

SELECCIÓN DE SOLUCIÓN TÉCNICA PARA LA OPERACIÓN DE BOMBAS SUMERGIBLES DE POZO PROFUNDO CON VARIADORES DE FRECUENCIA - VFD

IVONNE ASTRID RUIZ MALDONADO

Universidad
Industrial de
Santander



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA**

2022

**SELECCIÓN DE SOLUCIÓN TÉCNICA PARA LA
OPERACIÓN DE BOMBAS SUMERGIBLES DE POZO
PROFUNDO CON VARIADORES DE FRECUENCIA - VFD**

IVONNE ASTRID RUIZ MALDONADO

Trabajo de grado para optar por el título de
**MAGÍSTER EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA**

Director:

JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ

PhD en Ingeniería Eléctrica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA**

2022

CONTENIDO

0. INTRODUCCIÓN.....	12
0.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN APLICADA.....	14
0.2 OBJETIVO GENERAL	15
0.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
0.4 ALCANCE	15
0.5 RESEÑA DEL TRABAJO DESARROLLADO.....	16
CAPÍTULO 1. ELECTROBOMBAS SUMERGIBLES PARA POZO PROFUNDO	17
1.1 FUNDAMENTOS	17
1.1.1. Bomba centrífuga sumergible para pozo profundo.	17
1.1.2. Motor sumergible.....	19
1.2. VENTAJAS	20
1.3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LOS MOTORES SUMERGIBLES	22
1.3.1. Camisa de refrigeración.....	22
1.3.2. Glicol Propilénico o Propilenglicol.	22
1.3.3. Diafragma de expansión.....	22
1.3.4. Cojinetes.	23
1.3.5. Aislamiento.	23
1.3.6. Protección del motor.....	23
1.3.7. Conexión interno del motor.	24
1.4. REGLAMENTACIÓN.....	25
1.4.1. Eficiencia.	26

1.5. VARIABLES QUE CONSIDERAR Y RESTRICCIONES TÉCNICAS DE LOS MOTORES SUMERGIBLES.....	27
CAPÍTULO 2. VARIADORES DE FRECUENCIA	31
2.1. FUNDAMENTOS	31
2.2. VENTAJAS DEL USO DE VFD EN SISTEMAS DE BOMBEO	31
2.3. FENÓMENOS ASOCIADOS AL ACCIONAMIENTO CON VFD	34
2.3.1. Corriente en los cojinetes.	34
2.3.2. Fenómeno de onda reflejada.....	35
2.4. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS.....	37
2.4.1. VFD de dos niveles.	37
2.4.2. VFD de tres o más niveles (n niveles).....	38
2.5. REGLAMENTACIÓN.....	40
CAPÍTULO 3. REACTORES Y FILTROS DE SALIDA	41
3.1. FUNDAMENTOS	41
3.2. SOLUCIONES DISPONIBLES EN EL MERCADO	42
3.2.1. Filtro seno.	43
3.2.2. Filtro limitador de tensión (filtro dv/dt).	44
3.2.3. Reactores de salida.....	45
3.2.4. Unidad terminal eléctrica.....	46
3.2.5. Filtros de alta frecuencia EMI (Electromagnetic interference).....	46
3.3. COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES.....	46
CAPÍTULO 4. SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN TÉCNICA	49
4.1. VALORES BASE.....	49

4.2. MOTOR DOBLE ESTRELLA	56
4.3. VFD DE TRES NIVELES.....	57
4.4. REACTOR DE SALIDA.....	58
4.5. FILTRO dv/dt.....	59
4.6. FILTRO SENOS	59
4.7. UNIDAD TERMINAL ELÉCTRICA	60
4.8. OTROS	60
4.9. RESUMEN COMPARATIVO.....	60
CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN.....	62
5.1. METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN.....	62
5.2. SIN FILTRADO.....	63
5.3. FILTRO SENOS – BOMBEO SAN NICOLÁS.....	66
5.4. FILTRO SENOS CON MOTOR DOBLE Y – BOMBEO PORVENIR.....	67
5.5. FILTRO dv/dt – BOMBEO SANTA CATALINA.....	69
5.6. MEDIDAS DE CONTROL POSTERIORES – BOMBEO PORVENIR	71
5.7. COMPARACIÓN FINAL.....	71
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
BIBLIOGRAFÍA.....	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia mínima para motores sumergibles trifásicos para pozo profundo o tipo "lapicero" (%) 60 Hz (adaptada) [37].	26
Tabla 2. Matriz de restricciones técnicas de los motores sumergibles para bombas de pozo profundo.	30
Tabla 3. Costos relativos, pérdidas y pesos de las medidas preventivas (adaptada) [55].	48
Tabla 4. Valores de referencia requeridos en bornes del motor.	49
Tabla 5. Valores garantizados para VFD Yaskawa A1000 [66].	50
Tabla 6. Parámetros típicos de la sección de filtrado para diferentes topologías (adaptada) [62].	52
Tabla 7. Parámetros típicos resultantes para la sección de cableado de diferentes topologías (adaptada) [62].	52
Tabla 8. Tiempo de subida típicos de un VFD (adaptada) [62].	54
Tabla 9. Coeficiente de reflexión resultante para diferentes tamaños de motores [62].	55
Tabla 10. Parámetros para un motor doble Y.	57
Tabla 11. Parámetros calculados para cada solución disponible en el mercado.	61
Tabla 12. Interpolación de parámetros calculados para un motor doble Y con filtro dv/dt.	61
Tabla 13. Ubicación de los filtros.	63
Tabla 14. Parámetros medidos a la salida del VFD con $f_{com} = 5$ kHz [69].	64
Tabla 15. Parámetros medidos a la entrada del filtro con $f_{com} = 5$ kHz [69].	65
Tabla 16. Parámetros medidos a la entrada del motor con filtro seno y $f_{conm} = 5$ kHz [69].	67
Tabla 17. Parámetros medidos a la entrada del motor doble Y con filtro seno y $f_{conm} = 5$ kHz [70].	68
Tabla 18. Parámetros medidos a la entrada del motor doble Y con filtro seno y Swing PWM [70].	68
Tabla 19. Parámetros medidos a la entrada del motor con filtro dv/dt y $f_{conm} = 2$ kHz [74].	70
Tabla 20. Parámetros medidos segunda prueba a la entrada de motor doble Y, filtro seno y $f_{conm} = 5$ kHz [75].	71
Tabla 21. Parámetros medidos para cada solución disponible en el mercado.	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Descripción del contenido del trabajo de investigación aplicada.....	16
Figura 2. Modelo a escala de una bomba sumergible de pozo profundo.....	18
Figura 3. Placas de esquema de conexionado externo de motores con bobinado paralelo.....	24
Figura 4. Placas con esquema de conexionado interno de motores KSB con bobinado paralelo...	25
Figura 5. Comparación de la potencia de entrada de los métodos de control por estrangulamiento y variación de frecuencia.....	33
Figura 6. Topología VFD de dos niveles.....	38
Figura 7. Tensión de salida de línea de un VFD de dos niveles.....	38
Figura 8. Topología del VFD de tres niveles.....	39
Figura 9. Tensión de salida de línea de un VFD de tres niveles.....	39
Figura 10. Topología básica de un filtro.....	42
Figura 11. Topología de un reactor.....	46
Figura 12. Ondas características de cada solución.....	47
Figura 13. Definición del rise time según normas NEMA e IEC, adaptada de [61] [67].....	50
Figura 14. Diagrama de circuito equivalente para calcular la tensión en bornes del motor, adaptada de [62].	51
Figura 15. Estación de bombeo Porvenir.....	53
Figura 16. Placas características de los equipos del bombeo Porvenir.....	53
Figura 17. Sobretensiones en bornes del motor para las diferentes topologías de VFD.....	57
Figura 18. Tensión de salida del VFD – bombeo San Nicolás.....	64
Figura 19. Tensión en bornes del filtro – bombeo San Nicolás.....	65
Figura 20. Cabezal del bobinado de uno de los motores sumergibles del bombeo Robledo.....	65
Figura 21. Filtro seno TCI 130 A para el bombeo San Nicolás.....	66
Figura 22. Tensión de entrada en bornes del motor con filtro seno – bombeo San Nicolás.....	66
Figura 23. Filtros seno MTE 415 A instalados en el bombeo Porvenir.....	67

Figura 24. Tensión en bornes del motor con filtro seno y $f_{\text{conm}}= 5 \text{ kHz}$ – bombeo Porvenir.....	68
Figura 25. Tensión en bornes del motor con filtro seno y la función Swing PWM – bombeo Porvenir.	69
Figura 26. Filtro dv/dt MTE 200 A instalado en el bombeo Santa Catalina.....	70
Figura 27. Tensión en bornes del motor con filtro dv/dt – bombeo Santa Catalina.	70
Figura 28. Tensión en bornes del motor con filtro seno y $f_{\text{conm}}= 5 \text{ kHz}$ – bombeo Porvenir, segunda prueba.	71

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Leyes de afinidad [57].	32
Ecuación 2. Tensión pico en bornes del motor [60].	36
Ecuación 3. Coeficiente de reflexión del sistema [60].	36
Ecuación 4. Tensión pico para VFD de tres niveles [64].	40
Ecuación 5. Frecuencia de resonancia [62].	42
Ecuación 6. Parámetro de selección de la frecuencia de resonancia de un filtro seno [62].	43
Ecuación 7. Parámetro de selección de la frecuencia de resonancia de un filtro dv/dt [62].	45
Ecuación 8. Tensión del Bus D.C. de acuerdo con la norma NEMA [59].	51
Ecuación 9. Tensión del Bus D.C. de acuerdo con la norma IEC [61].	51
Ecuación 10. Velocidad de propagación de onda [62].	54
Ecuación 11. Longitud crítica del cable [62].	54
Ecuación 12. <i>Rise time</i> de la sección de filtrado para topología sin filtro [62].	55
Ecuación 13. <i>Rise time</i> de la sección de cableado por encima de la longitud crítica y sin filtro [62].	55
Ecuación 14. Factor K_{D4} de la sección de cableado por encima de la longitud crítica y sin filtro [62].	56
Ecuación 15. Tensión de salida en bornes del motor sin filtro [62].	56
Ecuación 16. Gradiente de tensión en bornes del motor [67].	56
Ecuación 17. Tensión pico máxima en un VFD de tres niveles vs. Un VFD de dos niveles [64].	58
Ecuación 18. Tensión de salida en bornes del VFD [62].	60

RESUMEN

TÍTULO: SELECCIÓN DE SOLUCIÓN TÉCNICA PARA LA OPERACIÓN DE BOMBAS SUMERGIBLES DE POZO PROFUNDO CON VARIADORES DE FRECUENCIA – VFD*

AUTOR: RUIZ MALDONADO, IVONNE ASTRID**

PALABRAS CLAVE: bomba sumergible de pozo profundo, bomba lapicero, motor sumergible, variador de frecuencia, filtro pasa bajo.

Empresas Públicas de Medellín, empresa de servicios públicos, produce mensualmente alrededor de 22 millones de m^3 de agua potable para abastecer a sus usuarios, siendo el principal costo para su operación el consumo de energía eléctrica que puede alcanzar hasta 5000 MWh con un costo de hasta \$1.600 MCOP, mensualmente. La función objetivo de la organización es garantizar la menor tasa de kWh/m^3 , para lo cual, a lo largo de los años se han venido madurando principalmente dos tecnologías, el uso de variadores de frecuencia para mejorar la eficiencia de los motores y las condiciones operativas, y las bombas sumergibles de pozo profundo por su eficiencia hidráulica y menor costo de inversión inicial; sin embargo, el uso conjunto de estas dos tecnologías sin un análisis a profundidad, implicó un siniestro en una de las instalaciones, donde la vida útil de los motores integrados en estas bombas se vio disminuido de años a unos cuantos meses con el impacto operativo que esto conlleva [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8].

En este trabajo de aplicación se realiza un diagnóstico eléctrico de la tecnología de las bombas sumergibles de pozo profundo y sus motores y se selecciona la mejor solución técnica disponible en el mercado para lograr la integración de las bombas sumergibles de pozo profundo con los Variadores de Frecuencia – VFD, de acuerdo con las normas IEC.

* Trabajo de grado. Modalidad: Investigación aplicada

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ph.D. Javier Enrique Solano Martínez

ABSTRACT

TITLE: SELECTION OF TECHNICAL SOLUTION FOR THE OPERATION OF BOREHOLE PUMPS WITH VARIABLE FREQUENCY DRIVE - VFD*

AUTOR: RUIZ MALDONADO, IVONNE ASTRID**

KEYWORDS: borehole pump, submersible motor, variable frequency drive, low-pass filter.

To supply customers, Empresas Públicas de Medellín a utility, produce around 22 million m³ of drinking water monthly, and the primary component of the operating cost is the electrical consumption, that can reach up to 5000 MWh and cost until to \$1.600 MCOP, monthly. The target function of the organization is guarantee the lowest kWh/m³ rate; looking for this target, over the years two main technologies have been maturing, implement the use of variable frequency drives to improve the motors efficiency and operative conditions in the facilities, and the use of submersible borehole pumps due to the hydraulic efficiency and an initial investment cost lower; however, the combination of these technologies without a deepest analysis, implied a damage in one of the facilities, where the useful life of the submersible motors integrated in the borehole pumps, was reduced from years at just a few months with the operative impact in the water supply that it means [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8].

In this application work an electrical diagnosis to the submersible borehole pumps and its submersible motors is carried out and is selected the best technical solution commercially available to achieve the integration between the submersible borehole pumps and the Variable Frequency Drives – VFD, according to IEC standards.

* Final graduate project. Modality: application work

** Department of Physical – Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: PhD. Javier Enrique Solano Martínez

0. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, EPM ha identificado un incremento en la necesidad de producción de agua potable para satisfacer las necesidades de los sectores formales, por alta densificación, y los sectores informales, donde se incluye un porcentaje de Agua No Contabilizada (ANC) [9] [10].

Con base en los análisis efectuados, EPM desarrolló el Programa de Intervención Provisión Aguas, el cual considera dar atención a las necesidades más inmediatas que tienen relación con condiciones críticas [9].

Debido a la topografía del Valle de Aburrá, donde se presta el servicio de Acueducto, estas intervenciones incluyen la construcción y/o modernización de cadenas de bombeo de hasta cuatro pasos, líneas de tubería para impulsar el agua y tanques de almacenamiento [3] [11].

En el desarrollo de su actividad como prestador de servicio de acueducto, EPM ha intentado la mejora continua en sus procesos para disminuir sus costos de inversión, así como sus costos de administración, operación y mantenimiento (AOM).

En el ciclo de vida de un bombeo, su principal costo es el consumo de energía eléctrica, el cual puede ser tan alto como el 84%. El principal objetivo del negocio de Aguas es garantizar calidad del servicio con el menor costo de operación posible, es decir, se busca minimizar la función objetivo que modela kWh/m^3 , además de cumplir con los reglamentos aplicables de los diferentes ministerios y entidades gubernamentales para garantizar la prestación de un servicio público de calidad a un costo óptimo [3] [5] [8].

La empresa ha venido implementando técnicas de reconversión energética, aprovechamiento energético, instalación de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas –

PCH, disminución del factor de potencia, instalación de equipos con mayor eficiencia y/o libres de mantenimiento, disminución de los costos de inversión iniciales con nuevas tecnologías, siempre buscando disminuir el costo del m³, que finalmente se traduce en un menor valor del servicio para el usuario final [3] [5].

Hay dos principales tecnologías que ha madurado el negocio de Aguas para disminuir tanto su costo de inversión (CAPEX), como su AOM (OPEX); estas dos tecnologías son interdependientes, sin embargo, no se había llegado a examinar la importancia de su integración detalladamente [3]:

- Electrobombas sumergibles para pozo profundo (lapicero): estos equipos empezaron a adquirirse desde hace más de 10 años, considerándose una optimización del proceso de bombeo de agua desde el componente hidráulico, ya que su costo es aproximadamente el 50% del costo de una bomba centrífuga tradicional, disminuyen también la inversión en obras civiles y no requieren adecuaciones adicionales por insonorización, son libres de mantenimiento y tienen una mayor eficiencia hidráulica [8] [12] [13] [14] [15].
- Variadores de Frecuencia – VFD: el control de motores través de VFD se ha venido implementado hace más de 20 años, pues tiene un potencial de ahorro para las aplicaciones de bombeo, incluso con el menor ajuste en flujo volumétrico bombeado. Adicionalmente, permiten un arranque controlado y su integración al sistema de control [6] [16] [17].

Estos desarrollos finalmente convergen en nuevos proyectos de inversión, donde se tienen bombas tipo lapicero controladas por VFD. Uno de los primeros proyectos desarrollados utilizando este tipo de soluciones fue la ampliación de la capacidad del Bombeo Robledo. Sin embargo, un par de meses después de la puesta en servicio del proyecto, dos de tres de las nuevas bombas presentaron fallas eléctricas de forma prematura [7].

Este incidente permitió identificar la necesidad de realizar un estudio de la tecnología de la bomba centrífuga sumergible de pozo profundo y su motor integrado.

A pesar de que, en la ficha técnica de muchos fabricantes de estas de bombas se indica que sus motores son aptos para trabajar con VFD, se identificó que estos motores tienen una construcción muy sencilla y no son aptos *per se* para operar con Variador de Frecuencia – VFD, siendo esto la razón de su prematura falla [13] [14] [18].

Considerando que es una política del negocio de acueducto de EPM, tanto la utilización de las bombas tipo lapicero, por sus múltiples beneficios y disminución del CAPEX y el OPEX, como su uso con Variadores de Frecuencia – VFD, para disminuir el OPEX, se debe implementar una solución técnica disponible en el mercado para lograr su compatibilidad.

Los fabricantes proponen dos posibles soluciones a los múltiples problemas que se pueden presentar con su uso, la instalación de filtros dv/dt o la instalación de filtros seno. En este trabajo se analizan tanto estas dos soluciones como la opción de utilizar VFD en baja tensión de tres niveles [8] [13] [14] [18].

De los anteriores análisis se selecciona la mejor alternativa técnica disponible en el mercado, que mitigue los problemas de integración entre los dos equipos, garantizando la vida útil del motor y por extensión de la bomba.

0.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN APLICADA

A continuación, se presentan los objetivos propuestos y sus respectivos alcances:

0.2 OBJETIVO GENERAL

- Seleccionar la mejor solución técnica para la operación de bombas sumergibles de pozo profundo con Variadores de Frecuencia – VFD, de acuerdo con las restricciones técnicas identificadas para los motores integrados con estas bombas.

