas armónicas obtenidas para las distintas fuentes de alimentación del estudio por el contenido armónico de bajas y/o altas frecuencias.

Evaluar los índices de la calidad de energía basado en la normativa internacional usada por los medidores de la red eléctrica comerciales adaptados a las necesidades específicas de medición a la salida de los variadores de frecuencia F-PWM y 6-STEP para sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal.

2.3 Justificación de la propuesta

Los procesos industriales relacionados a los sistemas de bombeo utilizados para producción y transporte de petróleo, involucran la utilización de motores eléctricos; siendo el motor de inducción trifásico AC el más utilizado en la industria. Sin embargo, su empleo para aplicaciones en donde se requiere variación de velocidad es restringido ya que estos motores giran a velocidades prácticamente fijas, las cuales son determinadas por las características técnicas de fabricación y la fuente de alimentación.

Los VSD surgen de la necesidad de optimizar los procesos industriales mediante la variación de velocidad de motores de inducción de alta eficiencia. La combinación de estos equipos, VSD y motor eléctrico permitió un avance eficiente y económico en aplicaciones industriales que requerían control de velocidades variables; sin embargo, este sistema desde su inicio ha presentado un efecto adverso que se caracteriza por producir corrientes armónicas en el sistema, originando este tipo de alimentación pérdidas adicionales tanto en los devanados del estator como en el rotor del motor eléctrico. Este incremento de pérdidas se transforma en un aumento adicional de la temperatura en

puntos de la máquina que no se presentaban cuando se alimentaba con red sinusoidal y siempre comparando a igual potencia mecánica desarrollada y con la misma refrigeración.

Como consecuencia de este fenómeno el aislamiento del motor eléctrico y los cables sufren un gran estrés, lo cual puede conducir a pérdida de aislamiento, sobrecarga y destrucción de los elementos que componen el sistema Variador - Motor, teniendo como meta evaluar la calidad de energía de la alimentación F-PWM y 6-STEP y los métodos utilizados para mitigar el fenómeno presentado, de esta manera disminuir el tiempo no productivo debido a paradas no programadas y fallas prematuras; así como extender la vida útil de los equipos de bombeo electro sumergible y horizontal.

2.4 Fundamentación de la propuesta

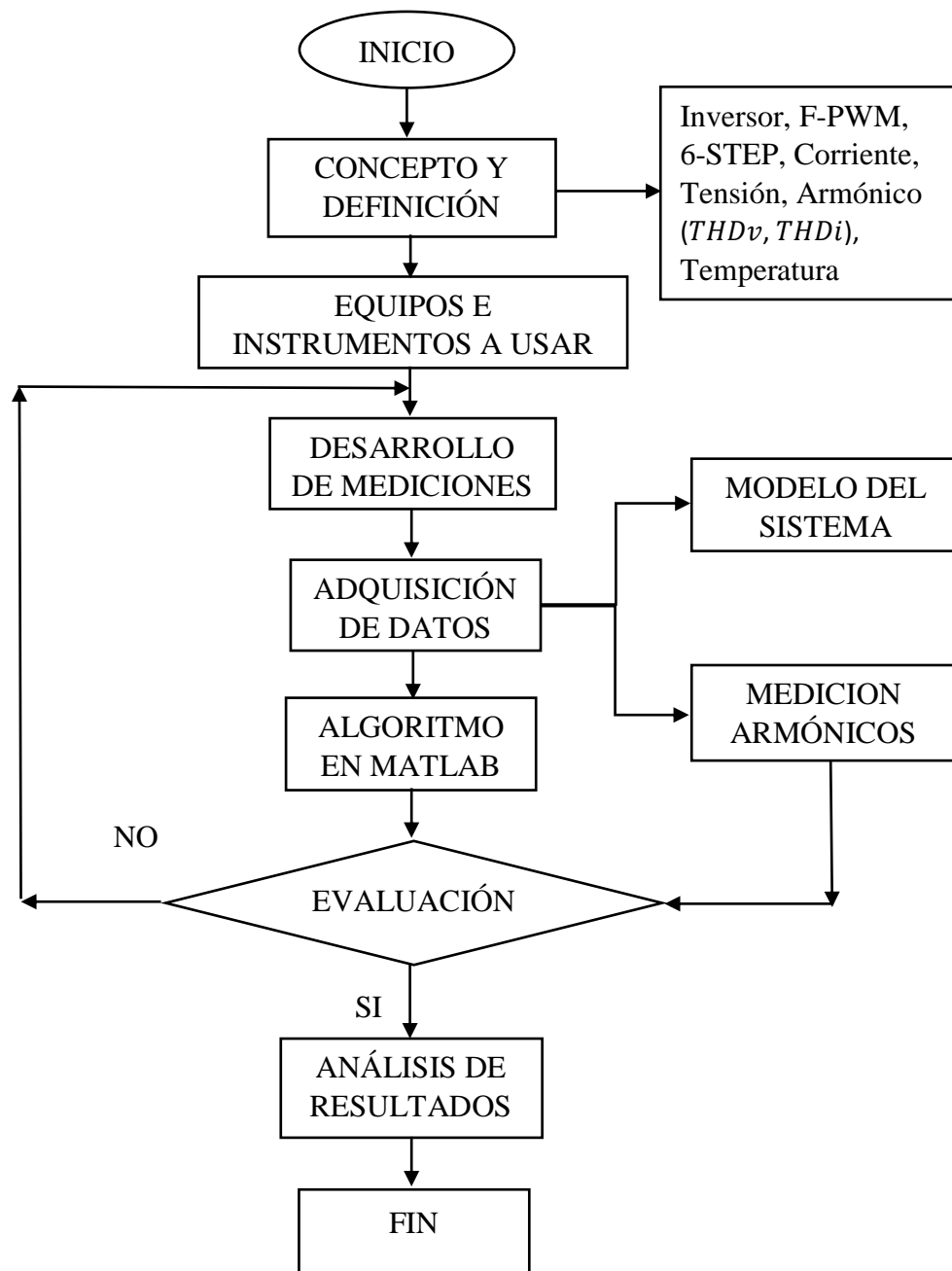
Mediante la utilización de variadores de frecuencia para el accionamiento de motores de inducción trifásicos en sistemas BES y Horizontales, con alimentación usando técnicas de modulación F-PWM y 6-STEP que inciden en el desempeño de la máquina debido a las componentes armónicas en los voltajes que genera el inversor. Como ya se ha indicado en el Capítulo II las distorsiones en las señales de alimentación del motor pueden provocar incrementos de la temperatura de operación en los devanados; así mismo las frecuencias de conmutación elevadas de los inversores aumentan las interferencias originadas por la capacitancia parasita entre los componentes metálicos del motor y tierra, induciendo el flujo de corrientes pulsantes no deseadas las mismas que pueden aumentar los niveles de ruido y vibración, provocar pérdidas de potencia, degradar el aislamiento y daños en los cojinetes.

Debido a la escasa información de los fabricantes y a la complejidad de realizar un estudio analítico de calidad de energía de un convertidor de frecuencia comercial es necesario realizar un estudio práctico ya que las salidas de los variadores generan gran contenido armónico que obstaculiza la localización de fallas en el motor, pero al mismo tiempo es posible que pueda contribuir con pautas para facilitar su diagnóstico. En este capítulo de la tesis se desarrolla una metodología de caracterización experimental de variadores de frecuencia F-PWM y 6-STEP que alimentan motores de inducción para sistemas BES y Horizontal, en función de los contenidos armónicos de sus salidas, mediante varios ensayos basándose en la normativa de medida de calidad de la red eléctrica, con la

finalidad de conocer la calidad de la energía generada y detectar posibles fallos en los motores.

2.5 Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados

A continuación, se presentan el diagrama de flujo general el mismo que indica la metodología desarrollada para el estudio de calidad de energía entregada por los inversores F-PWM y 6-STEP utilizados para sistemas BES y Horizontal.



2.5.1 Método para caracterizar la calidad de energía

- Se determinará las técnicas de análisis para el tratamiento de las señales consideradas.
- Utilizando el analizador de calidad de energía FLUKE 435 SII se realizarán varios ensayos experimentales con diferentes porcentajes de carga y frecuencia, determinando las medidas eléctricas reales.
- Con el software Simulink/Matlab se programará y correrá simulaciones de los sistemas eléctricos ensayados para validar las mediciones experimentales e identificar posibles problemas y se evaluarán los métodos de filtrado preexistentes.
- Se evaluará las mediciones con lineamientos propios para caracterización experimental de la calidad de energía suministrada por los variadores F-PWM y 6-STEP que alimentan a motores de inducción de sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal en función de su contenido armónico, con la finalidad de determinar la calidad eléctrica suministrada.

2.5.2 Procedimiento de investigación de calidad de energía de los VSD

- Recopilar la información de los sistemas BES y Horizontal que se realizarán las mediciones experimentales: Transformadores (datos de placa), Variador de frecuencia (datos de placa), motores de fondo y superficie (datos de placa), cable de potencia (longitud, calibre, tipo).
- Identificar niveles de voltaje y puntos de medición en cada equipo puntual del estudio con la ayuda de un voltímetro digital Digivolt 80KV marca HDE.
- Levantar información de hoja de vida de los equipos y reportes de monitoreo para conocer sus características eléctricas y operativas.
- Realizar mediciones experimentales con el analizador de energía Fluke 435 SII, por un periodo de tiempo determinado en los puntos señalados de los ensayos propuestos.
- Mediante el software Simulink/Matlab caracterizar los variadores con sus respectivas cargas y simular el contenido armónico de las señales de alimentación de los motores.
- Recolectar la información y análisis de los datos obtenidos.

2.5.3 Procedimiento de evaluación e implementación de lineamientos propios de calidad de energía de los VSD

- Dibujar y simular los sistemas propuestos en el software Simulink/Matlab con la finalidad de elegir las normativas recomendadas para calidad de energía.
- Comparación de datos con las mediciones experimentales de los ensayos: Corriente, voltaje, potencia y distorsión armónica.
- Evaluación de los métodos F-PWM y 6-STEP y su influencia en los motores electrosumergibles y de superficie.

2.6 Instrumentación y aplicaciones informáticas usadas

2.6.1 Simulink – Matlab

SIMULINK (originalmente llamado SIMULAB) se integra con MATLAB y apareció en 1991. Se diseñó para trabajar con diagramas de bloques (BD) usando la potencia de cálculo de MATLAB para el análisis dinámico de sistemas. Los diagramas de bloques de SIMULINK pueden ser definidos como ecuaciones de estado. Actualmente las librerías gráficas de SIMULINK ofrecen innumerables aplicaciones en el ámbito de los componentes eléctricos y el procesamiento de la señal. [40]

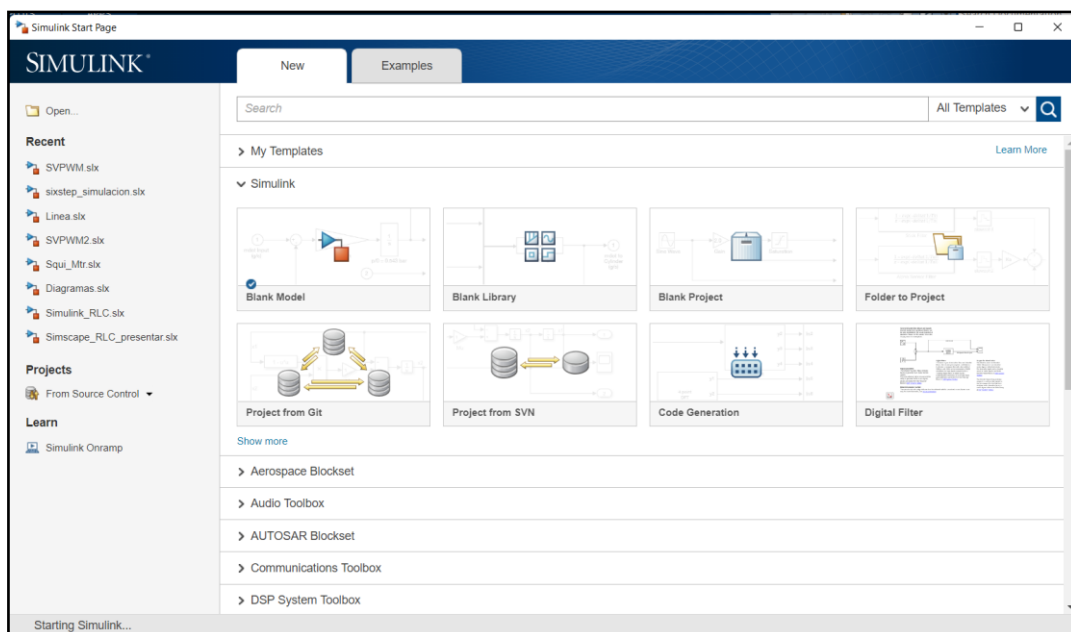


Figura 40. Interfaz Simulink-Matlab

2.6.2 Analizador de energía FLUKE 435 SII

El analizador de calidad eléctrica y energía FLUKE 435 SII mide simultáneamente múltiples parámetros y se muestran en formatos que describen rápidamente el estado general de calidad eléctrica. La información detallada ayuda a tomar mejores decisiones para definir posibles causas de fallas y el modo afectan a los sistemas eléctricos a la calidad de la energía. Se puede acceder a los datos como simples valores digitales, gráficos de tendencias, formas de onda o diagramas fasoriales. Los datos también pueden analizarse y organizarse en formato tabular. Los datos de eventos detallados le permiten ver las etiquetas de magnitud, duración y tiempo de las anomalías de forma que se puedan correlacionar rápidamente los problemas que experimenta en las instalaciones y equipos. [41]



Figura 41. Analizador de energía Fluke 435 II

Fuente: [41]

2.7 Conclusiones

Se ha caracterizado experimentalmente los variadores de frecuencia seleccionados y se los clasifico de acuerdo a su comportamiento en el accionamiento de motores de inducción para sistemas BES y Horizontal. Realizando ensayos en diferentes sistemas con la finalidad de extraer la máxima información armónica de los equipos analizados.

Se han analizado las diferencias entre las evidencias halladas en los diferentes equipos con distintos motores y estados de funcionamiento, y se ha concluido las tendencias que aportan información relevante de cara a la implementación de un sistema con lineamientos para medición de la calidad de energía de los inversores F-PWM y 6-STEP.

3 CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACION DE LA PROPUESTA

En el capítulo 3 se procede a desarrollar la metodología propuesta, comenzando por caracterizar experimentalmente en Matlab Simulink los inversores con señal de salida F-PWM unidad SCH-007 y 6-STEP unidad SCHAA-301 para sistemas BES y en sistemas de bombeo HPS la unidad SCHN-002 con inversor F-PWM, basados en su emisión de distorsión armónica. Por lo que se han realizado varios ensayos en los sistemas propuestos con diferentes niveles de frecuencia fundamental y porcentaje de cargas, tratando de obtener sus respectivos contenidos armónicos con distintas frecuencias fundamentales.

El actual capítulo empieza por describir los variadores de frecuencia, sus cargas conectadas y los ensayos realizados con el objetivo de extraer la máxima información de las corrientes armónicas generadas por los dos inversores y sus cargas experimentadas. Estos resultados se procederán a presentar de forma digital mediante una simulación en MatLab Simulink.

Así mismo se detallará los resultados de flujos armónicos junto a las tasas de distorsión ordenados de acuerdo a la fuente de alimentación empleada y se expone la dependencia entre algunas tasas de distorsión. Finalmente se realiza una evaluación de los inversores ensayados y un análisis comparativo de las tasas armónicas para los dos tipos de señal F-PWM y 6-STEP en concordancia con la normativa internacional.

3.1 Descripción y modelación de los de los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal

Los circuitos que fueron implementados en el software de simulación de MatLab Simulink, se modelaron utilizando los bloques internos preexistentes de la librería SimPower Systems y se procedió a realizar modificaciones con el objetivo de alcanzar una aproximación de los resultados de simulación en relación con los datos expuestos en el estándar IEEE Std 399 de 1997.

El estudio se ejecutó en base al diagrama unifilar como se muestra en la **figura 42** en los mismos que mediante las mediciones experimentales realizadas a la salida de los VSD con el analizador de energía FLUKE 435 SII y en base a los resultados obtenidos fueron caracterizados los inversores en MatLab Simulink utilizando los datos técnicos de placa de cada componente y con los resultados de las medidas antes mencionadas.

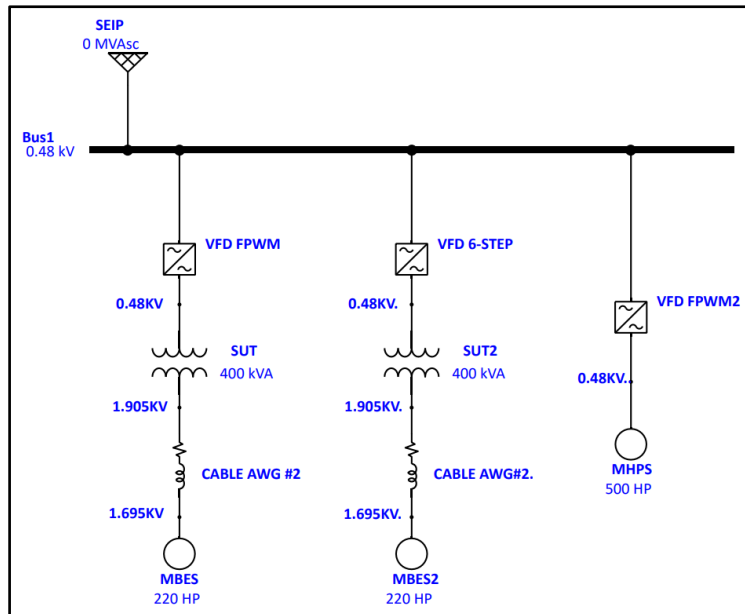


Figura 42. Diagrama unifilar sistemas bombeo electrosumergible y de superficie

Fuente: Elaboración propia

3.1.1 Descripción de componentes del sistema de bombeo electrosumergible

Para estos sistemas se han caracterizado 2 variadores de frecuencia de la marca BH, Vector Plus en la unidad SCH-007 (Anexo 1) y Electrospeed III GCS en la unidad SCHAA-301 (Anexo 2) que por sus diferentes modos de funcionamiento han dado lugar a las señales F-PWM y 6-STEP ensayadas. Cada una de estas fuentes han accionado motores electrosumergibles de 220 HP.

3.1.1.1 Variador Vector Plus unidad SCH-007

El modelo utilizado de VSD en los que se realizó las mediciones experimentales ofrece una potencia de salida de 301 KVA para el sistema BES, presentan una salida trifásica de voltaje de 0-480 V y un ajuste de frecuencia de 0-120 Hz. La **tabla 4.** detalla las principales características técnicas del variador y en la **figura 43** se aprecia una fotografía frontal del equipo. Con una frecuencia de conmutación para sistemas BES de 2 KHz. Los inversores Vector Plus con señal de salida PWM equipados con filtro LC de generación de onda sinusoidal variable (VSG) diseñado para proteger al motor en aplicaciones con largas longitudes de cable entre el VSD y el motor que exceden los 100 metros. Un filtro puede minimizar los transitorios de voltaje dañinos entregados al sistema.

Tabla 4. Principales características del VSD Vector Plus sistema de bombeo electrosumergible

Potencia Nominal	301 KVA / 226 KW
Tensión y frecuencia alimentación	480 V/60 Hz
Tensión de salida	0-480 V
Corriente Nominal	362 A
Frecuencia de salida	0-120 Hz
Denominación	VSD VP
Número de serie	J25F68401P
Índice de protección	IP46/NEMA 4
Sistema	BES

Este inversor Vector Plus dispone de diversas configuraciones de parámetros para el control del arranque, parada e inversión de giro y permite adaptarse a las características individuales del motor. El variador incluye control escalar V/Hz que proporciona una regulación de velocidad excepcional y niveles muy altos de par en todo el rango de velocidad del convertidor. Otras características son las funciones de protección contra sobrecarga del variador, regulación de rampa y arranque ligero [42]. Para las mediciones experimentales realizadas se considera como situación ideal el estado estacionario debido a que se realizara en sistemas de bombeo en operación y para un mejor análisis de armónicos generados.



Figura 43. VSD Vector Plus

Fuente: [42]

3.1.1.2 Variador Electrospeed III GCS

Los convertidores del tipo Electrospeed III GCS en los que se realizó el ensayo ofrece una potencia nominal de 390 KVA con una salida trifásica de 0-480 V con una frecuencia variable entre 2-120 Hz. En la **tabla 5** se puede ver las principales características y en la **figura 44** se apreciar dicho equipo visto desde la parte frontal. Este convertidor presenta una señal de salida 6-STEP para los sistemas BES. El Electrospeed GCS está clasificado como un inversor de voltaje variable (VVI) utiliza un puente rectificador compuesto por SCR de 6, 12 y 24 pulsos para convertir la alimentación CA en alimentación CC de voltaje variable, utiliza un inductor en serie y condensadores a través del Bus DC para filtrar la ondulación de CA. El inversor utiliza 6 (o múltiplos de 6) IGBT de potencia para sintetizar un voltaje de salida cuasi sinusoidal utilizando un algoritmo inversor.

Tabla 5. Principales características del VSD Electrospeed III GCS

Potencia Nominal	390 KVA / 292 KW
Tensión y frecuencia alimentación	480 V / 60 Hz
Tensión de salida	0-480 V
Corriente Nominal	469 A
Frecuencia de salida	2-120 Hz
Denominación	4350-4-GCS
Número de serie	12603393
Índice de protección	IP56/NEMA 4
Sistema	BES/HPS

El inversor GCS es programable para muchos tipos de cargas, como par constante y variable con rango de velocidad extendido [43].



Figura 44. VSD Electrospeed III GCS

Fuente: [43]








3.1.1.3 Transformador Elevador Multifrecuencial

Para el accionamiento de este motor se utiliza un transformador elevador multifrecuencial diseñado para motores de media tensión utilizados en los sistemas electrosumergible, con las siguientes características técnicas detalladas en la **tabla 6**.

Tabla 6. Principales características del transformador elevador

Potencia (KVA)	400 KVA
Voltaje Primario (V)	480 V
Voltaje secundario (V)	1100 V / 3810 V
Frecuencia (Hz)	30 - 90 Hz
Impedancia (%)	4,6 %
Factor K	20
Grupo de conexión	Dd0 / Yd11

En ambos sistemas BES ensayados para una frecuencia máxima de 60 Hz se ha seleccionado el TAP 1-7 conexión estrella con un voltaje de salida de 1905 V, satisfaciendo el voltaje requerido en los bornes del motor de acuerdo con diseño del equipo y requerimientos del sistema.

PRIMARY VOLTAGE ACROSS X ₁ -X ₂ -X ₃		SECONDARY VOLTAGE ACROSS H ₁ - H ₂ - H ₃					
 480V			SW. No. 1 POS. No. 1		No. 2 SWITCH POSITION	SW. No. 1 POS. No. 2	
							
			1608	2785	1	2200	3811
			1523	2638	2	2116	3664
			1439	2492	3	2031	3518
			1354	2345	4	1946	3371
			1269	2198	5	1862	3225
			1185	2052	6	1777	3078
1100	1905	7	1692	2931			

DE-ENERGIZE TRANSFORMER BEFORE CHANGING TAPS

Figura 45. Grupos de conexión transformador elevador sistema BES

Fuente: PEC

3.1.1.4 Cable de potencia

El cable de potencia utilizado para el accionamiento de los sistemas BES, en los dos casos se tiene instalado el modelo CEL FLAT - EPDM/LEAD – 5 KV – 450 °F (232 °C) # 2 AWG. Para el sistema BES que utiliza el VSD con inversor F-PWM se tiene una longitud total de cable de 9168.9 pies (2794.6 m) y para el VSD con inversor 6-STEP se considera una longitud de 9598.3 pies (2925.6 m); en base a los datos técnicos proporcionados por el fabricante se ha determinado experimentalmente la impedancia de este componente para la simulación como se observa en las **tablas 7 y 8**.

Tabla 7. Características técnicas cable de potencia BES SCH-007 9168.9 pies

	Resistencia	React. Induc.	Capacitancia	Impedancia	Inductancia
CABLE BES	Ω/K-pies	Ω /K-pies	μF/K-pies	Ω /K-pies	H
2 AWG PLANO	0,1621	0,039	0,0698	0,1656	0,00010345
K-pies / 220 °F	0,2839093	0,039	0,0698	0,1656	0,00010345
Cable total	2,6031355	0,357587	0,639989	1,5184	0,00094853

Tabla 8. Características técnicas cable de potencia BES SCHAA-301 9598.3 pies

	Resistencia	React. Induc.	Capacitancia	Impedancia	Inductancia
CABLE BES	Ω/K-pies	Ω /K-pies	μF/K-pies	Ω /K-pies	H
2 AWG PLANO	0,1621	0,039	0,0698	0,1656	0,00010345
K-pies / 220 °F	0,2839092	0,039	0,0698	0,1656	0,00010345
Cable total	2,7250489	0,374334	0,669962	1,5895	0,00099295

Fuente: El autor

3.1.1.5 Motor de fondo sistema BES

Para el ensayo con señal de salida F-PWM y 6-STEP en sistemas BES se realizó la medición experimental en diferentes sistemas utilizando 1 motor marca BH de 220 HP, conectado en estrella, cuyos principales datos técnicos obtenidos del reporte de pruebas proporcionado por el fabricante y mediante simulación se detallan en la **tabla 9**.

Tabla 9. Principales características del motor electrosumergible marca BH

Voltaje (V)	1695 V
Amperaje (A)	84 A
Potencia (HP)	220 HP
Frecuencia (Hz)	60 Hz
Velocidad (rpm)	3470 rpm
Factor Potencia	0,81
Eficiencia (%)	84 %
Resistencia estator Rs (%)	2,56 %
Reactancia estator Xs (%)	4,94 %
Reactancia de magnetización Xm (%)	246,3 %
Resistencia pérdidas núcleo Rc (%)	803,7 %

3.1.2 Descripción de componentes del sistema de bombeo horizontal

En el caso de los sistemas de bombeo horizontal se caracteriza y ensaya el inversor Vector Plus con salida F-PWM alimentando a 1 motor WEG de 500 HP al que llamaremos MHPS. Todas las pruebas se han realizado a cargas superiores a 50% (en dependencia de los sistemas de bombeo) y distintas frecuencias fundamentales de operación. No se realiza ensayos en el sistema con VSD Electrospeed GCS ya que mantiene un inversor con salida F-PWM con una topología y operación similar al VSD Vector Plus.

3.1.2.1 Variador Vector Plus

El modelo utilizado de VSD en el que se realizó las mediciones experimentales ofrece una potencia de salida de 561 KVA para sistemas HPS, presentan una salida trifásica de 0-480 V y un ajuste de frecuencia de 0-120 Hz. La **tabla 10** detalla las principales características técnicas del variador y en la **figura 43** se aprecia una fotografía frontal del equipo. De la misma forma que en el sistema de bombeo electrosumergible mantiene una

frecuencia de conmutación de 2 KHz para la señal de salida PWM con filtro de generación de onda sinusoidal variable (VSG).

Tabla 10. Placa característica del VSD Vector Plus Sistema Bombeo Horizontal

Potencia Nominal	561 KVA / 420 KW
Tensión y frecuencia alimentación	480 V / 60 Hz
Tensión de salida	0-480 V
Corriente Nominal	675 A
Frecuencia de salida	0-120 Hz
Denominación	VSD VP
Número de serie	J28H73978P
Índice de protección	IP46/NEMA 4
Sistema	HPS

Para las mediciones experimentales realizadas se considera como situación ideal el estado estacionario debido a que se realizara en sistemas de bombeo en operación y para un mejor análisis de armónicos generados.

3.1.2.2 Motor de superficie sistema de bombeo horizontal HPS

Para el ensayo con señal de salida F-PWM en sistemas de bombeo horizontal se realizó la medición experimental en un sistema con 1 motor WEG de 500HP, S/N 1050979522 como se aprecia en placa de datos de la **figura 46**, conectado en delta, cuyos principales datos técnicos obtenidos del reporte de pruebas proporcionado por el fabricante se detallan en la **tabla 11**.



Figura 46. Motor WEG 500 HP sistema HPS F-PWM SCHN-002

Fuente: PEC

Tabla 11. Principales características del motor WEG

Voltaje (V)	460 V
Amperaje (A)	564 A
Potencia (HP)	500 HP
Frecuencia (Hz)	60 Hz
Velocidad (rpm)	3580 rpm
Factor Potencia	0,86
Eficiencia (%)	95,7 %
Resistencia estator Rs (%)	2,34 %
Reactancia estator Xs (%)	15,59 %
Reactancia de magnetización Xm (%)	294,4 %
Resistencia pérdidas núcleo Rc (%)	11071,4 %

3.2 Descripción de ensayos realizados en los sistemas F-PWM y 6 STEP

Las mediciones experimentales de calidad de energía en el punto de acoplamiento VSD-SUT y VSD-MOTOR se han realizado mediante los siguientes parámetros:

Alimentación:

Variador Vector Plus – F-PWM

- Modo de operación control escalar V/Hz.
- Salida F-PWM con frecuencia de conmutación de 2 KHz, no modificable ya que las pruebas se realizan con equipos en producción en estado estacionario.
- Se realiza las mediciones con frecuencia fundamental de salida usando siempre múltiplos de resolución frecuencial de 5 Hz recomendada en la normativa (45 Hz, 50 Hz, 55 Hz y 60 Hz), ya que al ser una limitante la modificación de frecuencia los ensayos fueron tomados de manera puntual tanto para sistemas HPS y BES.

Variador Electrospeed III GCS – 6-STEP

- Modo de operación control escalar V/Hz.
- Salida 6-STEP con algoritmo SelectWave Tm.
- Se realiza las mediciones con frecuencia fundamental de salida usando siempre múltiplos de la resolución frecuencial de 5 Hz recomendada en la normativa (45 Hz,

50 Hz, 55 Hz y 60 Hz), ya que al ser una limitante la modificación de frecuencia los ensayos fueron tomados de manera puntual para el sistema de bombeo electrosumergible estudiado.

- No se realiza pruebas en los sistemas de bombeo horizontal, ya que el inversor del VSD Electrospeed III GCS trabaja en modo F-PWM con frecuencia de conmutación de 2 KHz, manteniendo una topología y funcionamiento similar al VSD Vector Plus por lo que se omitió este ensayo.

Carga:

- En el caso de los sistemas de bombeo electrosumergible se ha realizado los ensayos con equipos que cuentan con un motor de las mismas características técnicas descritas en la **tabla 9** con cargas de operación superiores al 40 % de acuerdo con el requerimiento del sistema.
- Para los sistemas de bombeo horizontal las mediciones experimentales se han realizado con 1 motor de baja tensión (**tabla 11**) con cargas medias y superiores del 60 % de igual forma en dependencia con el requerimiento del sistema.