0.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las restricciones técnicas de los motores sumergibles debidas a factores constructivos para su operación con VFD.
- Identificar las soluciones disponibles en el mercado para realizar la integración de bombas sumergibles de pozo profundo y VFD.
- Seleccionar la solución que cumpla con las restricciones técnicas identificadas.
- Implementar la solución o soluciones seleccionadas.
- Validar con mediciones en campo el desempeño de la solución.

0.4 ALCANCE

Se cumplieron los objetivos establecidos de acuerdo con el siguiente alcance:

Para el objetivo específico N.º 1: Se realiza un estudio de la tecnología de las bombas sumergibles de pozo profundo, en específico de sus motores y se identifican las restricciones técnicas para su uso con VFD esto se presenta en el CAPÍTULO 1.

Para el objetivo específico N.º 2: Se listan las potenciales soluciones disponibles en el mercado para realizar la integración de las bombas sumergibles y los VFD; los filtros y reactores se presentan en el CAPÍTULO 3 y soluciones alternativas en los numerales 1.3.6 para motores, 0 para VFD.

Para el objetivo específico N.º 3: Se realiza un análisis del comportamiento de cada una de las soluciones a partir de los respectivos modelos matemáticos según las normas IEC, presentado en el CAPÍTULO 4.

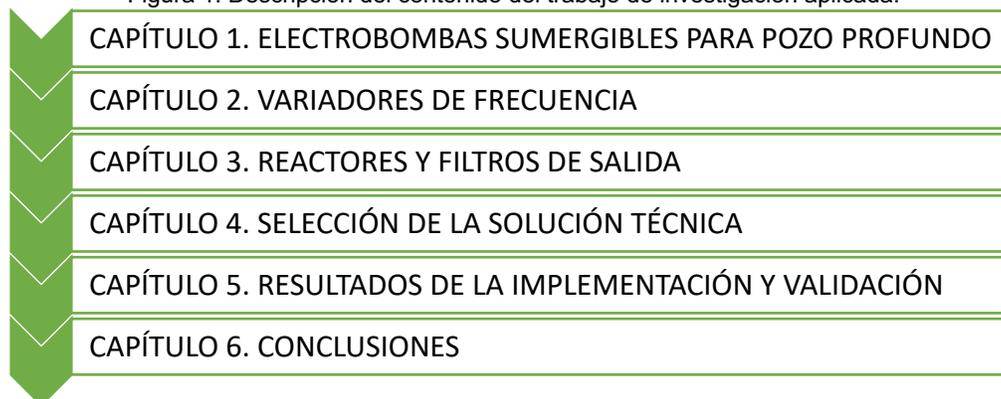
Para el objetivo específico N.º 4 y N.º 5: Se realizan la implementación y pruebas de la solución seleccionada, así como de una solución alternativa, en el CAPÍTULO 5 se analizan los resultados.

0.5 RESEÑA DEL TRABAJO DESARROLLADO

Esta memoria se ha organizado para exponer los aspectos técnicos de cada uno de los componentes del sistema de bombeo que se deben considerar, posteriormente el análisis de cada solución y, por último, la implementación y pruebas *in situ*.

La Figura 1 describe la estructura de este trabajo y los aspectos que influyen en la selección técnica de la solución para la operación de bombas sumergibles de pozo profundo con Variadores de Frecuencia – VFD.

Figura 1. Descripción del contenido del trabajo de investigación aplicada.



CAPÍTULO 1. ELECTROBOMBAS SUMERGIBLES PARA POZO PROFUNDO

En vista de la poca información que en primera instancia se encontró respecto a los motores acoplados a las bombas lapicero, y dada la importancia de contar con ella para identificar la solución más favorable, en este capítulo se hace una recopilación de sus principales aspectos, entre los cuales se incluyen, su principio de funcionamiento, ventajas, reglamentación, características constructivas y fenómenos en motores asociados al uso de VFD.

Con esta información se identifican las variables a considerar y las restricciones técnicas de este tipo de motores.

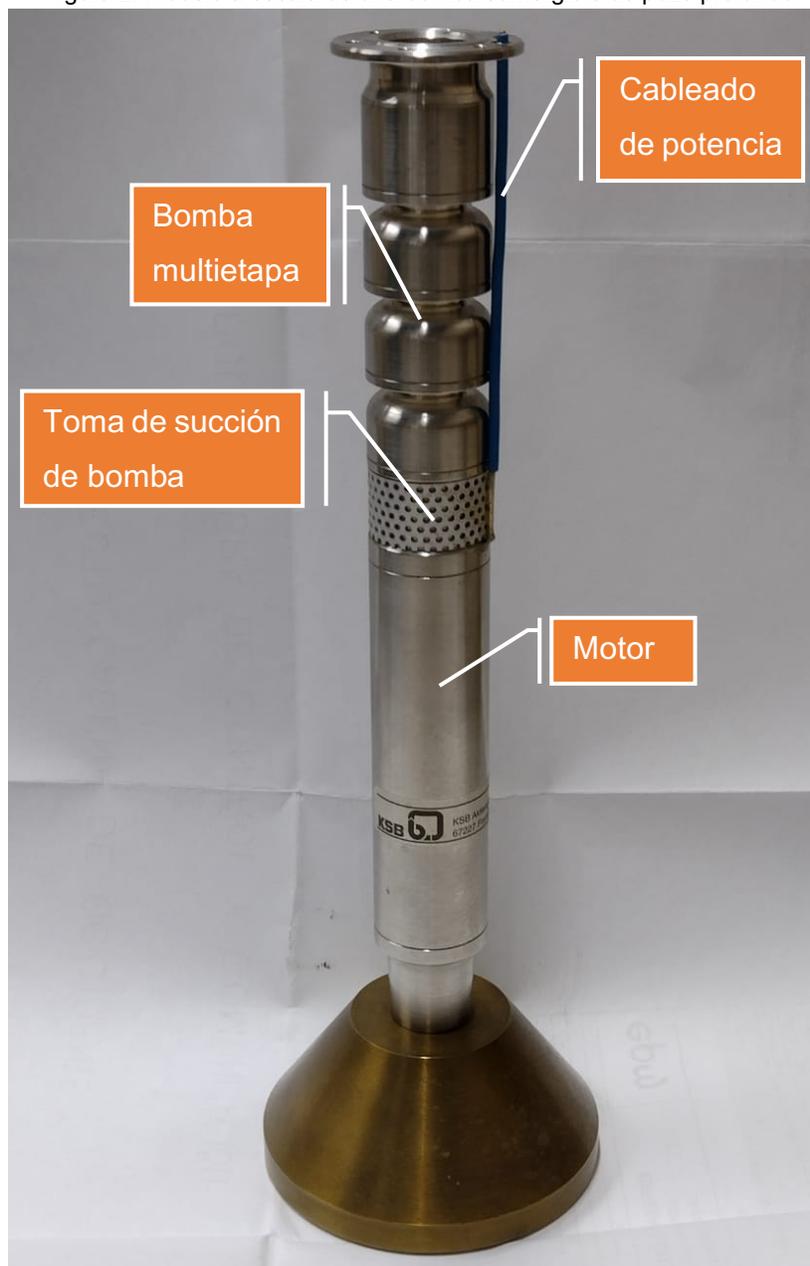
1.1 FUNDAMENTOS

Una electrobomba se puede dividir en los siguientes componentes: Una bomba centrífuga para pozo profundo multietapa, un motor sumergible, una sección de sello o protector de arena, que va entre el motor y la bomba y su respectivo cableado, a continuación, se abordan las características de sus dos principales componentes, la bomba y el motor [19] [20].

1.1.1. Bomba centrífuga sumergible para pozo profundo. Una bomba sumergible es una bomba que está diseñada para operar completamente sumergida en el líquido bombeado [21].

En la Figura 2 se puede identificar la bomba vertical con motor sumergible o bomba eléctrica sumergible, que cuenta con eje alargado y el motor va instalado debajo de la bomba [8] [12] [19].

Figura 2. Modelo a escala de una bomba sumergible de pozo profundo.



Las bombas sumergibles para pozo profundo son también conocidas como bombas buzo, *U-pump* (cuando el líquido bombeado es agua potable), de sondeo, vertical tipo turbina, o coloquialmente “lapicero”, por su forma constructiva, y se diseñan para que el también el motor trabaje completamente sumergido, es decir, va instalada directamente en el líquido bombeado sin toma de entrada o tubería de

succión. Fueron desarrolladas para posibilitar la captación de aguas subterráneas a través de pozos tubulares con perforaciones de diámetro reducido, razón por la cual se construyen con varias etapas (multietapas), cada una de las etapas consta de un impulsor y un difusor, y el líquido entra y sale de cada etapa en dirección paralela al eje del impulsor, siendo este funcionamiento el que logra mejoras de eficiencia hidráulica importantes [8] [12] [21].

Inicialmente eran de uso exclusivo para riesgos en pozos y perforaciones, pero hoy en día sus aplicaciones abarcan los sectores industriales, petroleros, agrícolas, residenciales, y empresas de servicios públicos. Sus ventajas incluyen es muy silenciosa, tiene alta eficiencia hidráulica y bajos de operación, pues son promocionadas como libres de mantenimiento a largo plazo [12] [22] [23] [24].

1.1.2. Motor sumergible. Es importante señalar que existen varias acepciones para “motor eléctrico sumergible” [21]:

2. Está diseñado para funcionar solo mientras está sumergido en líquido.
3. Puede funcionar mientras está sumergido en líquido, indefinidamente.
4. Está sellado para evitar que el líquido inunde el motor.

Para el caso particular de los motores acoplados con bombas lapicero, es decir, cuando la bomba es vendida con el motor con un equipo integral, aplican las características 1, 2 y 3, teniendo en cuenta que, dependen de la camisa de refrigeración para garantizar su buen funcionamiento, están llenos de un refrigerante que puede ser agua o una mezcla de agua/glicol y usualmente son IP68 [21] [24] [25] [26] [27].

Los motores sumergibles se identifican según el tamaño del motor en pulgadas, que indica el diámetro mínimo del pozo; son motores asíncronos con un diseño jaula de ardilla especial para uso sumergido, este diseño incluye un diafragma de expansión de goma para igual la presión del líquido interno

(refrigerante) y el líquido bombeado, sello mecánico, cojinetes radiales y axiales lubricados por el motor, cojinete de empuje con almohadillas basculantes autoajustables para absorber el empuje axial y camisa de refrigeración; pueden ser instalados de forma horizontal, vertical y en ángulo [8] [13] [24] [25].

Se pueden identificar dos clases de motores sumergibles, encapsulados y no encapsulados, siendo su diferencia fundamental que los motores encapsulados no se pueden rebobinar. Por otro lado, comparten la característica que los dos llenan con líquido refrigerante, este cumple una doble función, lubricar los cojinetes y enfriar los devanados del motor al transferir el calor a la cubierta del motor y al fluido bombeado. Para los tamaños más grandes de 8", entre 200 y 570 HP se utilizan motores rebobinables, bajo la consideración de que, en caso de falla, puedan repararse [8].

Otro aspecto que debe ser analizado cuidadosamente para garantizar la vida útil del motor es la profundidad mínima de inmersión, esta debe ser adecuada para cada equipo y flujo de operación. Con respecto a la profundidad máxima de inmersión, esta varía entre cada marca, puede oscilar entre 100m y 250m [24] [25].

1.2. VENTAJAS

Las bombas lapicero empezaron a adquirirse en EPM desde hace más de 10 años, considerándose una optimización del proceso de bombeo de agua desde el componente hidráulico, ya que tienen las siguientes ventajas:

- Menor costo de obras civiles: ya que se pueden instalar a la intemperie y solo requieren la construcción de un foso para realizar la succión del agua [8].

- Menor costo en equipos: El costo de una bomba lapicero (sistema motor-bomba) puede ser típicamente alrededor del 50% del valor de una bomba superficie. Adicionalmente, la simplicidad de las bombas y sus motores disminuye las variables a monitorear, así como la instrumentación requerida para ello.

- Disminución del ruido audible en la instalación: Ya que el motor se encuentra sumergido en agua a varias metros, el nivel de presión acústica de la bomba es menor a 70 dB(A) a 1 metro del equipo y a 1,6 metros de altura desde el nivel del piso, y menor a 50 dB(A) fuera de la instalación, por lo tanto, se cumple la normatividad de ambiental, tanto en el día como en la noche, sin necesidad de edificaciones insonorizadas o equipos adicionales [14] [28]. Este punto es muy importante considerando que, debido al importante crecimiento poblacional de la ciudad en los últimos años, los bombeos que originalmente se encontraban en las afueras hoy colindan con sectores residenciales fuertemente densificados.

- Disminución de los costos de mantenimiento: Esto de acuerdo con los fabricantes y distribuidores de este tipo de equipos, ya que se consideran libres de mantenimiento o de bajo mantenimiento [8] [13].

- Mayor eficiencia hidráulica: El diseño de este tipo de bombas, con un diámetro externo del impulsor reducido, y su construcción multietapas, donde el líquido entra y sale de cada etapa en dirección paralela al eje del impulsor, es altamente eficiente, adicionalmente, tienen la ventaja que no requiere trabajo para mover el agua hacia sí, pues ya están sumergidas en el fluido y la presión empuja el agua hacia la bomba; un rango típico de eficiencia para estas bombas entre el 65% y el 80% [8] [12] [15] [21].

1.3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LOS MOTORES SUMERGIBLES

A continuación, se procede a revisar las características que han de considerarse para determinar si este tipo de motores pueden ser accionados por VFD.

1.3.1. Camisa de refrigeración. También conocida como generador de caudal, es un componente mecánico que garantiza un flujo constante de agua sobre la superficie del motor. Las camisas de refrigeración permiten que parte del líquido bombeado o del líquido externo circule por la carcasa del estator, este absorbe el exceso de calor mediante convección forzada, garantizando un enfriamiento adecuado [29] [30].

Para que la camisa de refrigeración cumpla su función y refrigere el motor, se debe garantizar una velocidad del agua mínima, la cual depende de su propia temperatura y la potencia del motor [8] [13] [18] [31].

Esto implica que el VFD debe configurarse para alcanzar una mínima frecuencia en apenas unos segundos, de modo que se cuente con el flujo de agua necesario para la correcta refrigeración del motor.

1.3.2. Glicol Propilénico o Propilenglicol. El glicol es un líquido refrigerante, clasificado como no peligroso, que protege los motores de daños provocados por las heladas. Típicamente los motores se rellenan con una mezcla de 70% de agua dulce limpia y 30% de glicol, sin embargo, si no se requiere puede sustituirse simplemente con agua dulce limpia y filtrada, no destilada. Esta característica no tiene impacto en el uso con VFD [14] [26].

1.3.3. Diafragma de expansión. El motor en la parte inferior cuenta con un diafragma que compensa la presión estática de la columna de agua sobre el motor

y la presión derivada de la expansión del volumen del fluido del motor por calentamiento asegurando que la presión interna del motor coincida con la externa. Esta característica no tiene impacto en el accionamiento con VFD [8].

1.3.4. Cojinetes. Las bombas lapicero tienen cojinetes lisos (planos) radiales que se fabrican con carbono sintético o grafito y su sistema de soporte es de acero inoxidable; también se cuenta un cojinete de empuje de almohadilla basculante en el extremo inferior del motor que equilibra el empuje axial los cojinetes de la bomba, y dependiendo del tamaño de la bomba y su número de etapas puede tener cojinetes intermedios [8] [13].

Los cojinetes son lubricados por el fluido que se está moviendo y los cojinetes del motor por su fluido interno. El sistema de lubricación de los cojinetes requiere de una velocidad mínima en el motor para crear una película lubricante estable. Por lo tanto, se debe garantizar la frecuencia mínima establecida por el fabricante para evitar daño en los cojinetes debido a la falta de lubricación y a vibraciones mecánicas resultantes [8] [13].

1.3.5. Aislamiento. Para los bobinados del motor se emplean conductores con aislamiento especial, PVC, PE2/PA o teflón. De acuerdo con la clasificación de la norma IEC 60085, su clase térmica asignada es Y, es decir, 90 °C es la temperatura límite o máxima de funcionamiento, con referencia a la temperatura del agua (T_{fluid}) [8] [24] [25].

Es de resaltar que los fabricantes y distribuidores recomiendan que un motor típico, enfriado por aire y accionado por un VFD, tenga un aislamiento clase F (155 °C) o superior, para que el equipo pueda soportar el esfuerzo eléctrico adicional al que se ve sometido por la forma de onda PWM y los armónicos [32].

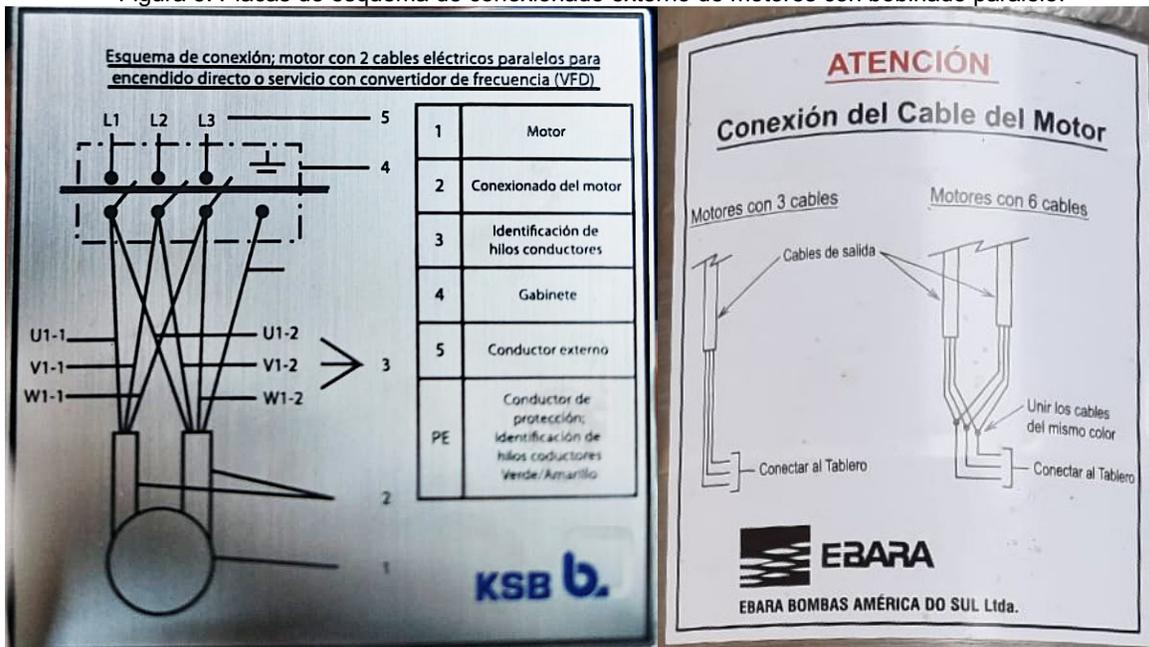
1.3.6. Protección del motor. Debido a que el uso de VFD incrementa el calor por pérdidas en el hierro y pérdidas en el cobre a altas frecuencias, los motores

sumergibles deben incluir sensores de temperatura en los devanados del motor, que pueden ser de sensores de termistor PTC o de resistencia PT-100, para monitorear que no se sobrepase la máxima temperatura soportada. Adicionalmente, se debe contar con un relé térmico ajustado a la corriente de trabajo si esta es inferior a la nominal del motor [8] [18] [33].