En los sistemas de bombeo electrosumergible combinando los tipos de alimentación F-PWM y 6-STEP se han realizado 4 ensayos de cada tipo, mediciones experimentales tomadas en el punto de acoplamiento VSD-SUT. En cambio, para el sistema de bombeo horizontal ensayado son 2 las mediciones experimentales para la señal F-PWM en el punto de acoplamiento VSD-MOTOR.

En la mayoría de estos ensayos se realizan series de hasta 3 repeticiones utilizando el analizador de calidad de energía FLUKE 435 SII, el mismo que se programó para tomar muestreos de 3seg con periodos de hasta 2 horas en estado estacionario (frecuencia de salida de producción). En total se han realizado más de 18 ensayos con ambos tipos de alimentaciones del variador y sus cargas conectadas.

A continuación, en la **tabla 12** se detalla el plan de mediciones experimentales desarrolladas y como se han organizado las variables durante los ensayos para los distintos niveles de frecuencia fundamental y carga del estudio de este estudio.

Tabla 12. Mediciones experimentales desarrolladas en los VSD

MOTOR	VARIADOR	CONTROL	F-PWM / 6-STEP	FREC. FUND.	CARGA/ PAR
MBES	VECTOR PLUS 301 KVA	V/Hz	FPWM-2 KHz	45 Hz	47,69 %
MBES	VECTOR PLUS 301 KVA	V/Hz	FPWM-2 KHz	50 Hz	60,19 %
MBES	VECTOR PLUS 301 KVA	V/Hz	FPWM-2 KHz	55 Hz	69,96 %
MBES	VECTOR PLUS 301 KVA	V/Hz	FPWM-2 KHz	60 Hz	73,51 %
MBES	ELECTROSPEED 390 KVA	V/Hz	6-STEP	45 Hz	48,29 %
MBES	ELECTROSPEED 390 KVA	V/Hz	6-STEP	50 Hz	56,59 %
MBES	ELECTROSPEED 390 KVA	V/Hz	6-STEP	55 Hz	68,49 %
MBES	ELECTROSPEED 390 KVA	V/Hz	6-STEP	60 Hz	75,63 %
MHPS1	VECTOR PLUS 561 KVA	V/Hz	FPWM -2 KHz	50 Hz	71,20 %
MHPS1	VECTOR PLUS 561 KVA	V/Hz	FPWM -2 KHz	55 Hz	93,05 %

Fuente: El autor

3.3 Ensayo experimental

3.3.1 Conexión del analizador de energía FLUKE 435 SII

Según el estándar IEEE-1159 para las mediciones de voltaje el equipo utilizado para la adquisición de estas señales fue el analizador de energía Fluke 435 SII [33]. Para la adquisición de datos y obtención de los oscilogramas de tensión la conexión realizada se encuentra en el punto de conexión común VSD-SUT o VSD-MOTOR entre la salida del VSD (Red de suministro) y la carga (circuito de potencia), como se muestra en la **figura 47**.

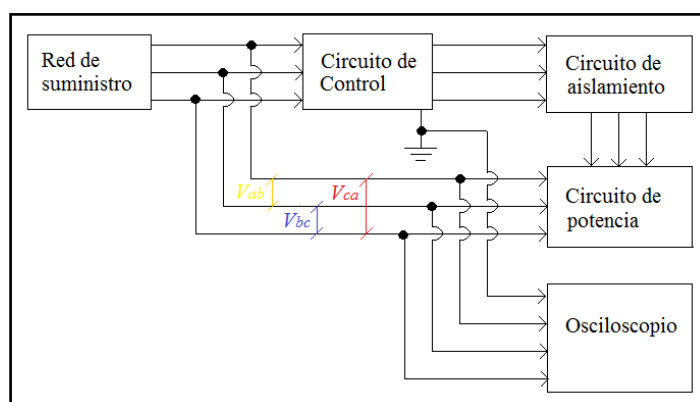


Figura 47. Conexión del osciloscopio de tensión Fluke 435 SII

Para las mediciones de corriente de igual forma se utilizaron las sondas Fluke I2500-10 iFlex conectadas al analizador de energía FLUKE 435 SII. De igual forma para la adquisición de datos y obtención de los oscilogramas de corriente se obtuvieron en el

punto de conexión común VSD-SUT o VSD-MOTOR entre la salida del VSD (Red de suministro) y la carga (Módulo de potencia) acorde IEEE-1159. Para la adquisición de estas señales de corrientes con el osciloscopio del FLUKE 435 SII, como se muestra en la **figura 48**.

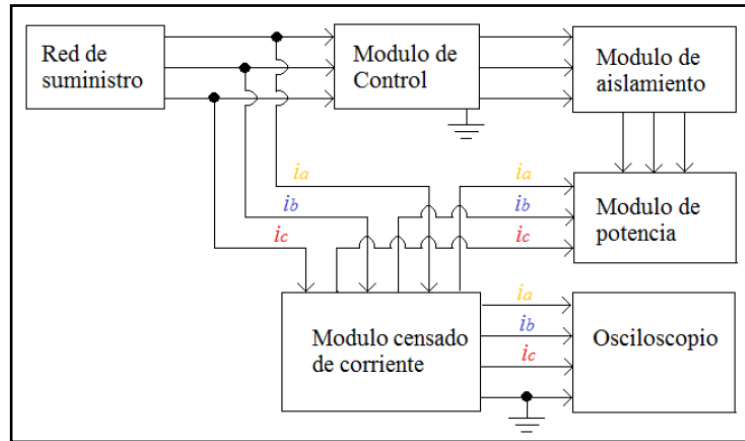


Figura 48. Conexión del osciloscopio de corriente Fluke 435 SII

3.3.2 Configuración del analizador de energía FLUKE 435 SII

En todos los casos de análisis se ha realizado la misma configuración para la realización de los ensayos experimentales, tanto para los sistemas de bombeo electrosumergible en la entrada del transformador elevador multifrecuencial el mismo que presenta el grupo de conexión Dd0/Yd11. En el sistema de bombeo horizontal la medición se realiza en la salida del VSD y la conexión del motor se mantiene en Delta de acuerdo con los datos técnicos de placa. En la **figura 49** se observa la configuración del analizador de energía FLUKE 435 SII para todos los ensayos realizados.

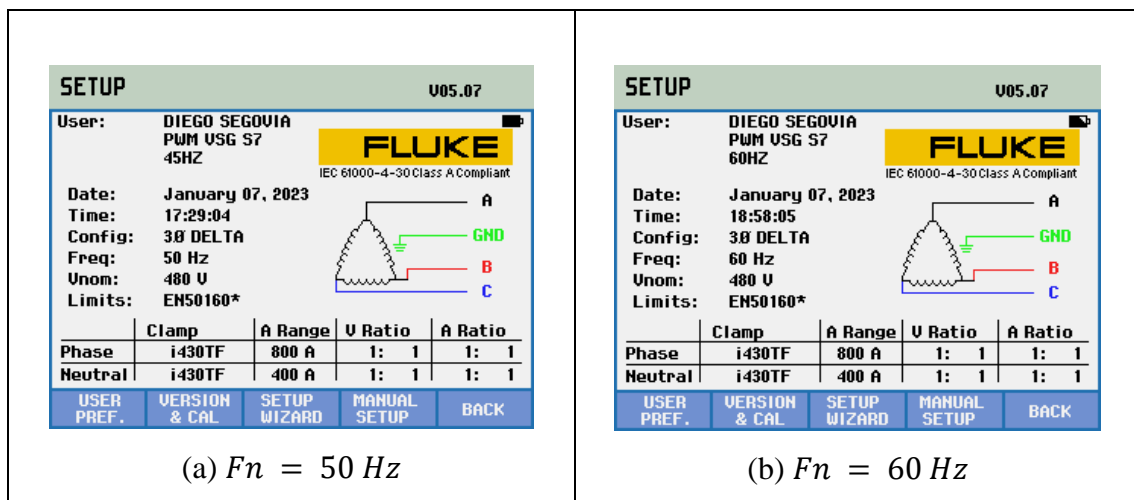


Figura 49. Programación del analizador de energía Fluke 435 SII

3.4 Modelación de los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal

Los circuitos se han caracterizado en el software de simulación de MatLab Simulink para la adquisición de las señales y procesamiento de las variables, se modelaron utilizando los bloques internos de la librería Sim Power Systems y se realizaron ciertas modificaciones con la finalidad de que los resultados de la simulación se aproximen respecto al estándar IEEE-399 de 1997. Las señales eléctricas de voltaje e intensidad de salida de los variadores han sido muestreadas mediante el equipo FLUKE 435 SII y digitalizadas en un computador personal mediante el software POWER LOG 430 II.

En la **figura 50 y 51** se presenta el modelo computacional realizado para los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal con inversor de salida F-PWM con una frecuencia de conmutación $F_c = 2\text{ KHz}$, mediante los datos obtenidos en las mediciones experimentales realizadas con el analizador de energía FLUKE 435 SII:

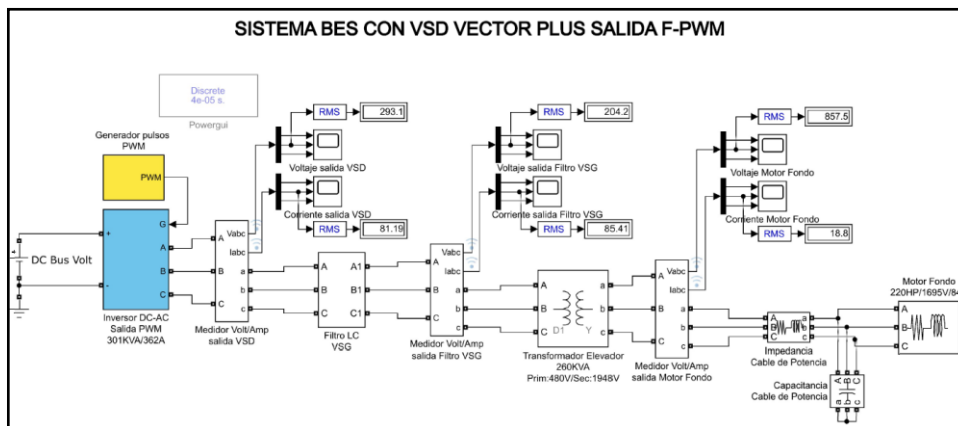


Figura 50. Modelo computacional VSD salida F-PWM BES SCH-007

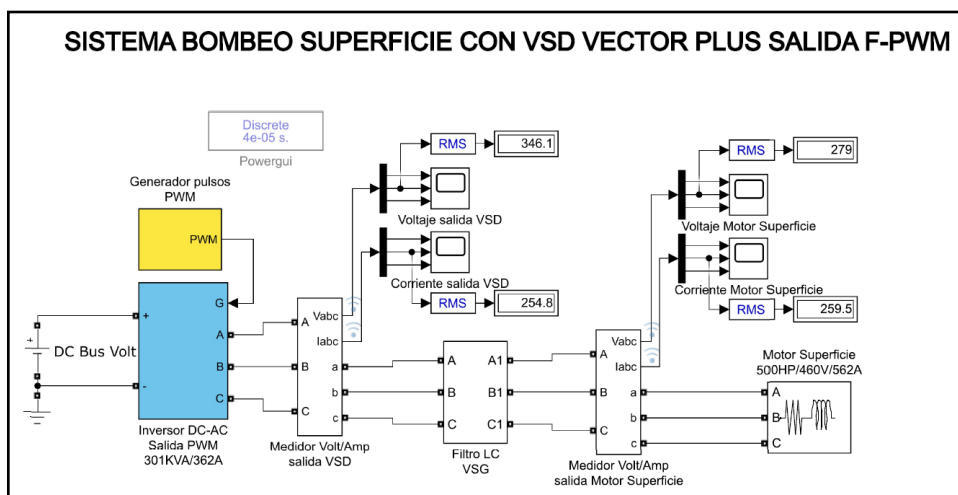


Figura 51. Modelo computacional VSD salida F-PWM HPS SCHN-002

Como se observa en la **figura 52**, se desarrolló en el software de simulación de MatLab Simulink utilizando los datos del fabricante el filtro pasivo del tipo pasa bajas para el filtrado de la señal PWM, con el objetivo de mitigar la generación de armónicos del variador de velocidad para el modelo Vector Plus.

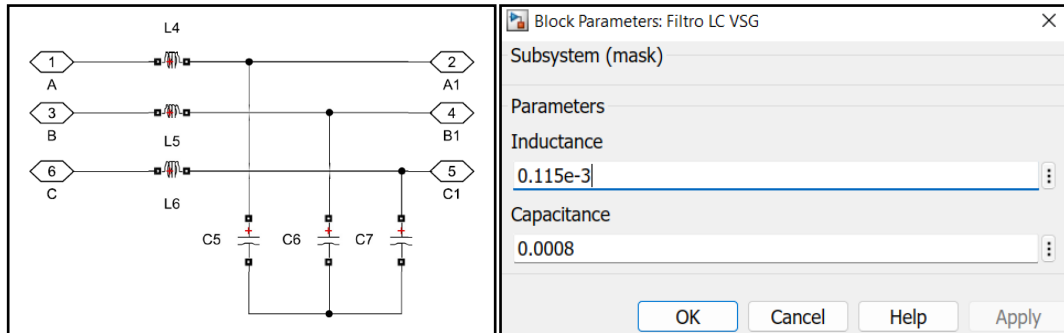


Figura 52. Modelo computacional Filtro LC VSG

Fuente: El autor

En la **figura 53** se presenta el modelo computacional realizado para los sistemas de bombeo electrosumergible con inversor de salida 6-STEP, la simulación se realiza mediante los datos obtenidos en las mediciones experimentales realizadas con el analizador de energía FLUKE 435 SII:

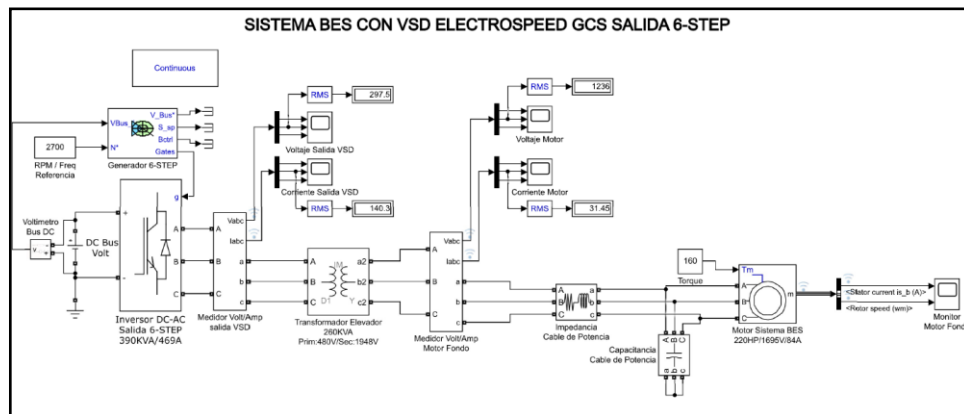


Figura 53. Modelo computacional VSD salida 6-STEP BES SCHAA-301

La estructura de los inversores F-PWM y 6-STEP se diseñó a partir del modelo de electrónica de potencia de Simulink de MATLAB, con la finalidad de realizar el control de velocidad se empleó un generador PWM y un generador 6-STEP, con frecuencias fundamentales de 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz y 60 Hz, en concordancia con los ensayos experimentales realizados.

Para la caracterización del motor de fondo y superficie para las aplicaciones de bombeo se ha utilizado los modelos de máquinas asíncronas y carga trifásica RLC con parámetros estimados con datos de placa de los equipos, valores típicos preexistentes en MatLab Simulink y con las mediciones experimentales realizadas, de la misma forma para el transformador elevador multifrecuencial se ha simulado con el bloque interno de transformador trifásico de 2 devanados.

Con la finalidad de obtener los resultados simulados se usaron los esquemas desarrollados en Simulink, que se muestran en las figuras arriba. Para ello se programó el tiempo de paso en "variable step". Para configurarlo, desde el menú de Simulink "SIMULATION" opción "CONFIGURATION PARAMETERS". Para el tratamiento de estos sistemas que contienen elementos no lineales como son los IGBTs, se utiliza el método matemático de Euler en la opción SOLVER con tiempos de simulación de hasta 10 segundos en estado estacionario.

3.5 Análisis y comparación de resultados de ensayos realizados vs simulación

Se ejecutó el análisis del estudio de medición de calidad de potencia entregado por los VSD con salida F-PWM y 6-STEP, mediante la utilización de un analizador de redes FLUKE 435 SII, donde se procedió a seleccionar, medir y almacenar las variables estudiadas, estas son parámetros de tensión, corriente, distorsión armónica total de voltaje y corriente con sus respectivas componentes armónicas individuales, se escogió uno de los ensayos delimitados por generación de armónicos y los oscilogramas de comportamiento de tensión y corriente, para poder caracterizar los sistemas y realizar el estudio correspondiente en MATLAB Simulink.

3.5.1 VSD Vector PLUS salida F-PWM en sistema BES unidad SCH-007.

En los siguientes apartados se muestran los resultados de las mediciones y simulación de calidad de potencia eléctrica suministrada a la carga por el VSD Vector Plus y se realiza el tratamiento en base a la normativa IEEE-519 1992 e IEC-61000-2-4; se analiza la parte baja y alta de los espectros usando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier FFT. La corriente y el voltaje de la **tabla 13** se miden en el punto de acoplamiento común entre el VSD y SUT.

Tabla 13. Corriente y voltaje medidos en el punto de acoplamiento VSD-SUT BES F-PWM unidad SCH-007

FRECUENCIA (Hz)	VOLTAJE		CORRIENTE	
	TOTAL	FUND.	TOTAL	FUND.
	V_{rms}	V_{rms}	A_{rms}	A_{rms}
45	327,75	327,43	158,97	158,64
50	363,62	363,97	200,65	199,20
55	399,53	399,92	233,22	232,70
60	434,31	434,28	245,08	244,30

3.5.1.1 Distorsión armónica de tensión VSD Vector PLUS (F-PWM) SCH-007

En las **figuras 54-57** y **tabla 14** contenidas en esta sección se pueden observar los oscilogramas que representan los espectros de salida de tensión con su respectivo contenido armónico en función de los distintos valores de frecuencias fundamentales de salida ($F_n = 45 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}, 55 \text{ Hz}, 60 \text{ Hz}$). Como se aprecia en la **tabla 14** los porcentajes medidos de distorsión armónica total de voltaje se encuentran dentro del límite permisible establecido en la normativa tomada como referencia; sin embargo, se puede evidenciar en los resultados de la simulación que el THD_v cumple el límite establecido por la IEEE 519-1992 solamente a $F_n = 45 \text{ Hz}$.

En cuanto se refiere a las componentes armónicas individuales en la parte baja del espectro se evidencia presencia del armónico de orden 3 en conjunto con el incremento de las componentes 5, 7, 11 y 13. Durante el proceso de realizar los incrementos previstos a la frecuencia fundamental de salida del VSD se aprecia un incremento de los armónicos 5 y 7 al superar la frecuencia fundamental de 50 Hz, a su vez se observa que el tercer armónico disminuye.

En la parte alta del espectro se aprecian incrementos en las componentes armónicas próximas al primer múltiplo de frecuencia portadora. A partir de 50 Hz se estabilizan estos valores alrededor del primer múltiplo de F_c . Finalmente se puede verificar que el VSD con topología de salida F-PWM garantiza el cumplimiento de la normativa vigente en la mayoría de aportes de armónicas individuales y distorsión armónica total.

Tabla 14. Resultado de armónicos individuales de tensión medido vs simulado, unidad SCH-007 (F-PWM)

APORTES DE COMPONENTES ARMÓNICAS DE VOLTAJE POR TOPOLOGÍA IEC 61000-2-4 / IEEE 519-1992										
Orden de armónico	APORTES PERMITIDOS VOLTAJE		45 Hz		50 Hz		55 Hz		60 Hz	
	IEC (%)	IEEE (%)	% Cont. armónico		% Cont. armónico		% Cont. armónico		% Cont. armónico	
			Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado
H01 / THD	100 / 10	100 / 5	1,81	4,2	4,042	5,84	4,72	6,24	5,00	6,33
H02	2	3	0,17	0,22	0,124	0,74	0,16	0,07	0,07	0,42
H03	5	3	0,38	0,04	0,429	0,62	0,64	0,04	0,67	0,36
H04	1	3	0,20	0,06	0,085	0,36	0,18	0,11	0,17	0,58
H05	6	3	0,44	0,17	0,602	0,81	0,86	0,07	0,64	0,77
H06	0,5	3	0,04	0,16	0,071	0,22	0,04	0,03	0,07	0,59
H07	5	3	0,63	0,07	0,951	0,22	1,20	0,07	1,34	1,63
H08	0,5	3	0,13	0,14	0,063	0,38	0,19	0,14	0,09	0,41
H09	1,5	3	0,27	0,08	0,376	0,31	0,45	0,08	0,61	0,85
H10	0,2	3	0,07	0,07	0,139	0,63	0,23	0,14	0,20	1,26
H11	3,5	3	0,81	0,03	1,050	2,17	1,54	0,16	2,57	1,65
H13	3	3	0,46	0,1	1,454	0,68	3,76	0,28	3,75	1,82
H15	0,3	3	0,91	0,05	1,182	0,1	1,27	0,06	0,88	0,42
H17	2	3	0,29	0,08	0,275	0,41	0,46	0,08	0,39	0,22
H19	1,5	3	0,60	0,07	0,340	0,14	0,25	0,05	0,14	0,32
H21	0,2	3	0,15	0,1	0,159	0,11	0,14	0,06	0,12	0,33
H23	1,5	3	0,08	0,1	0,088	0,09	0,10	0,05	0,08	0,49
H25	1,5	3	0,04	0,09	0,061	0,16	0,09	0,06	0,04	0,15
H27	0,2	3	0,04	0,1	0,042	0,09	0,06	0,07	0,06	0,37
H29	1,32	3	0,01	0,12	0,010	0,11	0,04	0,10	0,01	0,58
H31	1,25	3	0,01	0,14	0,020	0,09	0,05	0,14	0,02	3,14
H33	0,2	3	0,03	0,16	0,011	0,04	0,21	0,78	0,02	0,56

H35	1,13	3	0,03	0,2	0,016	0,06	0,23	2,25	0,01	2,51
-----	------	---	------	-----	-------	------	------	------	------	------

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de tensión y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 45\text{ Hz}$:

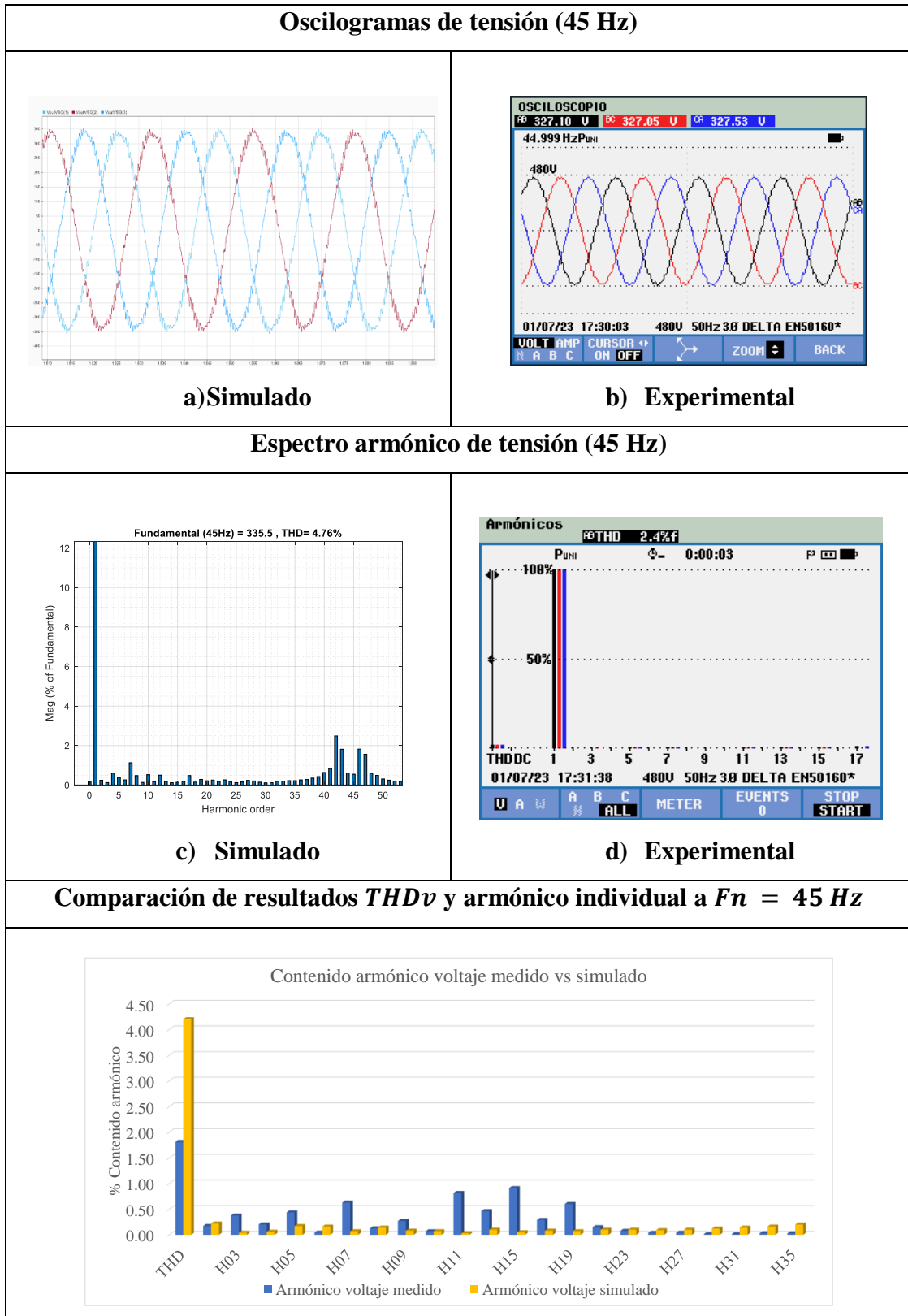


Figura 54. Oscilograma tensión y espectro armónico BES F-PWM a 45 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de tensión y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 50\text{ Hz}$:

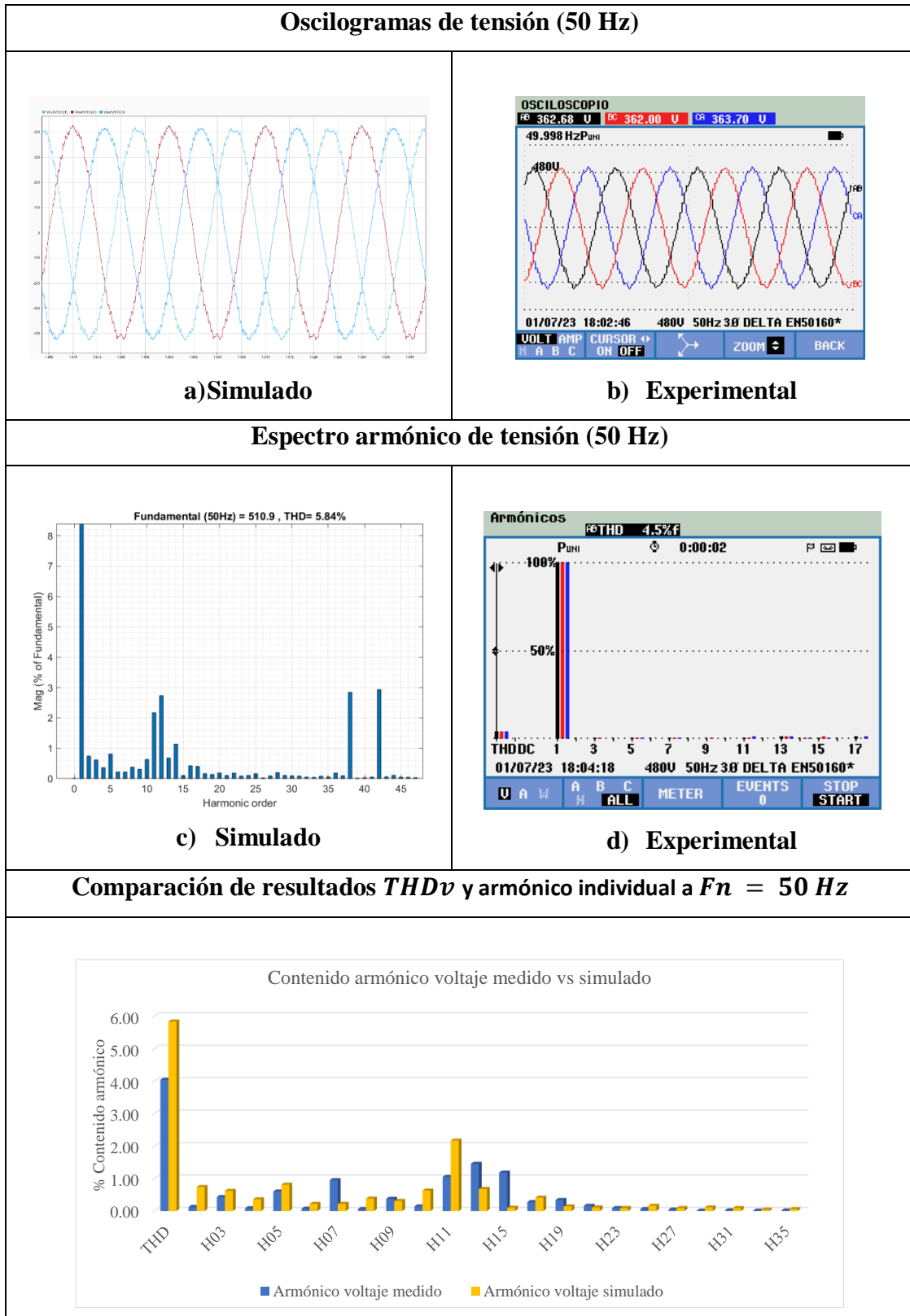


Figura 55. Oscilograma tensión y espectro armónico BES F-PWM a 50 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de tensión y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 55\text{ Hz}$:

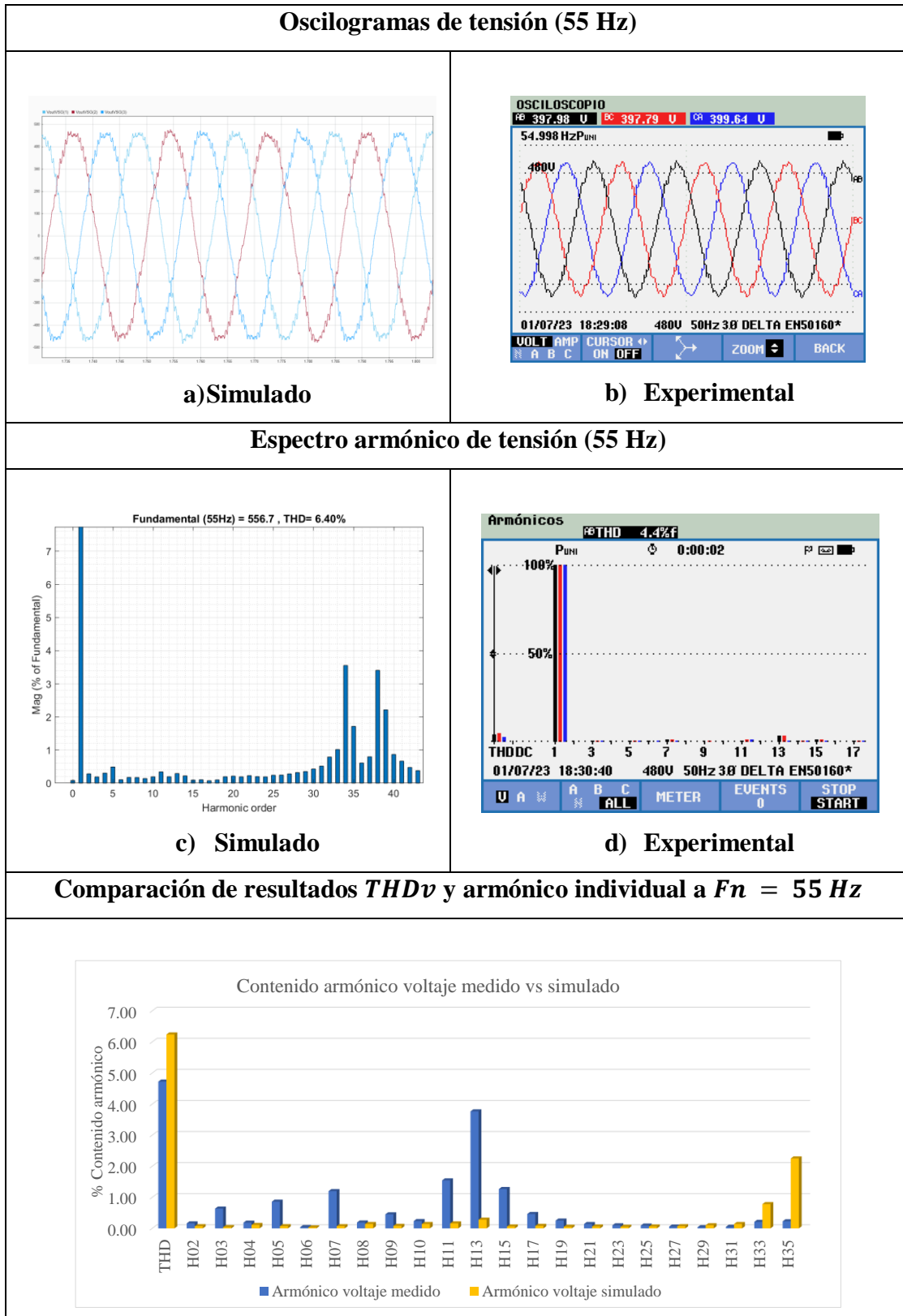


Figura 56. Oscilograma tensión y espectro armónico BES F-PWM a 55 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de tensión y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 60\text{ Hz}$:

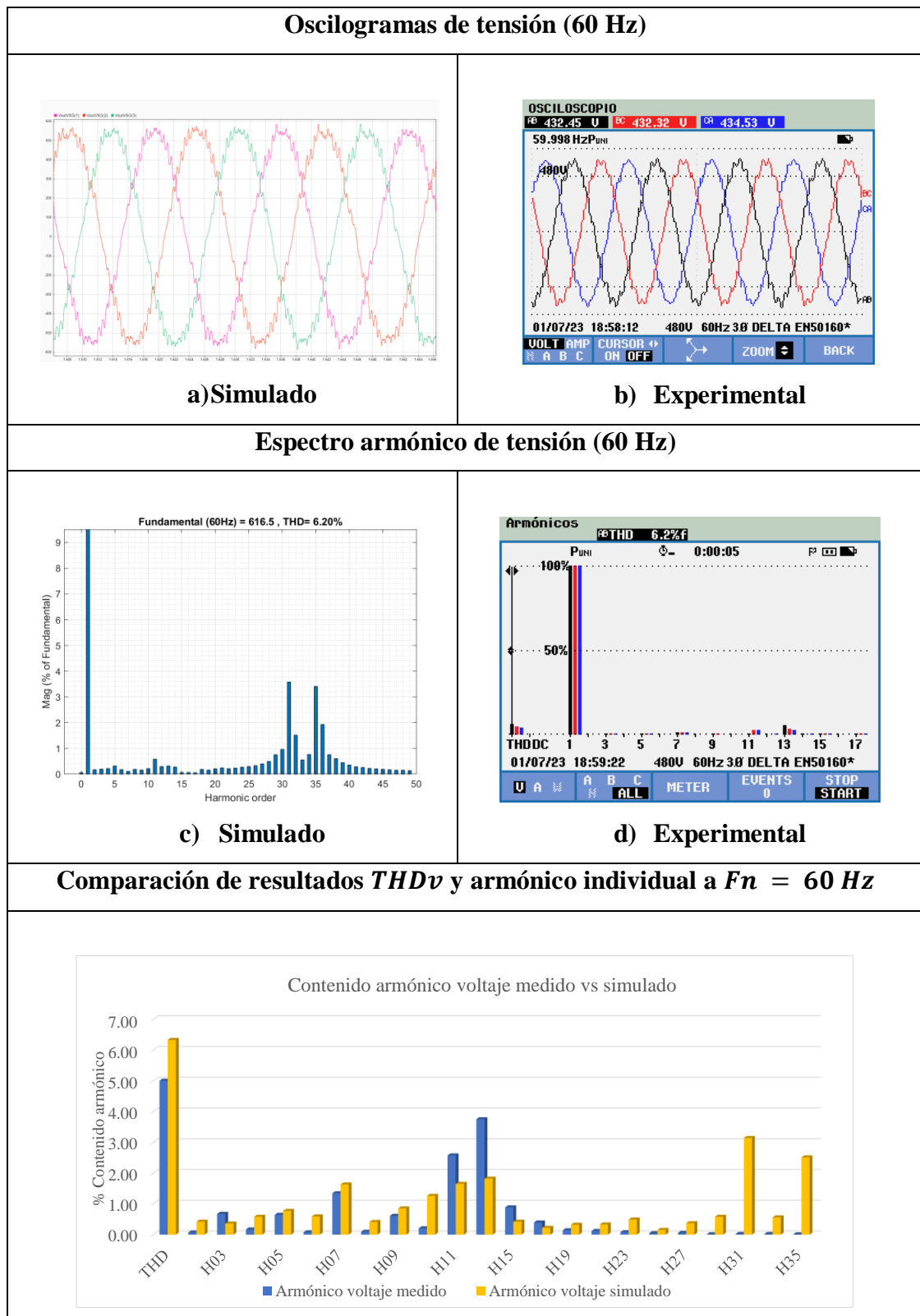


Figura 57. Oscilograma tensión y espectro armónico BES F-PWM a 60 Hz

3.5.1.2 Distorsión armónica de corriente VSD Vector PLUS (F-PWM) SCH-007

En las **figuras 58-61 y tabla 15** de esta sección se pueden observar los oscilogramas que representan los espectros de salida de intensidad aplicados en función de valores diferentes de frecuencias fundamentales de salida ($F_n = 45 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}, 55 \text{ Hz y } 60 \text{ Hz}$).

En referencia al contenido armónico individual se evidencia que al proceder a modificar la frecuencia de la corriente de salida fundamental en frecuencias de 55 Hz y 60 Hz se produce un gran aumento de los armónicos 5 y 7, así como de otros impares como los 11 y 13, manteniéndose el tercer armónico en niveles bajos a los que ya venía presentando para frecuencias fundamentales inferiores. Esto nos da un indicio de posible manejo de sobre modulación frente a otras posibles técnicas PWM, con el resultante incremento de estas componentes armónicas impares de baja frecuencia.

En la zona de frecuencias altas se puede prestar atención cómo al incrementar la frecuencia fundamental presentan tendencia a incrementar las amplitudes de las bandas laterales alrededor de múltiplo de la portadora ($1fc \pm 2.Fn$), y a reducirse en otros ($2fc \pm 1.Fn$). Al superar los 50 Hz no se evidencian cambios sustanciales en las amplitudes de las principales bandas laterales alrededor del primer múltiplo de la frecuencia de conmutación. El aumento a lo ancho se debe al lógico incremento de la distancia de estas bandas al múltiplo de la portadora configurada, ya que se cambia la frecuencia fundamental en cada uno de los esquemas (es por esto que, si se incrementa F_n , lógicamente también tiende a crecer la distancia de $m.fc$ a $n.Fn$).

De acuerdo a lo previsto por las normativas IEC-61000-2-4 y IEEE 519-1992 se puede evidenciar que el VSD con inversor de salida tipo F-PWM cumple la normativa vigente de tasa de distorsión armónica total y en cuanto a los aportes de armónicas individuales cumple en su mayoría con excepción de la quinta armónica.

Tabla 15. Resultado de armónicos individuales de intensidad medido vs simulado, unidad SCH-007 (F-PWM)

APORTES DE ARMÓNICAS INDEPENDIENTE DE CORRIENTE POR TOPOLOGÍA IEC 61000-2-4 / IEEE 519-1992										
Orden de armónico	APORTES PERMITIDOS CORRIENTE		45 Hz		50 Hz		55 Hz		60 Hz	
	IEC (%)	IEEE (%)	% Cont. armónico		% Cont. armónico		% Cont. armónico		% Cont. armónico	
			Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado
H1 / THD	100 / 15	100 / 15	5,93	4,59	5,87	3,92	6,36	4,15	6,90	3,69
H02	1,08	4	1,80	0,17	0,43	0,54	1,16	0,13	0,70	0,09
H03	2,3	4	3,15	0,06	2,26	0,28	2,51	0,02	2,19	0,03
H04	0,43	4	1,40	0,04	0,39	0,15	0,90	0,05	0,35	0,02
H05	1,14	4	3,55	0,06	4,65	0,27	4,61	0,14	5,15	0,08
H06	0,3	4	1,03	0,03	0,23	0,02	0,65	0,02	0,27	0,03
H07	0,77	4	1,93	0,05	2,14	0,06	2,36	0,04	2,04	0,04
H08	0,23	4	0,48	0,04	0,15	0,07	0,31	0,04	0,19	0,03
H09	0,4	4	0,78	0,05	0,46	0,05	0,49	0,03	0,38	0,03
H10	0,184	4	0,12	0,05	0,06	0,04	0,10	0,01	0,08	0,03
H11	0,33	4	0,40	0,05	0,71	0,29	0,72	0,04	0,75	0,07
H13	0,21	2	0,50	0,05	0,49	0,07	0,82	0,02	2,80	0,01
H15	0,15	2	0,29	0,06	0,55	0,01	1,25	0,02	1,00	0,02
H17	0,13	2	0,22	0,06	0,44	0,02	0,68	0,02	0,52	0,02
H19	0,12	1,5	0,97	0,07	0,71	0	0,75	0,02	0,77	0,03
H21	0,11	1,5	0,31	0,08	0,34	0	0,39	0,03	0,41	0,03
H23	0,1	1,5	0,12	0,08	0,16	0	0,17	0,03	0,12	0,04
H25	0,1	0,6	0,20	0,08	0,31	0	0,36	0,04	0,33	0,04
H27	0,09	0,6	0,15	0,08	0,18	0	0,23	0,05	0,23	0,06
H29	0,08	0,6	0,02	0,13	0,03	0,01	0,05	0,06	0,02	0,11
H31	0,07	0,6	0,09	0,13	0,11	0,01	0,17	0,08	0,15	1,04
H33	0,07	0,6	0,10	0,16	0,07	0,01	0,12	0,22	0,11	0,63
H35	0,06	0,6	0,02	0,20	0,02	0,02	1,04	1,11	0,03	2,86

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 45\text{ Hz}$:

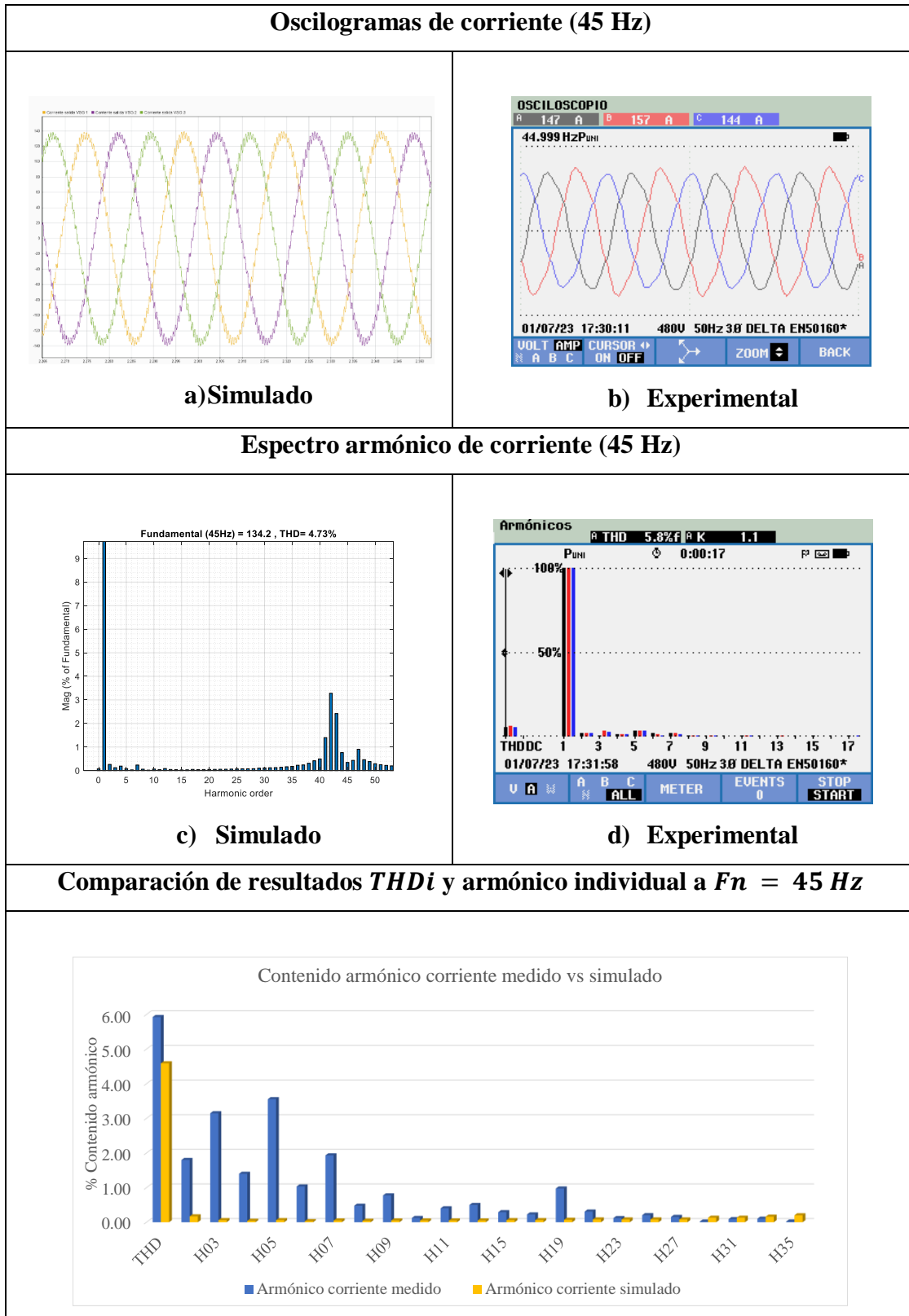


Figura 58. Oscilograma corriente y espectro armónico BES F-PWM a 45 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 50\text{ Hz}$:

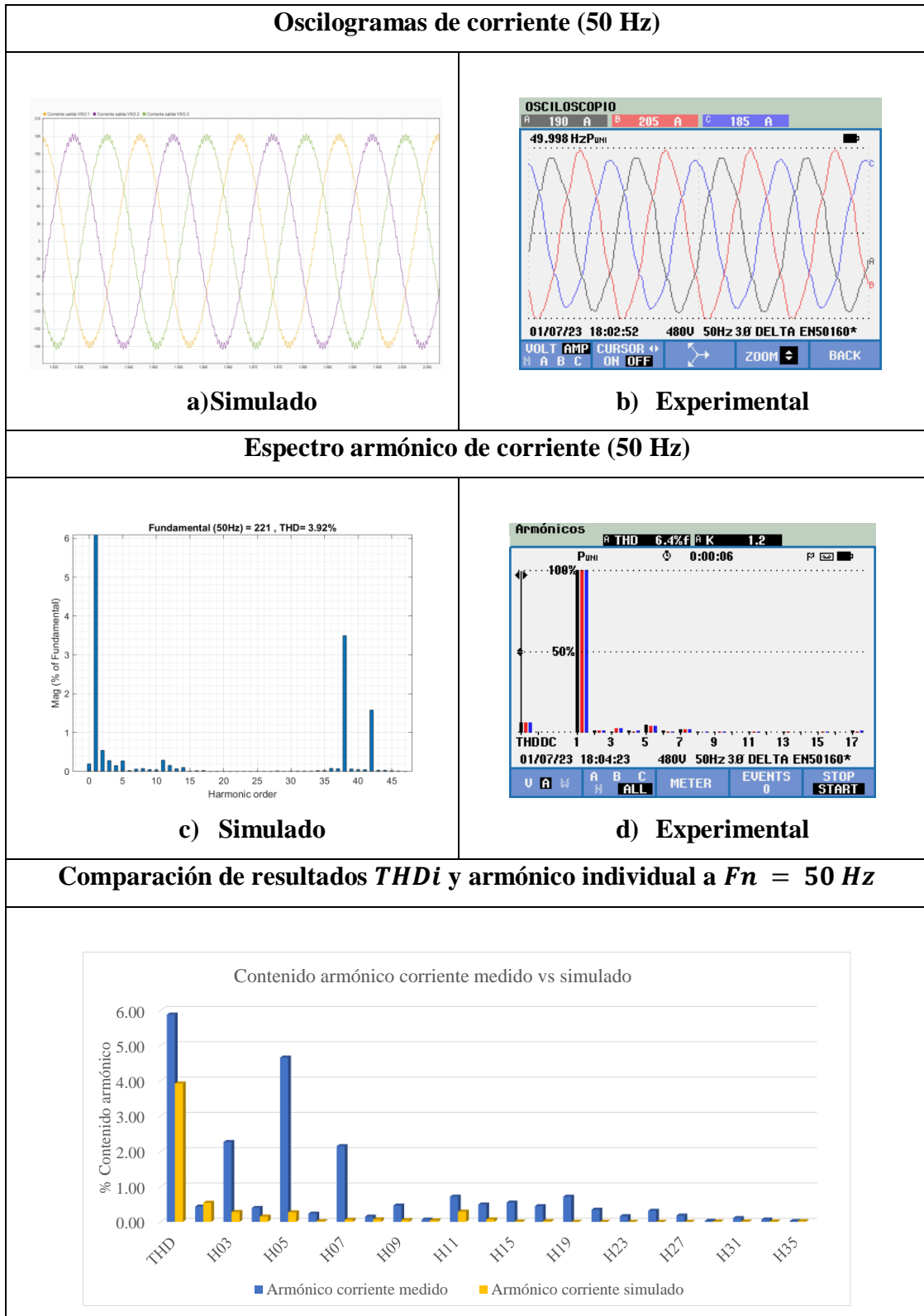


Figura 60. Oscilograma corriente y espectro armónico BES F-PWM a 50 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 55 \text{ Hz}$:

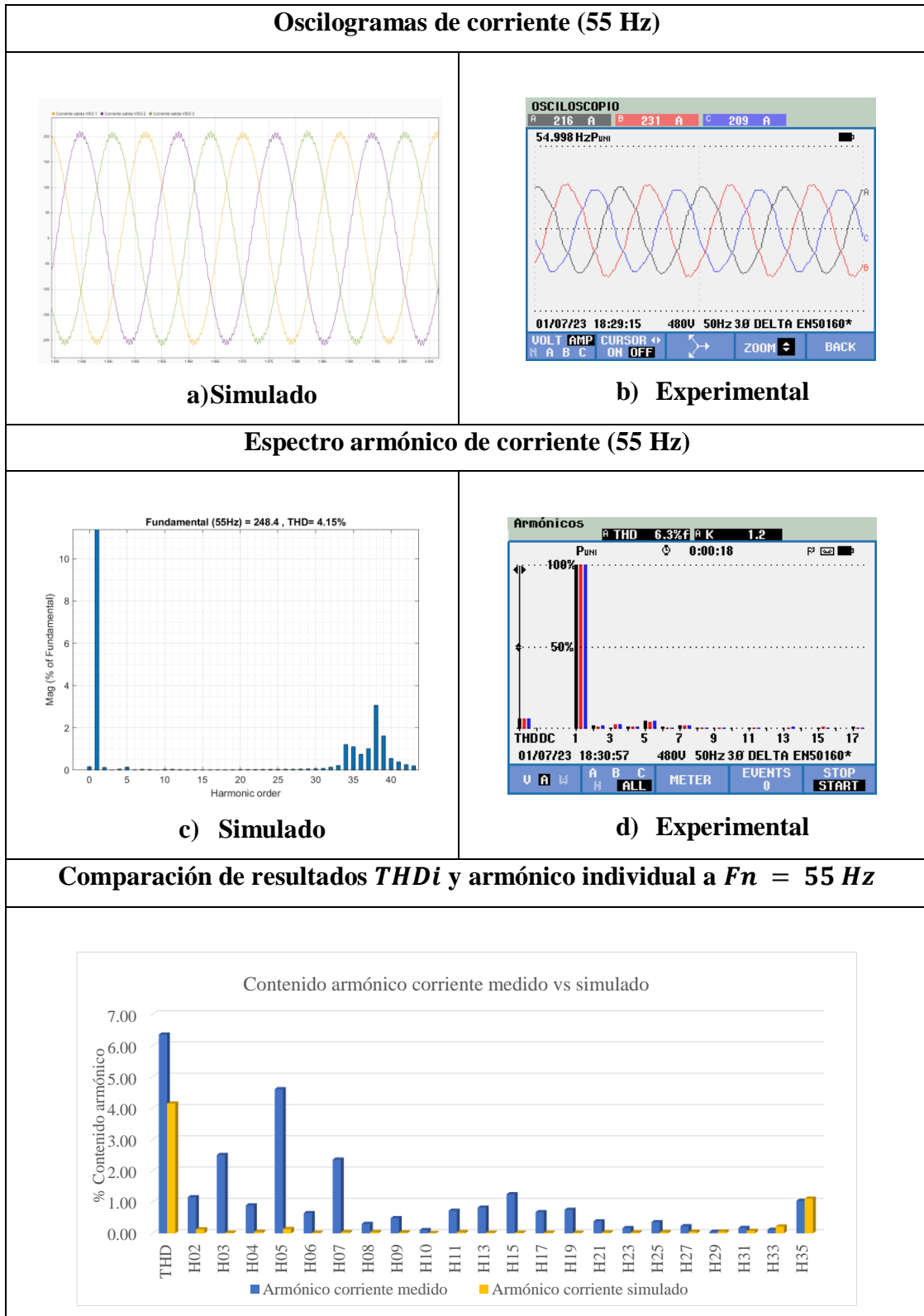


Figura 61. Oscilograma corriente y espectro armónico BES F-PWM a 55 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 60\text{Hz}$:

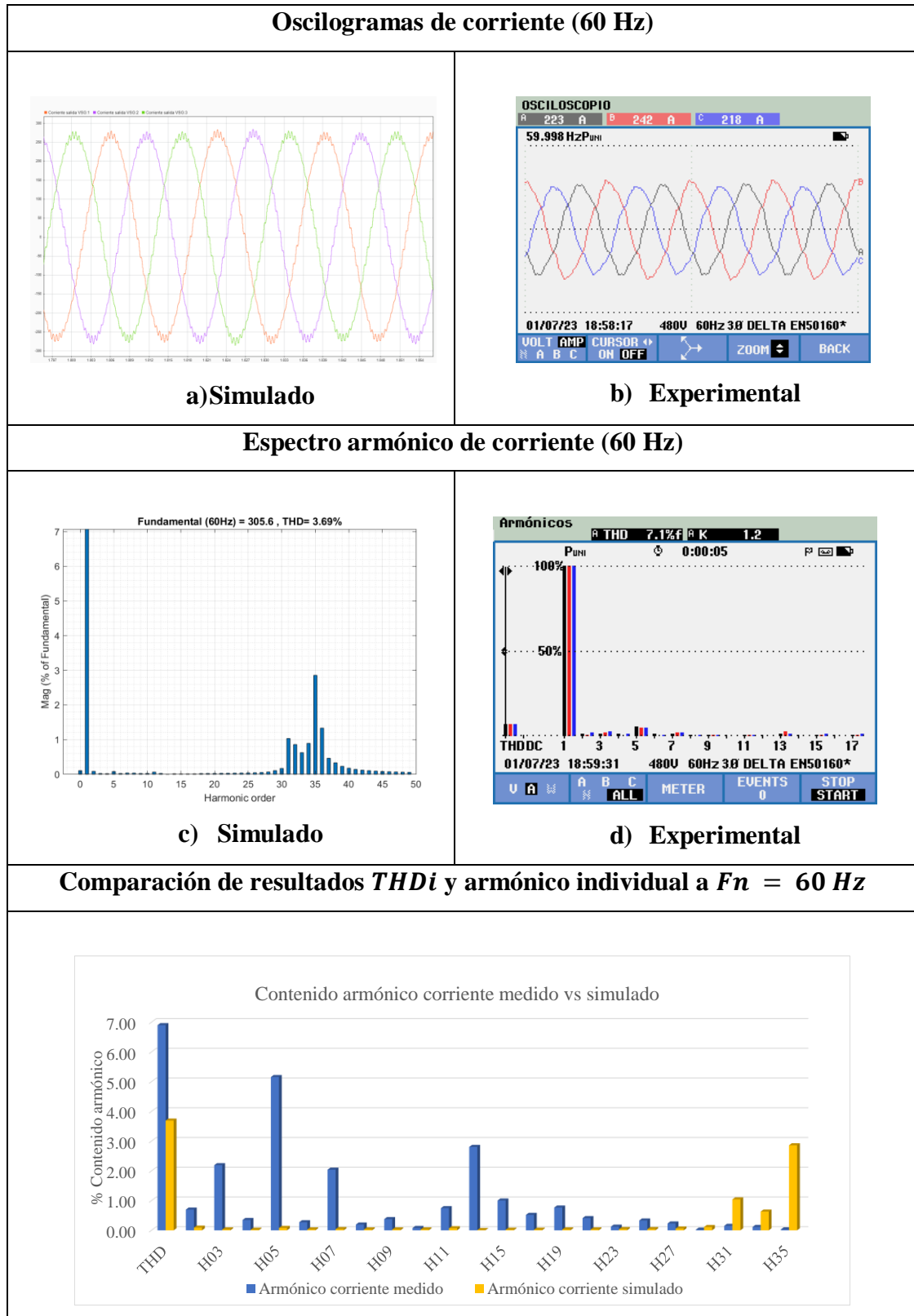


Figura 62. Oscilograma corriente y espectro armónico BES F-PWM a 60 Hz

3.5.2 Ensayos realizados con VSD Electrospeed GCS 6-STEP en sistema de bombeo electrosumergible.

En los siguientes apartados se muestran los resultados de las mediciones y simulación de calidad de potencia eléctrica suministrada a la carga por el VSD Electrospeed III GCS y se realiza el tratamiento en base a la normativa IEEE-519 1992 e IEC-61000-2-4; se analiza la parte baja y alta de los espectros usando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier FFT. La corriente y el voltaje de la **tabla 16** se miden en el punto de acoplamiento común entre el VSD y SUT.

Tabla 16. Voltaje y corriente medido en el punto de acoplamiento VSD BES 6-STEP unidad SCHAA-301

FRECUENCIA (Hz)	VOLTAJE		CORRIENTE	
	TOTAL	FUND.	TOTAL	FUND.
	<i>V_{rms}</i>	<i>V_{rms}</i>	<i>A_{rms}</i>	<i>A_{rms}</i>
45	356,33	341,65	160,99	150,57
50	395,91	378,66	188,65	177,43
55	434,45	416,98	228,34	218,26
60	473,64	453,74	252,12	232,37

3.5.2.1 Distorsión armónica de tensión VSD Electrospeed GCS (6-STEP) SCHAA-301

En las **figuras 62-65** y **tabla 17** en términos de la normativa IEEE 519-1992, los valores máximos permitidos para los armónicos en un sistema son del 5 % para la tasa de distorsión armónica total y 3 % para los armónicos individuales. En este caso, se puede observar que el *THD_v* supera con el límite recomendado con un promedio de 29 % y algunos de los valores de contenido armónico de baja frecuencia con valores elevados en los armónicos de orden 5, 7, 11, 13 se encuentran sobre estos límites y en la parte de altas frecuencias carece de contenido armónico de cierta amplitud. En cuanto a la normativa IEC 61000-2-4, ésta establece que los valores máximos permitidos para los armónicos en un sistema son del 10 % para la tasa de distorsión armónica total. En este caso, se puede observar que algunos de los valores de los armónicos individuales superan estos límites también. Para el caso del quinto armónico, que presenta un valor de 20.04 %, se puede observar que supera ampliamente el límite permitido. Este armónico corresponde a la frecuencia fundamental multiplicada por 5, lo que indica que este comportamiento puede estar relacionado con el diseño del equipo con onda de salida 6-STEP.

Tabla 17. Resultado de armónicos individuales de tensión medido vs simulado, unidad SCHAA-301 (6-STEP)

APORTES DE ARMÓNICAS INDEPENDIENTE DE VOLTAJE POR TOPOLOGÍA IEC 61000-2-4 / IEEE 519-1992										
Orden de armónico	APORTES PERMITIDOS VOLTAJE		45 Hz		50 Hz		55 Hz		60 Hz	
	IEC (%)	IEEE (%)	% Cont. armónico		% Cont. armónico		% Cont. armónico		% Cont. armónico	
			Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado
H01 / THD	100 / 10	100 / 5	29,53	31,11	29,62	31,11	29,62	31,12	29,59	31,10
H02	2	3	0,46	0,03	0,42	0,01	0,42	0,02	0,49	0,02
H03	5	3	0,41	0,02	0,46	0,02	0,46	0,04	0,51	0,01
H04	1	3	0,45	0,03	0,42	0,01	0,41	0,02	0,45	0,02
H05	6	3	20,04	20,02	20,06	20,02	20,02	20,03	19,98	20,02
H06	0,5	3	0,13	0	0,09	0,02	0,13	0,00	0,16	0,00
H07	5	3	14,22	14,28	14,27	14,29	14,30	14,28	14,32	14,29
H08	0,5	3	0,44	0,03	0,42	0,01	0,42	0,02	0,46	0,02
H09	1,5	3	0,42	0,02	0,41	0,02	0,40	0,04	0,42	0,01
H10	0,2	3	0,45	0,03	0,43	0,01	0,43	0,02	0,47	0,02
H11	3,5	3	8,81	9,11	8,84	9,11	8,88	9,12	8,87	9,10
H13	3	3	7,73	7,69	7,75	7,69	7,77	7,68	7,78	7,69
H15	0,3	3	0,39	0,02	0,40	0,02	0,40	0,04	0,42	0,01
H17	2	3	5,59	5,59	5,63	5,9	5,61	5,91	5,59	5,89
H19	1,5	3	5,33	5,26	5,37	5,26	5,36	5,25	5,35	5,26
H21	0,2	3	0,39	0,02	0,39	0,02	0,39	0,04	0,41	0,01
H23	1,5	3	4,05	4,36	4,07	4,36	4,08	4,37	4,05	4,36
H25	1,5	3	4,07	3,99	4,10	3,99	4,11	3,98	4,09	4,00
H27	0,2	3	0,39	0,02	0,40	0,02	0,39	0,04	0,40	0,01
H29	1,32	3	3,13	3,46	3,17	3,46	3,16	3,47	3,13	3,46
H31	1,25	3	3,28	3,22	3,33	3,22	3,33	3,21	3,30	3,22
H33	0,2	3	0,38	0,02	0,39	0,02	0,39	0,04	0,40	0,01

H35	1,13	3	2,53	2,87	2,57	2,87	2,57	2,88	2,53	2,87
-----	------	---	------	------	------	------	------	------	------	------

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 45\text{ Hz}$:

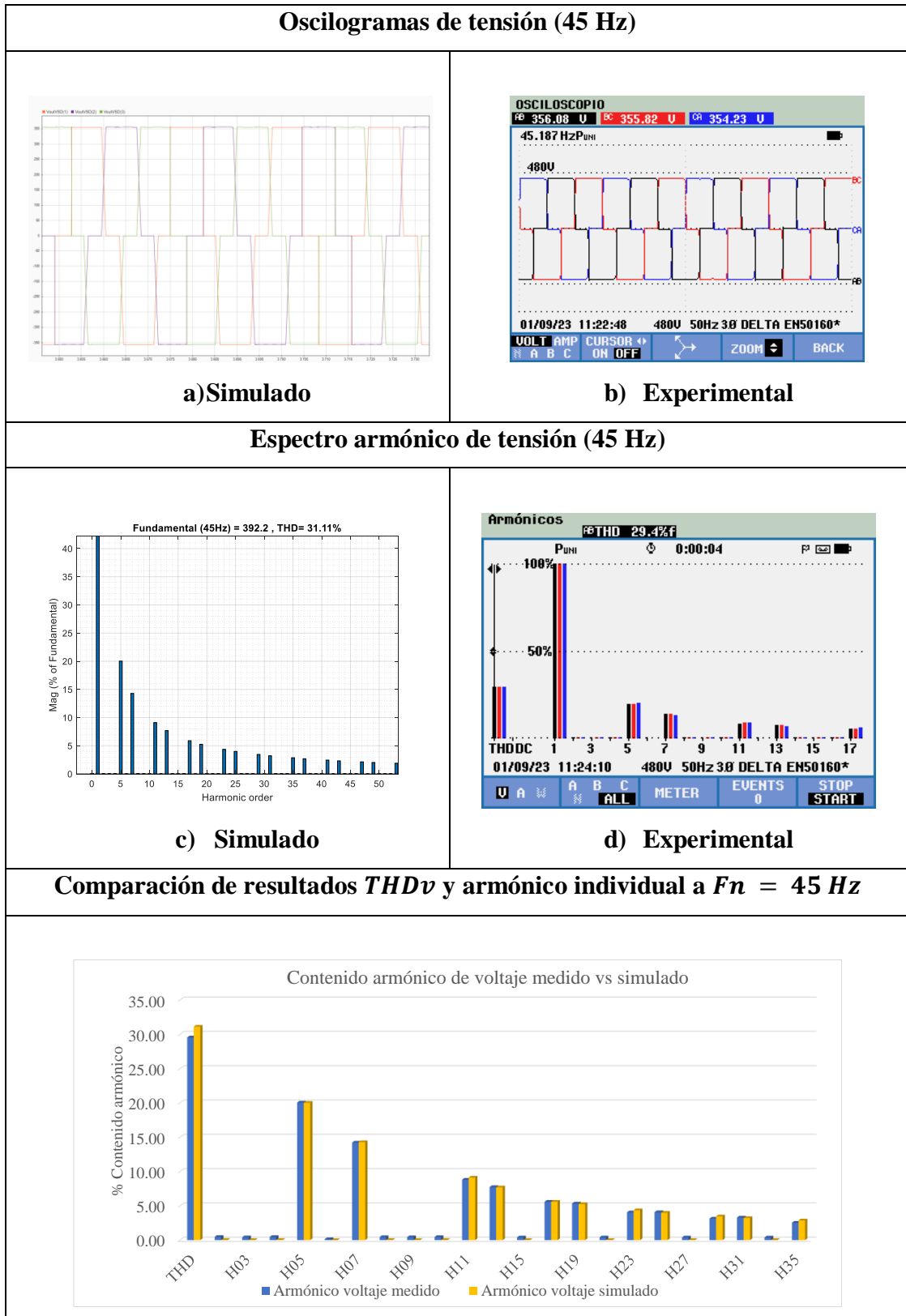


Figura 63. Oscilograma tensión y espectro armónico BES 6-STEP a 45 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 50\text{ Hz}$:

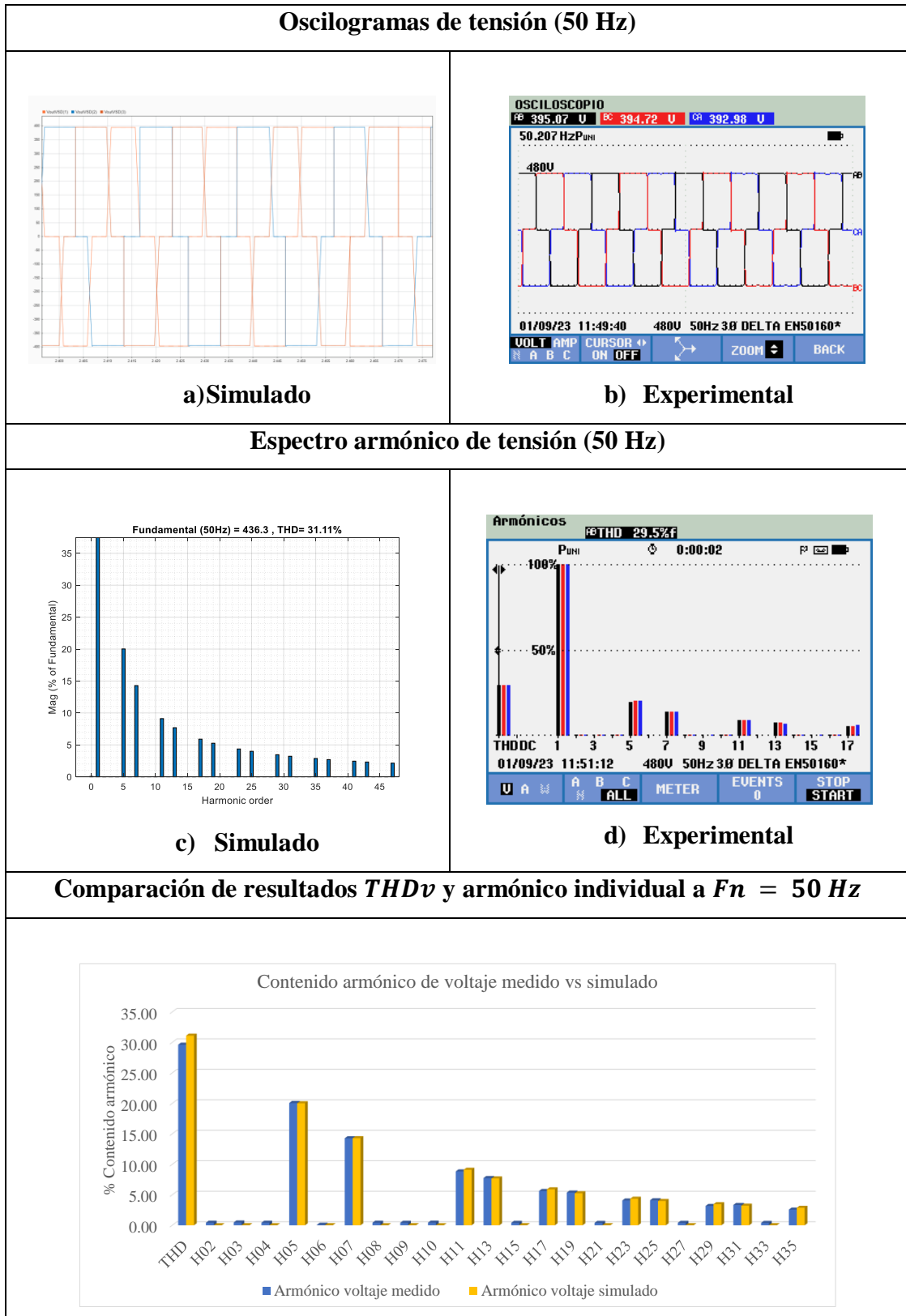


Figura 64. Oscilograma tensión y espectro armónico BES 6-STEP a 50 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 55 \text{ Hz}$:

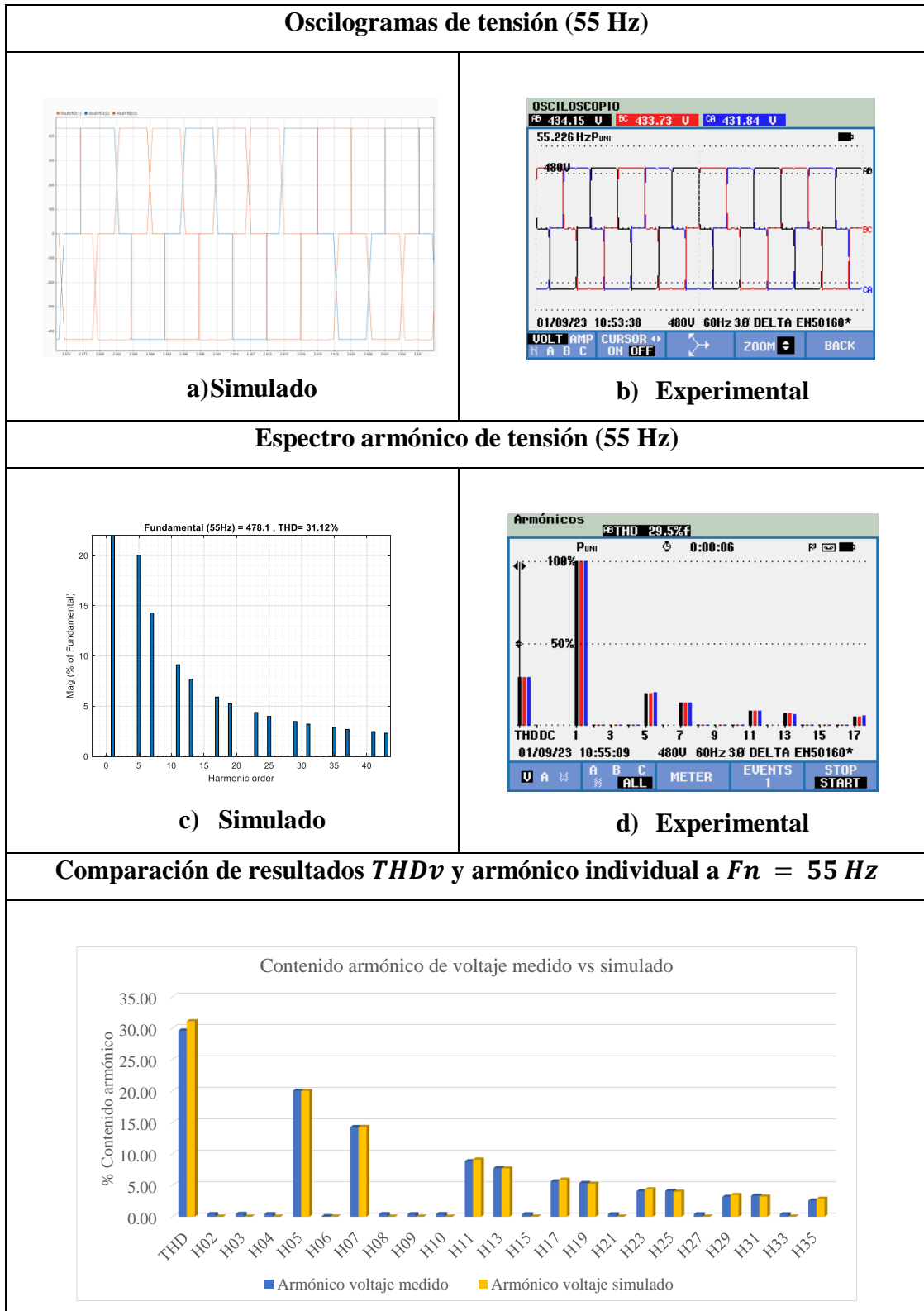


Figura 65. Oscilograma tensión y espectro armónico BES 6-STEP a 55 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 60\text{ Hz}$:

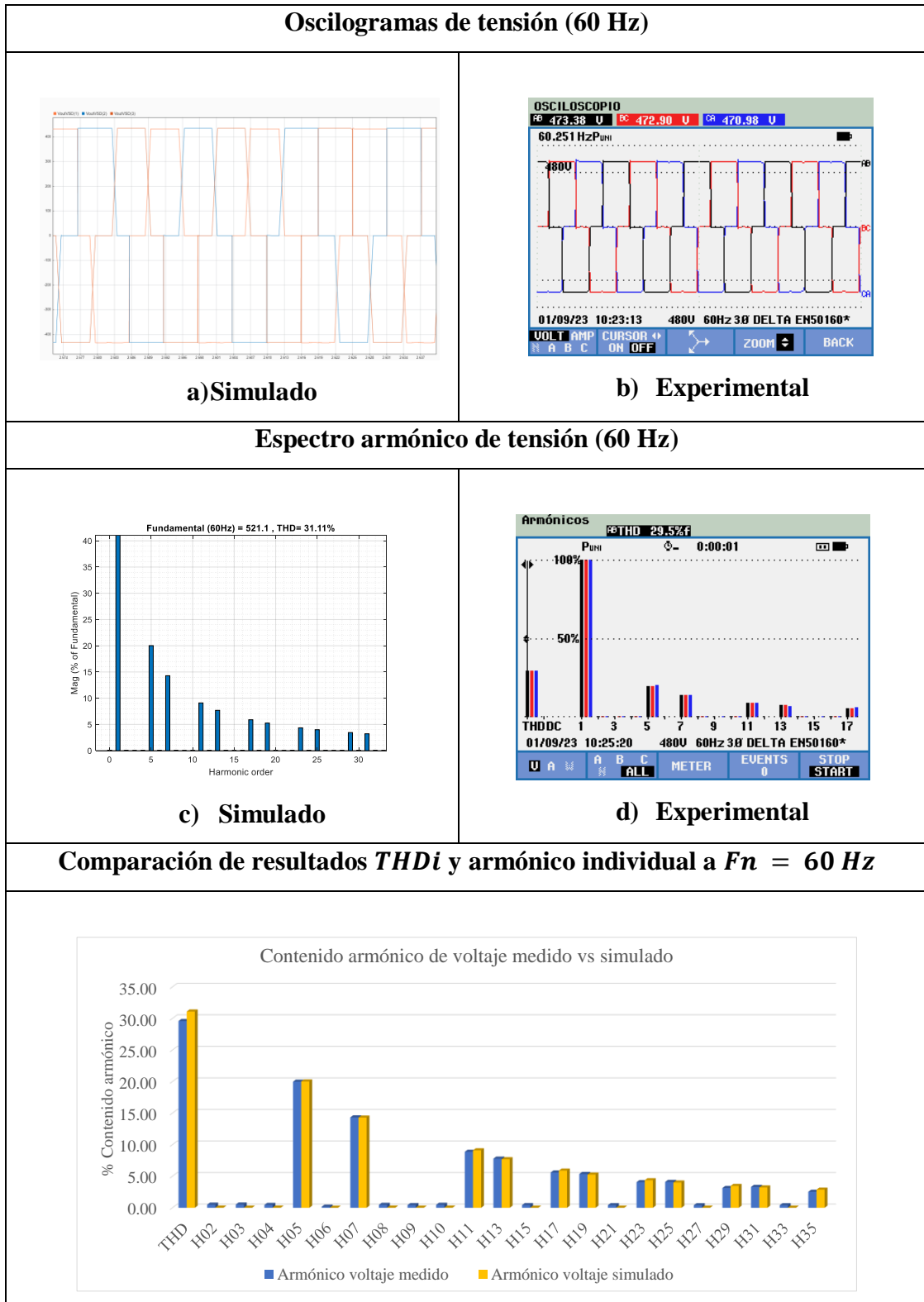


Figura 66. Oscilograma tensión y espectro armónico BES 6-STEP a 60 Hz

3.5.2.2 Distorsión armónica de corriente VSD Electrospeed GCS (6-STEP) SCHAA-301

En las **figuras 67-70** y **tabla 18** los resultados experimentales y simulados obtenidos muestran que para la técnica de inversión 6-STEP, en los espectros de corriente se evidencia que la tasa de distorsión armónica de corriente $THDi$ se mantiene sobre el límite permisible por la normativa IEEE 519-1992 y IEC 61000-2-4. El análisis muestra que a frecuencia portadora baja de 45 Hz el contenido armónico es mayor con un $THDi$ de 32,85 % y se observa tendencia a disminuir conforme se realiza el incremento de la frecuencia portadora hasta 60 Hz con un $THDi$ 25,41 %.

La presencia de armónicos individuales de corriente de orden impar en la señal de salida del VSD indica la frecuencia y la amplitud de cada uno de los componentes presentes, siendo los más significativos los armónicos individuales de orden 5, 7, 11 y 13 entre otros, lo que indica que se están generando armónicos de orden impar debido a la naturaleza discontinua de la onda de salida 6-STEP.

Tabla 18. Resultado de armónicos individuales de intensidad medido vs simulado, unidad SCHAA-301 (6-STEP)

APORTES DE ARMÓNICAS INDEPENDIENTE DE CORRIENTE POR TOPOLOGÍA IEC 61000-2-4 / IEEE 519-1992										
Orden de armónico	APORTES PERMITIDOS CORRIENTE		45 Hz		50 Hz		55 Hz		60 Hz	
	IEC (%)	IEEE (%)	% Cont. armónico		% Cont. armónico		% Cont. armónico		% Cont. armónico	
			Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado
H1 / THD	100 / 15	100 / 15	32,85	37,59	30,56	34,16	27,35	28,24	25,41	26,98
H02	1,08	4	2,08	0,94	2,45	0,19	2,53	0,24	1,98	0,18
H03	2,3	4	2,07	0,44	3,02	0,03	3,20	0,01	2,66	0,02
H04	0,43	4	0,78	0,26	1,03	0,04	1,09	0,01	0,81	0,02
H05	1,14	4	27,84	31,59	26,72	28,66	24,65	23,46	23,40	22,04
H06	0,3	4	0,17	0,18	0,16	0,03	0,19	0,02	0,19	0,01
H07	0,77	4	12,88	16,33	10,59	14,72	8,14	12,03	6,88	11,26
H08	0,23	4	0,65	0,14	0,78	0,01	0,79	0,01	0,60	0,01
H09	0,4	4	0,36	0,10	0,36	0,01	0,29	0,00	0,25	0,01
H10	0,184	4	0,55	0,09	0,59	0,01	0,51	0,00	0,40	0,01
H11	0,33	4	7,46	6,74	5,73	5,96	4,39	4,83	3,84	4,49
H13	0,21	2	6,36	4,69	5,83	4,22	4,47	3,41	3,55	3,16
H15	0,15	2	0,14	0,06	0,29	0	0,25	0,00	0,12	0,00
H17	0,13	2	3,77	2,76	2,99	2,4	1,91	1,92	1,32	1,76
H19	0,12	1,5	2,64	2,18	2,69	1,88	2,57	1,50	2,26	1,37
H21	0,11	1,5	0,09	0,06	0,16	0	0,18	0,00	0,14	0,00
H23	0,1	1,5	1,61	1,38	1,79	1,22	1,61	0,96	1,33	0,00
H25	0,1	0,6	1,88	1,19	1,17	1	1,14	0,78	1,10	0,69
H27	0,09	0,6	0,14	0,04	0,09	0,02	0,13	0,00	0,12	0,00
H29	0,08	0,6	0,94	0,79	0,71	0,69	0,93	0,52	0,87	0,44
H31	0,07	0,6	1,36	0,67	1,05	0,57	0,54	0,42	0,38	0,35
H33	0,07	0,6	0,11	0,03	0,09	0,01	0,05	0,00	0,06	0,00

H35	0,06	0,6	0,75	0,51	0,34	0,39	0,32	0,27	0,41	0,20
-----	------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 45\text{Hz}$:

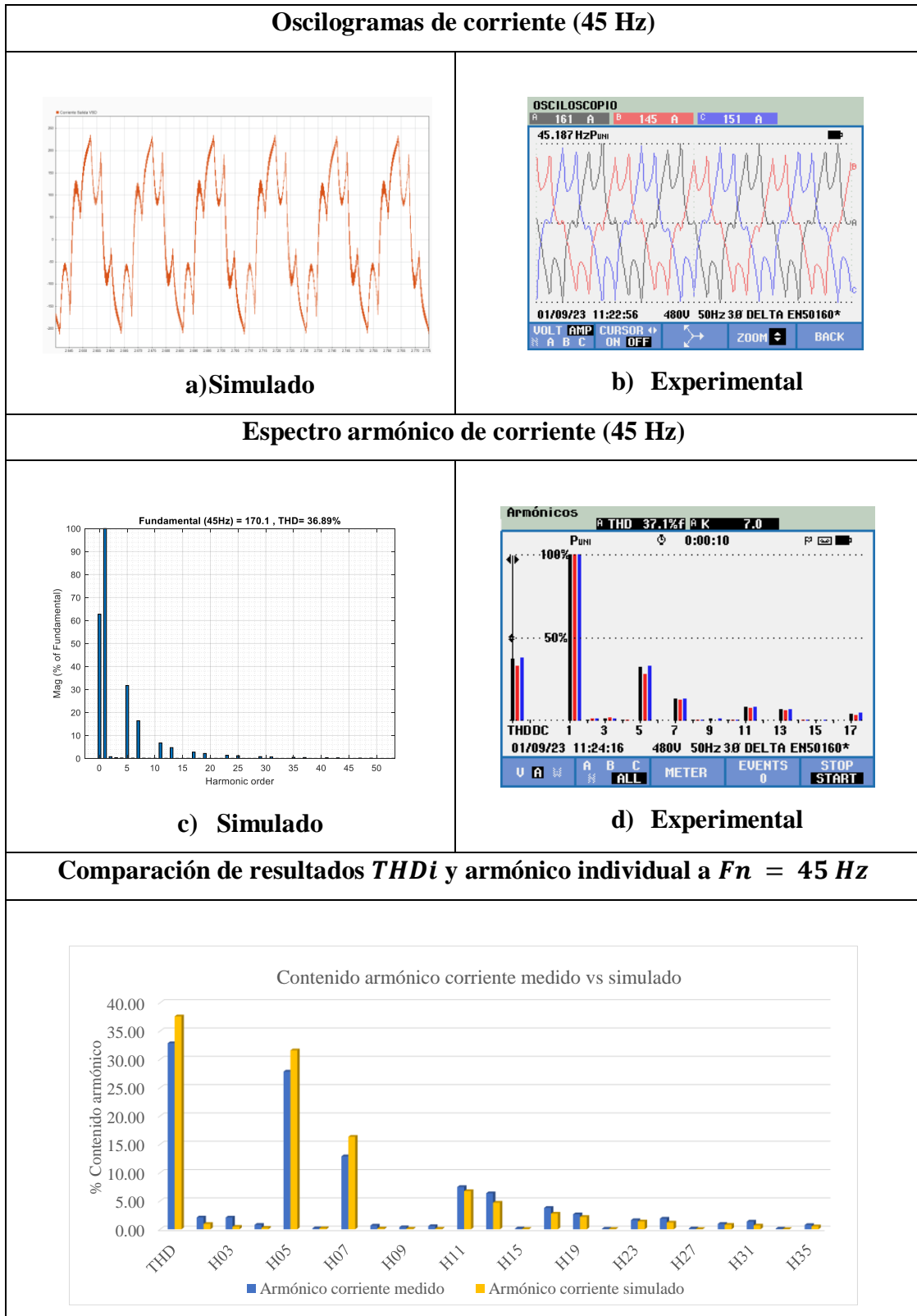


Figura 67. Oscilograma corriente y espectro armónico BES 6-STEP a 45 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 50\text{ Hz}$:

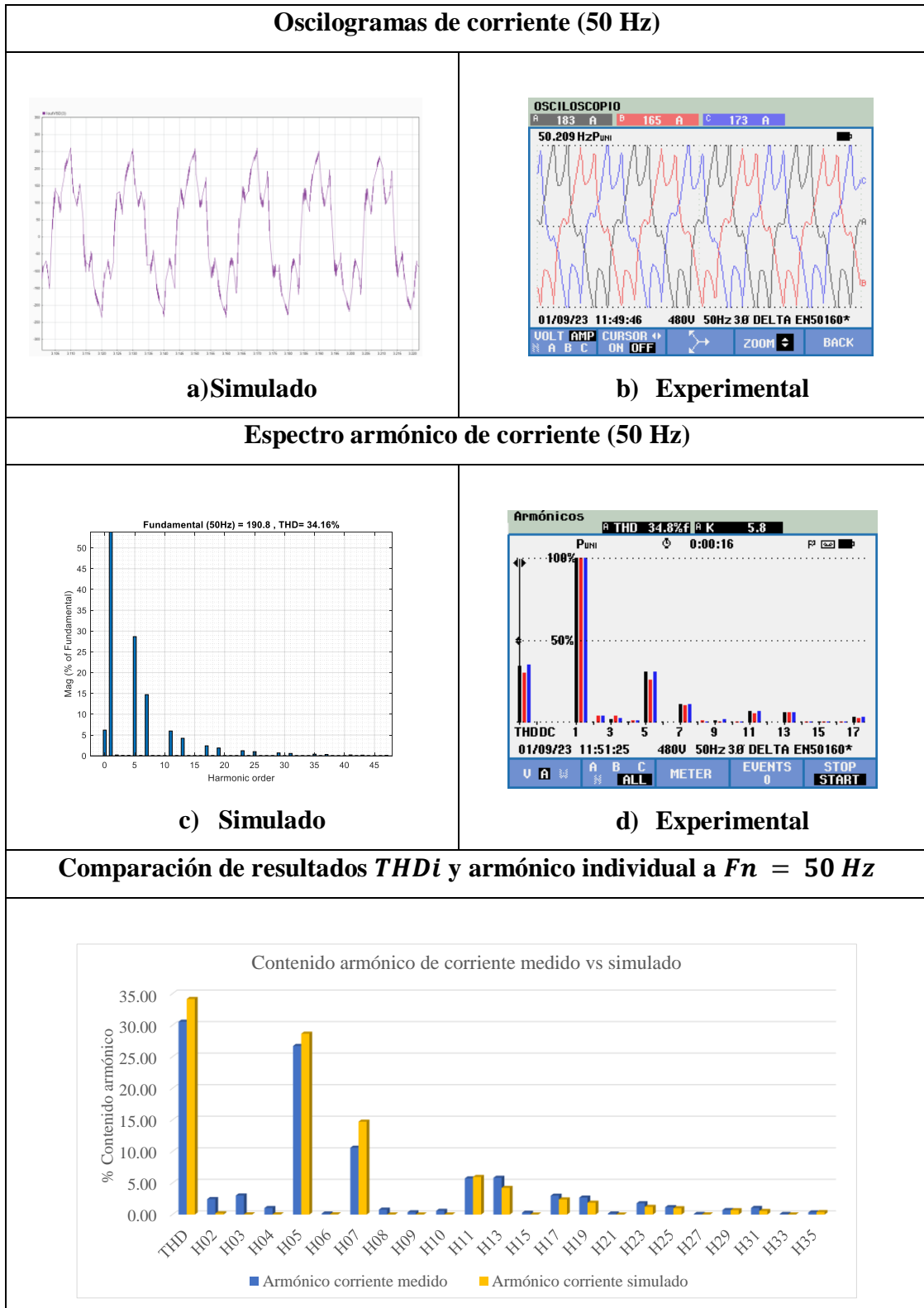


Figura 68. Oscilograma corriente y espectro armónico BES 6-STEP a 50 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 55 \text{ Hz}$:

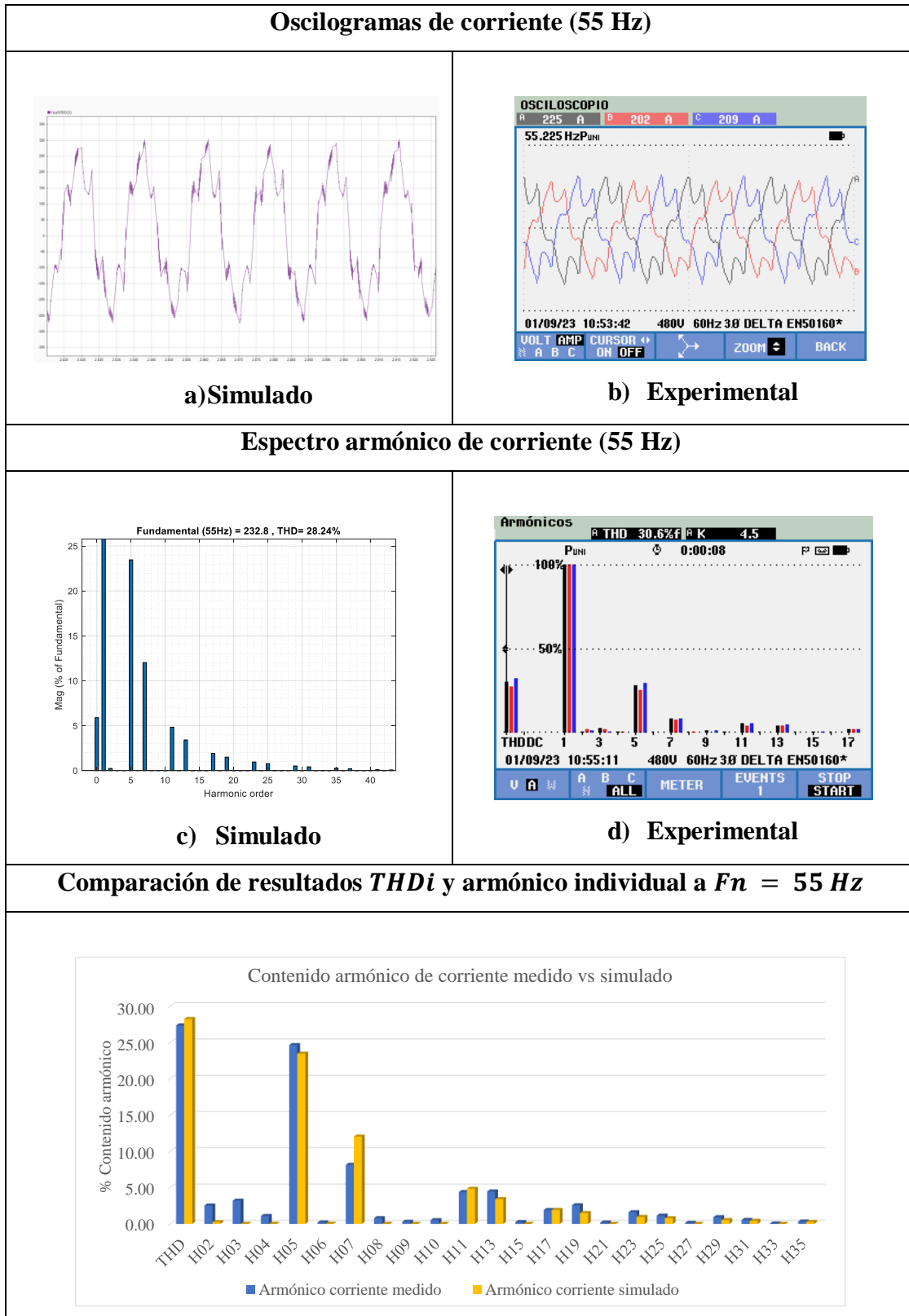


Figura 69. Oscilograma corriente y espectro armónico BES 6-STEP a 55 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 60\text{ Hz}$:

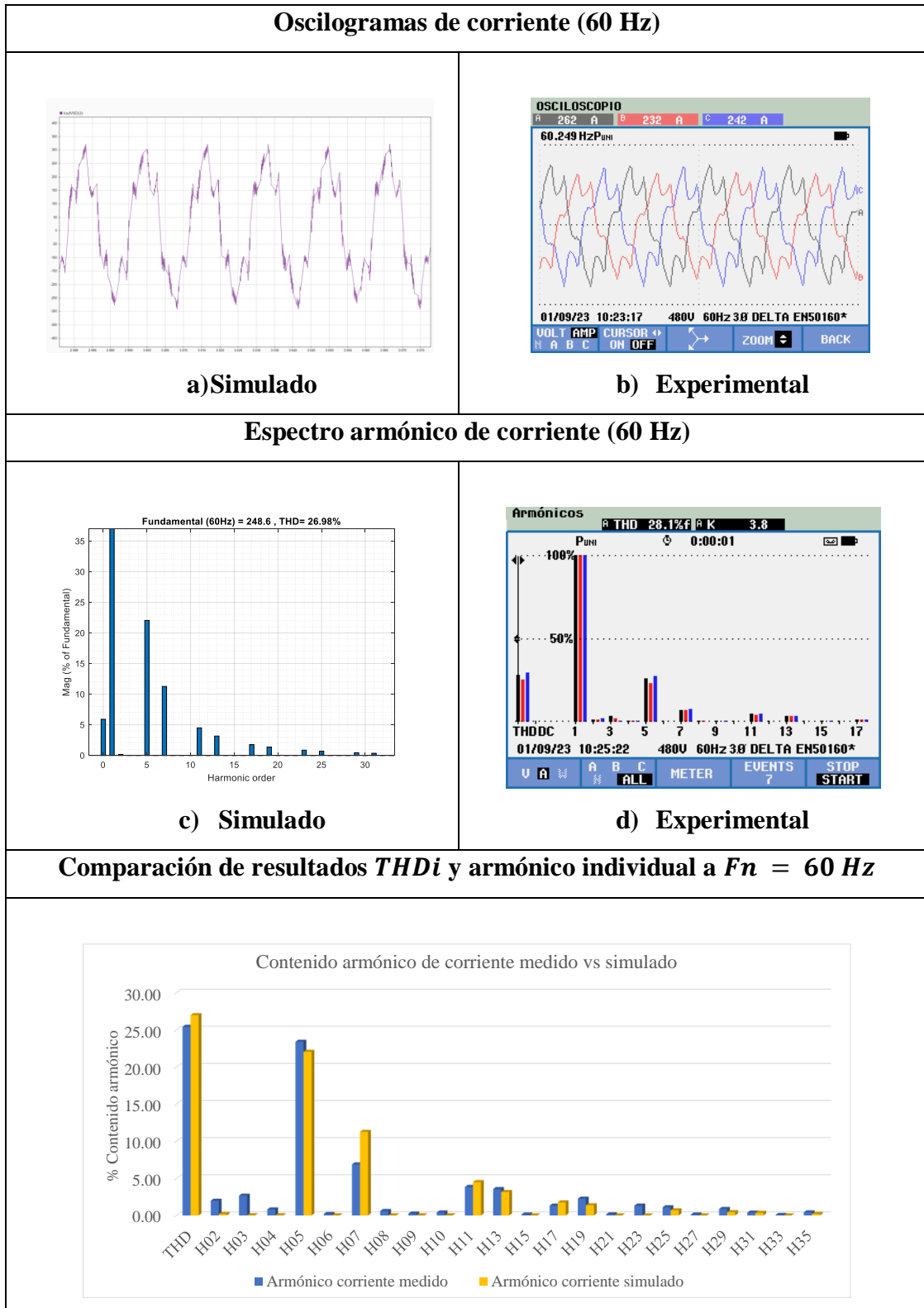


Figura 70. Oscilograma corriente y espectro armónico BES 6-STEP a 60 Hz

3.5.3 Ensayos realizados con VSD Vector PLUS en sistema HPS SCHN-002

En los siguientes apartados se muestran los resultados de las mediciones y simulación de calidad de potencia eléctrica suministrada a la carga por el VSD Vector Plus y se realiza el tratamiento en base a la normativa IEEE-519 1992 e IEC-61000-2-4; se analiza la parte baja y alta de los espectros usando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier FFT. La corriente y el voltaje de la **tabla 19** se miden en el punto de acoplamiento común entre el VSD y MOTOR.

Tabla 19. Voltaje y corriente medido en el punto de acoplamiento VSD HPS F-PWM unidad SCHN-002

FRECUENCIA (Hz)	VOLTAJE		CORRIENTE	
	TOTAL	FUND.	TOTAL	FUND.
	<i>Vrms</i>	<i>Vrms</i>	<i>Arms</i>	<i>Arms</i>
50	399,63	398,83	401,56	400,67
55	429,68	429,43	524,78	524,03

3.5.3.1 Distorsión armónica de tensión VSD Vector Plus (F-PWM) SCHN-002

En las **figuras 71-72 y tabla 20** se presentan los resultados de las mediciones de contenido armónico de voltaje para la salida del VSD F-PWM de la unidad HPS SCHN-002, en donde se puede evidenciar que la tasa de distorsión armónica total de voltaje THD_v presenta un valor promedio de 4,3 % y 3,3 % respectivamente para las frecuencias portadoras de 50 Hz y 55 Hz, el mismo que se encuentra dentro del límite permisible que establece la normativa IEEE 61000-2-4 y IEEE 519-1992 para sistemas de baja tensión.

Para el caso de los componentes armónicos individuales de voltaje en general se puede observar que los valores medidos y simulados para cada componente armónico están dentro de los límites establecidos por la normativa utilizada para cargas no lineales de baja tensión.

Tabla 20. Resultado de armónicos individuales de tensión medido vs simulado, unidad SCHN-002 (F-PWM)

APORTES DE ARMÓNICAS INDEPENDIENTE DE VOLTAJE POR TOPOLOGÍA IEC 61000-2-4 / IEEE 519-1992						
Orden de armónico	APORTES PERMITIDOS VOLTAJE		50 Hz		55 Hz	
	IEC (%)	IEEE (%)	% Cont. armónico		% Cont. armónico	
			Medido	Simulado	Medido	Simulado
H1 / THD	100 / 10	100 / 5	4,31	3,02	3,32	3,35
H02	2	3	0,04	0,11	0,09	0,14
H03	5	3	0,03	0,05	0,04	0,07
H04	1	3	0,07	0,1	0,08	0,21
H05	6	3	0,68	0,09	2,24	0,22
H06	0,5	3	0,09	0,03	0,03	0,02
H07	5	3	0,91	0,05	0,77	0,14
H08	0,5	3	0,08	0,06	0,08	0,08
H09	1,5	3	0,07	0,31	0,06	0,29
H10	0,2	3	0,11	0,44	0,09	1,42
H11	3,5	3	0,60	0,46	1,54	0,25
H13	3	3	0,42	0,14	0,96	0,29
H15	0,3	3	0,19	0,04	0,39	0,04
H17	2	3	0,37	0,03	0,81	0,06
H19	1,5	3	0,11	0,03	0,45	0,08
H21	0,2	3	0,04	0,02	0,04	0,10
H23	1,5	3	0,02	0,02	0,17	0,07
H25	1,5	3	0,05	0	0,14	0,10
H27	0,2	3	0,01	0,02	0,01	0,13
H29	1,32	3	0,02	0	0,06	0,18
H31	1,25	3	0,01	0,01	0,06	0,26
H33	0,2	3	0,02	0,01	0,23	0,51
H35	1,13	3	0,03	0	0,23	0,95

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 50\text{ Hz}$:

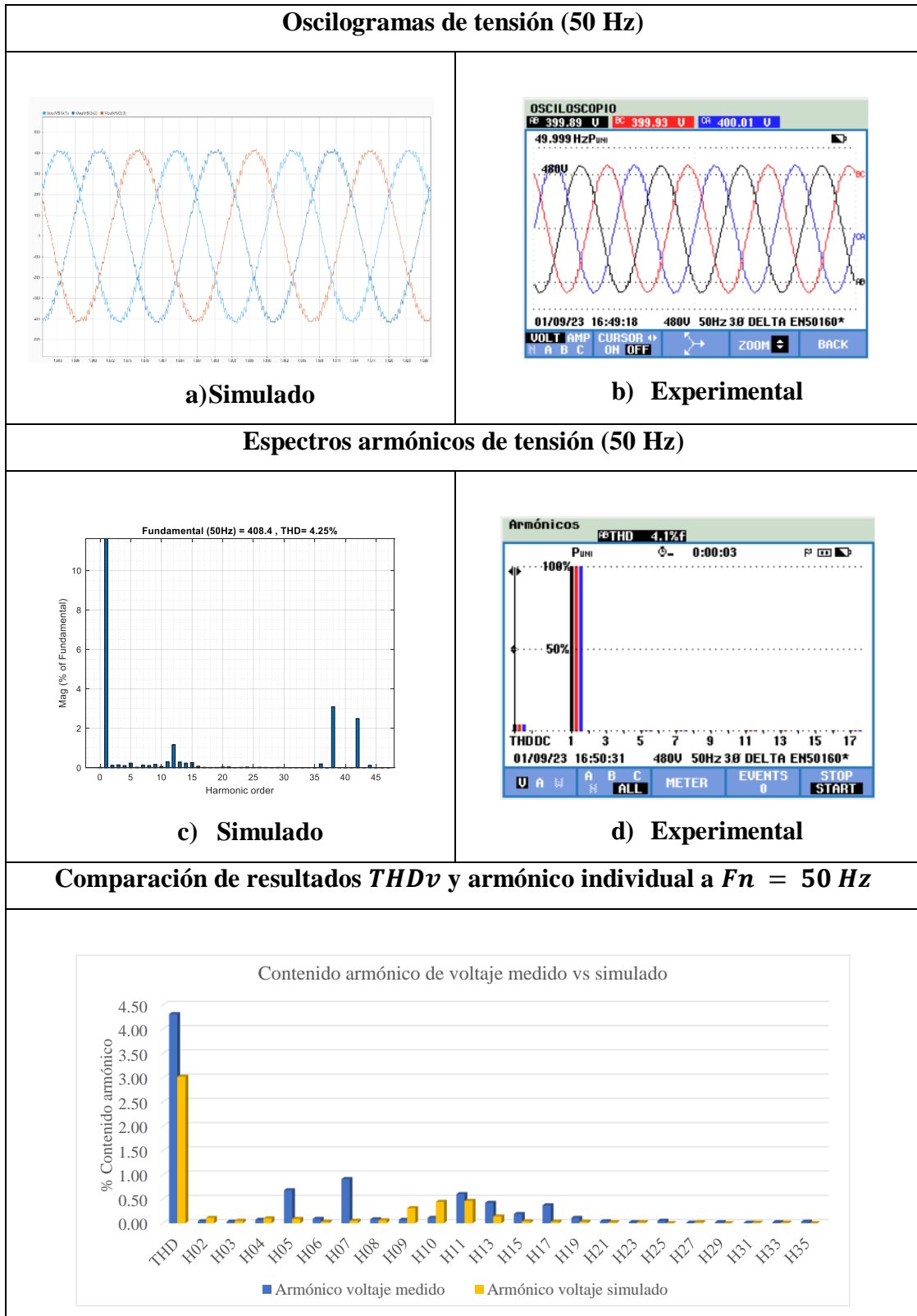


Figura 71. Oscilograma tensión y espectro armónico HPS F-PWM a 50 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDv$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 55\text{ Hz}$:

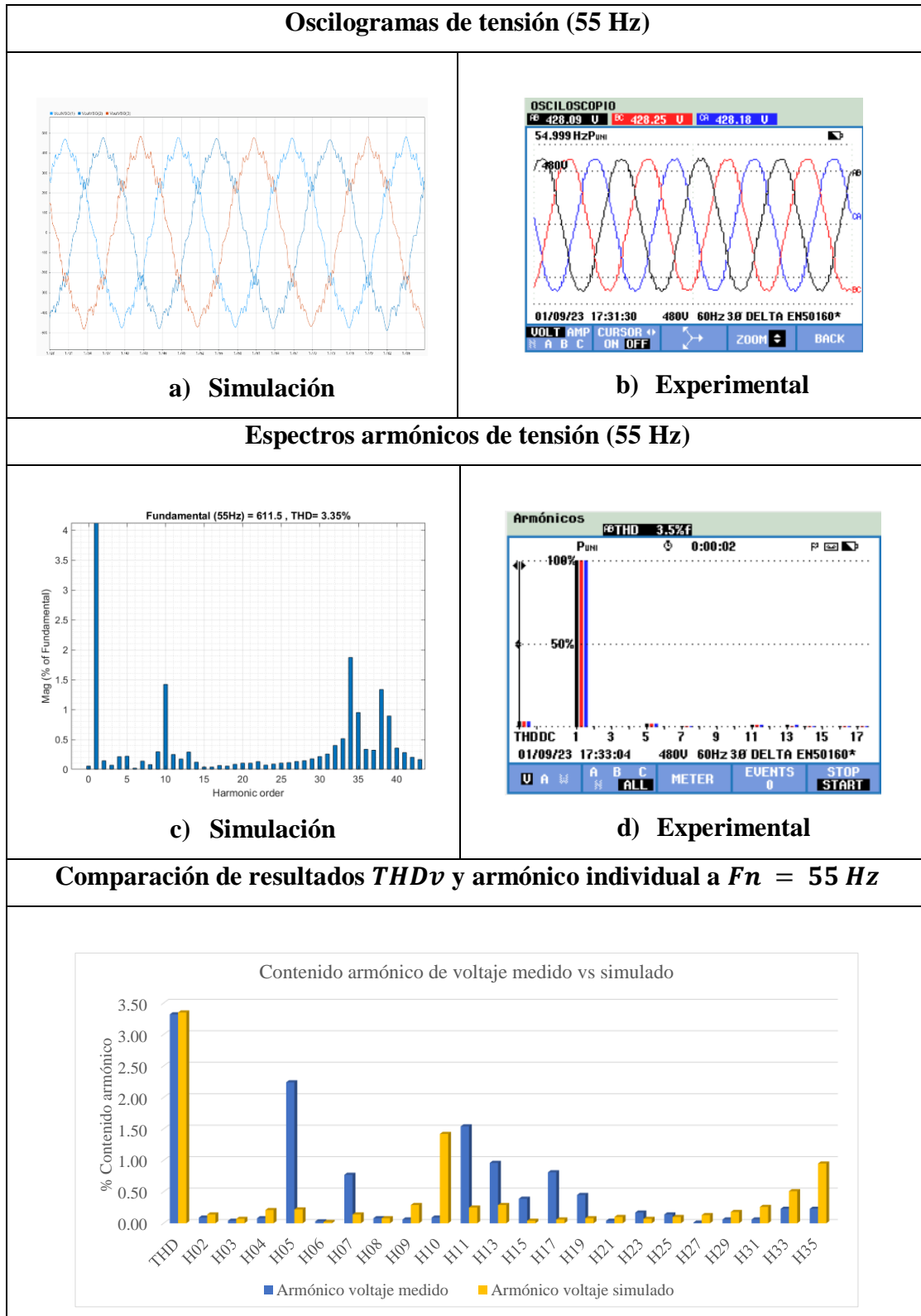


Figura 72. Oscilograma tensión y espectro armónico HPS F-PWM a 55 Hz

3.5.3.2 Distorsión armónica de corriente VSD Vector PLUS (F-PWM) SCHN-002

El análisis del contenido armónico de corriente a la salida del VSD F-PWM de la unidad HPS SCHN-002 en las **figuras 71-72 y tabla 20** se realiza mediante la medición y simulación de los armónicos de corriente y su comparación con las normas aplicables. En este caso de acuerdo con la norma IEEE 519-1992 y IEC 61000-2-4 el valor de la distorsión armónica de corriente se encuentra en 1,62 % y 2,67 % para las frecuencias portadoras de 50 Hz y 55 Hz; por lo que se determina que está dentro del límite permitido. En cuanto a las componentes armónicas individuales de corriente de frecuencias altas son casi imperceptibles, siendo más pronunciados los armónicos 5, 7, 11, 13. De estos se evidencia cómo cambia su comportamiento al realizar los incrementos de frecuencia fundamental de salida, así como con otros niveles de carga tienden a disminuir.

Tabla 21. Resultado de armónicos individuales de intensidad medido vs simulado, unidad SCHN-002 (F-PWM)

APORTES DE ARMÓNICAS INDEPENDIENTE DE CORRIENTE POR TOPOLOGÍA IEC 61000-2-4 / IEEE 519-1992						
Orden de armónico	APORTES PERMITIDOS CORRIENTE		50 Hz		55 Hz	
	IEC (%)	IEEE (%)	% Cont. armónico		% Cont. armónico	
			Medido	Simulado	Medido	Simulado
H1 / THD	100 / 15	100 / 15	1,62	0,27	2,31	0,56
H02	1,08	4	0,16	0,08	0,32	0,13
H03	2,3	4	0,13	0,03	0,11	0,10
H04	0,43	4	0,22	0,06	0,14	0,09
H05	1,14	4	0,87	0,04	1,63	0,07
H06	0,3	4	0,11	0,01	0,04	0,03
H07	0,77	4	0,34	0,01	0,82	0,03
H08	0,23	4	0,12	0,04	0,10	0,06
H09	0,4	4	0,03	0,08	0,06	0,13
H10	0,18	4	0,11	0,1	0,05	0,45
H11	0,33	4	0,06	0,06	1,15	0,08
H13	0,21	2	0,14	0,03	0,41	0,04
H15	0,15	2	0,16	0,01	0,19	0,01
H17	0,13	2	0,20	0	0,27	0,01
H19	0,12	1,5	0,22	0	0,29	0,01
H21	0,11	1,5	0,02	0	0,03	0,01
H23	0,1	1,5	0,06	0	0,14	0,00
H25	0,1	0,6	0,05	0	0,12	0,01
H27	0,09	0,6	0,00	0	0,01	0,01
H29	0,08	0,6	0,02	0	0,05	0,01
H31	0,07	0,6	0,02	0	0,04	0,02
H33	0,07	0,6	0,01	0	0,04	0,04
H35	0,06	0,6	0,02	0	0,06	0,07

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 50\text{ Hz}$:

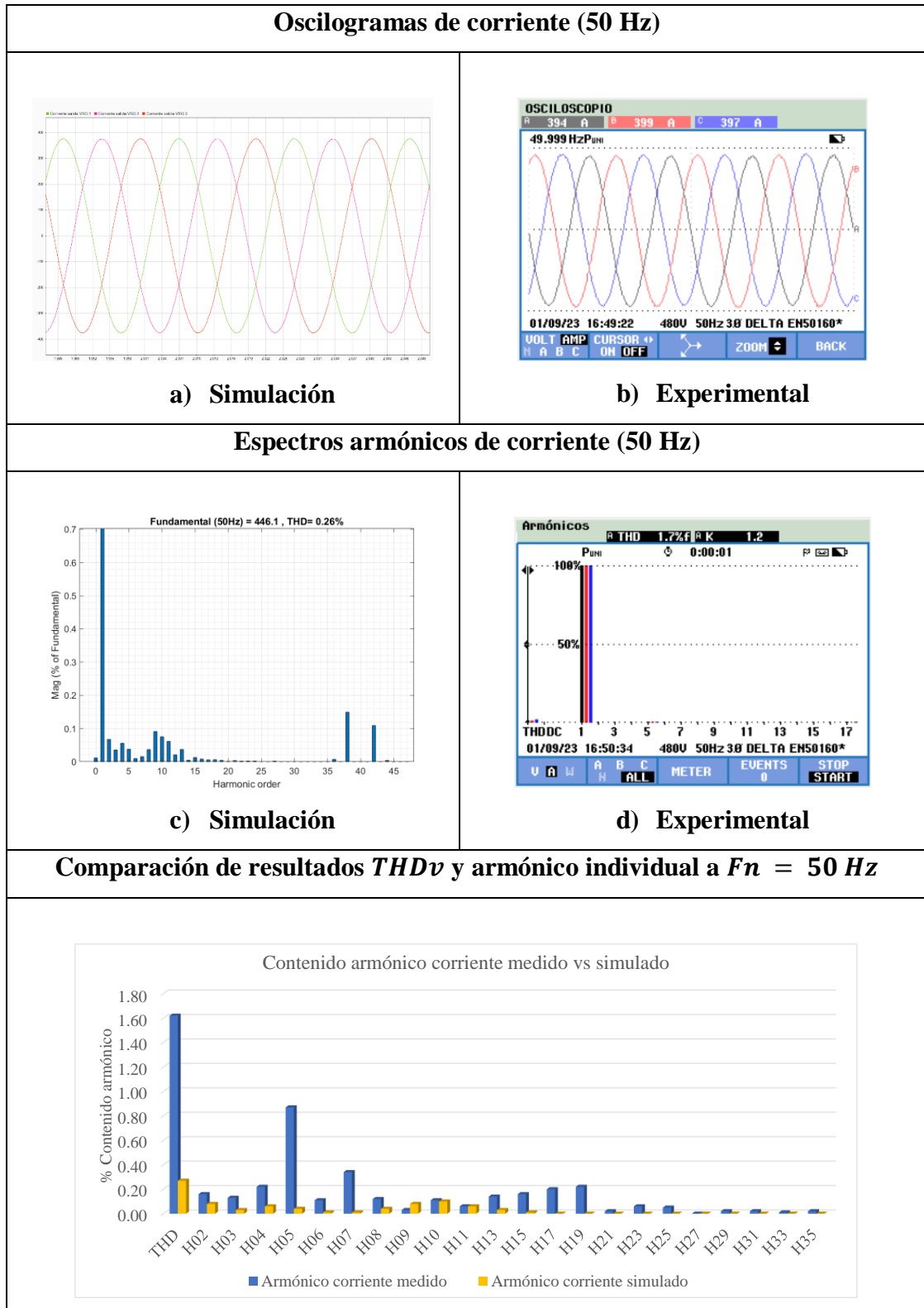


Figura 73. Oscilograma corriente y espectro armónico HPS 6-STEP a 50 Hz

Se presentan a continuación los valores medidos y simulados de las componentes armónicas de corriente y el valor del $THDi$ utilizando una frecuencia fundamental $F_n = 55 \text{ Hz}$:

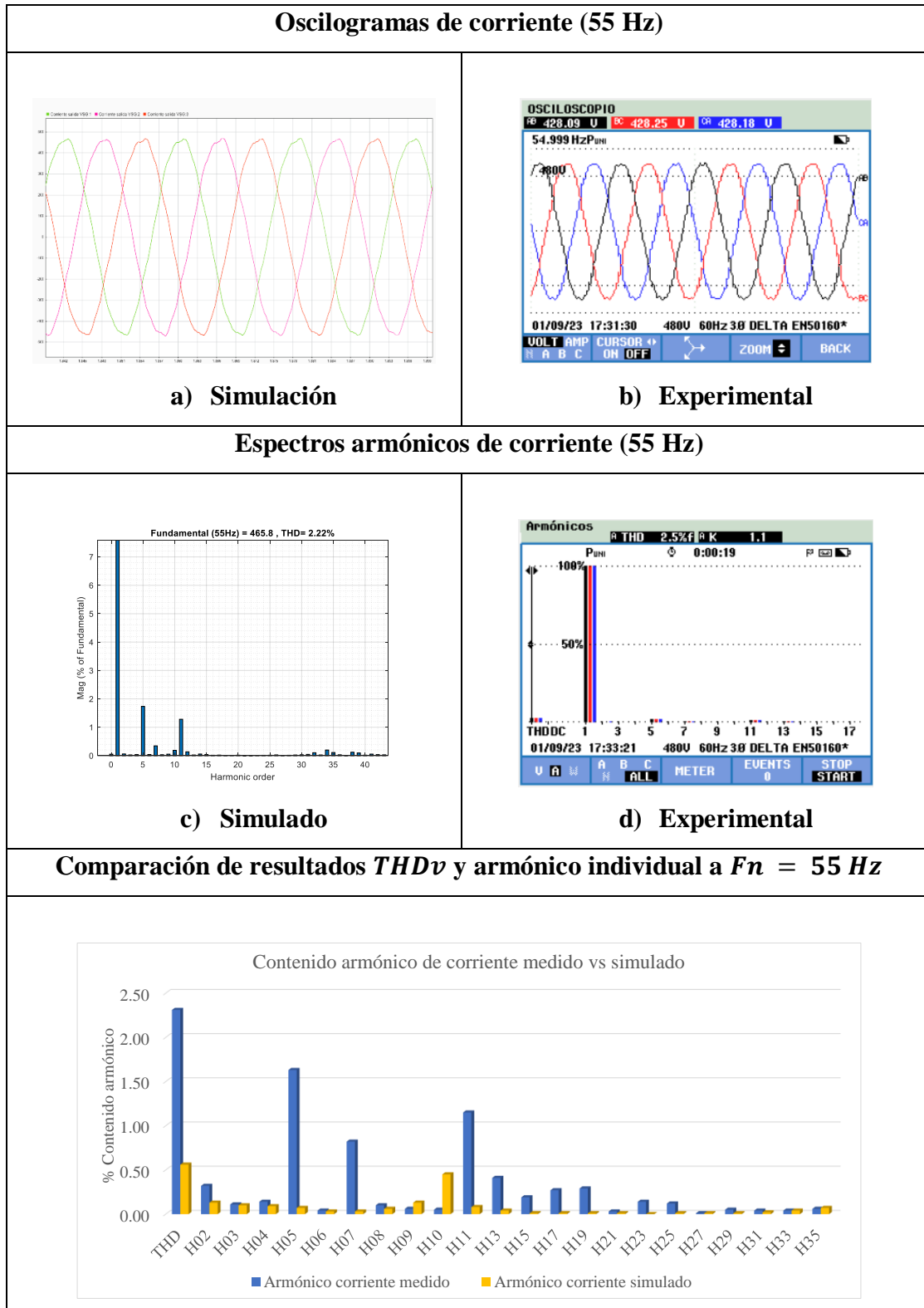


Figura 74. Oscilograma corriente y espectro armónico HPS 6-STEP a 55 Hz

3.6 Potencia armónica de carga en los sistemas de bombeo horizontal y electrosumergible con alimentación F-PWM y 6-STEP

Los ensayos experimentales de calidad de potencia suministrada por los inversores con salida F-PWM y 6-STEP se realizan en los puntos de acoplamiento (VSD-SUT en el caso del sistema BES y VSD-MOTOR en el caso del sistema de bombeo horizontal), nos sirve como punto de partida para calcular la potencia armónica de carga en los equipos de superficie y fondo.

3.6.1 Potencia armónica de carga en el equipo de superficie

La medición de calidad de energía que se realiza en el punto de acoplamiento común indicado produce en el transformador elevador un consumo de potencia agregado, que contempla:

- Potencia armónica en el núcleo del transformador.
- Potencia armónica provocada por el Efecto Piel.
- Potencia armónica por la circulación de Corrientes de Eddy.

3.6.1.1 Potencia armónica en el núcleo magnético del transformador

En el transformador elevador multifrecuencial el consumo de potencia armónica en el núcleo magnético, debido al contenido armónico de tensión medido, se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} P_{ECnucleo} &= \sum_{h=1}^{hmax} P_{ECnucleo-h} \\ &= ke * f^2 * B^2 * \left(\frac{V_1}{V}\right)^2 * \left[1 + \sum_{h=1}^{hmax} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2 * C_{en} * C_{T-h}\right] \end{aligned} \quad (29)$$

Donde:

$ke * f^2 * B^2$: Potencia armónica por circulación de corrientes de Eddy por el núcleo del transformador a la frecuencia fundamental de operación.

V : Voltaje nominal en los bornes del transformador.

C_{T-h} : Factor de corrección aplicado solo a transformadores trifásicos con presencia de armónicos de secuencia homopolar ($h=3, 9, 15$, etc).

C_{en} : Función de entrada.

B : Intensidad de flujo magnético $B = \frac{\sqrt{2} * B}{2\pi * A * N * f}$

A : Área transversal del núcleo del transformador en m^2 .

Ke : Constante de proporcionalidad obtenida experimentalmente.