1.3.7. Conexión interno del motor. Los motores sumergibles estándar vienen con un conexionado interno predeterminado, es decir, no se puede manipular la bornera del motor para adaptarse al nivel de tensión de entrada o aplicar un arranque estrella-delta, a menos que el motor sea especificado para este tipo de arranque; de hecho, estos motores no se entregan con bornera, sino con tres o seis puntas de cable sueltas.

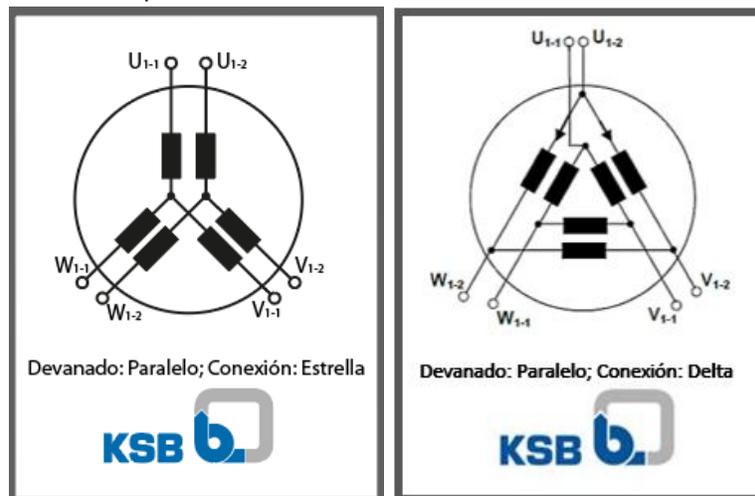
Por lo anterior, y para motores de un tamaño considerable, se tienen disponibles dos opciones, doble delta y doble estrella. Es decir, que se tiene un motor con un conexionado interno de dos estrellas o dos deltas y que una vez se instale se deben conectar en paralelo, de acuerdo con el esquema de la Figura 3.

Figura 3. Placas de esquema de conexionado externo de motores con bobinado paralelo.



En la Figura 4 se pueden observar los dos tipos de conexionado. La mayoría de los fabricantes ofrecen la opción de la izquierda (doble delta), sin embargo, una vez identificado el problema para el aislamiento que implica el uso de estos motores con VFD, empezaron a ofrecer la opción de la derecha, bajo la premisa que una conexión de doble estrella reduce la tensión aplicada sobre los bobinados por un factor de $\sqrt{3}$ comparado con la conexión en doble delta [34].

Figura 4. Placas con esquema de conexionado interno de motores KSB con bobinado paralelo.



Esta nueva opción ofrecida por los fabricantes es una buena estrategia para disminuir el estrés sobre los bobinados, sin embargo, es importante considerar que el cambio de conexión implica una mayor circulación de corriente en los bobinados que también aumenta las pérdidas, por lo tanto, se debe asegurar que los fabricantes garanticen una eficiencia mínima en el motor de acuerdo con la reglamentación vigente.

1.4. REGLAMENTACIÓN

Con el propósito de establecer medidas tendientes a fomentar el uso racional y eficiencia de la energía, en Colombia se debe cumplir con el Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, expedido en 2015 por el Ministerio de Minas y Energía - Minenergía [35].

Dicho reglamento, que entró en vigor en 2016, tiene como productos objeto, entre otros, los equipos de fuerza motriz, es decir, motores y generadores eléctricos. En el caso de motores trifásicos se consideran específicamente los motores de inducción tipo jaula de ardilla a 60 Hz, con tensión nominal hasta 600 V y potencia nominal entre 0,18 kW y 373 kW, incluyendo aquellos usados en: bombas, motorreductor, motoventiladores y compresores [35].

Sin embargo, considerando que las condiciones constructivas de los motores del tipo sumergible, de uso exclusivo en sistemas de bombeo tales como pozos profundos, denominados comúnmente como tipo "lapicero", son distintas a las de un motor convencional, desde 2017 Minenergía empezó analizar las particularidades de estos motores y determinó las siguientes eficiencias [36] [37].

Tabla 1. Eficiencia mínima para motores sumergibles trifásicos para pozo profundo o tipo "lapicero" (%) 60 Hz (adaptada) [37].

Clasificación NEMA (Diámetro del pozo – pulgadas)	Número de polos	Potencia del motor (kW)		Eficiencia - η (%)
		Límite inferior (no incluido)	Límite superior (incluido)	
6	2	29,84	44,76	83
8	2	29,84	44,76	86
8 o superior	2	44,76	Más de 44,76	87

Adicionalmente, la UPME establece que los motores eléctricos deben cumplir con las eficiencias definidas en el RETIQ para acceder a beneficios tributarios de descuento en el impuesto de renta, que puede alcanzar hasta 25% del valor de la inversión, y exclusión del IVA, para proyectos de gestión eficiente de la energía [38].

1.4.1. Eficiencia. Determinar la eficiencia (η) de un motor diseñado para funcionar completamente sumergido en un líquido y/o completamente integrado a otro equipo no es tan sencillo, ya que este no se puede probar independientemente por varias razones que van desde la conexión mecánica y el sistema de refrigeración, hasta que no se tiene un método de prueba establecido [39].

Si se prueba simplemente midiendo par y potencia en el eje, no se estaría considerando la ventilación y refrigeración, con su respectivo consumo de potencia, tampoco las pérdidas mecánicas por rozamiento en los sellos y/o en los rodamientos. Por lo tanto, es recomendable calcular la eficiencia de un sistema de bombeo incluyendo todos los componentes desde el transformador de potencia, si en la instalación se tiene el proceso de transformación [6] [39].

Para el caso de un grupo de bombeo, se debería considerar, además de la eficiencia del motor y la bomba, también la eficiencia del VFD, teniendo en cuenta, además, que la eficiencia de todos los componentes se ve reducida cuando se disminuye la velocidad [8].

1.5. VARIABLES QUE CONSIDERAR Y RESTRICCIONES TÉCNICAS DE LOS MOTORES SUMERGIBLES

En resumen, los motores sumergibles se diferencian de los motores convencionales por sus cojinetes, momento de inercia muy bajo, aislamiento (temperatura de aislamiento típica entre 70 °C y 90 °C), aumento de temperatura, distribución de pérdidas y distribución de calor, es importante garantizar algunas variables [13] [18]:

- Tiempo máximo permitido de aceleración (t_{run}) y desaceleración (t_{stop}) o rampas de inicio y parada: Las rampas muy cortas pueden generar golpe de ariete y las muy largas pueden dañar el motor, por lo tanto, se debe seguir lo indicado por el fabricante para llegar a la frecuencia mínima recomendada en un par de segundos [8] [13] [18].
- Frecuencia mínima (f_{min}): La frecuencia mínima del sistema debe ser calculada para garantizar la correcta refrigeración del motor, así como la

lubricación de los cojinetes, estas dos condiciones dependen de la velocidad del agua. La velocidad del agua requerida depende de su temperatura y la potencia del motor, pero no debe ser menor a 0,15 m/s, así como la frecuencia de funcionamiento no debe estar por debajo de 25 o 30 Hz (dependiendo del fabricante y número de polos del motor). El funcionamiento del motor con frecuencias bajas puede provocar vibraciones mecánicas, graves daños al cojinete de empuje axial, a los bujes y al devanado del motor [8] [13] [18] [31].

- Frecuencia máxima (f_{max}): Considerando que es una aplicación de torque cuadrático, la máxima frecuencia de funcionamiento recomendada es la frecuencia nominal; se pueden operar a una frecuencia superior, siempre y cuando el motor pueda satisfacer la demanda de potencia de la bomba y no se exceda la corriente nominal [8] [13] [16] [18].
- Gradiente de tensión (dv/dt) y tensión pico ($V_{pk/pk}$): Teniendo en cuenta que los motores sumergibles no cumplen lo especificado en la norma IEC60034-25 o NEMA MG1 Parte 31, donde se determinan los requisitos para clasificar un motor como apto para trabajar con VFD o *Inverter Duty*, como se denomina en NEMA (de hecho los motores sumergibles no están considerados dentro de la norma NEMA MG1 Parte 31), su uso con VFD pueden causar estrés al bobinado y el aislamiento a distancias mucho más cortas que un motor estándar, por lo tanto, un dv/dt muy alto, así como los picos de voltaje pueden reducir la vida útil del aislamiento del devanado [13] [18] [40] [41].
- Frecuencia de conmutación (f_{conm}): La frecuencia de conmutación o frecuencia portadora de los VFD normalmente se puede ajustar entre 2 y 12 kHz, seleccionar una frecuencia de conmutación alta puede disminuir el ruido audible, pero genera estrés adicional en el motor, al someterlo a más picos de tensión; se recomienda disminuir la frecuencia portadora cuando el ruido

audible no es un problema, y seleccionar como máximo 5 kHz. Es importante tener en cuenta que algunos fabricantes también indican el número máximo de variaciones de frecuencia permitidas durante un minuto [18] [42].

- Dimensionamiento: En las aplicaciones de torque cuadrático, en la selección de la potencia nominal, no es necesario tener en cuenta el sobretorque requerido para la aceleración. Cuando se usan Variadores de Frecuencia – VFD los fabricantes típicamente utilizan sus motores estándar, sin embargo, aplican un factor adicional de reserva de entre el 5% y el 10% sobre la potencia requerida por la bomba, esto como consideración por el calentamiento adicional resultante por armónicos [8] [16] [43].

Después de conocer las restricciones técnicas para el uso de VFD con bombas lapicero, se identifica que estas pueden clasificarse en dos tipos:

- De fabricación: Estas son restricciones impuestas por el usuario que el fabricante debe considerar en el diseño.
- De uso final: Estas son restricciones que debe considerar el usuario final para garantizar el buen funcionamiento del motor.

Considerando que la fabricación de motores sumergibles para bombas lapicero no se ciñe a ningún estándar normativo, en la Tabla 2 se presenta un resumen de las restricciones técnicas a considerar para la implementación de VFD con motores sumergibles para las marcas o fabricantes más relevantes para EPM. Adicionalmente, se incluye la columna “estándar”, donde se recopilan los parámetros mínimos a requerir en las especificaciones técnicas para garantizar la integridad de los motores.

Tabla 2. Matriz de restricciones técnicas de los motores sumergibles para bombas de pozo profundo.

PARÁMETRO	FABRICANTE O MARCA					ESTÁNDAR	CLASIFICACIÓN
	KSB	EBARA	WILO	CAPRIARI	SAER		
dv/dt [V/ μ s]	500 [13]	-	500 [8]	500 [44]	500 [18]	500	Uso final
$V_{pk/pk}$ [V]	1400 [13]	1500 [45]	1450 [46]	1400 [44]	1700 [18]	1400	Uso final
t_{run} [s]	2 [13]	10-15 [47]	2 [8]	3,5 [14]	4 [18]	-	Uso final
t_{stop} [s]	2 [13]	10-15 [47]	2 [8]	3,5 [14]	4 [18]	-	Uso final
Arranques [N°/h]	5 [43]	4 [48]	10 [49]	3 [14]	5 [18]	3	Uso final
f_{min} [Hz]	20 [13]	30 [50]	25 [8]	42 [44]	30 [18]	40	Uso final
f_{max} [Hz]	60 [13]	60 [50]	60 [8]	60 [44]	60 [18]	60	Uso final
f_{comm} [kHz]	-	-	-	-	3-5 [18]	5 ¹	Uso final
$T_{max-fluid}$ [°C]	50 [25]	30 [48]	40 [51]	25 [44]	30 [18]	25	Fabricación
Potencia de reserva [%]	5 [43]	-	10 [8]	-	-	20 ²	Fabricación
$\eta_{A/4}$ [%]	88 [25]	86 [45]	90 [51]	88 [52]	91 [53]	87 [37]	Fabricación

Los valores que no aparecen diligenciados corresponden datos que no fueron suministrados por los fabricantes y/o distribuidores, incluso después de solicitarlos.

No se determinan valores mínimos estándar para las variables tiempo de arranque (t_{run}) y tiempo de parada (t_{stop}), pues son parámetros de control que se pueden programar en el PLC (Controlador Lógico Programable) con los valores recomendados por cada fabricante según cada caso.

¹ Seleccionada por el equipo de mantenimiento para todos los bombeos de EPM.

² De acuerdo con las especificaciones técnicas de EPM.

CAPÍTULO 2. VARIADORES DE FRECUENCIA

En el presente capítulo se aborda lo correspondiente a los VFD, incluyendo su principio de funcionamiento, las características constructivas y su clasificación, de acuerdo con la cantidad de componentes electrónicos, fenómenos asociados a su uso, reglamentación y ventajas y desventajas del uso de VFD en los sistemas de bombeo.

2.1. FUNDAMENTOS

Un Variador de Frecuencia – VFD, es un convertidor electrónico que cambia una o más características eléctricas de la alimentación de entrada y está compuesto por dispositivos de conmutación y otros componentes como transformadores, filtros, controles, protecciones, etc.; en los sistemas industriales se utiliza para obtener mayores eficiencias y mejorar la confiabilidad en los procesos con motores eléctricos [54] [55].

Adicionalmente, en combinación con un sistema de control con PLC, se facilita la integración y operación del sistema de acueducto, aumenta la confiabilidad y se hace más sencilla el monitoreo de alarmas, la expansión e incluso la mejora operacional continua [17].

2.2. VENTAJAS DEL USO DE VFD EN SISTEMAS DE BOMBEO

La mejora de la eficiencia en un proceso de transporte de fluidos es especialmente importante, ya que en aplicaciones con torque variable (cuadrático), la potencia crece cúbicamente con respecto a la velocidad, obteniendo un ahorro muy importante en el consumo de energía eléctrica [16] [56].

Este ahorro se puede cuantificar aplicando las leyes de afinidad presentadas en la Ecuación 1, que expresan la relación matemática entre las distintas variables involucrada en el rendimiento de las bombas [57].

Ecuación 1. Leyes de afinidad [57].

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2$$

$$\frac{BHP_1}{BHP_2} = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^3$$

Donde:

Q: Flujo volumétrico [m³/h]

N: Velocidad de la bomba [rpm]

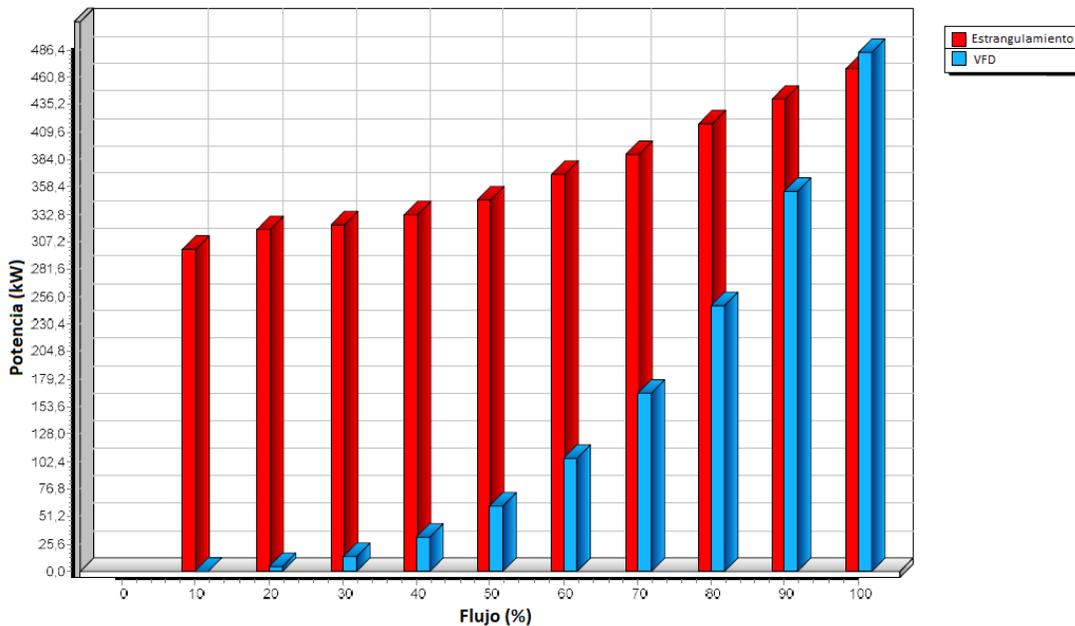
H: Carga de la bomba [mca]

BHP: Potencia de entrada en la bomba [kW]

Adicionalmente, comparado con el método tradicional para el control de flujo, el estrangulamiento de válvulas, que consiste en regular manualmente el porcentaje de apertura de una válvula con las pérdidas mecánicas que esto implica, se tiene una potencia de entrada mucho menor para el mismo flujo de caudal bombeado, lo que impacta directamente en la eficiencia del sistema [6].

En la Figura 5, elaborada con el software de simulación *Yaskawa Energy Savings Predictor*, de uso libre, se presenta una comparación entre el control de flujo por estrangulamiento de válvulas y el control de velocidad por variación de frecuencia para un motor de 450 kW, que muestra la relación entre la potencia de entrada requerida para bombear un caudal determinado.

Figura 5. Comparación de la potencia de entrada de los métodos de control por estrangulamiento y variación de frecuencia.



Se observa que los métodos solo son comparables al flujo nominal, donde no hay realmente un control de flujo, ya que la válvula está completamente abierta y no se tienen pérdidas mecánicas. Para un flujo menor siempre se tiene un menor requerimiento de potencia con VFD y por ende una mayor eficiencia [6] [16].

Se concluye que el uso de VFD tiene un potencial de ahorro para las aplicaciones de bombeo, incluso con el menor ajuste en flujo volumétrico bombeado.

También se logran importantes ahorros de energía al permitir adaptarse a la demanda real del sistema de acuerdo con la hora del día [17].