N : Relación entre el numero de espiras del bobinado primario y secundario.

3.6.1.2 Potencia armónica debido al efecto piel

En presencia de circulación de corriente alterna por un conductor eléctrico, la misma no circula a través del conductor de forma distribuida, sino por la periferia del mismo; a este comportamiento se lo define como efecto piel, el mismo que genera un calentamiento adicional sobre el cable eléctrico. La circulación de corrientes armónicas en los conductores eléctricos que forman parte de los bobinados del transformador, provoca un consumo de potencia adicional.

3.6.1.3 Potencia armónica por circulación de corrientes de Eddy

Una corriente alterna circulando a través de un conductor eléctrico, induce un campo magnético envolvente en el mismo provocando que se generen corrientes parasitas o de Eddy. La presencia de componentes armónicas de corriente induce campos magnéticos variables ocasionando que las corrientes de Eddy varíen provocando un consumo adicional en los bobinados del transformador.

3.6.1.4 Potencia armónica de carga total en el transformador

Este valor depende de las potencias armónicas detalladas anteriormente, se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{carga} = I^2 R + P_{EC} + P_{EC-Núcleo} \quad (30)$$

Donde

$P_{EC-Núcleo}$: Potencia armónica en el núcleo del transformador, (Vatio).

P_{carga} : Potencia armónica de carga total, (Vatio).

I^2R : Potencia armónica por efecto piel en bobinados del transformador, (Vatio).

P_{EC} : Potencia armónica por corrientes de Eddy en bobinados del transformador, (Vatio).

La ecuación para calcular la potencia armónica en el núcleo magnético del transformador definido en la **ecuación 29** están en función de los datos referentes al diseño del equipo y su fabricación. Estos datos de fabricación son de difícil acceso al momento de seleccionar un transformador o determinar su comportamiento en presencia de cargas no lineales; por lo que los datos disponibles serán los proporcionados por el fabricante y en el mejor de los casos aquellos que se pueda obtener realizando pruebas. Por este motivo la potencia armónica de carga total en el transformador en presencia de contenido armónico considerando ($P_{EC-Núcleo} \approx 0$), se define como:

$$P_{Carga} = I^2R + P_{EC} \quad (31)$$

3.6.1.5 Potencia armónica de carga total en “Por Unidad”

Se utiliza el sistema “por unidad (PU)” de valores base seleccionados de forma adecuada, con la finalidad de calcular de forma sencilla la potencia armónica de carga total del transformador. Para el cálculo se procede a expresar la corriente como base de la corriente nominal en el bobinado respectivo del transformador; en tanto que la potencia por efecto piel a condiciones nominales (I^2R_{nom}) será el valor base de este parámetro. Así para realizar el cálculo de la potencia armónica de carga total, potencia armónica por efecto piel y potencia armónica por circulación de corrientes de Eddy en el transformador, se calculan de la siguiente forma:

$$P_{Carga}(pu) = I^2R(pu) + P_{EC}(pu) \quad (32)$$

$$I^2R = I^2R_{nom}(pu) * \sum_{h=1}^{hmax} [(I_h(pu))^2] \quad (33)$$

$$P_{EC} = P_{ECnom}(pu) * \sum_{h=1}^{hmax} [(I_h(pu))^2 * h^2] \quad (34)$$

Donde:

$P_{Carga}(pu)$: Potencia armónica de carga total, (pu)

$I^2R(pu)$: Potencia armónica por efecto piel en bobinados de transformador, (pu)

$I^2R_{nom}(pu)$: Potencia armónica por efecto piel a condiciones nominales en bobinados de transformador, (pu)

P_{EC} : Potencia armónica por circulación de corrientes de Eddy en bobinados de transformador, (pu)

$P_{ECnom}(pu)$: Potencia armónica por efecto piel a condiciones nominales en bobinados de transformador, (pu)

$[(I_h(pu))^2 * h^2]$ se define como **Factor K del transformador**, nos indica el grado de aislamiento o tipo de aleación con que son fabricados los conductores de los bobinados del transformador, con la finalidad de mantener un consumo mínimo de potencia armónica en presencia de corrientes circulantes distorsionadas, en el caso de este estudio el factor K de diseño es 20.

3.6.1.6 Factor K del motor

El factor k es una medida de la distorsión armónica en el motor y se utiliza para determinar el efecto de los armónicos en la capacidad del motor para producir torque. Cuanto mayor sea el factor k, mayor será la distorsión armónica y mayor será el efecto de los armónicos en la capacidad del motor para producir torque. Por lo general, el factor k aumenta a medida que aumenta el número de armónicos presentes en el sistema. Los armónicos de corriente, en particular, pueden aumentar el factor k, lo que puede afectar la capacidad del motor para producir torque y puede provocar sobrecalentamiento y fallos en el motor.

Existen diferentes métodos para calcular el factor k de un motor accionado por un variador de velocidad, en este caso se utilizará el método de medición, el mismo que consiste en medir la corriente y el voltaje aplicado al motor y utilizar estos valores para calcular el factor k . El factor k se define como la relación entre la corriente armónica total y la corriente fundamental, expresado en porcentaje.

Fórmula para calcular la corriente armónica total (I_{thd}):

$$I_{thd} = \sqrt{I_2^2 h_2 + I_3^2 h_3 + \dots + I_n^2 h_n} \quad (35)$$

Donde:

I_{thd} : Corriente armónica total expresada en porcentaje

I_{hn} : Corriente armónica de orden n

I_1 : Corriente fundamental

Fórmula para calcular el factor k :

$$K = \frac{I_{thd}}{I_1} * 100\% \quad (36)$$

Donde:

K : Factor de distorsión armónica expresado en porcentaje

I_{thd} : Corriente armónica total expresada en porcentaje

I_1 : Corriente fundamental

3.6.2 Potencia armónica de carga en el equipo de fondo

El contenido armónico de voltaje $THDv$ puede causar un efecto resonante en el equipo de fondo, mientras que los armónicos de corriente $THDi$ vienen a generar una potencia armónica de carga.

3.6.2.1 Efecto del contenido armónico de voltaje en sistemas de bombeo electrosumergible

La cercanía de las frecuencias de las componentes armónicas de voltaje $THDv$ con la máxima frecuencia de resonancia del equipo generan un efecto resonante en el equipo de fondo. Con la finalidad de conocer la frecuencia de resonancia, es necesario saber el circuito equivalente de los componentes del sistema BES en el punto de acoplamiento VSD – SUT, que se puede representar mediante el siguiente esquema de la **figura 75**.

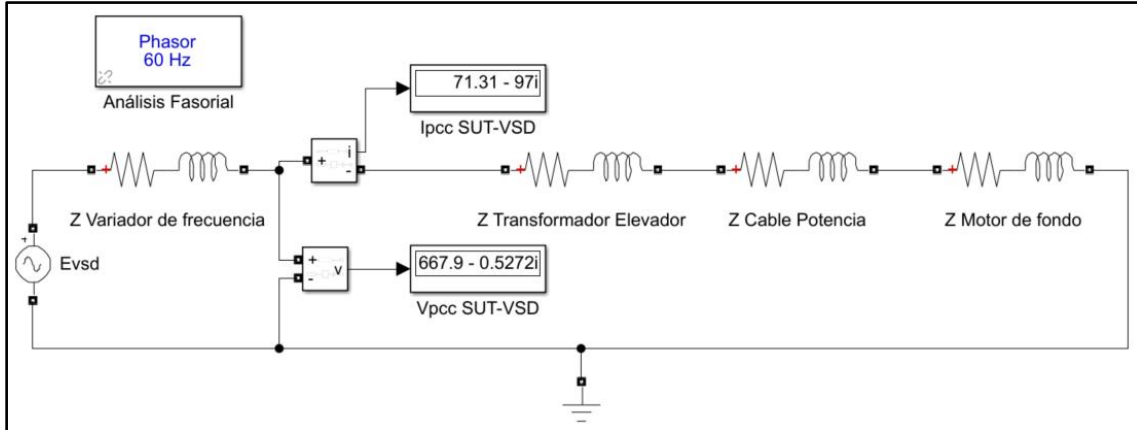


Figura 75. Circuito equivalente simplificado del equipo de fondo

Mediante el equivalente eléctrico, se plantea la condición para determinar la frecuencia de máxima resonancia del sistema BES, expresada de la siguiente forma:

$$\omega_L = \frac{1}{\omega_C} \quad (37)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * C}} \quad (38)$$

Donde:

$$\omega_L = 2\pi * f \quad (39)$$

$$\omega_C = 1/2\pi * f$$

f_r : Frecuencia resonancia equipo fondo, (Hz)

L : Inductancia equivalente equipo fondo en punto de acoplamiento VSD – SUT, (H)

C : Capacitancia equivalente equipo de fondo en punto de acoplamiento VSD – SUT, (C)

En la **figura 75** el circuito expuesto es visto como una sola malla en el que juega un papel importante la tensión de la fuente de alimentación, la tensión y corriente medidas en el punto de acoplamiento VSD-SUT (V_{pcc} e I_{pcc} respectivamente) y la impedancia equivalente $Z = Z_{VSD} + Z_{SUT} + Z_{CABLE} + Z_{MOTOR}$. En base a lo antes mencionado se realiza la simulación del sistema y se representa su respuesta en base a la frecuencia. Como recurso para el análisis de la bibliografía se obtuvo la curva experimental de resonancia del sistema BES en la misma se determina que a 4 KHz se presenta la frecuencia de máxima resonancia [44]. En esta curva se identifica tres áreas: Normal ($THDv$ sin efecto), Resonante ($THDv$ amplificados) y Atenuación ($THDv$ atenuados), como se observa en la **figura 76**:

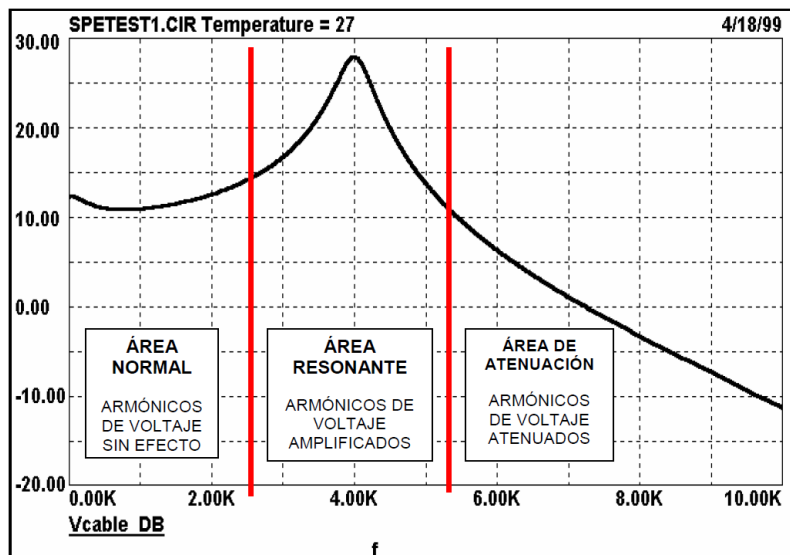


Figura 76. Curva de resonancia experimental de equipo de fondo en función de inversión de voltaje PWM en el VSD [44].

Los variadores de frecuencia de la marca BH ensayados en este estudio son capaces de operar tanto en modo F-PWM (Modulación por ancho de pulso filtrado) como en modo 6-STEP (voltaje variable, onda pseudo sinusoidal de 6 pulsos), al ser capaces de manejar diferentes tecnologías de inversión ocasionando que el espectro armónico se encuentre cerca o lejos de la máxima frecuencia de resonancia que en el caso del estudio es 4 KHz.

3.6.2.2 VSD Electrospeed III GCS con tecnología de inversión de voltaje 6-STEP.

En el modo 6-STEP genera un espectro de componentes armónicas de voltaje a ciertas frecuencias características. Caracterizadas por:

$$f_h = f_{vsd} * h \quad (40)$$

Donde:

f_{vsd} : Frecuencia de salida de VSD, (Hz)

f_h : Frecuencias de las componentes armónicas de tensión 6-STEP, (Hz)

h : Orden de armónico, $h = 5, 7, 11, 13. etc$

En los ensayos experimentales con el analizador de energía FLUKE 435 SII, la componente armónica mayor medida por las características técnicas del equipo es ($h = 50$), al realizar el análisis con la máxima frecuencia fundamental ($f = 60Hz$), nos da un resultado de 3 KHz. En la **figura 77** se presenta el resultado de la simulación de respuesta en frecuencia del sistema BES, aquí se registra que la función de transferencia presenta su punto más alto en 2.634 KHz, determinándose como una región de posible presencia de resonancia en el motor; sin embargo, ya que en la parte alta del espectro de contenido armónico de tensión las componentes individuales presentan valores relativamente bajos no se presentaría el efecto resonante.

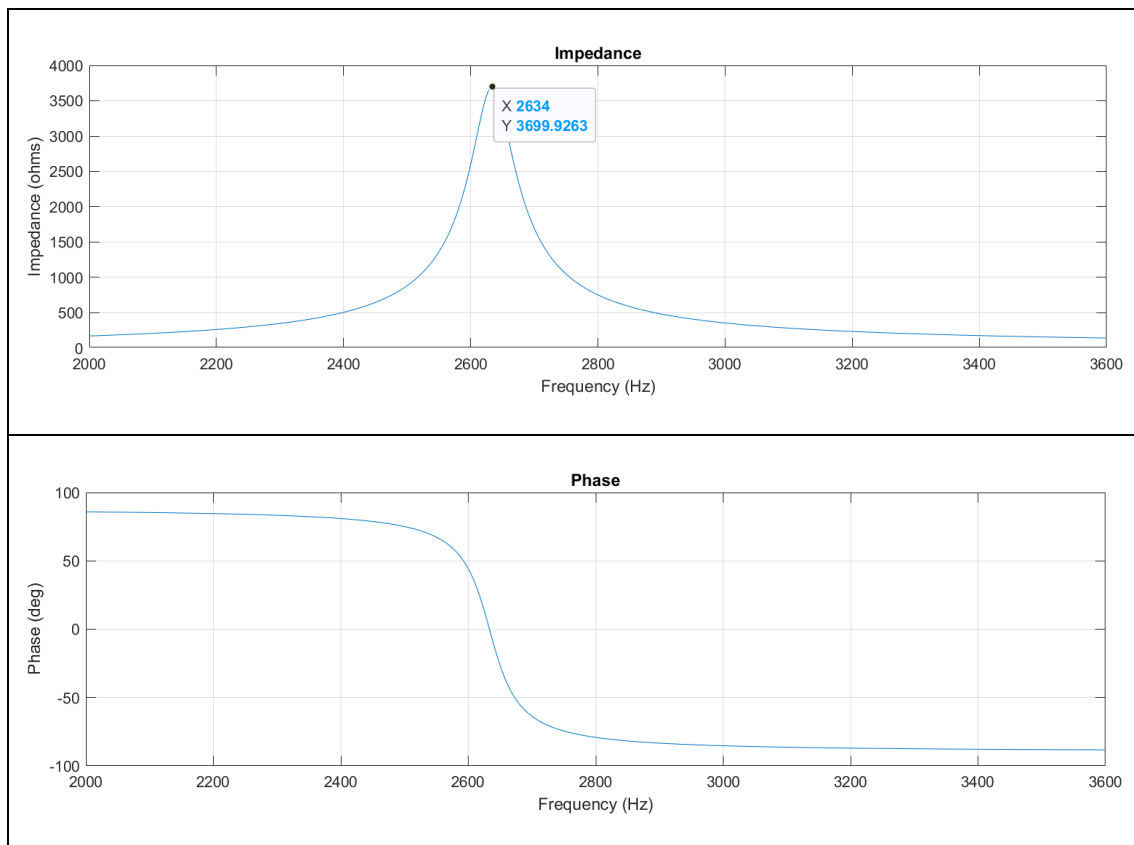


Figura 77. Curva de resonancia experimental sistema BES SCHAA-301 6-STEP

3.6.2.3 VSD Vector Plus con tecnología de inversión de voltaje F-PWM.

La alimentación con variador de frecuencia F-PWM provoca que el comportamiento de los sistemas con motor electrosumergible y de superficie, sus prestaciones sean diferentes a las del del motor alimentado con voltaje sinusoidal, esto por la presencia de contenido armónico de alta frecuencia [45]. En la **figura 78** se presenta el resultado de la simulación de respuesta en frecuencia del sistema BES; determinándose que cuando las componentes armónicas se aproximan a la frecuencia de 2.696 KHz se encuentran próximos a la frecuencia de resonancia y estos se amplifican provocando distorsión en el voltaje que alimenta al motor, adicional la amplificación de las componentes armónicas cercanas a 2.696 KHz incrementa el porcentaje de distorsión armónica de voltaje (*THDv*) en el punto de acoplamiento.

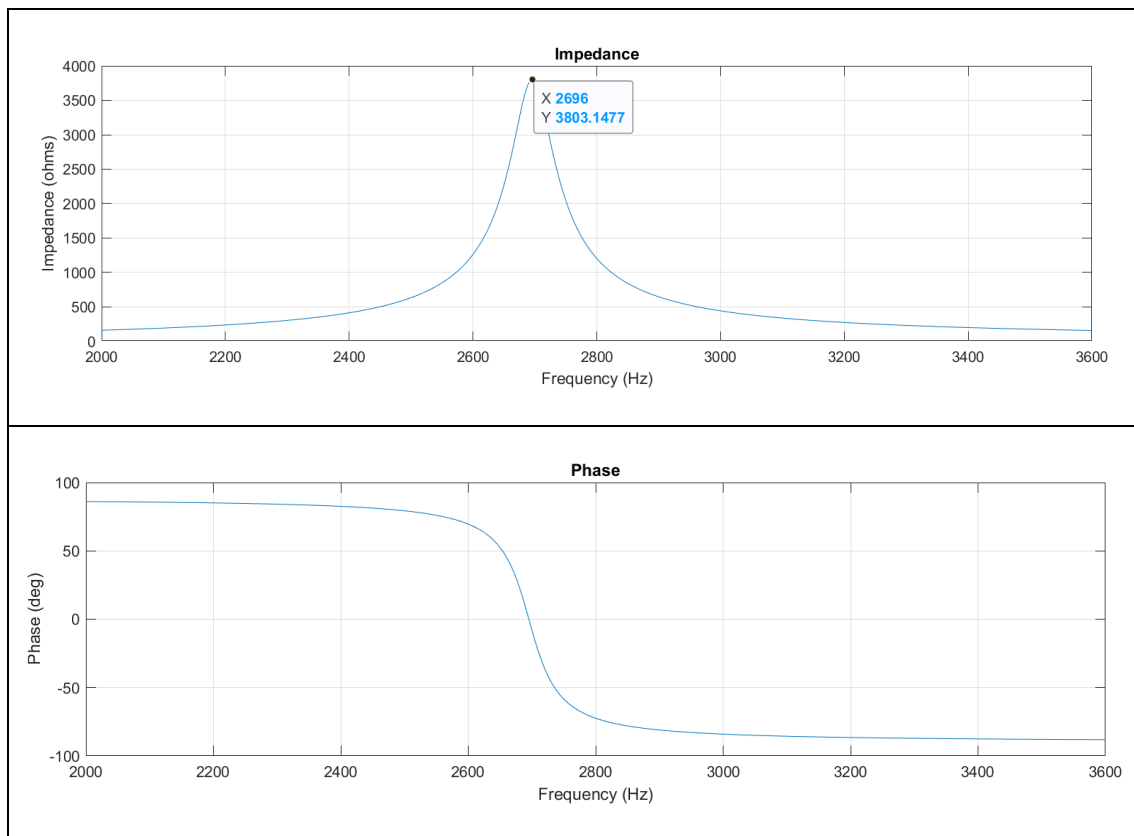


Figura 78. Curva de resonancia experimental sistema BES SCH-007 F-PWM

En los espectros de la parte de alta frecuencia se evidencian incrementos en el grupo de bandas laterales alrededor del primer múltiplo de la portadora, también cambios considerables en el segundo grupo alrededor de la frecuencia de conmutación, sobre todo una considerable reducción de las bandas $2fc \pm 1f1$ y un incremento de las frecuencias $2fc \pm 7f1$, al realizar los cambios propuestos en la frecuencia fundamental de salida.

Sobre los 50 Hz se observa estabilidad en los datos de bandas laterales del primer múltiplo de la portadora. En conclusión, los valores porcentuales normalizados de armónicos altos de tensión son relativamente bajos y de mayor nivel que los de intensidad, comportamiento similar tanto para el motor electrosumergible como para el motor de superficie.

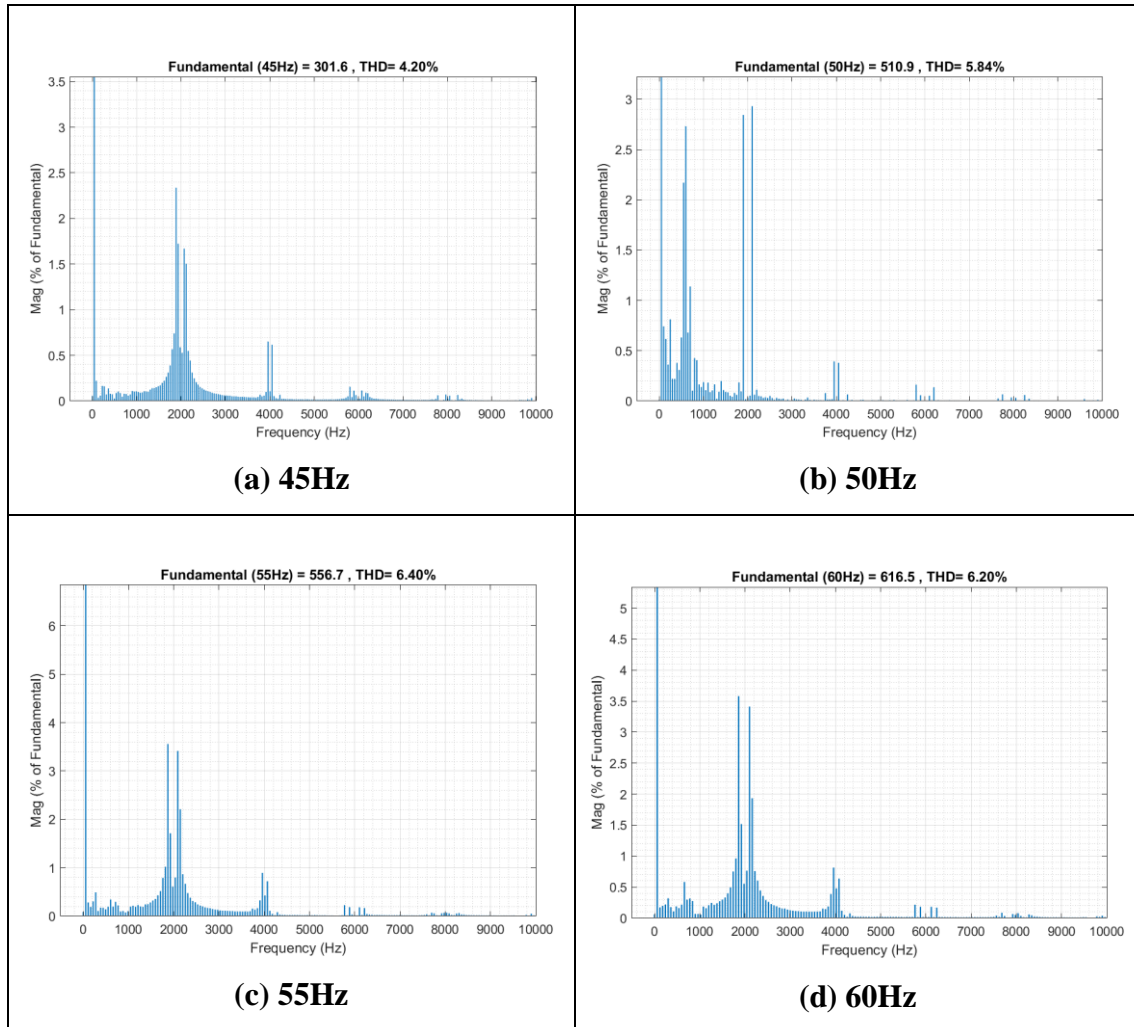


Figura 79. Respuesta a frecuencia de salida de tensión del VSD Vector Plus con salida F-PWM con $f_c = 2 \text{ KHz}$ con $f_1 = 45 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}, 55 \text{ Hz}$ y 60 Hz .

3.6.3 Potencia armónica de carga debido al $THDi$

La distorsión armónica total de corriente ($THDi$) que se mide en el punto de acople VSD-SUT es capaz de producir el efecto piel en el cable de potencia, bobinados del motor BES adicional de una variación en el torque del motor.

3.6.3.1 Potencia de carga debida al Efecto Piel en el Cable Eléctrico de Potencia

La potencia de carga en el cable eléctrico debido al efecto piel “Skin” se determina de forma similar a la potencia armónica en los bobinados del transformador por el mismo efecto.

3.6.3.2 Potencia armónica de carga debido al Efecto Piel en el Motor

La potencia armónica de carga en el motor electrosumergible causada por el efecto piel se agrupa en una sola potencia para su cálculo. La resistencia entre las terminales del motor es de 1.09Ω para motores de este tipo.

3.6.3.3 Torque en el Motor

El motor eléctrico cuando se encuentra alimentado con un voltaje distorsionado en el mismo se pueden producir torques a favor y en contra de la componente fundamental. Los armónicos de secuencia positiva producen torques que se encuentran a favor del torque de la componente fundamental, mientras que para los armónicos de secuencia negativa producen torques en sentido contrario al torque de la componente fundamental y los torques producidos por armónicas homopolares se anulan. Este efecto producido por los torques de las componentes armónicas con secuencias opuestas se cancela, haciendo que el efecto neto del torque de las componentes armónicas no sea significativo en el desempeño del motor.

3.6.4 Cálculo de la potencia armónica de carga en los equipos electrosumergibles con inversor de salida F-PWM y 6-STEP

A continuación, se realiza el cálculo de potencia de carga total en los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontal con inversor de salida F-PWM y 6-STEP.

3.6.4.1 Potencia armónica de carga en transformador elevador multifrecuencial

En la **tabla 9 y 22** se detallan los principales datos técnicos del transformador para realizar el cálculo de la potencia armónica de carga para la frecuencia de 60 Hz:

Tabla 22. Información técnica de transformador elevador multifrecuencial

Potencia	Volt. Pri.	Volt. Sec.	Freq.	I^2R	P_{EC}	P_{ArmVac}
400 KVA	480 V	1905 V	60 Hz	4243,2 W	636 W	832 W

Cálculo de la corriente nominal del bobinado primario del transformador:

$$I_{NOM-SUT} = \frac{S_{SUT}}{\sqrt{3} * V_{SUT-PRIM}} \quad (41)$$

Donde:

$I_{NOM-SUT}$: Intensidad nominal en devanado primario del transformador elevador

S_{SUT} : Potencia nominal transformador elevador, (VA)

$V_{SUT-PRIM}$: Voltaje devanado primario del transformador elevador

Realizando el cálculo se tiene:

$$I_{NOM-SUT} = \frac{400000[VA]}{\sqrt{3} * 480[V]}$$

$$I_{NOM-SUT} = 481,1[A]$$

El espectro armónico medido en el punto de acoplamiento VSD–SUT se define como el $THDi$ en el devanado primario del transformador elevador, la misma se puede usar con el objetivo de calcular la potencia armónica por circulación de corrientes de Eddy y efecto piel, obsérvese en la **tabla 23** para el sistema de bombeo electrosumergible con VSD Vector Plus con inversor de salida con F-PWM y en la **tabla 24** para el VSD Electrospeed III GCS con inversor de salida 6-STEP.