Por otro lado, cuando se tienen algunas restricciones técnicas en el sistema interconectado de acueducto, y se requiere mantener una presión de descarga constante para abastecer una porción de los usuarios, los VFD pueden ser especialmente útiles para dar flexibilidad, mitigando las siguientes condiciones [17]:

- a. Presión de succión variable a la entrada de la estación de bombeo.
- b. Estación de bombeo con demanda variable.
- c. Red eléctrica monofásica: Cuando se requiere conectar un motor trifásico.
- d. Transitorios hidráulicos y sobrepresiones.

El uso de VFD también beneficia la infraestructura eléctrica, ya que el arranque controlado de los motores mitiga el impacto de la corriente de arranque e incluso se puede acceder a Beneficios Tributarios Ambientales – BTA, por eficiencia energética [38] [58].

Otra importante ventaja es que permite planear el crecimiento del sistema con un horizonte de al menos 20 años, ya que al permitir ajustar el sistema de bombeo al crecimiento de la demanda a largo plazo.

2.3. FENÓMENOS ASOCIADOS AL ACCIONAMIENTO CON VFD

Existen principalmente dos problemas que se asocian al accionamiento de motores por VFD, el primero es la tensión inducida en el eje, que deriva en la circulación de corrientes por los cojinetes; el segundo, es el fenómeno conocido como onda reflejada, asociado los VFD con dispositivos de conmutación IGBT (la mayoría). A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno.

2.3.1. Corriente en los cojinetes. El principal problema que se ha agravado con el uso de VFD es el fenómeno de tensión inducida en el eje y las corrientes que circulan por los cojinetes, ya que la forma de onda de alimentación es desequilibrada, puede tener componentes de alta frecuencia y tensiones modo común, sumándose a las causas propias del motor, como el desequilibrio electromagnético por asimetría [8] [59].

La circulación de corriente en los cojinetes causa estrés sobre el material y puede dañarlos dependiendo de la magnitud de la corriente. La corriente en los cojinetes se presenta solo si la tensión eléctrica es suficiente para penetrar el aislamiento del lubricante y esta diferencia de tensión es la fuente de las corrientes. Hay 3 tipos de corrientes en los cojinetes debidas a altas frecuencias: corrientes de circulación, corrientes de tierra a través del eje y corrientes de electroerosión. Varios factores inciden en este fenómeno, como el tipo de instalación, la puesta a tierra, el tipo de cable y su apantallamiento, así como la tensión de entrada del VFD y el gradiente de tensión [8].

En el caso de los motores sumergibles se recomienda, para mitigar este fenómeno, conectar a tierra los múltiples de impulsión, succión y la camisa del pozo. En caso de que no sea posible, se debe contar con un sistema de protección especial, como un interruptor diferencial [18].

2.3.2. Fenómeno de onda reflejada. Es indispensable considerar adecuadamente el fenómeno de onda reflejada, ya que puede provocar daños al motor, específicamente sobre el sistema de aislamiento, y cualquier otro dispositivo cercano [60].

El fenómeno de onda reflejada tiene su símil en la teoría de la línea de transmisión y la onda viajera, es decir, cuando se tiene una diferencia significativa entre la impedancia de carga y la impedancia de línea se pueden dar tensiones reflejadas hacia la carga. La magnitud de esta tensión depende de los siguientes factores [60] [61]:

- Distancia entre Motor y VFD: La tensión reflejada aumenta con la distancia [32] [60].
- Frecuencia de conmutación: La tensión reflejada es mayor a altas frecuencias, ya que el *rise time* o tiempo de subida, entre el 10% y el 90% del pico de tensión transitoria (definición IEC) es menor [60] [62].

- Tensión de operación: El fenómeno tiene mayor incidencia en sistemas de baja tensión con una tensión superior a 460 V, ya que las descargas parciales se empiezan a presentar a partir de los 700 V pico [32] [60] [63].

La tensión pico que recibe el motor se modela según la Ecuación 2:

Ecuación 2. Tensión pico en bornes del motor [60].

$$U_{pk} = U_{dc} \cdot (1 + \Gamma)$$

Donde:

Ecuación 3. Coeficiente de reflexión del sistema [60].

$$\Gamma = \frac{Z_{motor} - Z_{cable}}{Z_{motor} + Z_{cable}}$$

Siendo [60],

U_{pk} : Tensión de onda reflejada

U_{dc} : Valor del Bus D.C. del VFD

Z: Impedancia

Γ : Coeficiente de reflexión

Por lo tanto, cuando la impedancia del motor y el cable son iguales, el fenómeno no se presenta, pues hay un acople perfecto [60].

Cuando se tienen cables paralelos la impedancia característica del cable se reduce, lo que implica un coeficiente de reflexión más alto [62].

Muchas veces este fenómeno no se evidencia en la primera conmutación, sino que será la acumulación de conmutaciones lo que aumentará la tensión en bornes del motor.

Este fenómeno somete al aislamiento de todos los componentes a un alto nivel de estrés, es decir, que los sistemas de aislamiento deben diseñarse para soportarlo [60].

Todo esto implica mayores costos en todos los componentes que integran un grupo de bombeo:

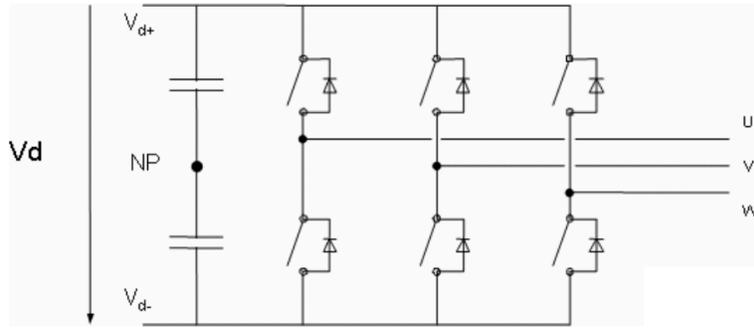
- Cableado: Se requieren cables con mejores aislamientos (aislamientos de Media Tensión). En el caso de EPM se utiliza el cable extraflexible DLO – *Diesel Locomotive Cable* que soporta hasta 2 kV y que puede requerir el doble de la inversión frente a un cable con aislamiento de baja tensión.
- VFD: Se requieren equipos para trabajo pesado o HD – *Heavy Duty*, para que soporte la sobrecorriente debida a las oscilaciones de alta frecuencia, lo cual puede representar un sobre costo de alrededor del 30% [60].
- Motor: Se requieren motores aptos para trabajar con VFD que pueden ser entre 40 y 60% más costosos, ya que un motor estándar eventualmente puede fallar por cortocircuitos entre fases del bobinado [60].

2.4. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

La principal diferencia entre los VFD de baja tensión disponibles en el mercado en la cantidad de dispositivos de conmutación en la sección de salida o etapa de inversión, esto permite que los VFD puedan clasificarse, entre otros, por su topología o cantidad de niveles [54] [62].

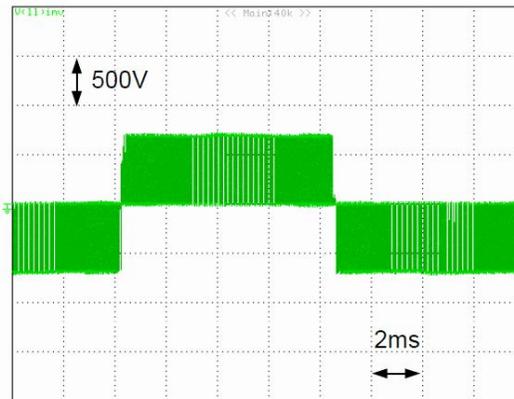
2.4.1.VFD de dos niveles. Un VFD de dos niveles está compuesto por seis dispositivos de conmutación, es decir, tiene seis pulsos, dos por fase, como se presenta en la topología de la Figura 6.

Figura 6. Topología VFD de dos niveles.



La tensión de salida se produce al conmutar entre los niveles positivo y negativo de la tensión de Bus D.C., es decir, existen dos niveles en la forma de onda y tres niveles de línea o tensiones de salida, como se observa en la Figura 7 [54].

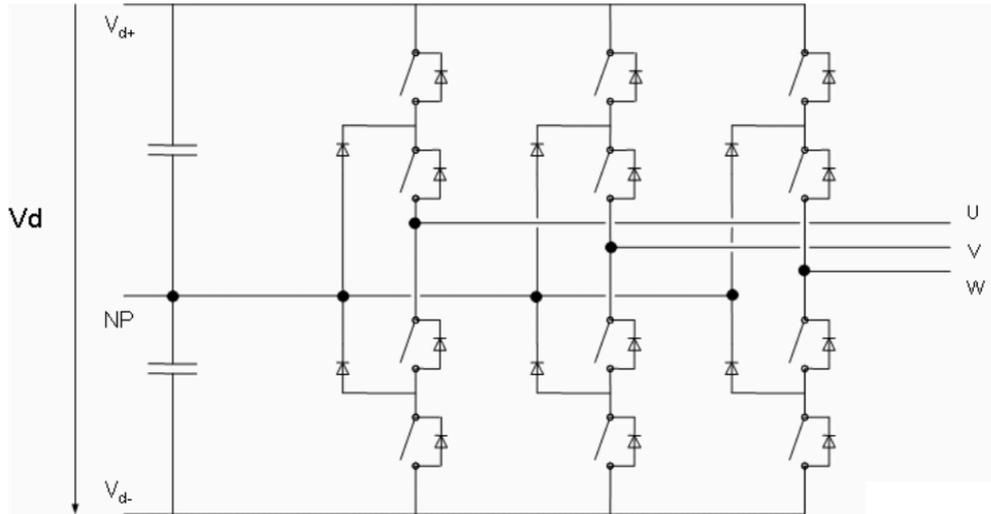
Figura 7. Tensión de salida de línea de un VFD de dos niveles.



En este esquema de conmutación, dependiendo del *rise time* del impulso de tensión a la salida del VFD, la longitud del cable y la impedancia de la máquina, se pueden generar sobretensiones en los terminales del motor (típicamente el voltaje pico puede llegar hasta dos veces la tensión del Bus D.C. entre fases). El exceso de voltaje se crea por ondas reflejadas en la interfaz entre el cable y los terminales de la máquina o del VFD, de acuerdo con la teoría de la línea de transmisión y la onda viajera [61].

2.4.2.VFD de tres o más niveles (n niveles). Un VFD de tres niveles está compuesto por dieciocho dispositivos de conmutación o pulsos, seis por fase; en la Figura 8 se presenta su topología.

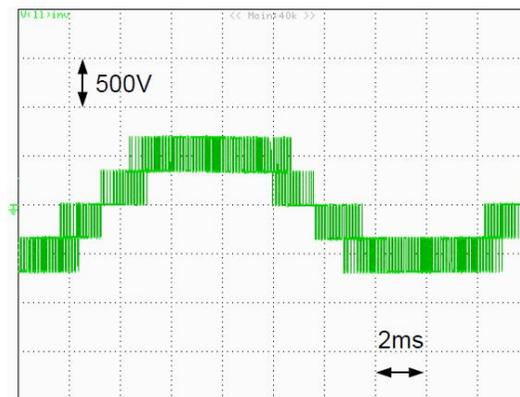
Figura 8. Topología del VFD de tres niveles.



Los variadores multiniveles, ofrecen tensiones de salida intermedias en la conmutación, disminuyendo en amplitud el espectro de armónicos, además de desplazarlos a más altas frecuencias. Dado que, los convertidores multinivel requieren mayor cantidad de componentes, suelen ser más costosos y usualmente se utilizan para aplicación de media tensión [54].

La Figura 9 muestra la tensión de salida en terminales, cuando se alimenta desde un VFD de tres niveles. En este caso se observan claramente los cinco pasos, niveles de línea o tensiones de salida (dos pasos positivos, dos negativos y el paso por cero) [61].

Figura 9. Tensión de salida de línea de un VFD de tres niveles.



Debido a los pasos más cortos del VFD de tres niveles, la sobretensión también es el doble, pero en este caso de la tensión de paso, lo que significa que la tensión pico es de máximo 1,5 veces la tensión del bus D.C. de acuerdo con la Ecuación 4 [64].

Ecuación 4. Tensión pico para VFD de tres niveles [64].

$$V_{pk} = 1,5 \cdot U_{dc}$$

De acuerdo con las fórmulas anteriores es posible inferir que un cuantos más niveles tenga el VFD menor es el valor pico a pico de la tensión, el gradiente de tensión y la tensión de salto, disminuyendo el estrés sobre el bobinado y su aislamiento.

2.5. REGLAMENTACIÓN

El uso de VFD en bombeos es una de las recomendaciones del Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, donde se indica lo siguiente para aumentar la eficiencia operacional y energética:

“Reducir el consumo de energía en bombas y sistemas de bombeo, y lograr que la bomba trabaje en el punto de operación del sistema, se debe presentar alternativas; instalar variadores de frecuencia para controlar el número de rev/min; reducir el diámetro externo del impulsor de la bomba; válvulas de control de bomba o caudal” [5].

Por lo tanto, en todos los casos se debería considerar como una solución a implementar en primera instancia y solo sí se logra determinar que no es viable se puede omitir.

CAPÍTULO 3. REACTORES Y FILTROS DE SALIDA

Debido a su forma de funcionamiento, los VFD generan un estrés adicional en los devanados del motor ya que inducen el fenómeno de descargas parciales que eventualmente derivan en una degradación del sistema de aislamiento y falla prematura del motor. Para garantizar el correcto funcionamiento de un motor sumergible controlado por VFD se deben considerar cuidadosamente las restricciones técnicas de los fabricantes para su uso final [55]. Sin embargo, cada una puede tener diferentes tratamientos:

- Programables: Se pueden cumplir simplemente con realizar una buena parametrización del sistema del control. Este es el caso de los tiempos de arranque, parada, número de arranques y las diferentes frecuencias.
- No programables: Pueden requerir componentes adicionales para cumplirse. Este es el caso de gradiente de tensión y la tensión pico [55].

Para garantizar el cumplimiento de estos dos requerimientos algunos fabricantes recomiendan el uso de filtros de salida [8] [13] [14] [18].

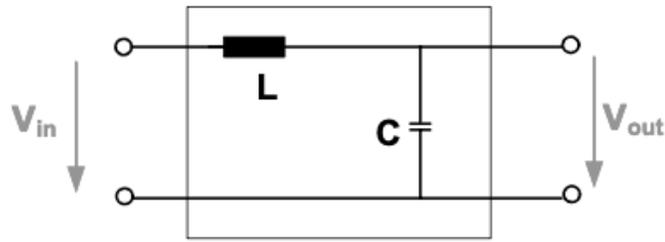
Estos equipos permiten limitar el gradiente de tensión, reducir el coeficiente de reflexión, y por ende la tensión pico. También pueden mitigar el efecto capacitivo en los cables, así como mejorar el rendimiento general del sistema [55] [62].

A continuación, se presentan su principio de funcionamiento y las diferentes clases de filtros disponibles en el mercado, así como una comparación entre ellos.

3.1. FUNDAMENTOS

La topología básica de todos los filtros de salida comerciales para uso con VFD es una combinación de inductores y capacitores, siendo la topología más básica la que aparece en la Figura 10. En general, son filtros tipo pasa bajo [62].

Figura 10. Topología básica de un filtro.



Incluso los filtros que solo se componen de una inductancia podrían modelarse de acuerdo con la topología anterior, considerando, por ejemplo, las capacitancias parásitas del cable [62].

Los filtros se diseñan para suprimir todas las amplitudes en el espectro de la tensión de entrada con frecuencia superiores a la frecuencia de resonancia. Sin embargo, las amplitudes en la región de la frecuencia de resonancia se amplifican, por lo tanto, se debe seleccionar cuidadosamente la frecuencia de resonancia para garantizar que no se tengan sobretensiones [62].

En la Ecuación 5 muestra cómo calcular la frecuencia de resonancia.

Ecuación 5. Frecuencia de resonancia [62].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$

3.2. SOLUCIONES DISPONIBLES EN EL MERCADO

Los reactores, los filtros de salida y otras posibles soluciones están considerados en las normas IEC, sin embargo, aunque se tenga un sistema accionado por VFD, estos no se consideran de uso obligatorio.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que pueden afectar el control, aumentar el estrés térmico y el estrés por corriente del VFD, por lo tanto, es importante que el VFD esté diseñado para funcionar en conjunto con un filtro; igualmente deben seleccionarse para cada aplicación y considerar los efectos de la

caída de tensión por la inserción de estos al circuito, así como la posible reducción del torque pico del motor [54] [55] [62].

3.2.1. Filtro seno. Los filtros seno son un diseño especial de los filtros pasa bajo que permite desviar las corrientes de alta frecuencia y la forma de onda resultante se vuelve prácticamente sinusoidal. Su objetivo principal es suprimir todas las amplitudes en el espectro de la tensión de entrada en el rango de la frecuencia de conmutación y las frecuencias superiores; la tensión de salida contiene principalmente la frecuencia fundamental de la tensión de entrada [54] [62].

La frecuencia de resonancia de este filtro debe seleccionarse entre la frecuencia fundamental y la frecuencia de conmutación de acuerdo con la Ecuación 6 [62].

Ecuación 6. Parámetro de selección de la frecuencia de resonancia de un filtro seno [62].

$$f_1 < f_o < f_p$$

Adicionalmente, debe considerarse lo siguiente [62]:

- a. Si la frecuencia de resonancia es demasiado baja el filtro puede ser excitado por los armónicos de la frecuencia fundamental.
- b. Si la frecuencia de resonancia es demasiado alta la supresión de las amplitudes con la frecuencia de pulso puede ser inadecuada.

Con un filtro seno todos los fenómenos asociados a la variación de frecuencia pueden mitigarse o mejorarse significativamente. Adicionalmente, solo un filtro seno puede mejorar las pérdidas del motor y su nivel de ruido acústico, sin embargo, es la solución más costosa y no son adecuados para las aplicaciones que requieren un alto rendimiento dinámico [54] [62].

Como ventajas adicionales, se tiene que, si son instalados a la salida del VFD, puede tener ahorros significativos en el cableado, pues ya no se requiere que sea especial para VFD y/o con aislamiento en Media Tensión.

También que los efectos de gradiente de tensión (dv/dt), debido a un *rise time* corto, son completamente eliminados por esta clase de filtros [62].

Su principal limitación es que tienen una alta caída de tensión en la frecuencia fundamental, esto debido a que su frecuencia de resonancia relativamente baja, esta caída puede ser hasta del 6% de la tensión en el inductor del filtro, lo que disminuye la potencia del VFD y la potencia mecánica del rotor, sin embargo, esta caída de tensión puede considerarse en la fase de diseño mitigando este efecto [54] [55] [62].