Tabla 23. Cálculo para potencia armónica por efecto piel y corrientes de Eddy para el VSD Vector Plus con inversor de salida F-PWM

H	$I_h(\text{Arms})$	$I_h(\text{pu})$	$[I_h(\text{pu})]^2$	FACTOR K	$f_h(\text{pu})$	$[f_h(\text{pu})]^2$	$[f_h(\text{pu})]^2 * h^2$
				$[I_h(\text{pu})]^2 * h^2$			
1	244,30	0,50790	0,25796542	0,257965	1	1	1
2	1,70	0,00354	0,00001254	0,000050	0,0069712	4,86E-05	0,0001944
3	5,35	0,01112	0,00012369	0,001113	0,021897	0,0004795	0,0043153
4	0,85	0,00177	0,00000312	0,000050	0,0034785	1,21E-05	0,0001936
5	12,59	0,02618	0,00068528	0,017132	0,0515411	0,0026565	0,066412
6	0,66	0,00138	0,00000191	0,000069	0,0027215	7,407E-06	0,0002666
7	4,98	0,01035	0,00010714	0,005250	0,0203798	0,0004153	0,0203515
8	0,47	0,00099	0,00000097	0,000062	0,0019394	3,761E-06	0,0002407
9	0,92	0,00191	0,00000366	0,000297	0,0037689	1,42E-05	0,0011506
10	0,19	0,00040	0,00000016	0,000016	0,0007864	6,185E-07	6,185E-05
11	1,82	0,00379	0,00001433	0,001734	0,007453	5,555E-05	0,0067212
13	6,85	0,01424	0,00020290	0,034289	0,028045	0,0007865	0,1329225
15	2,45	0,00509	0,00002592	0,005832	0,0100235	0,0001005	0,0226059
17	1,27	0,00263	0,00000694	0,002006	0,0051874	2,691E-05	0,0077768
19	1,87	0,00389	0,00001512	0,005457	0,007655	5,86E-05	0,0211541
21	1,00	0,00209	0,00000435	0,001918	0,0041063	1,686E-05	0,007436
23	0,30	0,00062	0,00000039	0,000206	0,0012285	1,509E-06	0,0007983
25	0,81	0,00168	0,00000283	0,001766	0,0033099	1,096E-05	0,0068473
27	0,56	0,00117	0,00000136	0,000993	0,0022974	5,278E-06	0,0038475
29	0,06	0,00011	0,00000001	0,000011	0,0002252	5,07E-08	4,264E-05
31	0,37	0,00076	0,00000058	0,000562	0,0015053	2,266E-06	0,0021776
33	0,28	0,00057	0,00000033	0,000359	0,0011308	1,279E-06	0,0013925
35	0,08	0,00016	0,00000003	0,000033	0,0003209	1,03E-07	0,0001261
TOTAL			0,2592	0,3372		1,0047	1,3070

Tabla 24. Cálculo para potencia armónica por efecto piel y corrientes de Eddy para el VSD Electrospeed III GCS con inversor de salida 6-STEP

H	$I_h(\text{Arms})$	$I_h(\text{pu})$	$[I_h(\text{pu})]^2$	FACTOR K	$f_h(\text{pu})$	$[f_h(\text{pu})]^2$	$[f_h(\text{pu})]^2 * h^2$
				$[I_h(\text{pu})]^2 * h^2$			
1	232,37	0,483	0,2333	0,23327	1	1	1
2	4,60	0,010	0,0001	0,00037	0,01980	0,00039	0,00157
3	6,18	0,013	0,0002	0,00149	0,02660	0,00071	0,00637
4	1,88	0,004	0,0000	0,00024	0,00810	0,00007	0,00105
5	54,37	0,113	0,0128	0,31932	0,23400	0,05476	1,36890
6	0,44	0,001	0,0000	0,00003	0,00190	0,00000	0,00013
7	15,99	0,033	0,0011	0,05410	0,06880	0,00473	0,23194
8	1,39	0,003	0,0000	0,00054	0,00600	0,00004	0,00230
9	0,58	0,001	0,0000	0,00012	0,00250	0,00001	0,00051
10	0,93	0,002	0,0000	0,00037	0,00400	0,00002	0,00160
11	8,92	0,019	0,0003	0,04162	0,03840	0,00147	0,17842
13	8,25	0,017	0,0003	0,04968	0,03550	0,00126	0,21298
15	0,28	0,001	0,0000	0,00008	0,00120	0,00000	0,00032
17	3,07	0,006	0,0000	0,01175	0,01320	0,00017	0,05036
19	5,25	0,011	0,0001	0,04301	0,02260	0,00051	0,18438
21	0,33	0,001	0,0000	0,00020	0,00140	0,00000	0,00086
23	3,09	0,006	0,0000	0,02183	0,01330	0,00018	0,09357
25	2,56	0,005	0,0000	0,01764	0,01100	0,00012	0,07563
27	0,28	0,001	0,0000	0,00024	0,00120	0,00000	0,00105
29	2,02	0,004	0,0000	0,01485	0,00870	0,00008	0,06366
31	0,88	0,002	0,0000	0,00324	0,00380	0,00001	0,01388
33	0,14	0,000	0,0000	0,00009	0,00060	0,00000	0,00039
35	0,95	0,002	0,0000	0,00480	0,00410	0,00002	0,02059
TOTAL			0,2483	0,8189		1,0645	3,5105

Para conocer el valor de la corriente armónica por corrientes de Eddy en términos de “pu” se calcula de la siguiente manera:

$$P_{EC}(\text{pu}) = \frac{P_{ECnom}}{I^2 R_{nom}} \quad (42)$$

Donde:

$P_{EC}(\text{pu})$: Potencia armónica por circulación de corrientes de Eddy en el transformador elevador en “pu”

P_{ECnom} : Potencia armónica por circulación de corrientes de Eddy en el transformador elevador condición nominal, (Vatio)

I^2R_{nom} : Potencia armónica por efecto piel en el transformador elevador a condición nominal, (Vatio)

Reemplazando en la **ecuación 42** con los datos de placa del transformador elevador se obtiene el siguiente resultado:

$$P_{EC}(pu) = \frac{636 [Vatio]}{4243,2 [Vatio]}$$

$$P_{EC}(pu) = 0,1498(pu)$$

Aplicando respectivamente en la **ecuación 32 y 34** en términos de “pu” se calcula la potencia armónica de carga total y potencia armónica por circulación de corrientes de Eddy en el devanado primario del transformador elevador respectivamente para los dos tipos de VSD:

Cálculo para el VSD Vector Plus con inversor F-PWM:

$$P_{Carga}(pu) = (1) * (0,2592) + (0,1498) * (0,3372) = 0,3097$$

$$P_{Carga} = 0,3097 * (4243,2(W)) = 1314,11(W)$$

$$P_{EC}(pu) = 0,1498 * 0,3372 = 0,0505$$

$$P_{EC} = 0,0505 * 636(W) = 32,118(W)$$

Cálculo para el VSD Electrospeed III GCS con inversor 6-STEP:

$$P_{Carga}(pu) = (1) * (0,2483) + (0,1498) * (0,8189) = 0,371$$

$$P_{Carga} = 0,371 * (4243,2(W)) = 1574,23(W)$$

$$P_{EC}(pu) = 0,1498 * 0,8189 = 0,1227$$

$$P_{EC} = 0,1227 * 636(W) = 78,04(W)$$

La potencia armónica de carga en el transformador elevador para en el caso del VSD con inversor F-PWM es el 30,97% y para el VSD con inversor de salida 6-STEP es el 37,1% de la potencia armónica máxima de carga permitida por el fabricante. Análisis similar se deberá realizar para conocer la corriente armónica de carga máxima permisible para no causar calentamiento excesivo en el equipo, este se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_{max}(pu) = \left[\frac{P_{carga_{nom}}(pu)}{1 + Pec_{nom}(pu) * \frac{\sum_{h=1}^{hmax} [(f_h(pu))^2 * h^2]}{\sum_{h=1}^{hmax} [(f_h(pu))^2]}} \right]^{1/2} \quad (43)$$

Cálculo para el VSD Vector Plus con inversor F-PWM:

$$I_{max}(pu) = \left[\frac{1(pu) + 0,1498(pu)}{1 + 0,1498(pu) * \frac{1,370}{1,047}} \right]^{1/2}$$

$$I_{max}(pu) = 0,98$$

$$I_{max}(A) = 0,98(pu) * 481,12(A) = 470,1(A)$$

Cálculo para el VSD Electrospeed III GCS con inversor 6-STEP:

$$I_{max}(pu) = \left[\frac{1(pu) + 0,1498(pu)}{1 + 0,1498(pu) * \frac{3,5105}{1,0645}} \right]^{1/2}$$

$$I_{max}(pu) = 0,88$$

$$I_{max}(A) = 0,88(pu) * 481,12(A) = 422,1(A)$$

En el caso del transformador elevador con el inversor F-PWM mantiene una capacidad reducida a 98%, mientras que con el inversor 6-STEP disminuye su capacidad a 88%, en conclusión, el transformador elevador soportara una corriente armónica de carga máxima de 470,1 A y 422,1 A respectivamente sin ocasionar daños por sobrecalentamiento.

En las **tablas 25 y 26** se presenta la potencia armónica de carga calculada y la corriente armónica de carga máxima permisible en el transformador elevador multifrecuencial para

los VSD de los sistemas BES de las unidades SCHAA-301 y SCH-007 con inversor de salida 6-STEP y F-PWM respectivamente.

Las **figuras 80 y 81** representan la tendencia de incremento progresivo de la potencia armónica de carga debido al efecto piel ($[I_h(pu)]^2$) y por circulación de corrientes de Eddy ($[I_h(pu)]^2 * h^2$):

Tabla 25. Potencia y corriente armónica por efecto piel y corrientes de Eddy VSD F-PWM SCH-007 a $F_n = 45 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}, 55 \text{ Hz}, 60 \text{ Hz}$

Frecuencia (Hz)	Potencia Armónica Efecto Piel y Corrientes Eddy				Potencia Armónica Carga Total				Corriente Máxima	
	[Ih(pu)] ²	[Ih(pu)] ² *h ²	[fh(pu)] ²	[fh(pu)] ² *h ²	PcargaTot (Pu)	PcargaTot (W)	Pec(pu)	Pec (W)	I _{max} (pu)	I _{max} (A)
45	0.11	0.12	1.00	1.13	0.1251	530.98	0.02	11.47	0.99	477.27
50	0.17	0.20	1.00	1.14	0.2014	854.71	0.03	18.65	0.99	476.86
55	0.24	0.31	1.00	1.34	0.2818	1195.91	0.05	29.79	0.98	471.09
60	0.26	0.34	1.00	1.37	0.3097	1314.17	0.05	32.13	0.98	470.11

Tabla 26. Potencia y corriente armónica por efecto piel y corrientes de Eddy VSD 6-STEP SCHAA-301 a $F_n = 45 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}, 55 \text{ Hz}, 60 \text{ Hz}$

Frecuencia (Hz)	Potencia Armónica Efecto Piel y Corrientes Eddy				Potencia Armónica Carga Total				Corriente Máxima	
	[Ih(pu)] ²	[Ih(pu)] ² *h ²	[fh(pu)] ²	[fh(pu)] ² *h ²	PcargaTot (Pu)	PcargaTot (W)	Pec(pu)	Pec (W)	I _{max} (pu)	I _{max} (A)
45	0.11	0.63	1.11	6.46	0.2034	862.87	0.09	60.33	0.78	376.84
50	0.15	0.56	1.09	5.27	0.2300	976.12	0.08	53.32	0.82	393.15
55	0.22	0.85	1.07	4.12	0.3481	1476.98	0.13	80.70	0.85	411.25
60	0.25	0.82	1.06	3.51	0.3710	1574.11	0.12	78.02	0.88	422.07

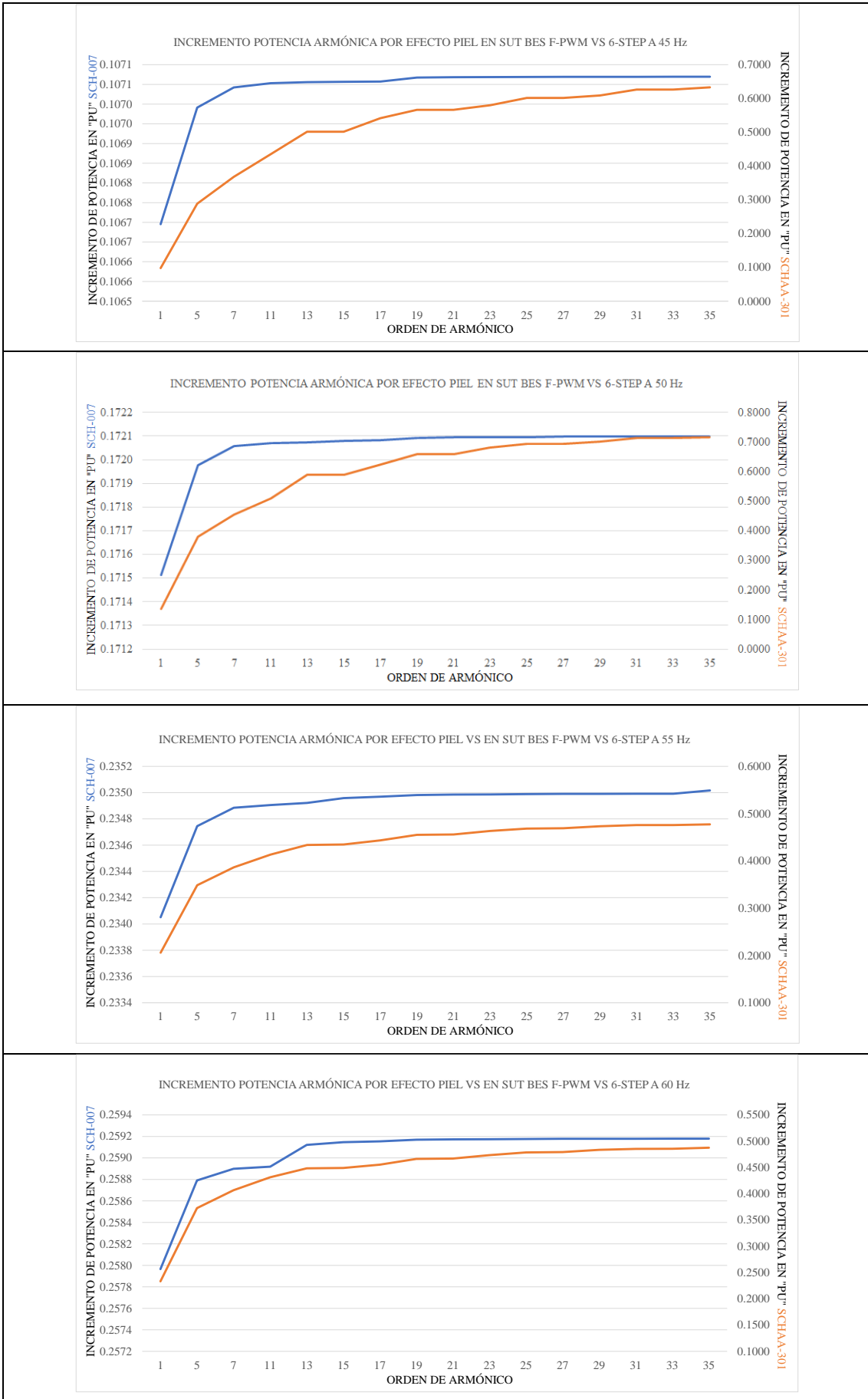


Figura 80. Incremento progresivo de la potencia armónica por efecto piel en SUT

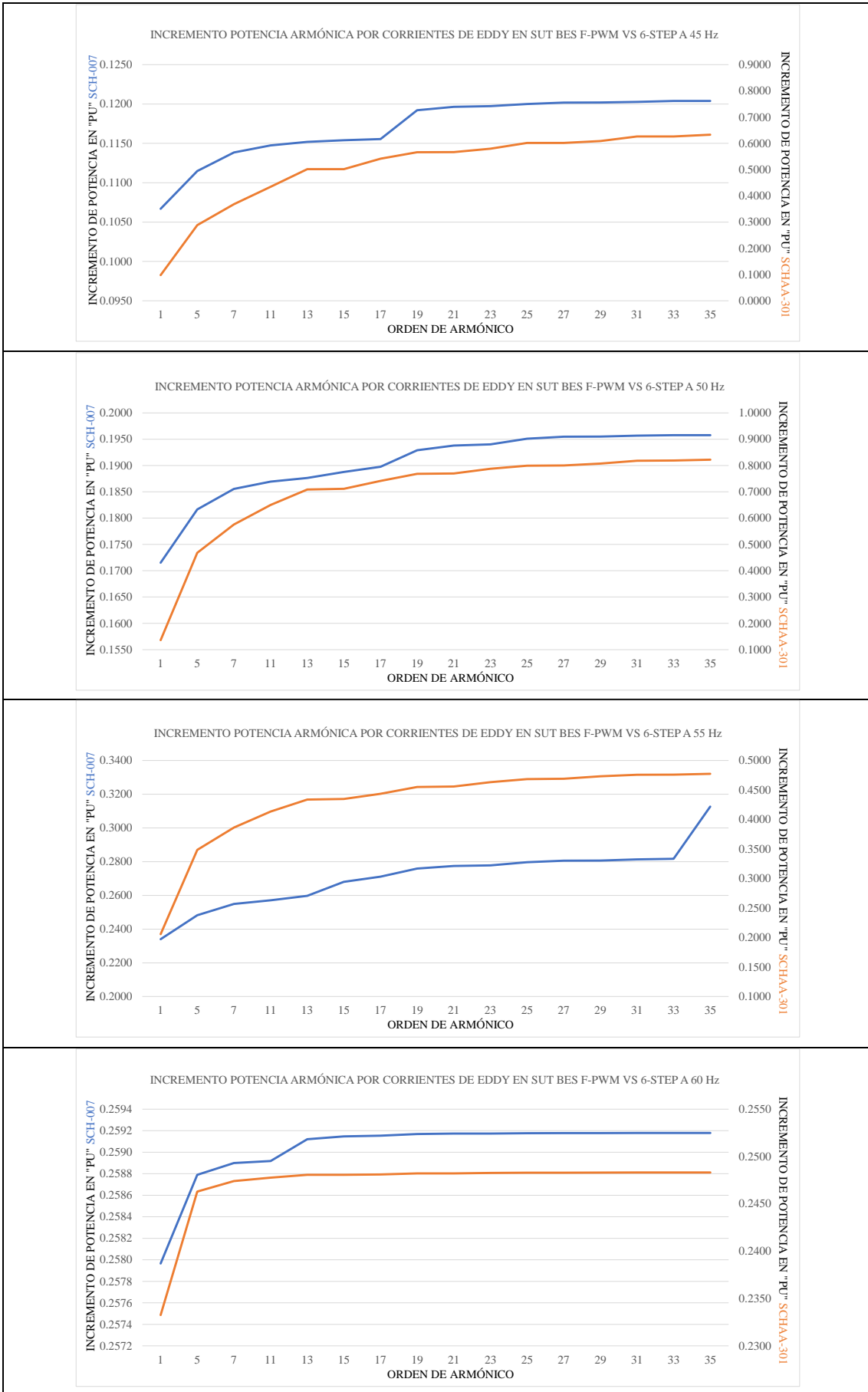


Figura 81. Incremento progresivo de la potencia armónica por Corrientes Eddy en SUT

3.6.4.2 Potencia armónica de carga en el equipo de fondo

En esta sección se procede a determinar el efecto que tiene el espectro armónico que se mide en el punto de acoplamiento del VSD-SUT en los dos tipos de topología de inversor de frecuencia variable que representan parte del estudio.

3.6.4.2.1 Cable eléctrico de potencia sistema electrosumergible

La potencia armónica de carga máxima que soporta el cable eléctrico de potencia se calcula de la siguiente forma:

$$P_{I^2R_{cable_nom}} = I^2_{cable_max} * R \quad (44)$$

Donde:

$P_{I^2R_{cable_nom}}$: Potencia armónica carga máxima cable de potencia, (Vatio)

I_{cable_max} : Corriente máxima que circula en el cable eléctrico de potencia, (A)

R : Resistencia del cable eléctrico en función de su longitud final, (Ohmio)

Así, la corriente armónica de carga máxima que circulara por el cable eléctrico de potencia es la corriente de placa del motor electrosumergible.

$$I_{cable_max} = I_{nom_mot} \quad (45)$$

$$I_{cable_max} = 84(A)$$

De las **tablas 7 y 8** se obtiene la información técnica del cable de potencia plano #2 AWG instalado en los sistemas de bombeo electrosumergible analizados. Para el sistema BES con inversor F-PWM con una longitud de 9168,9 *pies* se calcula una $R = 2,603 \Omega$; mientras que para el sistema BES con inversor 6-STEP con una longitud de 9598,3 *pies* se calcula una $R = 2,725 \Omega$.

Utilizando la **ecuación 44** la potencia armónica máxima del cable eléctrico de potencia para el sistema BES con inversor F-PWM, se calcula:

$$P_{I^2R_{cable_nom}} = 84^2(A) * 2,603\Omega$$

$$P_{I^2 R_{cable_nom}} = 18366,77(W)$$

La potencia armónica máxima del cable eléctrico de potencia para el sistema BES con inversor 6-STEP, se calcula:

$$P_{I^2 R_{cable_nom}} = 84^2(A) * 2,725\Omega$$

$$P_{I^2 R_{cable_nom}} = 19227,6(W)$$

La conexión del devanado primario de transformador por diseño se encuentra en **DELTA**, mientras que la configuración del devanado secundario se encuentra en **1-7 Y (1905V)**, con estos datos podemos obtener la relación de transformación, dato que se requiere para calcular la potencia armónica de carga que circula por el cable eléctrico.

$$\frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{V_{pri}}{V_{sec}} = \frac{I_{sec}}{I_{pri}} \quad (46)$$

Donde:

$\frac{a}{\sqrt{3}}$: Relación de transformación transformador elevador

V_{pri} : Voltaje primario, (Voltio eficaz)

V_{sec} : Voltaje secundario, (Voltio eficaz)

I_{sec} : Corriente secundario, (Amperio eficaz)

I_{pri} : Corriente primario, (Amperio eficaz)

Calculando la relación de transformación en base a la **ecuación 46**:

$$a = \frac{V_{pri}}{\frac{V_{sec}}{\sqrt{3}}} = \frac{480(V)}{\frac{1905(V)}{\sqrt{3}}} = \frac{480(V)}{1099,88(V)} = 0,436$$

Para el cálculo del contenido armónico de corriente que circula por el cable eléctrico de potencia, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_{S_h} = \frac{a}{\sqrt{3}} * I_{p_h} \quad (47)$$

Donde:

I_{S_h} : Corriente devanado primario transformador elevador medida en el PCC, al armónico de orden h, (Amperio eficaz)

I_{p_h} : Corriente devanado secundario transformador elevador al armónico de orden $h(1, 2, 3 \dots)$, que circula por el cable eléctrico de potencia, (Amperio eficaz)

Tabla 27. Cálculo para potencia armónica de carga en el cable eléctrico de potencia inductor de salida F-PWM

Orden de armónico	I_{p_h}	I_{S_h}	$I_h(pu)$	$[I_h(pu)]^2$
			I_{S_h}/I_{cable_max}	
1	244,301325	61,55624	0,73281	0,53701397
2	1,70307145	0,42912	0,00511	0,00002610
3	5,34947096	1,34790	0,01605	0,00025749
4	0,84979649	0,21412	0,00255	0,00000650
5	12,5915491	3,17267	0,03777	0,00142657
6	0,66487172	0,16753	0,00199	0,00000398
7	4,97881246	1,25450	0,01493	0,00022304
8	0,47379896	0,11938	0,00142	0,00000202
9	0,92074095	0,23200	0,00276	0,00000763
10	0,19212439	0,04841	0,00058	0,00000033
11	1,82077292	0,45878	0,00546	0,00002983
13	6,85143874	1,72635	0,02055	0,00042237
15	2,44875675	0,61701	0,00735	0,00005395
17	1,2672929	0,31932	0,00380	0,00001445
19	1,87011855	0,47121	0,00561	0,00003147
21	1,00317243	0,25277	0,00301	0,00000905
23	0,30011851	0,07562	0,00090	0,00000081
25	0,80862121	0,20375	0,00243	0,00000588
27	0,56124589	0,14142	0,00168	0,00000283
29	0,05500825	0,01386	0,00017	0,00000003
31	0,3677463	0,09266	0,00110	0,00000122
33	0,27625464	0,06961	0,00083	0,00000069
35	0,07838675	0,01975	0,00024	0,00000006
TOTAL				0,53954027

Tabla 28. Cálculo para potencia armónica de carga en el cable eléctrico de potencia inversor de salida 6-STEP

Orden de armónico	I_{p_h}	I_{S_h}	$I_h(pu)$	$[I_h(pu)]^2$
			I_{S_h}/I_{cable_max}	
1	232,3700	58,55	0,69702	0,4858409
2	4,6009	1,16	0,01380	0,0001905
3	6,1810	1,56	0,01854	0,0003438
4	1,8822	0,47	0,00565	0,0000319
5	54,3746	13,70	0,16310	0,0266027
6	0,4415	0,11	0,00132	0,0000018
7	15,9871	4,03	0,04796	0,0022997
8	1,3942	0,35	0,00418	0,0000175
9	0,5809	0,15	0,00174	0,0000030
10	0,9295	0,23	0,00279	0,0000078
11	8,9230	2,25	0,02677	0,0007164
13	8,2491	2,08	0,02474	0,0006123
15	0,2788	0,07	0,00084	0,0000007
17	3,0673	0,77	0,00920	0,0000847
19	5,2516	1,32	0,01575	0,0002481
21	0,3253	0,08	0,00098	0,0000010
23	3,0905	0,78	0,00927	0,0000859
25	2,5561	0,64	0,00767	0,0000588
27	0,2788	0,07	0,00084	0,0000007
29	2,0216	0,51	0,00606	0,0000368
31	0,8830	0,22	0,00265	0,0000070
33	0,1394	0,04	0,00042	0,0000002
35	0,9527	0,24	0,00286	0,0000082
TOTAL				0,5172001

Con la **ecuación 33** se procede a calcular la potencia armónica de carga debido al efecto piel en “pu” para el cable eléctrico de potencia considerando la potencia armónica por efecto piel máxima en el cable eléctrico de potencia como potencia base ($I^2R_{nom}(pu) = 1(pu)$), entonces se determina de la siguiente forma.

Para el sistema BES con VSD con inversor de salida F-PWM:

$$I^2R = I^2R_{nom}(pu) * \sum_{h=1}^{hmax} [(I_h(pu))^2]$$

$$I^2R(pu) = 1(pu) * (0,53954027) = 0,54$$

$$I^2R = 0,54 * 18366,77(W) = 9918,06(W)$$

Para el sistema BES con VSD con inversor de salida 6-STEP:

$$I^2R = I^2R_{nom}(pu) * \sum_{h=1}^{hmax} [(I_h(pu))^2]$$

$$I^2R(pu) = 1(pu) * (0,5172001) = 0,52$$

$$I^2R = 0.52 * 19227,6(W) = 9998,35(W)$$

En el cable eléctrico de los sistemas de bombeo electrosumergible la potencia armónica de carga utilizando el VSD con inversor F-PWM es de 54 % (9918,06W), mientras que con el VSD con inversor 6-STEP es de 52 % (9998,35W), estos valores nos indican que no estamos en presencia de un incremento de temperatura en el cable como incidencia de presencia de contenido armónico de corriente.

A continuación, se representa en la **figura 82** el incremento progresivo de la potencia armónica de carga en el cable eléctrico por Efecto Piel $[I_h(pu)]^2$.

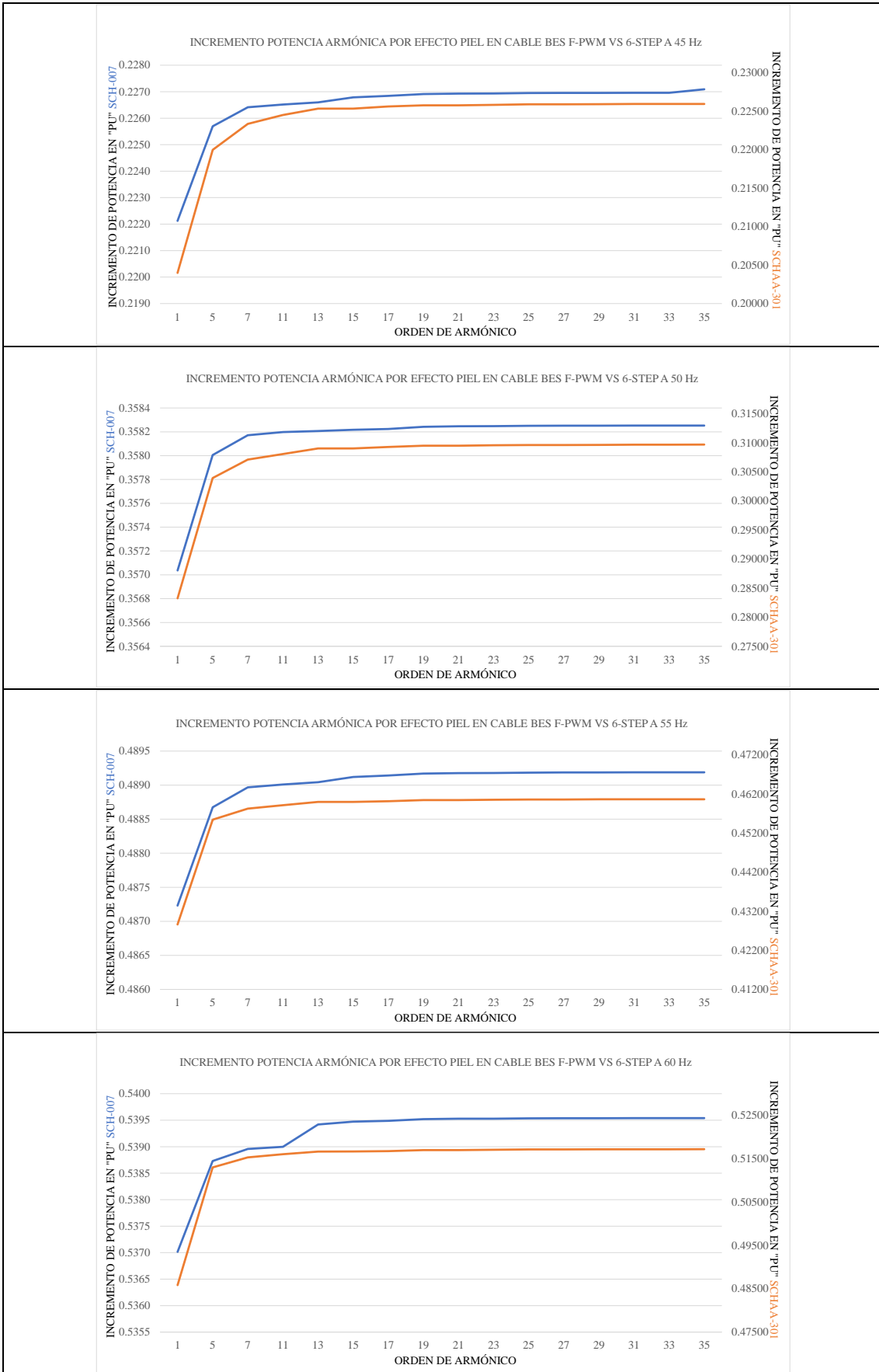


Figura 82. Incremento progresivo de la potencia armónica por Corrientes Eddy cable BES

3.6.4.2.2 Motor sistema electrosumergible BH

La información técnica del motor electrosumergible proporcionada por el fabricante se encuentra en la **tabla 9**, el dato de la R_{f-f} se obtiene del reporte de protocolo de pruebas registrándose el valor en $1,09 \Omega$.

La potencia armónica de carga máxima en el motor electrosumergible se obtiene cuando circula la corriente nominal, se determina como:

$$P_{mtr_max} = I_{mtr_nom}^2 * R_{f-f} \quad (48)$$

Utilizando la **ecuación 48**, se calcula la potencia armónica de carga máxima en el motor electrosumergible como:

$$P_{mtr_max} = [84(A)]^2 * 1,09(\Omega)$$

$$P_{mtr_max} = 7691,04(W)$$

Aplicando la **ecuación 33** se calcula la potencia armónica debido al efecto piel en el motor electrosumergible en “pu” considerando la potencia de carga máxima en el motor que se calcula como potencia base ($I^2 R_{nom}(pu) = 1(pu)$).

Entonces se calcula para el sistema BES con VSD con inversor de salida F-PWM:

$$I^2 R = I^2 R_{nom}(pu) * \sum_{h=1}^{hmax} [(I_h(pu))^2]$$

$$I^2 R(pu) = 1(pu) * (0,53954027) = 0,54$$

$$I^2 R = 0,54 * 7691,04(W) = 4153,16(W)$$

Y para el sistema BES con VSD con inversor de salida 6-STEP:

$$I^2 R = I^2 R_{nom}(pu) * \sum_{h=1}^{hmax} [(I_h(pu))^2]$$

$$I^2 R(pu) = 1(pu) * (0,5172001) = 0,52$$

$$I^2 R = 0,52 * 7691,04(W) = 3999,34(W)$$

La potencia armónica de carga en el motor electrosumergible con alimentación de VSD con inversor F-PWM está en 54% (4153,16 W) y con alimentación de VSD con inversor 6-STEP se encuentra en 52% (3999,34 W) de la potencia armónica de carga máxima que se calcula.