Por último, es importante recordar que si bien algunos fabricantes no indican el tipo de filtro a utilizar y otros indican que pueden usarse tanto filtros dv/dt como filtros seno, hay otros que indican exclusivamente el uso de filtros seno para garantizar el correcto funcionamiento del motor [18].

3.2.2. Filtro limitador de tensión (filtro dv/dt). El diseño de un filtro dv/dt consta de condensadores, inductores y diodos o resistencias que se utilizan para limitar el dv/dt , reduciendo drásticamente el pico de tensión y aumentando el *rise time*. Su topología básica es la misma que la de un filtro seno, su diferencia radica en la elección de su frecuencia de resonancia f_0 [62] [61].

El objetivo de un filtro dv/dt es aumentar el *rise time* de la tensión de salida del VFD. Con el fin de garantizar un *rise time* $t_{r\ min}$, la frecuencia de resonancia debe elegirse de acuerdo con la Ecuación 7 [62]:

Ecuación 7. Parámetro de selección de la frecuencia de resonancia de un filtro dv/dt [62].

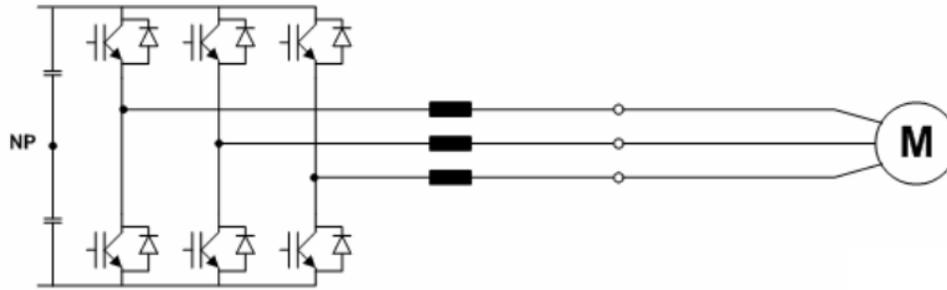
$$f_0 < \frac{1}{2 \cdot t_{r \min}}$$

Si el filtro se diseña como una combinación LC simple, similar a la observada en la Figura 10, se puede presentar una sobretensión con factor de hasta 2 en la tensión de salida, ya que la frecuencia de resonancia del filtro esta por encima de la frecuencia de pulso f_p del VFD. Para evitarlo, se pueden utilizar elemento de amortiguación adicional y dependiendo de su magnitud, permanece una cierta sobretensión en la salida [62].

Al aumentar el *rise time* los filtros dv/dt reducen el estrés del motor por tensión, también son una buena solución para corrientes en los cojinetes. Se deben tener en cuenta que su instalación tiene un aumento en las pérdidas entre el 0,5% y el 1,0% y puede haber una reducción en el torque [54] [62].

3.2.3. Reactores de salida. Son la forma de filtrado más económica disponible en el mercado, se diseñan para adaptarse a la forma PWM y pueden reducir el gradiente de tensión y la tensión pico. En la Figura 11 se observa que su topología no incluye un condensador, no se considera realmente un filtro, sin embargo, se combina con las capacitancias parásitas del cable y de los bobinados del motor, por lo tanto, es una versión reducida de un filtro dv/dt, que puede disminuir el dv/dt en los terminales del motor, así como también permite aumentar la distancia entre el VFD y el motor. Sin embargo, su selección debe hacerse de forma cuidadosa porque teóricamente también pueden extender la duración del sobre impulso [54] [62] [65].

Figura 11. Topología de un reactor.



3.2.4. Unidad terminal eléctrica. Existe también la opción instalar junto al motor una unidad terminal eléctrica, que no es otra cosa que un dispositivo que sintoniza la impedancia característica del motor con la del cable. El propósito de hacer coincidir la impedancia del motor con la impedancia del cable es evitar la onda reflejada, sin embargo, este filtro aumenta las pérdidas entre el 0,5% y el 1,0% [54].

3.2.5. Filtros de alta frecuencia EMI (Electromagnetic interference). Los filtros HF son filtros de modo común que reducen el nivel de ruido EMI de las emisiones conducidas y radiadas en un rango de frecuencia entre 150 kHz y 100 MHz [62].

3.3. COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES

Para conocer el comportamiento de las diferentes soluciones o medidas preventivas disponibles, se presentan las formas de onda de salida entregadas por cada solución sobre el mismo sistema (Figura 12) [54].

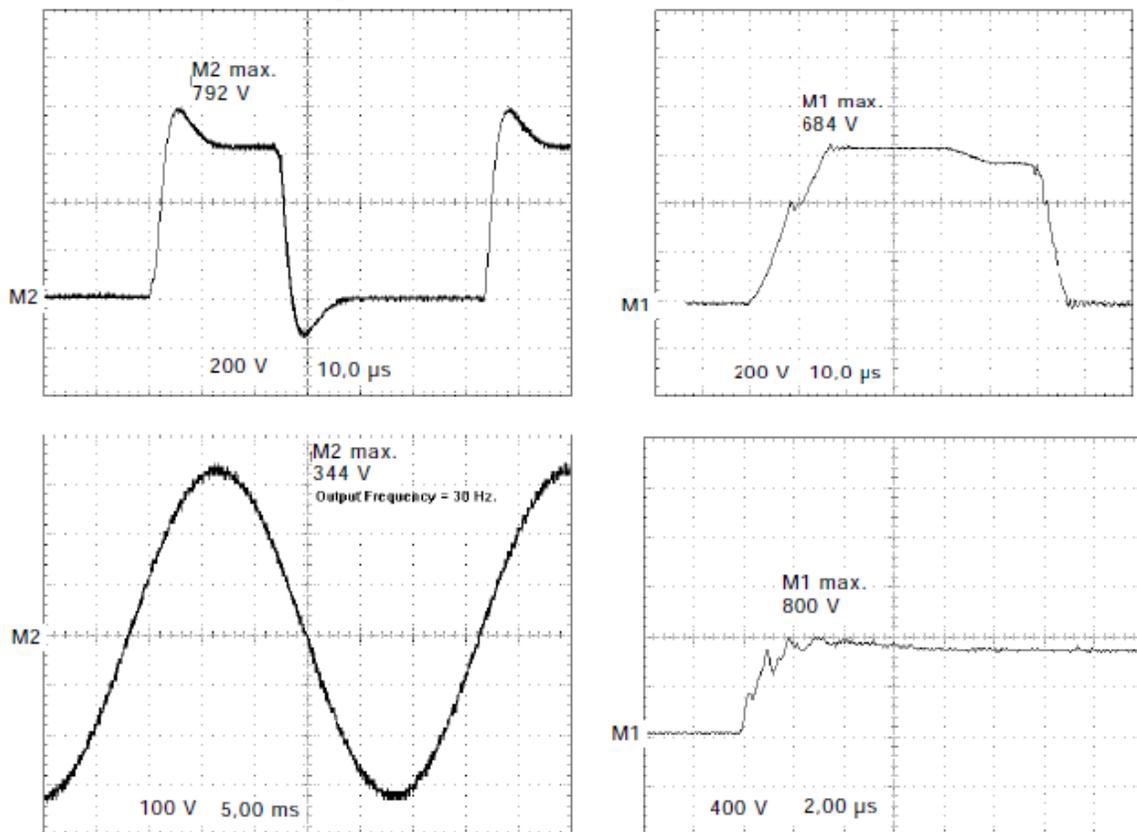
En el primer cuadrante de la figura se presentan los resultados al instalar un filtro dv/dt ; se evidencia que el filtro corta los picos de la onda PWM, que la tensión pico se reduce a 684 V y que el dv/dt es de 40 V/ μ s [54].

En el segundo cuadrante, con la instalación del reactor de salida se observan picos suavizados en cada cambio de nivel, adicionalmente, el *rise time* aumenta aproximadamente a 5 μs y la tensión pico se reduce a 792 V [54].

En el tercer cuadrante se presenta la tensión de salida de línea de un filtro seno por 1,5 periodos; el filtro entrega una forma de onda sinusoidal, la tensión pico es de 344 V y no se tiene un *rise time*, ya que su definición no es aplicable a una onda sinusoidal [54].

Por último, en el cuarto cuadrante se muestra el efecto de la instalación de la unidad terminal, es decir, la onda PWM del VFD sin sobretensiones por onda reflejada, en este caso la tensión pico es de 800 V con un *rise time* de 2 μs [54].

Figura 12. Ondas características de cada solución.



No se presenta el efecto sobre la forma de onda del filtro EMI, ya que este no incide en la tensión de salida y solo se instala para mitigar la interferencia en altas frecuencias que afecta los sistemas de comunicaciones [54].

Las formas de ondas anteriores permiten conocer el comportamiento general de cada uno de los filtros y en primera instancia hacer una preselección de la solución a implementar de acuerdo con que tan sensible es el motor que se va accionar.

Adicionalmente, en la selección de la solución también debe considerarse el costo, las pérdidas y los pesos. En la Tabla 3 se presentan los valores indicativos para distintos motores.

Tabla 3. Costos relativos, pérdidas y pesos de las medidas preventivas (adaptada) [55].

Motor	Medidas preventivas		
	Reactor	Filtro dv/dt	Filtro seno
Costos relativos típicos [%] (Motor convencional TEFC ³ = 100%)			
2.2kW 400 V	50%	100%	150%
75 kW 400 V	30%	40%	45%
250 kW 400 V	10%	15%	30%
160 kW 690 V	10%	20%	35%
250 kW 690 V	10%	15%	25%
Pérdidas típicas [kW]			
2.2kW 400 V	0,09	0,10	0,63
75 kW 400 V	0,20	0,24	2,2
250 kW 400 V	0,22	0,25	9,7
160 kW 690 V	0,09	0,12	6,6
250 kW 690 V	0,12	0,15	8,0
Pesos típicos [kg]			
2.2kW 400 V	2,2	2,4	6
75 kW 400 V	19	21	75
250 kW 400 V	82	90	690
160 kW 690 V	60	62	250
250 kW 690 V	82	90	690

De lo anterior, es posible concluir que la mejor solución técnica disponible en el mercado es el filtro seno porque entregada una onda sinusoidal, sin embargo, también es la más costosa, la más pesada y la que mayores pérdidas genera y solo se hace viable cuando el tamaño del motor a proteger es lo suficientemente grande.

³ TEFC: Totalmente cerrado, con ventilación forzada (*Totally Enclosed, Fan-Cooled*).

CAPÍTULO 4. SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN TÉCNICA

Las bombas lapicero y los VFD son dos tecnologías importantes para el negocio de Aguas de EPM ya que se puede lograr una disminución del costo de inversión inicial (CAPEX), como de su Administración, Operación y Mantenimiento – AOM (OPEX), sin embargo, se debe tener un especial cuidado en su integración dentro de un bombeo ya que son interdependientes.

A pesar de que algunos fabricantes de bombas lapicero indiquen en sus fichas técnicas que estas son aptas para trabajar con VFD, la realidad es que pueden ser compatibles, siempre y cuando se cumplan unos requisitos mínimos. Es decir, su integración no es tan sencilla como simplemente solicitar que las bombas sean aptas para trabajar con VFD, como *a priori* se pudiera pensar.

Con el fin de realizar una primera selección de la solución a implementar, en este capítulo se evalúan las distintas opciones disponibles en el mercado, a partir de modelos matemáticos que permitan comparar su respuesta con respecto a los criterios de evaluación determinados.

4.1. VALORES BASE

Con el fin de garantizar un criterio de evaluación uniforme, se utilizan los valores presentados en la Tabla 4, que corresponden a las restricciones técnicas no programables que el usuario debe garantizar para el uso de motores sumergibles con VFD y que fueron seleccionadas en el CAPÍTULO 1.

Tabla 4. Valores de referencia requeridos en bornes del motor.

PARÁMETRO		ESTÁNDAR
Gradiente de tensión	dv/dt [V/ μ s]	500
Tensión pico a pico	V_{pk} [V]	700

Como valores base del VFD, se toman los indicados por el fabricante Yaskawa para la referencia A1000, que se presentan en la Tabla 5, considerando

que en EPM se tiene un parque instalado muy amplio de estos equipos. Este es un VFD tradicional de dos niveles [66].

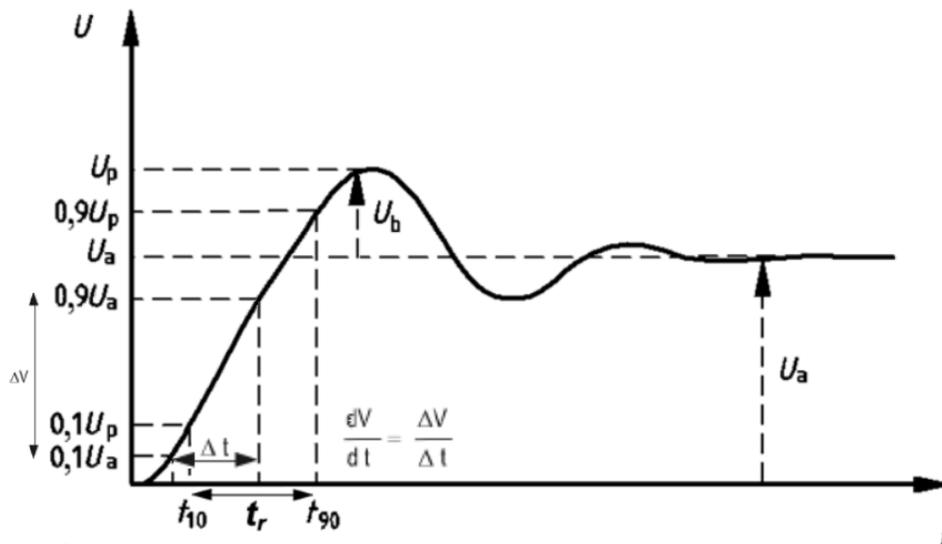
Tabla 5. Valores garantizados para VFD Yaskawa A1000 [66].

PARÁMETRO		YASKAWA A1000
Tensión pico máxima	V_{pk} [V]	1301
Rise time	t_r [μ s]	0,125 – 0,250

Para el caso del VFD, el fabricante está aplicando el criterio de la norma NEMA MG1 *part* 31 para la determinar estos valores [66].

Es importante señalar que las definiciones de rise time difieren entre las normas IEC y NEMA. Para el caso de NEMA, el *rise time* (Δt) se define como el tiempo requerido para que la tensión se eleve desde el 10% hasta el 90% de la tensión en estado estable o tensión del Bus D.C. (U_a), por otro lado, IEC define el *rise time* (t_r) como el tiempo de subida entre el 10% y el 90% del pico de tensión transitoria en terminales del motor (U_p). En la Figura 13 se puede evidenciar la diferencia [59] [67].

Figura 13. Definición del rise time según normas NEMA e IEC, adaptada de [61] [67].



Por lo tanto, se debe tener cuidado de no mezclar los criterios cuando se calcule el *rise time*. Por efecto del cable, el *rise time* calculado con el criterio IEC

siempre es mayor que en NEMA (que corresponde al valor informado por los fabricantes de VFD). También difieren las definiciones de la tensión del Bus D.C. que en cada caso se calcula con la Ecuación 8 y la Ecuación 9 respectivamente [59] [62].

Ecuación 8. Tensión del Bus D.C. de acuerdo con la norma NEMA [59].

$$U_{dc} = \sqrt{2} \cdot U_N \cong 1,41 \cdot U_N$$

Ecuación 9. Tensión del Bus D.C. de acuerdo con la norma IEC [61].

$$U_{dc} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_N \cong 1,35 \cdot U_N$$

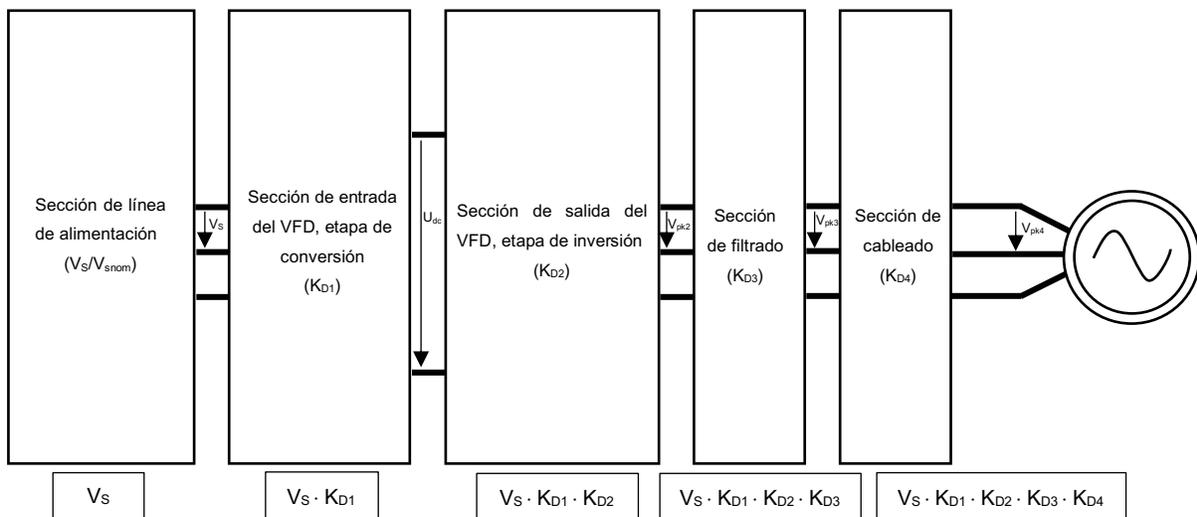
En el caso de estudio se requiere conocer la forma de onda en bornes del motor, incluyendo el efecto de onda reflejada que pueda presentarse, por ello, se utilizan las definiciones de IEC. De acuerdo con lo anterior, se calcula la tensión del bus D.C con la Ecuación 9.

$$U_{dc} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 460 = 621,2 \text{ V}$$

En la

Figura 14 se presenta un diagrama de circuito equivalente de los elementos que inciden en el cálculo de la tensión pico y gradiente de tensión a partir de la tensión de línea de acuerdo con el criterio IEC.

Figura 14. Diagrama de circuito equivalente para calcular la tensión en bornes del motor, adaptada de [62].



Dado que las secciones de conversión de entrada y de inversión hacen parte del VFD y se tienen los parámetros de salida de este, en este caso solo se analizan las secciones de filtrado y cableado. A continuación, se presentan los factores a aplicar dependiendo de cada topología. En la Tabla 6 se muestran los factores de amplificación al incluir un filtro.

Tabla 6. Parámetros típicos de la sección de filtrado para diferentes topologías (adaptada) [62].

Parámetro/Filtro	Sin filtro	Seno	dv/dt	Reactor de salida
K_{D3}	1	0,97	1,2 ... 1,5	1,2 ... 2
t_{r3}	t_{r2}	N.A.	2 μ s	500 ns ... 1 μ s

Las fórmulas presentadas en la Tabla 7 se utilizan para calcular el *rise time* y la tensión en bornes del motor para cada topología considerando el efecto del cableado [62].

Tabla 7. Parámetros típicos resultantes para la sección de cableado de diferentes topologías (adaptada) [62].

Parámetro	Después del cableado, por debajo de la longitud crítica y sin filtro	Después del cableado, por encima de la longitud crítica y sin filtro	Después de un filtro dv/dt o un reactor de salida	Después de un filtro seno
K_{D4}	$\left(\frac{l_c \cdot \Gamma}{l_{cr}} + 1\right)$	$(1 + \Gamma)$	1*	1
t_{r4}	$\approx t_{r3} \times \left(\frac{l_c \cdot \Gamma}{l_{cr}} + 1\right)$	$\geq t_{r3} \times (1 + \Gamma)$	2 μ s	N. A.

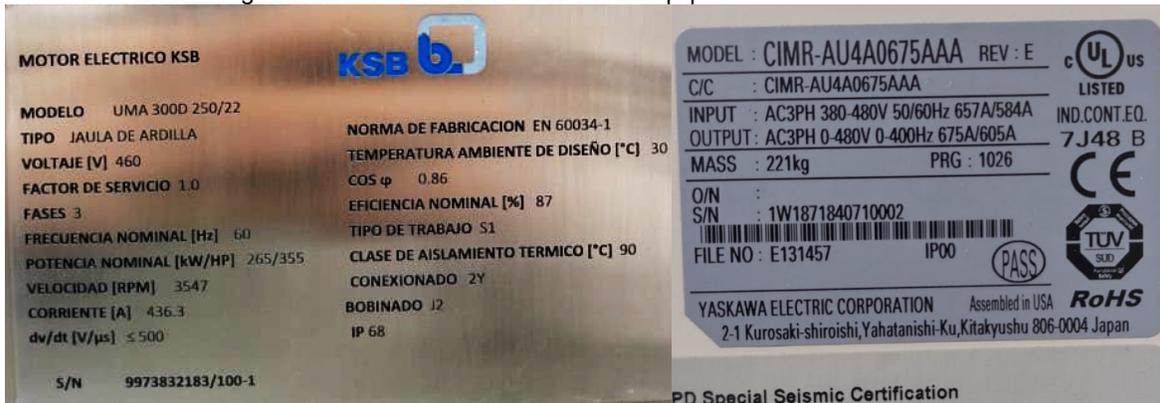
Nota: En caso de que la distancia del cable este en el rango o por encima del valor crítico, el valor alcanza hasta 2/ K_{D3}

Para determinar el dv/dt, de acuerdo con la definición de IEC, en bornes de un motor sumergible, antes de una sección de filtrado, se utiliza como ejemplo los parámetros del bombeo Porvenir, que es una de las estaciones seleccionadas para la implementación piloto de la solución. En la Figura 15 se presenta la estación de bombeo Porvenir, que consiste en cuatro grupos de bombeo, cada uno accionado por un VFD. Los VFD se encuentran instalados en la caseta que se observa al fondo y la distancia entre los dos equipos varía entre 45 m y 60 m. En la Figura 16 se presentan las placas de características tanto del VFD como del motor.

Figura 15. Estación de bombeo Porvenir.



Figura 16. Placas características de los equipos del bombeo Porvenir.



A continuación, el resumen de los parámetros:

- Tensión nominal (U_N) = 460 V
- Potencia del motor (P_2) = 265 kW
- Frecuencia nominal (f_1) = 60 Hz

- Tipo de cable: *Diesel Locomotive Cable* “DLO”
- Capacitancia del cable (C_0) = 130 pF/m
- Inductancia del cable (L_0) = 650 nH/m
- Longitud del cable (L_c) = 60 m (distancia máxima para el grupo 1)
- Tensión pico máxima a la salida del VFD (V_{pk}) = 1301 V [66]
- *Rise time* del VFD (t_{r2}) \cong 0, 250 μ s [66]
- Frecuencia de switcheo (f_{sw}) = 5 kHz

Se procede a calcular la velocidad de propagación v de la onda de acuerdo con la Ecuación 10.

Ecuación 10. Velocidad de propagación de onda [62].

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}} = 108,8 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Posteriormente, se calcula la longitud crítica del cable, la cual se define como la longitud de cable donde un pulso viaja a lo largo del cable del motor, se refleja en los terminales del motor y regresa a la salida del VFD después de un tiempo igual al *rise time*, utilizando la Ecuación 11 [62].

Ecuación 11. Longitud crítica del cable [62].

$$l_{cr} = \frac{v \cdot t_{r3}}{2}$$

Para facilitar los cálculos, se considera el mayor *rise time* indicado por el fabricante, que se acerca lo suficiente a los valores típicos definidos por IEC que se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Tiempo de subida típicos de un VFD (adaptada) [62].

	Aplicaciones de baja tensión	Aplicaciones de media tensión
t_{r2}	50 ns ... 200 ns	100 ns ... 1 μ s

Respecto al parámetro t_{r3} , es igual t_{r2} a cuando no se tiene filtro de acuerdo con lo definido en la Tabla 6 y presentado en la Ecuación 12.

Ecuación 12. *Rise time* de la sección de filtrado para topología sin filtro [62].

$$t_{r3} = t_{r2} = 0,25 \mu s$$

Aplicando la Ecuación 11:

$$l_{cr} = \frac{v \cdot t_{r3}}{2} = \frac{108,8 \cdot 0,25}{2} = 13,6 \text{ m}$$

Por lo tanto, se determina que la longitud crítica de cableado para este sistema es 13,6 m.

En este caso, para una longitud de cableado de 60 m, se debe utilizar la Ecuación 13 para calcular el *rise time* de la etapa de cableado, ya que la longitud es mayor que la crítica [62].

Ecuación 13. *Rise time* de la sección de cableado por encima de la longitud crítica y sin filtro [62].

$$t_{r4} \geq t_{r3} \times (1 + \Gamma)$$

Para el coeficiente de reflexión del motor, se utiliza un valor de la típico tomado de la Tabla 9; en este caso $\Gamma = 0,82$ [62].

Tabla 9. Coeficiente de reflexión resultante para diferentes tamaños de motores [62].

Potencia del motor [kW]	Zm [Ω]	Γ
< 3,7	2000 – 5000	0,95
90	800	0,82
355	400	0,6

Finalmente, se procede a calcular t_{r4} aplicando la Ecuación 13:

$$t_{r4} \geq t_{r3} \times (1 + \Gamma) \geq 0,25 \times (1 + 0,82) \geq 0,455 \mu s$$

Con respecto al valor de la tensión pico esta se amplifica por efecto del cableado con el factor K_{D4} (Ecuación 14) aplicando la Ecuación 15 para distancias mayores a la distancia crítica.

Ecuación 14. Factor K_{D4} de la sección de cableado por encima de la longitud crítica y sin filtro [62].

$$K_{D4} = (1 + \Gamma) = 1,82$$

Ecuación 15. Tensión de salida en bornes del motor sin filtro [62].

$$V_{pk4} = U_{dc} \cdot K_{D3} \cdot K_{D4} = 621,2 \cdot 1 \cdot 1,82 = 1130,6 \text{ V}$$

En este caso la tensión pico para una distancia de cableado de 60 m alcanza los 1130,6 V.

Tomando el valor V_{pk} y el caso más desfavorable de t_{r4} , se realiza una aproximación del gradiente de tensión aplicando la Ecuación 16.

Ecuación 16. Gradiente de tensión en bornes del motor [67].

$$\frac{dv}{dt} \cong \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{1130,6 \cdot 0,8}{0,455} = 1987,8 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Por lo tanto, se confirma que no es posible utilizar los VFD con bombas lapicero sin la instalación de equipos adicionales para garantizar los parámetros requeridos. Se continua con el cálculo de los parámetros para las posibles soluciones identificadas.

4.2. MOTOR DOBLE ESTRELLA

Un motor con conexión de doble estrella (Y) reduce la tensión aplicada sobre los bobinados por un factor de $\sqrt{3}$ comparado con la conexión en doble delta, esto implica que la tensión pico soportada se incrementa por este mismo factor [34].

Sin embargo, el dv/dt requerido no cambia, ya que el aislamiento del motor permanece igual y este valor está asociado con el aumento de tensión que pueden soportar la primera o última bobina de cada devanado. En la Tabla 10 se presentan los valores requeridos.

Tabla 10. Parámetros para un motor doble Y.

PARÁMETRO	REQUERIDO	CALCULADO
dv/dt [V/ μ s]	500	1987,8
V_{pk} [V]	1212	1130,6

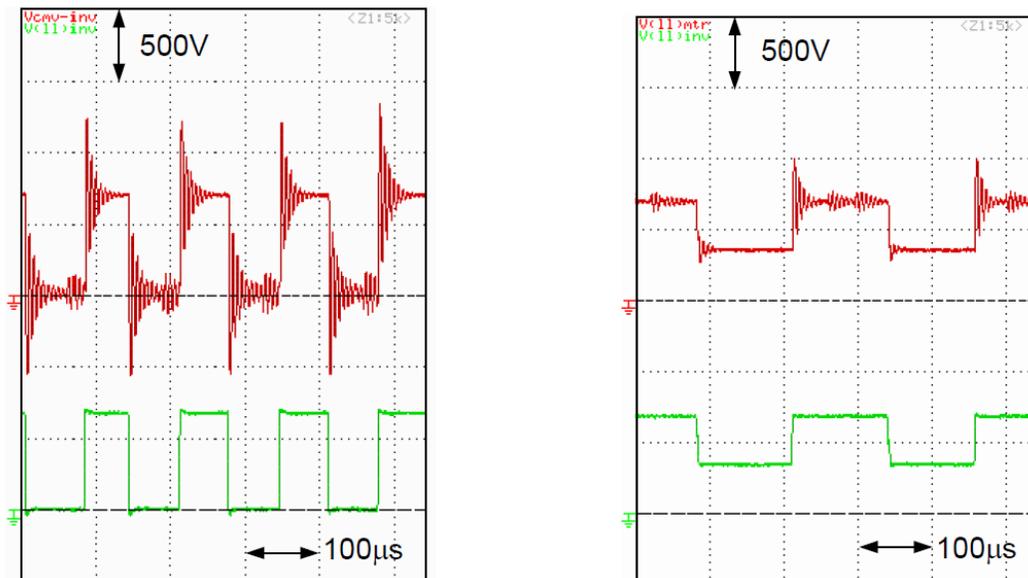
4.3. VFD DE TRES NIVELES

Considerando que la tensión paso (V_{step}) en un VFD de tres niveles es la mitad de un VFD convencional de dos niveles, la tensión pico en bornes del motor es mucho menor [64].

Típicamente, en un VFD convencional esta sobretensión puede alcanzar hasta 2 veces la tensión del Bus D.C. Sin embargo, debido a los pasos más cortos del VFD de tres niveles, la sobretensión también es el doble, pero en este caso de la tensión de paso, lo que significa que la tensión pico alcanza máximo 1,5 veces la tensión del bus D.C. [64].

En la Figura 17 se observa a la izquierda las ondas de tensión de un VFD de dos niveles, en rojo aparece la onda de tensión en bornes del motor y en verde, la onda de tensión a la salida del VFD; a la derecha, y con las mismas convenciones, se muestran las ondas de tensión de un VFD de tres niveles.

Figura 17. Sobretensiones en bornes del motor para las diferentes topologías de VFD.



La tensión pico máxima se calculará de acuerdo con la Ecuación 17:

Ecuación 17. Tensión pico máxima en un VFD de tres niveles vs. Un VFD de dos niveles [64].

$$V_{pk4-3n} = 0,75 \cdot V_{pk4-2n} = 0,75 \cdot 1130,6 = 847,9 V$$

Para el gradiente de tensión se aplica la Ecuación 16 y se considera el mismo *rise time* calculado previamente, teniendo en cuenta que este depende del comportamiento de los dispositivos de conmutación y su circuito amortiguador, que son iguales en las dos topologías [62].

$$\frac{dv}{dt} \cong \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{745,4 \cdot 0,8}{0,4} = 1490,9 V/\mu s$$

De acuerdo con lo anterior, se concluye que incluso con un VFD de tres niveles no es suficiente para garantizar la vida útil del motor.

4.4. REACTOR DE SALIDA

Para analizar la tensión de salida de los distintos filtros se utilizan los parámetros presentados en el numeral 4.1. Para calcular la tensión de salida con una sección de filtrado se aplica la Ecuación 15.

$$V_{pk4} = U_{dc} \cdot K_{D3} \cdot K_{D4} = 621,2 \cdot (1,2 \dots 2) \cdot 1 = 745,4 \dots 1242,4 V$$

Ahora se calcula el gradiente de tensión aplicando la Ecuación 16 y utilizando el valor previamente calculado y el *rise time* t_{r3} indicado en la tabla.

$$\frac{dv}{dt} \cong \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(745,4 \dots 1242,2) \cdot 0,8}{(0,5 \dots 1)} = 596,3 \dots 1987,8 V/\mu s$$

De acuerdo con los cálculos anteriores, ninguno de los dos parámetros se cumple y esta no sería una solución viable, esto sin considerar el efecto de la sección de cableado.

4.5. FILTRO dv/dt

Para analizar la tensión pico de salida y el gradiente de tensión del filtro dv/dt se utilizan nuevamente la Ecuación 15 y la Ecuación 16:

$$V_{pk4} = U_{dc} \cdot K_{D3} \cdot K_{D4} = 621,2 \cdot (1,2 \dots 1,5) \cdot 1 = 745,4 \dots 931,8 \text{ V}$$

$$\frac{dv}{dt} \cong \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(745,4 \dots 931,8) \cdot 0,8}{2} = 298,2 \dots 372,7 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Se encuentra, de acuerdo con lo calculado, que el gradiente de tensión cumpliría con lo requerido, sin embargo, la tensión pico es un poco superior al límite establecido.

4.6. FILTRO SENO

En el caso del filtro seno solo se analiza la tensión de salida, esto teniendo en cuenta que el efecto por gradiente de tensión relacionado con un *rise time* muy corto es eliminado por este tipo de filtros, por lo tanto, se aplica la Ecuación 15 [62].

$$V_{pk4} = U_{dc} \cdot K_{D3} \cdot K_{D4} = 621,2 \cdot 0,97 \cdot 1 = 602,5 \text{ V}$$

De acuerdo con lo esperado, es claro que el filtro seno cumple a cabalidad con la función de proteger al motor.

4.7. UNIDAD TERMINAL ELÉCTRICA

Considerando que una unidad terminal hace coincidir la impedancia del motor con la impedancia del cable para evitar la onda reflejada, se considera el valor pico como tensión del Bus D.C. de acuerdo con la Ecuación 18 y se utiliza el *rise time* calculado para la sección de cableado para calcular el gradiente de tensión empleando la Ecuación 16 [54].

Ecuación 18. Tensión de salida en bornes del VFD [62].

$$V_{pk2} = U_{dc} = 621,2$$

$$\frac{dv}{dt} \cong \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{621,2 \cdot 0,8}{0,455} = 1092,2 \text{ V}/\mu\text{s}$$

De acuerdo con lo anterior, la unidad terminal no es una solución suficiente para garantizar el gradiente de tensión.

4.8. OTROS

Ya que el filtro HF no tiene efecto sobre la forma de onda de salida, no es viable como solución para garantizar la tensión pico y el gradiente de tensión requeridos.

4.9. RESUMEN COMPARATIVO

En la Tabla 11 se presenta el resumen comparativo de resultados calculados, donde se encuentra que solamente el filtro seno cumple a cabalidad con los requerimientos establecidos para el motor.

El filtro dv/dt tiene unos valores cercanos a la solución requerida, por lo tanto, merece la pena revisar los resultados de su implementación. De acuerdo con lo

anterior, se seleccionan para la etapa de implementación y validación de resultados las soluciones de filtro seno y filtro dv/dt.

Tabla 11. Parámetros calculados para cada solución disponible en el mercado.

PARÁMETRO	EN BORNES DEL MOTOR	REQUERIDO	RESULTADO
VFD de 2 niveles (estándar) y motor doble Δ (estándar)			
dv/dt [V/μs]	1987,8	500	No cumple
V_{pk} [V]	1130,6	700	No cumple
VFD de 2 niveles (estándar) y motor doble Y			
dv/dt [V/μs]	1987,8	500	No cumple
V_{pk} [V]	1130,6	1212	Cumple
VFD de 3 niveles			
dv/dt [V/μs]	1490,9	500	No cumple
V_{pk} [V]	847,9	700	No cumple
Reactor de salida			
dv/dt [V/μs]	596,32 ... 1987,8	500	No cumple
V_{pk} [V]	745,4 ... 1242,4	700	No cumple
Filtro dv/dt			
dv/dt [V/μs]	298,2 ... 372,7	500	Cumple
V_{pk} [V]	745,4 ... 931,8	700	No cumple
Filtro seno			
dv/dt [V/μs]	N.A.	500	Cumple
V_{pk} [V]	602,5	700	Cumple
Unidad terminal eléctrica			
dv/dt [V/μs]	1092,2	500	No cumple
V_{pk} [V]	621,2	700	Cumple

También se identifica como posible alternativa la implementación de dos soluciones complementarias, como es el caso del filtro dv/dt con un motor doble estrella, ya que se cumplirían todos los requerimientos como se observa en la Tabla 12.

Tabla 12. Interpolación de parámetros calculados para un motor doble Y con filtro dv/dt.

PARÁMETRO	EN BORNES DEL MOTOR	REQUERIDO	RESULTADO
Filtro dv/dt y motor doble Y			
dv/dt [V/μs]	298,2 ... 372,7	500	Cumple
V_{pk} [V]	745,4 ... 931,8	1212	Cumple

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de la implementación de las dos soluciones seleccionadas, así:

- Filtro dv/dt : Bombeo Santa Catalina
- Filtro seno: Bombeo San Nicolás
- Filtro seno y motor doble Y: Bombeo Porvenir

Los filtros instalados corresponden a soluciones disponibles en el mercado de los fabricantes MTE y TCI como tecnología patentada.