En la **tabla 29** y **30** se presenta el resultado de cálculo del *Factor K* del motor electrosumergible con alimentación de onda F-PWM y 6-STEP:

Tabla 29. Factor K motor BES unidad SCH-007 F-PWM

SCH-007 (F-PWM)	45 Hz	50 Hz	55 Hz	60 Hz
Factor K	0.128	0.141	0.336	0.307
Factor de desclasificación 1/K	0.994	0.993	0.984	0.985
	0.636%	0.700%	1.639%	1.501%

Tabla 30. Factor K motor BES unidad SCHAA-301 6-STEP

SCHAA-301 (6-STEP)	45 Hz	50 Hz	55 Hz	60 Hz
Factor K	5.465	4.269	3.116	2.510
Factor de desclasificación 1/K	0.804	0.837	0.873	0.894
	19.586%	16.284%	12.681%	10.595%

3.6.5 Porcentaje de carga equipos BES con inversor de salida F-PWM y 6-STEP

El porcentaje de carga de acuerdo a las mediciones eléctricas tomadas en el punto de acoplamiento común VSD-SUT se calcula para una sola fase, sabiendo que será el mismo para las 2 fases restantes.

El porcentaje de carga en el variador de velocidad, se estima como la relación entre la potencia aparente total calculada en el punto de acoplamiento VSD-SUT y la potencia nominal de placa del VSD, se define como:

$$\% \text{ Carga VSD} = \frac{S_{PCC}}{S_{nom VSD}} \quad (49)$$

Donde:

S_{PCC} Potencia aparente total en el punto de acoplamiento VSD-SUT, (VA)

$S_{nom VSD}$ Potencia aparente nominal del VSD, (VA)

El porcentaje de carga del transformador elevador es la relación entre la potencia aparente total en el punto de acoplamiento VSD-SUT y la potencia nominal de placa del equipo, definida como:

$$\% \text{ Carga SUT} = \frac{S_{PCC}}{S_{nom \text{ SUT}}} \quad (50)$$

Donde:

S_{PCC} Potencia aparente total en el punto de acoplamiento VSD-SUT, (VA)

$S_{nom \text{ SUT}}$ Potencia aparente nominal del SUT, (VA)

La potencia aparente total en el punto de acoplamiento VSD-SUT se determina mediante la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{3} * V_{rms} I_{rms} \quad (51)$$

Donde:

V_{rms} Voltaje eficaz total en el punto de acoplamiento VSD-SUT, (V)

I_{rms} Corriente eficaz total en el punto de acoplamiento VSD-SUT, (A)

El porcentaje de carga en el motor electrosumergible, es la relación entre la corriente que circula por el cable eléctrico de potencia y la corriente nominal del motor, se determina con la siguiente formula:

$$\% \text{ Carga MTR BES} = \frac{I_{Cable}}{I_{nom \text{ Mtr}}} \quad (52)$$

Donde:

I_{Cable} Corriente armónica total circulante en cable BES, (A)

$I_{nom \text{ Mtr}}$ Corriente nominal del motor electrosumergible, (A)

A continuación, las **tablas 31 y 32**, se indican las cargas calculadas para el equipo de superficie y fondo de los sistemas electrosumergibles analizados:

Tabla 31. Cálculo cargas equipo de fondo y superficie unidad SCH-007 F-PWM

FREQ (Hz)	VSD / SUT		MOTOR	VSD (%)	SUT (%)	MOTOR (%)
	<i>Vrms</i>	<i>Arms</i>	<i>Arms</i>	301 KVA	400 KVA	84 A
45	327,75	158,97	40,06	29,98	22,56	47,69
50	363,62	200,65	50,56	41,98	31,59	60,19
55	399,53	233,22	58,76	53,62	40,35	69,96
60	434,31	245,08	61,75	61,25	46,09	73,51

Tabla 32. Cálculo cargas equipo de fondo y superficie unidad SCHAA-301 6-STEP

FREQ (Hz)	VSD / SUT		MOTOR	VSD (%)	SUT (%)	MOTOR (%)
	<i>Vrms</i>	<i>Arms</i>	<i>Arms</i>	390 KVA	400 KVA	84 A
45	356,33	160,99	40,56	25,48	24,84	48,29
50	395,91	188,65	47,53	33,17	32,34	56,59
55	434,45	228,34	57,53	44,06	42,96	68,49
60	473,64	252,12	63,53	53,03	51,71	75,63

3.6.6 Análisis de resultados distorsión armónica total en el punto de acoplamiento VSD-SUT

En esta sección se analiza el efecto del contenido armónico de voltaje y corriente presente en el punto de acoplamiento VSD-SUT. A continuación, se observan en las **figuras 83 y 84** las formas de onda de voltaje y corriente de las tecnologías de inversión de los VSDs estudiados.

Figura 83. Forma de onda de voltaje y corriente VSD con inversor 6-STEP

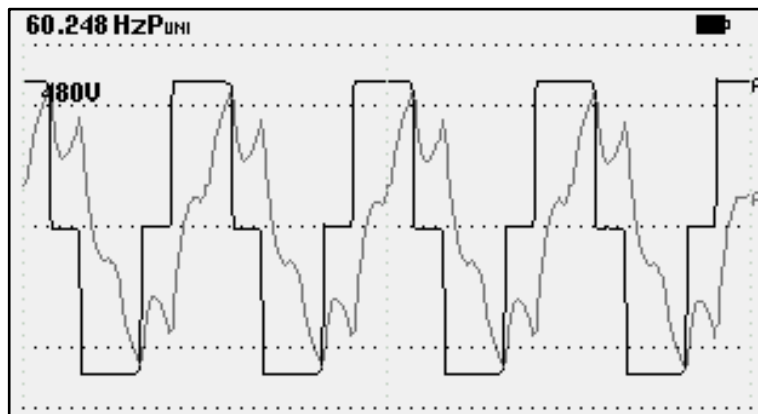
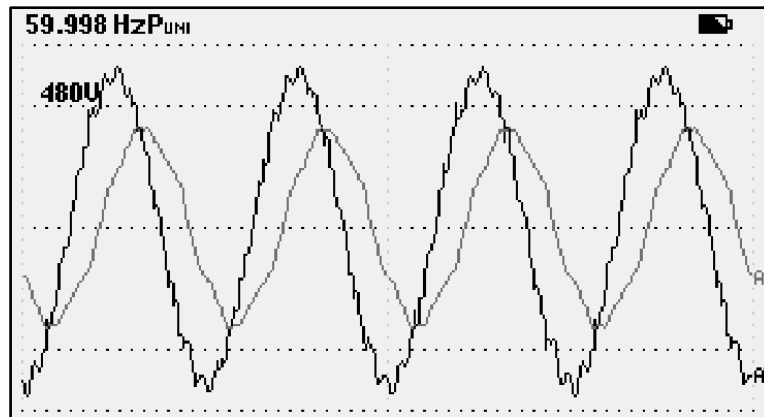


Figura 84. Forma de onda de voltaje y corriente VSD con inversor F-PWM



En la **tabla 29** se consolida de forma detallada las principales características de la potencia armónica generada por los VSD con topología de inversor de salida F-PWM y 6-STEP utilizados en aplicaciones de bombeo electrosumergible y horizontal en los que se ha implementado la metodología de medición desarrollada en este estudio:

Tabla 33. Análisis de calidad de energía suministrada en sistema BES y HPS con VSD inversor de salida F-PWM

VARIADOR VECTOR PLUS CON SALIDA F-PWM
Garantiza el cumplimiento de la normativa IEEE 519-1992 / IEC 61000-2-4.
<i>THD_v</i> cumple el límite 45 Hz: 1,81% / 50 Hz: 4,02 % / 55 Hz: 4,72 % y 60 Hz: 5,00%.
Armónicas individuales de baja frecuencia de voltaje 5, 7, 11, 13 predominan en el sistema y su magnitud aumenta con el incremento de <i>F_n</i> .
Predomina armónicos individuales de voltaje de alta frecuencia próximos a <i>F_n</i> e incrementan con el aumento de frecuencia fundamental.
<i>THD_i</i> cumple el límite 45 Hz: 5,93% / 50 Hz: 5,87 % / 55 Hz: 6.36 % y 60 Hz: 6,90%.
Armónicos de corriente individuales de baja frecuencia cumplen la normativa a excepción de la componente 5.
A <i>F_n</i> = 55 Hz y 60 Hz incrementan los armónicos individuales de corriente 5, 7, 11, 13 debido a sobre modulación.
En la parte del espectro de alta frecuencia se observa que con el incremento de <i>F_n</i> aumenta magnitud de bandas laterales alrededor del múltiplo de la portadora.
En el sistema HPS de la unidad SCHN-002 el <i>THD_v</i> y contenido armónico individual cumple la normativa 50 Hz: 4,3% / 55 Hz: 3,3 %.
En el sistema HPS de la unidad SCHN-002 el <i>THD_i</i> y contenido armónico individual cumple la normativa 50 Hz: 1,6% / 55 Hz: 2,6 %.
TRANSFORMADOR ELEVADOR: Potencia armónica de carga 45 Hz: 12,5 % / 50 Hz: 20,14% / 55Hz: 28,18 % / 60 Hz: 30,97%.
TRANSFORMADOR ELEVADOR: Corriente armónica de carga máxima, capacidad reducida a 45 Hz: 99 % / 50 Hz: 99 % / 55Hz: 98 % / 60 Hz: 98 %.
CABLE BES y MOTOR: con VSD F-PWM la potencia armónica de carga es del 54%

Tabla 34. Análisis de calidad de energía suministrada en sistema BES con VSD inversor de salida 6-STEP

UNIDAD BES SCHAA-301 (VSD 6-STEP)
VSD 6-STEP supera el límite recomendado por la normativa IEEE 519-1992 / IEC 61000-2-4
<i>THD_v</i> supera el límite recomendado 45 Hz: 29,53 % / 50 Hz: 29,62 % / 55 Hz: 29,62 % y 60 Hz: 29,59 %.
Componente armónica individual de baja frecuencia 5, 7, 11, 13 y otros impares superan el límite recomendado por la normativa.
Predomina armónicos individuales de voltaje de alta frecuencia próximos a F_n e incrementan con el aumento de frecuencia fundamental.
En la parte alta del espectro de tensión carece de contenido armónico de cierta amplitud, por lo que no podría presentar resonancia.
El porcentaje elevado de contenido armónico está relacionado con el diseño del variador de frecuencia con onda de salida 6-STEP
<i>THD_i</i> no garantiza el cumplimiento de la normativa 45 Hz: 32,85 % / 50 Hz: 30,56 % / 55 Hz: 27,35 % y 60 Hz: 25,41 %.
En la parte baja del espectro de corriente predominan componentes de orden impar 5, 7, 11, 13 debido a la naturaleza discontinua de la onda 6-STEP.
TRANSFORMADOR ELEVADOR: Potencia armónica de carga 45 Hz: 20,34 % / 50 Hz: 23; 00 % / 55Hz: 34,81 % y 60 Hz: 37,10 %.
TRANSFORMADOR ELEVADOR: Corriente armónica de carga máxima, capacidad reducida a 45 Hz: 78 % / 50 Hz: 82 % / 55Hz: 85 % / 60 Hz: 88 %.
CABLE BES y MOTOR: con VSD F-PWM la potencia armónica de carga es del 52%

CONCLUSIONES

Se ha realizado la caracterización de variadores de frecuencia con inversor de salida F-PWM y 6-STEP que alimentan motores de inducción electrosumergibles y de superficie en función de sus espectros armónicos generados, se ha utilizado una metodología y procedimiento de ensayos experimentales basados en la normativa de medidas de calidad de red eléctrica IEEE 519-1992, IEC 61000-2-4 y estudios previos. Finalmente se pudo conocer la calidad de la energía generada por los equipos y caracterizar estas señales en MatLab Simulink para el estudio de las señales procesadas; así como el respectivo análisis del contenido armónico producido en el motor y su accionamiento, concluyendo lo siguiente:

Se desarrollo e implemento una metodología de caracterización práctica para variadores con inversor de salida F-PWM y 6-STEP, en función de la calidad de potencia entregada a la carga, se realizó un plan de ensayos experimentales, con sus respectivas medidas y análisis de los sistemas de bombeo electrosumergible y horizontales alimentados con onda de salida F-PWM y 6-STEP, determinando el espectro armónico y su influencia en el motor eléctrico.

Para el variador de frecuencia Vector Plus, con salida F-PWM se evidencia que el $THDv \leq 5\%$ y $THDi \leq 10\%$ medido en el punto de acoplamiento VSD-SUT para BES y VSD-MOTOR para HPS, se determina que estos valores se encuentran dentro de los límites que recomiendan las normas IEEE 519-1992 e IEEE-61000-2-4. En este estudio se ha determinado que al incrementar la frecuencia fundamental hasta el valor nominal de 60 Hz se registra un incremento del $THDv$ característico para motores accionados por PWM, pudiendo encontrar ciertas frecuencias de resonancia mecánica y ruido magnético que pueden ocasionar incrementos globales en el nivel de ruido del motor y fuerzas producidas que pueden excitar ciertos modos de vibración.

Para el variador de frecuencia Electrospeed III GCS, con salida 6-STEP registra un $THDv \approx 5\%$ y $THDi = 25\%$ y 33% medido en el punto de acoplamiento VSD-SUT, estos valores no cumplen los límites que recomiendan las normas IEEE 519-1992 y IEEE-61000-2-4 tomados como referencia para este estudio. En este tipo de topología de inversor el $THDv$ en la parte alta del espectro presenta atenuación de los componentes

armónicos individuales, por lo que no se encuentra cerca de la frecuencia de resonancia típica de un equipo de fondo (4 KHz). El porcentaje elevado de contenido armónico está relacionado con el diseño del variador de frecuencia con onda de salida 6-STEP.

La potencia armónica de carga calculada para los equipos de superficie y de fondo debido al contenido armónico de corriente no superan los valores máximos que permiten los sistemas, por lo que este contenido armónico no tiene incidencia sobre los mismos.

RECOMENDACIONES

Para realizar las mediciones de las señales en las salidas de los variadores comerciales se requieren ciertas características que los analizadores de energía que se encuentran en el mercado no disponen, por lo tanto, sería recomendable desarrollar un sistema de medida y análisis.

En este proyecto para la caracterización de los sistemas estudiados se consideró el motor de inducción con valores típicos y alimentado por tensiones de onda no sinusoidal equilibradas, pero en el sector industrial los sistemas de potencia presentan desbalance entre sus fases por lo que se sugiere utilizar un método de estimación de eficiencia, temperatura y desclasificación de los parámetros del motor para condiciones en estado estacionario, régimen transitorio y con presencia de condiciones armónicas.

Finalmente, debido a las limitaciones en cuanto a software en la industria, se recomienda el desarrollo de un lenguaje de programación libre que permita estimar in situ la eficiencia y temperatura de operación de motores de inducción electrosumergibles con presencia de armónicos y desequilibrio de tensión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. L. J. D. C. G. Guillermo Camacho, Artist, *Caracterización de las técnicas de modulación Pulse Width Modulation (PWM) aplicadas a inversores trifásicos*. [Art]. Universidad de La Salle, Bogotá, 2021.
- [2] J. D. Arcila, «ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS,» Ingeniería Especializada S.A., Bogota, 2018.
- [3] G. Lemieux, «Power System Harmonic Resonance - A Documented Case,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, n° 3, pp. 483-488, May/Jun 1990.
- [4] A. C. L. Caiza, Artist, *Desarrollo e implementación de una estación de medición para la evaluación de efectos que producen las señales de los variadores de frecuencia en los motores eléctricos trifásicos*. [Art]. ESPOCH, 2014.
- [5] A. Tejada y A. Llamas, Artists, *EFFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS*. [Art]. ITESM, 2016.
- [6] IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, «IEEE Std. 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems.,» IEEE Press, New York, 1993.
- [7] J. Peralta, P. Reyes y A. Godínez, Artists, *El fenómeno de la resonancia*. [Art]. Escuela Superior de Física y Matemáticas Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- [8] E. Rubiano, «Análisis de comportamiento de pozos con sistemas de bombeo electrosumergible.,» Schlumberger., 2015.
- [9] J. E. Hernandez, Artist, *Elaboración de un Portafolio de Servicios Técnicos y Administrativos para Bombas Electrosumergibles*. [Art]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander., 2016.
- [10] L. Cabascango, Artist, *DISEÑO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS PARA LA AMPLIACIÓN DE UNA PLATAFORMA PETROLERA UBICADA EN EL BLOQUE 66*. [Art]. Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [11] D. Lucía y B. Diaz, Artists, *Estudio y diseño de un sistema cerrado de reinyección de agua de formación para la Estación Central del Campo Sacha*. [Art]. Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [12] Baker Hughes Services International, *The Baker Hughes Submersible Pump Handbook*, Claremore, OK: Baker Hughes, 2011.
- [13] Baker Hughes Services International, *HPump: Specification for Multistage Centrifugal Surface Pumps*, Claremore OK: Baker Hughes, 2015.
- [14] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, México DF: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2012.

- [15] TECO WESTINGHOUSE, Operation and maintenance Manual for a Three Phase Induction Motors, Round Rock, Tx.: TECO WESTINGHOUSE MOTOR COMPANY, 2016.
- [16] L. Farina, «Motores eléctricos trifasicos: usos, componentes y funcionamiento,» *Suplemento Instaladores*, vol. 3, n° 26, pp. 69-72, 2018.
- [17] Baker, SKF Group, «Revista Electroindustria,» Editora Microbyte Ltda., Septiembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1254>. [Último acceso: 3 Marzo 2022].
- [18] B. Infante y A. Jimenez, Artists, *Estudio para la optimización del consumo de energía en el sistema de extracción de petróleo en el Bloque 43*. [Art]. Universidad Central del Ecuador, 2020.
- [19] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones.*, México DF: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 2004.
- [20] D. López, G. Camacho, J. Díaz y C. Gaviria, Artists, *MODULACIÓN PWM APLICADA A INVERSORES TRIFÁSICOS DENTRO DEL ESQUEMA DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS AC.*. [Art]. Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET), 2007.
- [21] B. G. Liptak, *Instrument Engineers' Handbook*, Londres: Process Control Londres: Editor in Chief, 1995.
- [22] A. A.-G. Duberney Murillo-Yarce1, Artist, *Comparative analysis of predictive current control of VSI converters in the connection of renewable energy sources to the power grid.*. [Art]. Universidad de la Rioja, 2017.
- [23] S. Capitaneanu, «Graphical and algebraic synthesis for PWM methods,» *EPE*, vol. 11, n° 3, 2001.
- [24] J. Holtz, Artist, *Pulsewidth modulation for electronic power conversion. In : Proceedings of the IEEE*. [Art]. Wuppertal University, 1994.
- [25] A. Pardo, Artist, *Aplicaciones de los convertidores de frecuencia Estrategias PWM*. [Art]. JAVA E.U.-ISBN:958-33-6768-0, 2004.
- [26] K. Zhou, Artist, *Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: A comprehensive analysis*. [Art]. IEEE transactions on Industrial Electronics, 2002.
- [27] A. Hava, «Carrier Based PWM-VSI Drives In The Overmodulation Region,» de *Ph.D. dissertation University of Wisconsin*, Madison, 1998.

- [28] S. Khan, Artist, «A review on power quality problems and its improvement techniques.», en *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. [Art]. IEEE, p.p. 1-7, 2017.
- [29] D. G. Jayaprakash Sabarad, Artist, *Comparative Analysis of SVPWM and SPWM Techniques for Multilevel Inveter*. [Art]. IEEE, 2015.
- [30] IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, «IEEE Standard 519-1992. “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems”.,» IEEE Press, New York, 1993.
- [31] Á. E. Arranz Gimón, Artist, *MEDIDA de ARMÓNICOS en el MARCO de los ESTÁNDARES IEC para la CARACTERIZACIÓN de VARIADORES de FRECUENCIA..* [Art]. Universidad de Valladolid, 2020.
- [32] GRUPO WEG, «Motores de inducción alimentados por convertidores PWM,» WEG Brasil, Jaraguá do Sul, 2016.
- [33] IEEE Std. 1159-2009, «IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,» IEEE Press, New York, 2009.
- [34] EN 50160:, «Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks, 3rd edition 2010.,» European Copper Institute, United Kingdom, 2010.
- [35] U. o. t. E. I. Eurelectric, Artist, *Application guide to the European Standard EN 50160 on «voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems».* *Electricity Product Characteristics and Electromagnetic Compatibility.*, [Art]. Union of the Electricity Ind. Eurelectric, Jul. 1995.
- [36] Angelo Bagгинi, John Wiley & Sons, Ltd., *Handbook of Power Quality.*, ISBN: 978-0-470-06561-7, 2008.
- [37] G. Vega y J. Aviles, Artists, *Paradigmas de investigación. Enfoque cualitativo y cuantitativo.* [Art]. European Scientific Journal, 2014.
- [38] J. L. Abreu, Artist, *El método de la investigación Research Method.* [Art]. Daena: International Journal of Good Conscience, 2014.
- [39] R. F. C. & B. P. Hernández, *Metodología de la investigación*, Mexico D.F.: McGrawHill, 2010.
- [40] A. Pérez, Artist, *Contribuciones al Modelado, Simulación y Controles en Ingeniería Agrícola.* [Art]. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, 2018.
- [41] FLUKE CORPORATION, «FLUKE,» FLUKE CORPORATION, [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-ec/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/434-435#>. [Último acceso: 18 Marzo 2022].

- [42] Baker Hughes Services International LLC, Vector Plus Low Voltage VSD Installation, Operation and Maintenance, Claremore, OK: Baker Hughes, 2018.
- [43] Baker Hughes Services International LLC, GCS Electrospeed III Operator's Manual, Claremore, OK: Baker Hughes, 2010.
- [44] D. M., Artist, "*VSDs and Harmonics*". [Art]. Schlumberger Artificial Lift, Congo, 2005.
- [45] A. Jornet, Artist, *Contribución al estudio de las ondas de campo armónico y las pérdidas adicionales que se originan en los motores eléctricos de inducción asíncronos alimentados con convertidor de frecuencia en modulación del ancho de los impulsos*. [Art]. Universidad Politécnica de Catalunya, 2005.
- [46] E. C. Q. Oqueña, « Una visión integral para el uso racional de la energía en la aplicación de motores eléctricos de inducción,» *Redalyc*, pp. 53-59, 2003.
- [47] M. O., Artist, *CONTROL DE BOMBAS CENTRIFUGAS CON VARIADOR DE FRECUENCIA*. [Art]. Universidad Cooperativa de Colombia, 2016.
- [48] J. Medina Gilsanz, Artist, *Diseño en Matlab de un convertidor P.W.M.*. [Art]. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2018.
- [49] C. M. G. A. D. C. J. O. y. G. L. C. A. L. M. D. Jimena, «MODULACIÓN PWM APLICADA A INVERSORES TRIFÁSICOS DENTRO DEL ESQUEMA DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS AC,» Cauca - Colombia, 2007.
- [50] V. Kinnares, Artist, *Measurement, Analysis and prediction of harmonic power losses in PWM fed induction motors*. [Art]. University of Nottingham , 1997.
- [51] E. B. Germar Müller, «Pérdidas de armónicos en máquinas asíncronas de baja tensión,» TU Dresden und VEM Motors GmbH in Wernigerode, 2000.
- [52] J. -. M. A. Aguayo, Artist, *SIMULACIONES DE FALLAS PARA VARIADORES DE FRECUENCIA EN BAJA TENSION*. [Art]. UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA SEDE CONCEPCIÓN - "REY BALDUINO DE BÉLGICA", 2018.
- [53] IEEE Power Engineering Society, «IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.,» IEEE Press, New York, 1991.

ANEXOS

Diagrama de equipo BES

Baker Hughes

Advancing Reservoir Performance

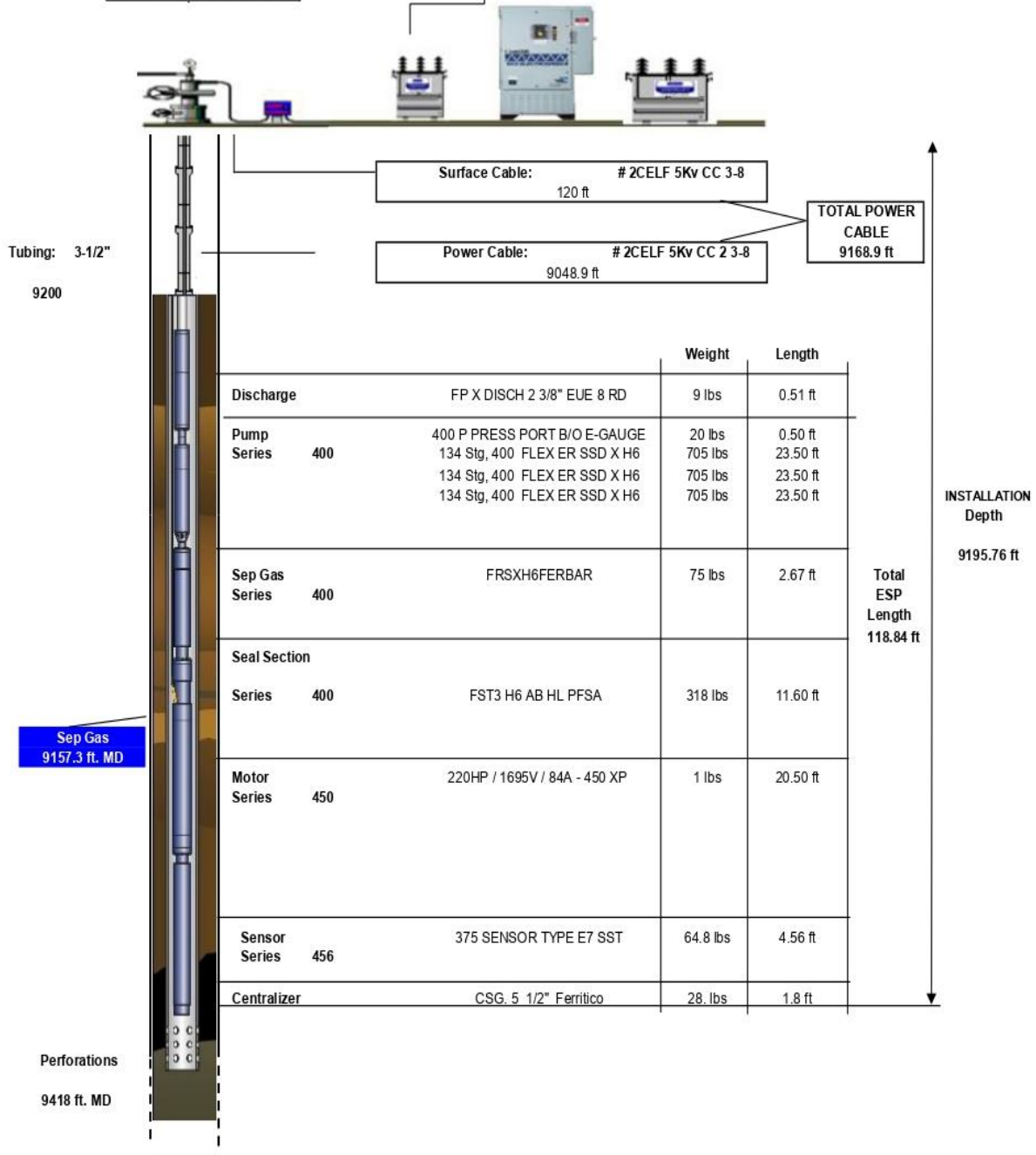
CUSTOMER: PETROAMAZONAS EP
BLOCK: BLOQUE 60
FIELD: SACHA
WELL: SCH-007

Flow Rate :	1500 BFPD
TDH :	8441 ft.
HZ:	61.6 Hz.
Vsurf:	1823 V.
Total Weigth:	3379 lbs.

VSD Model	S/N
VSD VP 301 KVA 362 A 12P VSG	J25D23845P

SU Xmer.	S/N
SUT MULTITAP 400 KVA 480V/1905V	12071421/1

Tubing Pres.: 250 PSI



Anexo 2. Sistema BES SCHAA-301 con VSD Electrospeed GCS salida 6-STEP

Diagrama de equipo BES

Baker Hughes

Advancing Reservoir Performance

CUSTOMER: EP PETROECUADOR
BLOCK: BLOQUE 60
FIELD: SACHA
WELL: SCHAA-301

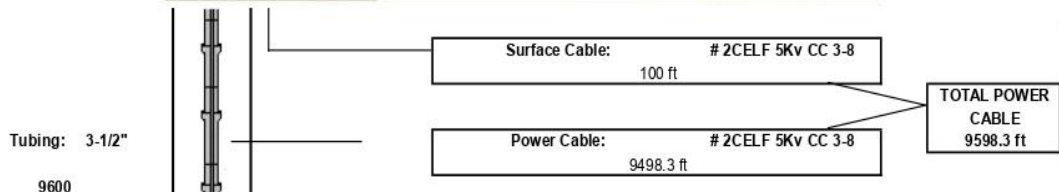
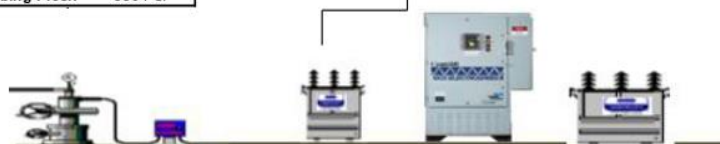


Flow Rate :	825 BFPD
TDH :	10028 ft.
HZ:	58.1 Hz.
Vsurf:	1405 V.
Total Weigh:	4031 lbs.

VSD Model	S/N
GCS-4500 4- GCS - 12 P 390KVA	10399895

SU Xmer.	S/N
SUT MULTITAP 400KVA 480V/1905V	12121491-8

Tubing Pres.: 350 PSI



Tubing: 3-1/2"
9600

		Weight	Length	
Discharge	FP X DISCH 3 1/2" EUE 8 RD	9 lbs	0.51 ft	INSTALLATION Depth 9625.16 ft
Pump Series 400	400 P PRESS PORT B/O E-GAUGE 141 Stg, 400 E-1000 SSD	20 lbs 705 lbs	0.50 ft 23.50 ft	
	141 Stg, 400 E-1000 SSD	705 lbs	23.50 ft	
Pump Tapper 400	141 Stg, 400 E-1000 SSD	705 lbs	23.50 ft	
	35 Stg, 400 FLEX17.5 SSD	240 lbs	7.00 ft	
Sep Gas Series 400	FRSBAR	75 lbs	2.67 ft	
Seal Section Series 400	FST3DB G HL PFSA	318 lbs	11.60 ft	
Motor Series 450	220HP / 1695V / 84A - 450 XP	1,161 lbs	20.50 ft	
Sensor Series 456	456 SENSOR TYPE E7 SST	64.8 lbs	4.56 ft	
Centralizer	CSG. 7" Ferritico	28. lbs	1.8 ft	
			Total ESP Length	119.64 ft

Sep Gas
9586.7 ft. MD

Perforations
9750 ft. MD