Como alcance de este trabajo de investigación se realizó la implementación de la solución en el bombeo Porvenir, que incluye adquisición, instalación, pruebas y puesta en servicio de cuatro grupos motor-bomba, VFD y filtros; el montaje estuvo a cargo de la Dirección Montajes EPM. La implementación de soluciones en los bombeos Santa Catalina y San Nicolás fueron realizadas por el equipo del Proyecto La Estrella – Santa Catalina y la Unidad de Mantenimiento Equipos Provisión Aguas – UMEPA, respectivamente.

Sin embargo, para cada caso se realiza un análisis de resultados, de acuerdo con las medidas realizadas en campo.

5.1. METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

Para realizar mediciones de valores pico de tensión y el *rise time* para cuantificar el gradiente de tensión es necesario el uso de un osciloscopio que permita realizar disparos de pulso y captura la forma de onda ya que los valores rms que se puedan medir con equipos tradicionales no permiten detectar el problema y mucho menos cuantificarlo [68].

Para realizar la medida del *rise time* es necesario ir ajustando manualmente el momento del pulso de forma periódica y además aumentar lentamente la tensión de disparo para identificar la tensión pico máxima cuando el osciloscopio deje de disparar. Para las medidas presentadas en este capítulo, se utilizaron tanto el osciloscopio HIOKI MR8875 como el osciloscopio FLUKE 190-202 y todos los valores corresponden a tensiones de línea [68].

Una vez obtenidas las mediciones son fácilmente comparables ya que los valores de tensión pico y gradiente de tensión dependen más de la tensión de entrada, la longitud del cable y la onda PWM entregada por el VFD que de la potencia nominal del grupo de bombeo.

El alcance del plan de mediciones incluye las medidas realizadas durante las pruebas y puesta en servicio de cada una de las soluciones. En cada caso se realizó una segunda validación tres meses después en compañía de la UMEPA. Adicionalmente, como parte del plan de mantenimiento predictivo se realizan mediciones de capacitancia y aislamiento del motor, así como la captura de la forma de onda del filtro cada seis meses, lo que permitirá validar que solución se mantiene a largo plazo.

5.2. SIN FILTRADO

Como primera consideración, es importante tener en cuenta que por restricciones de espacio se tienen diferentes configuraciones o topologías, presentadas en la Tabla 13.

Tabla 13. Ubicación de los filtros.

Instalación	Solución	Ubicación
Bombeo San Nicolás	Filtro Seno	Junto al motor
Bombeo Porvenir	Filtro Seno y Motor doble Y	Junto al VFD
Bombeo Santa Catalina	Filtro dv/dt	Junto al VFD

Debido a que en el momento de la falla del bombeo Robledo no se realizaron mediciones de la onda de tensión en bornes del motor, se utilizan las mediciones a

la entrada del filtro de San Nicolás como referencia, considerando que, ya que los filtros quedaron instalados junto al motor, el comportamiento de la onda de tensión por efecto del fenómeno de onda reflejada se conserva hasta los bornes del filtro.

Con el fin de observar el fenómeno, en primera instancia, en la Figura 18 y la Tabla 14, se muestran los resultados de las mediciones de la onda de tensión a la salida del VFD para una frecuencia de conmutación de 5 kHz [69].

Figura 18. Tensión de salida del VFD – bombeo San Nicolás.

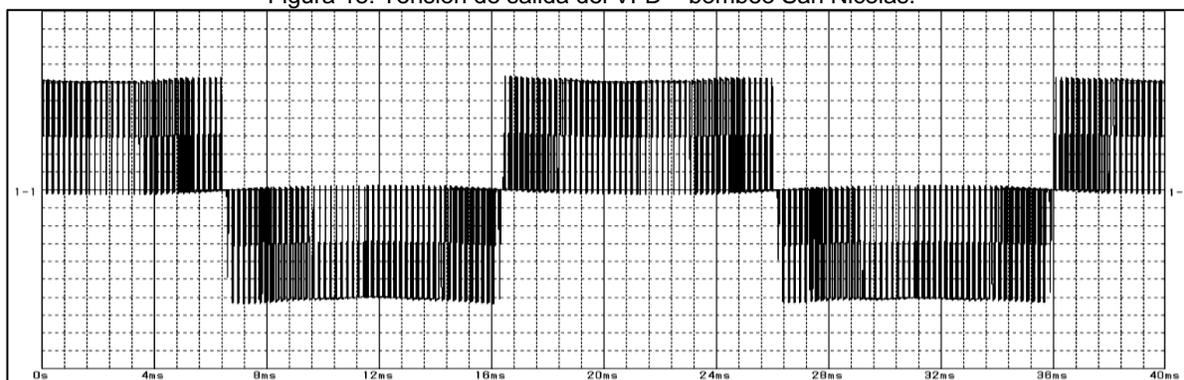


Tabla 14. Parámetros medidos a la salida del VFD con $f_{com}= 5$ kHz [69].

PARÁMETRO	MEDIDO	REQUERIDO	RESULTADO
U_{dc} [V]	617	N.A.	N.A.
t_{r2} [μ s]	0,206	N.A.	N.A.
dv/dt [V/ μ s]	2468	500	No cumple
V_{pk} [V]	637	700	Cumple

De acuerdo con las mediciones, se tiene una tensión pico de 637 V, un gradiente de tensión de 2468 V/ μ s, un *rise time* de 0,206 μ s y una tensión en el bus D.C. de 617 V, valores muy similares a los previamente calculados. Se observa que la tensión pico a la salida del VFD cumple con lo requerido, sin embargo, ni siquiera con una distancia de menos de 1 metro, el gradiente de tensión cumple con las condiciones establecidas [69].

Finalmente, en la Figura 19 y la Tabla 15, se muestra la forma de onda y valores medidos a la entrada del filtro para una frecuencia de conmutación de 5 kHz [69].

Figura 19. Tensión en bornes del filtro – bombeo San Nicolás.

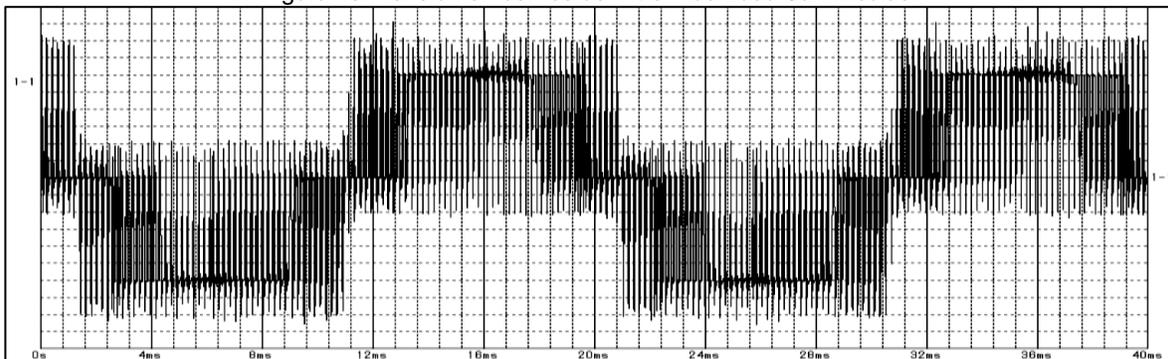


Tabla 15. Parámetros medidos a la entrada del filtro con $f_{com}= 5 \text{ kHz}$ [69].

PARÁMETRO	MEDIDO	REQUERIDO	RESULTADO
$dv/dt \text{ [V}/\mu\text{s]}$	3068,7	500	No cumple
$V_{pk} \text{ [V]}$	935	700	No cumple

Se evidencia la influencia del fenómeno de onda reflejada por efecto de la sección de cableado, ya que se alcanza una tensión pico de hasta 935 V y un gradiente de tensión de 3068,7 V/ μ s con una distancia entre VFD y motor de solo 50 m [69].

Estos valores tan altos de tensiones pico y gradiente de tensión son los que afectan los equipos, como sucedió en el bombeo Robledo, donde se encontró durante la reparación, falla por cortocircuito en los bobinados de los motores, como se observa en la Figura 20 [7].

Figura 20. Cabezal del bobinado de uno de los motores sumergibles del bombeo Robledo.



Nuevamente, se comprueba que no es posible realizar el control de las bombas lapicero con VFD sin la instalación de una sección de filtrado.

5.3. FILTRO SENO – BOMBEO SAN NICOLÁS

En el bombeo San Nicolás se instalaron filtros seno marca TCI con corriente nominal de 130 A para proteger motores sumergibles marca KSB de potencia nominal 53 kW y tensión de servicio 460 V, controlado por VFD Yaskawa de dos niveles, configurado con una frecuencia de conmutación de 5 kHz. En la Figura 21 se presenta el filtro instalado junto al motor.

Figura 21. Filtro seno TCI 130 A para el bombeo San Nicolás.



La onda de tensión en bornes del motor del bombeo San Nicolás, aguas abajo del filtro se presenta en la Figura 22 y los valores en la Tabla 16.

Figura 22. Tensión de entrada en bornes del motor con filtro seno – bombeo San Nicolás.

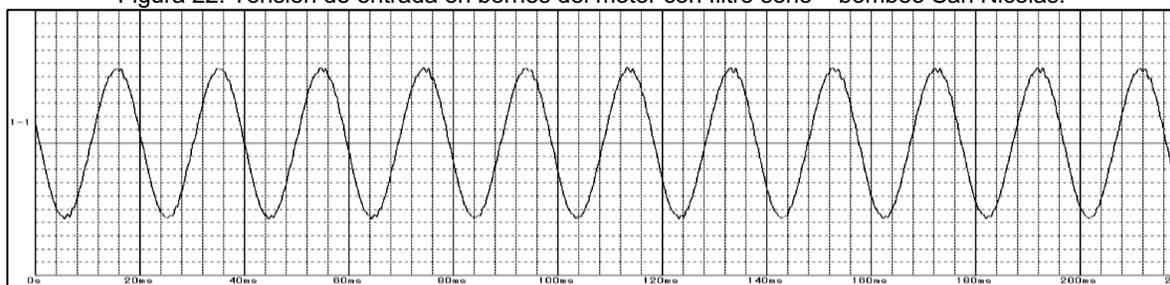


Tabla 16. Parámetros medidos a la entrada del motor con filtro seno y $f_{\text{conm}} = 5 \text{ kHz}$ [69].

PARÁMETRO	MEDIDO	REQUERIDO	RESULTADO
$dv/dt [V/\mu s]$	N.A.	500	Cumple
$V_{pk} [V]$	575	700	Cumple

Como resultado de la implementación se evidencia la forma de onda sinusoidal en contraposición con la onda PWM deformada por el fenómeno de onda reflejada que se tiene antes del filtro; la tensión pico máxima alcanzada es de 575 V, es un poco más baja de lo esperada, debido a que el bombeo se encuentra operando a 57 Hz. Se concluye que cumple con los requerimientos mínimos para la instalación de bombas lapicero de cualquier fabricante.

5.4. FILTRO SENO CON MOTOR DOBLE Y – BOMBEO PORVENIR

En el bombeo Porvenir se instalaron los primeros motores con bobinado interno doble Y, esta configuración se considera un caso especial, ya que el motor doble estrella tiene una mayor tolerancia respecto a la tensión pico.

En esta estación de bombeo se implementaron filtros seno marca MTE de corriente nominal 415 A, para la protección de motores sumergibles marca KSB de potencia nominal 265 kW y tensión de servicio 460 V accionados por VFD marca Yaskawa de dos niveles. En la Figura 23 se muestran dos de los filtros instalados detrás de los VFD.

Figura 23. Filtros seno MTE 415 A instalados en el bombeo Porvenir.



Para el bombeo Porvenir se realizaron dos pruebas; la primera, presentada en la Figura 24 y sus resultados en la Tabla 17, es con el VFD configurado con una frecuencia portadora de 5 kHz.

Figura 24. Tensión en bornes del motor con filtro seno y $f_{conm}= 5$ kHz – bombeo Porvenir.

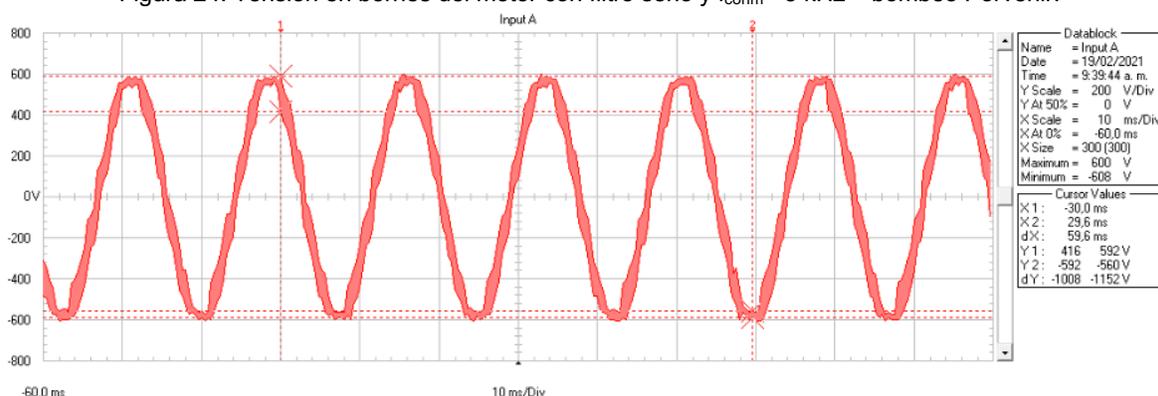


Tabla 17. Parámetros medidos a la entrada del motor doble Y con filtro seno y $f_{conm}= 5$ kHz [70].

PARÁMETRO	MEDIDO	REQUERIDO	RESULTADO
dv/dt [$V/\mu s$]	N.A.	500	Cumple
V_{pk} [V]	608	1212	Cumple

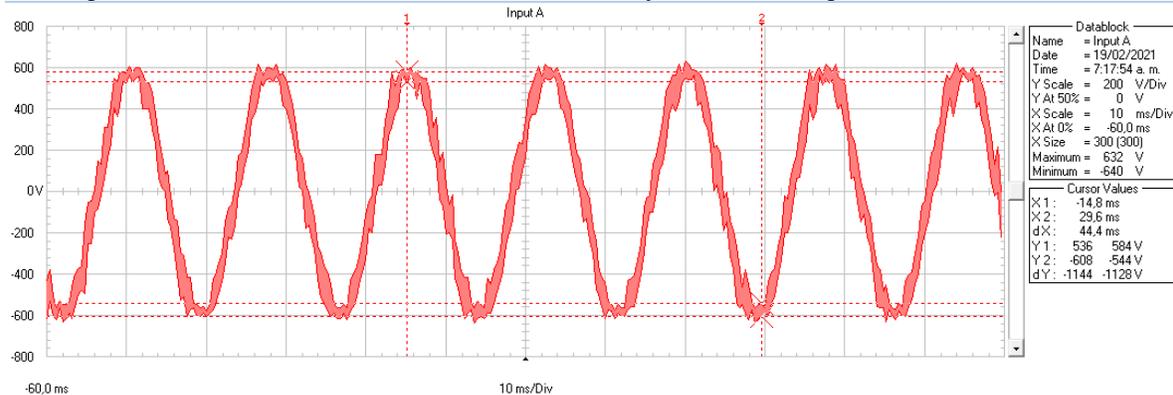
Se observa una forma de onda sinusoidal, mucho más suave que una PWM, sin impulsos de tensión instantáneos y con una tensión pico máxima de 600 V para una frecuencia de salida de 58,5 Hz [70].

La segunda prueba se presenta en la Figura 25 y la Tabla 18, se realiza con el VFD configurado con la función de Yaskawa *Swing PWM* (PWM cambiante), que utiliza una frecuencia portadora base de 2 kHz que cambia según un algoritmo que tiene como función objetivo reducir el ruido audible del motor [71] [72].

Tabla 18. Parámetros medidos a la entrada del motor doble Y con filtro seno y *Swing PWM* [70].

PARÁMETRO	MEDIDO	REQUERIDO	RESULTADO
dv/dt [$V/\mu s$]	N.A.	500	Cumple
V_{pk} [V]	640	1212	Cumple

Figura 25. Tensión en bornes del motor con filtro seno y la función Swing PWM – bombeo Porvenir.



Si bien se conserva la forma sinusoidal, en este caso se obtiene una tensión pico máxima de 640 V, lo que demuestra que el filtro tiene un mejor comportamiento cuando no se somete a cambios dinámicos de frecuencia; por lo tanto, no se recomienda activar el uso de la función Swing PWM cuando se instalen filtros seno [54].

Aunque un motor doble Y puede soportar una tensión pico de más de 1000 V, no se alcanzan este valor, pues para cualquiera de las dos configuraciones del VFD, se tienen máximo de 640 V. Sin embargo, la disminución de la tensión aplicada sobre los bobinados puede aumentar significativamente la vida útil del motor [73].

5.5. FILTRO dv/dt – BOMBEO SANTA CATALINA

El bombeo Santa Catalina es un bombeo nuevo que fue puesto en servicio un par de meses después de la falla en Robledo; allí se implementaron filtros dv/dt marca MTE de corriente nominal 200 A para la protección de motores sumergibles marca KSB de 132 kW y tensión de servicio 460 V, accionado por VFD marca Yaskawa de dos niveles, esto bajo la consideración que el fabricante recomienda de forma indistinta la instalación de filtros seno o filtros dv/dt , y que el costo de estos últimos es mucho menor que el de los filtros seno. El filtro instalado se presenta en la Figura 26, la forma de onda en la Figura 27 y los valores en la Tabla 19 [20] [74].

Figura 26. Filtro dv/dt MTE 200 A instalado en el bombeo Santa Catalina.



Figura 27. Tensión en bornes del motor con filtro dv/dt – bombeo Santa Catalina.

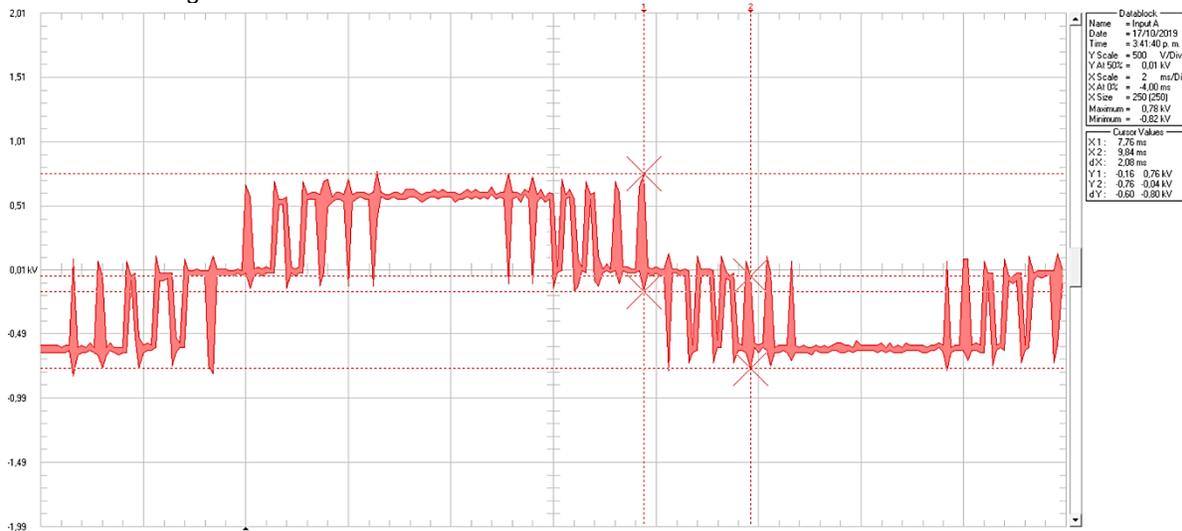


Tabla 19. Parámetros medidos a la entrada del motor con filtro dv/dt y $f_{conm} = 2$ kHz [74].

PARÁMETRO	MEDIDO	REQUERIDO	RESULTADO
dv/dt [$V/\mu s$]	395,8	500	Cumple
V_{pk} [V]	760	700	No cumple

En este caso, la forma PWM de la onda entregada al motor se mantiene, pero los picos por la conmutación se mitigan y la onda es mucho más suave. El hecho de que la frecuencia de conmutación sea de 2 kHz, ayuda a disminuir los picos de tensión, así como su tasa de repetición. Con la implementación se tiene una tensión pico de 760 V y un dv/dt de aproximadamente 395,8 $V/\mu s$ [74].

Se concluye que esta solución es adecuada para las bombas KSB, que soportan una tensión pico máxima de 800 V; también sería adecuada para las bombas SAER, sin embargo, este fabricante indica solo el uso de filtro seno [20] [18].

5.6. MEDIDAS DE CONTROL POSTERIORES – BOMBEO PORVENIR

Después de tres meses de realizar la puesta en servicio del bombeo Porvenir con la implementación de la solución se realizó una nueva medición con la UMEPA, con el fin de verificar el desempeño de la solución a largo plazo. En la Figura 28 se presenta la forma de onda y los valores en la Tabla 20 [75].

Figura 28. Tensión en bornes del motor con filtro seno y $f_{conm} = 5$ kHz – bombeo Porvenir, segunda prueba.

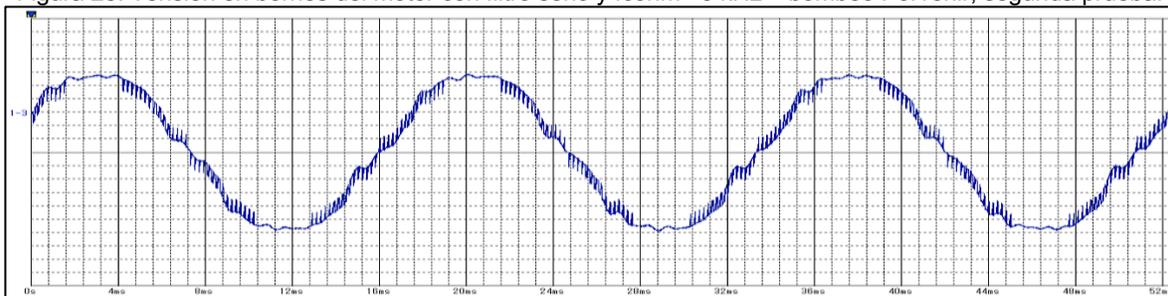


Tabla 20. Parámetros medidos segunda prueba a la entrada de motor doble Y, filtro seno y $f_{conm} = 5$ kHz [75].

PARÁMETRO	PRIMERA MEDIDA	SEGUNDA MEDIDA	RESULTADO
dv/dt [V/ μ s]	N.A.	N.A.	Cumple
V_{pk} [V]	608	614	Cumple

De acuerdo con lo anterior, se valida que la solución sigue funcionando correctamente; la UMEPA seguirá realizando un control cada seis meses como parte del plan de mantenimiento predictivo de los motores.

5.7. COMPARACIÓN FINAL

En la Tabla 21, se presenta el resumen comparativo de las mediciones, donde se valida la hipótesis del CAPÍTULO 4 de que solamente el filtro seno cumple a cabalidad con los requerimientos establecidos para el motor.

Tabla 21. Parámetros medidos para cada solución disponible en el mercado.

PARÁMETRO	CALCULADO	MEDIDO	REQUERIDO	RESULTADO
Filtro dv/dt				
dv/dt [V/ μ s]	298,2 ... 372,7	395,8	500	Cumple
V_{pk} [V]	745,4 ... 931,8	760	700	No cumple
Filtro seno				
dv/dt [V/ μ s]	N.A.	N.A.	500	Cumple
V_{pk} [V]	602,5	575	700	Cumple
Filtro seno y motor doble Y				
dv/dt [V/ μ s]	N.A.	N.A.	500	Cumple
V_{pk} [V]	602,5	608	1212	Cumple
Filtro seno y motor doble Y con función Swing PWM				
dv/dt [V/ μ s]	N.A.	N.A.	500	Cumple
V_{pk} [V]	602,5	640	1212	Cumple

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla anterior, se comprueba que el filtro seno es la única solución que cumple a cabalidad con los valores establecidos para las restricciones técnicas identificadas para los motores integrados con bombas sumergibles de pozo profundo, es decir, es la mejor solución técnica disponible en el mercado en cuanto a filtrado.

Sin embargo, se determina que la mejor solución técnica para la operación de bombas sumergibles de pozo profundo con VFD, es la combinación de dos soluciones, en este caso filtro seno y motor doble estrella, ya que si bien, los valores de tensión pico y gradiente de tensión son los mismos, el motor está mejor diseñado para soportar los picos de tensión, aumentando su vida útil [73].

Para casos específicos, la implementación de un filtro dv/dt es viable, siempre y cuando el fabricante del motor garantice que este soporta una tensión pico máxima de al menos 800 V. Aunque esta última no se considera la mejor solución, ya que la onda de control sigue siendo PWM, lo que implica mayores pérdidas por histéresis y las corrientes de Foucault, debido a la presencia de armónicos, impactando la vida útil del motor. Es importante señalarlo, porque en un posible análisis técnico-financiero, puede ser una solución relevante [73] [76].

Por otro lado, un filtro seno, al entregar una forma de onda sinusoidal, tiene armónicos reducidos y mitiga completamente el impacto de los picos de tensión por la modulación PWM [73] [76].

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

- Los motores sumergibles para bombas lapicero *per se* no son aptos para trabajar con VFD, sin embargo, los dos equipos pueden llegar a ser compatibles siempre que se cumplan unos requisitos mínimos.
- Algunos requisitos son programables, se deben seguir cuidadosamente las indicaciones de cada fabricante, sin embargo, su implementación es sencilla de realizar en el sistema de control del bombeo.
- Para evitar los golpes de ariete y daños en el motor por una insuficiente refrigeración, se deben programar las rampas de inicio y parada de los motores para alcanzar la frecuencia mínima en un par de segundos [8] [13] [18].
- La frecuencia mínima garantiza la refrigeración de los motores y la lubricación de los cojinetes, evitando que se presenten vibraciones mecánicas y otros daños [8] [13] [18] [31].
- La frecuencia máxima recomendada es la nominal, sin embargo, si por condiciones operativas una bomba requiere operarse a una frecuencia superior, se debe analizar que el motor pueda satisfacer la demanda de potencia, esto considerando que es una aplicación de torque cuadrático; adicionalmente, no debe salirse de la zona de trabajo segura de la bomba para evitar su desgaste acelerado [8] [13] [16] [18].
- La tensión pico máxima que puede soportar este tipo de motores es de aproximadamente 700 V (depende de cada fabricante) ya que son muy compactos y su aislamiento es clasificación Y 90 °C [8] [13] [18] [24] [25] [40] [41].

- Se recomienda adquirir motores con conexionado interno doble estrella, siempre que los fabricantes mantengan la eficiencia mínima requerida, ya que al disminuir el estrés en el aislamiento de los bobinados con una tensión aplicada $\sqrt{3}$ veces menor, se aumenta significativamente la vida útil del motor [6] [34] [73].
- El gradiente de tensión máximo soportado por los motores sumergibles es de 500 V/ μ s, la única forma de garantizarlo es disminuyendo el *rise time*, y para esto se deben utilizar filtros a la entrada del motor [13] [18] [40] [41].
- Se debe ajustar el VFD a una frecuencia de conmutación entre 2 kHz y 5 kHz, siendo preferible la primera, para disminuir la cantidad de picos de tensión a la que se somete el motor [18] [42].
- Se debe seleccionar el motor con un factor de reserva adicional de aproximadamente el 20% de la potencia mecánica requerida, considerando tanto el calentamiento adicional por efecto de los armónicos y la variación de los requerimientos hidráulicos [8] [16] [43].
- Para garantizar la integridad del motor el número de arranques en una hora no debe superar la cantidad indicada por cada fabricante.
- La eficiencia mínima que se le debe exigir a los fabricantes para motores con una potencia superior a 44,76 kW debe ser del 87% para cumplir con el Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ [35] [36] [37].
- El uso de VFD en sistemas de bombeo tiene importantes mejoras en la eficiencia del sistema respecto al método tradicional de control por estrangulamiento de válvulas, permite adaptarse a la demanda del sistema, incrementa la flexibilidad del sistema interconectado de acueducto, aumenta la

vida útil de la infraestructura eléctrica así como su relación costo-beneficio y permite una ampliación en el horizonte de planeación del sistema [6] [17] [58].

- Con las mediciones del bombeo San Nicolás se comprueba que el fenómeno onda reflejada afecta las instalaciones de bombeo aumentando entre 1,5 y 2 veces la tensión pico e incrementando el gradiente de tensión; la criticidad puede aumentar debido al uso de cables paralelos para la alimentación de los motores, pues su impedancia característica se reduce y aumenta el coeficiente de reflexión Γ [62] [69].
- No es posible operar motores sumergibles con VFD, sin una sección de filtrado, incluso aunque la distancia entre los equipos sea menor a un metro, pues el gradiente de tensión entregado por el VFD es superior a 2000 V/ μ s.
- Los VFD de tres niveles no son suficientes para garantizar la vida útil de los motores sumergibles, pues si bien tienen menores niveles de tensión pico y gradiente de tensión no alcanzan los valores requeridos [64].
- Los reactores de salida mejoran ligeramente la tensión pico y el gradiente de tensión, pero no son una solución viable para la integración entre VFD y motores sumergibles.
- El filtro dv/dt puede funcionar como solución para las marcas de motores sumergibles que soportan mayores tensiones pico, como KSB. Para seleccionarla, debe considerarse adicionalmente, la impedancia característica del cable y su longitud en cada caso [60].
- El filtro dv/dt funciona perfectamente como solución para motores doble estrella, ya que en todos los casos ralentiza el *rise time* lo suficiente para garantizar un gradiente de tensión menor a 500 V/ μ s, su limitación está en la tensión pico entregada en bornes del motor, por lo tanto, si el motor soporta una tensión pico

mayor a 1000 V, sería una solución relevante en un posible análisis técnico-financiero, pues su valor es mucho menor que el de un filtro seno, sin embargo, la onda de control sigue siendo PWM, lo que implica mayores pérdidas por histéresis y las corrientes de Foucault, debido a la presencia de armónicos, lo que finalmente incide en la vida útil del motor [34] [73] [76].

- La unidad terminal eléctrica es una solución que mitiga el impacto del fenómeno de onda reflejada manteniendo el valor pico entregado por el VFD, sin embargo, no disminuye el gradiente de tensión más allá de lo esperado por la distancia entre equipos, por esta razón, no es una solución suficiente.
- El filtro seno es el único que cumple con los requisitos establecidos para los motores sumergibles de cualquier marca; entrega al motor una onda sinusoidal con una tensión pico similar a la de la red de alimentación y sin gradiente de tensión, pues este efecto es mitigado por completo por este filtro [62].
- Ya que la onda entregada por el filtro seno es prácticamente sinusoidal se mitiga el calentamiento adicional por efecto de los armónicos [54] [62].
- El filtro seno es la solución más costosa; por ejemplo, para una corriente de 415 A y una tensión de 480 V tiene un costo de 29,2 MCOP, mucho mayor al costo de un filtro dv/dt que para los mismos valores de tensión y corriente sería de 6,5 MCOP. También es la más voluminosa, pesada y la que aumenta las pérdidas por inserción [55].
- El filtro seno se hace más asequible cuánto más grande es la bomba, sin embargo, desde la etapa de diseño se debe considerar un espacio adicional para el equipo, sus pérdidas y la caída de tensión [55].

- Como ventajas, el filtro seno puede mejorar el ruido acústico de cualquier motor por su uso con VFD, disminuir las pérdidas del motor y la inversión en cableado especial para VFD o con aislamientos en Media Tensión [54] [62].
- El filtro seno tiene como desventaja que no es una solución adecuada para aplicaciones con un alto rendimiento dinámico [54] [62].
- No se recomienda el uso de la función Swing PWM con filtros seno.
- El filtro seno es la solución técnica seleccionada para la operación de bombas sumergibles de pozo profundo de cualquier fabricante con VFD, es decir, es la mejor solución técnica disponible en el mercado en cuanto a filtrado.
- Se determina que la mejor solución técnica para la operación de bombas sumergibles de pozo profundo con VFD, es la combinación de dos soluciones, en este caso filtro seno y motor doble estrella, pues el motor está mejor diseñado para soportar los picos de tensión, y con una onda de alimentación sinusoidal, que tiene armónicos reducidos y mitiga completamente el impacto de los picos de tensión por la modulación PWM, se obtiene un aumento significativo en la vida útil del motor [73] [76].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), «Tendencia kWh - M2 - kVAR (Confidencial),» Medellín, 2021.
- [2] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), «Ciclo de Facturación: Febrero/2020 - Unidad Operación y Mantenimiento Provisión Aguas (Confidencial),» Medellín, 2020.
- [3] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P., Segunda Edición ed., Medellín, 2013.
- [4] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), «Tarifas y Costo de Energía Eléctrica - Mercado Regulado - Agosto de 2020,» Medellín, 2020.
- [5] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Resolución No. 0330 de 2017 - Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2017.
- [6] E. Quispe Oqueña, «Medidas de Eficiencia en Máquinas Eléctricas,» de *Seminario Posgrado Energía con voz*, Rafaela, 2020.
- [7] KSB Chile S.A., «Reporte servicio,» Santiago de Chile, 2018.
- [8] WILO SE, Raw water intake - borehole technology, Primera ed., Dortmund, 2012.
- [9] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), «Programa de Intervención en Provisión Aguas - Definición de alcance de la intervención en infraestructura (Confidencial),» Dirección Planeación Agua y Saneamiento, Medellín, 2017.
- [10] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), «Análisis Infraestructura primaria (Confidencial),» Unidad Operación Integrada Agua y Saneamiento, Medellín, 2019.
- [11] Área Metropolitana Valle de Aburrá, «Condiciones Especiales del Valle de Aburrá,» [En línea]. Available: metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales. [Último acceso: 3 Marzo 2022].
- [12] M. Á. Mora Vargas, Selección de Bombas para la Extracción de Aguas Subterráneas en Pozos Profundos, Naucalpan: Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [13] KSB Aktiengesellschaft, Type Series Booklet Submersible Borehole Pumps, Frankenthal, 2008.
- [14] Capriari S.p.A., Electrobombas sumergidas - Instrucciones de servicio, Modena: Capriari pumping power, 2016.
- [15] M. Hurlbatt, «How Submersible Pumps Work: Advantages and Disadvantages of Submersible Pumps,» Pump Solutions, 13 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://pumpsolutions.com.au/how-submersible-pumps-work-advantages-and-disadvantages-of-submersible-pumps/>. [Último acceso: 24 Julio 2021].
- [16] G. Maureira, «Variadores de Frecuencia en Aplicaciones con Torque Variable Resistente Cuadráticamente,» *Electroindustria*, Julio 2004.

- [17] Lewis, Bruce W., P.E., Lewis Companies, Litchfield, N.H. 03052, «Small Public Water Supply Applications for Variable Frequency Drive (VFD) technology,» *American Water Works Association, Engineering and Construction Conference Proceedings*, 1999.
- [18] SAER Elettropompe spa, Manuale uso e manutenzione motori sommersi, Guastalla, 2018.
- [19] J. Lund, «Geothermal Direct Use,» *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2013.
- [20] KSB Aktiengesellschaft, Submersible borehole pumps from KSB, Frankenthal, 2013.
- [21] Office of the Federal Register (OFR), Code of Federal Regulations, Washington D.C.: U.S. Government Publishing Office, 2020.
- [22] KSB Colombia, «Bombas de pozo profundo UPA - mejor desempeño para un óptimo funcionamiento,» [En línea]. Available: https://www.ksb.com/ksb-co/Productos_y_Servicios/Agua/water_transport/UPA/. [Último acceso: 24 Octubre 2020].
- [23] TROTEC, «Bombas de pozo profundo - La forma económica de obtener agua sanitaria,» [En línea]. Available: <https://de.trotec.com/?id=26352&L=6#c1582253>. [Último acceso: 24 Octubre 2020].
- [24] EBARA Bombas, Catálogo de seleção de curvas e cabos, Bauru, 2020.
- [25] KSB Aktiengesellschaft, Type Series Booklet UMA Submersible motor, Frankenthal, 2015.
- [26] Grundfos, «Glicol en motores de bombas sumergibles,» Grundfos, [En línea]. Available: https://es.grundfos.com/Servicio_mantenimiento_bombas/support-contact/faq/glycol-in-motors-of-submersibles.html. [Último acceso: 25 Octubre 2020].
- [27] WILO SE, Pump unit - combination with hydraulics, Durtmond, 2020.
- [28] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 627 de 2006 - Norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2006.
- [29] Grundfos, «¿Qué es una camisa de refrigeración?,» Grundfos, [En línea]. Available: https://es.grundfos.com/Servicio_mantenimiento_bombas/support-contact/faq/what-is-a-cooling-jacket.html. [Último acceso: 25 Octubre 2020].
- [30] Grundfos, «Camisa de refrigeración,» Grundfos, [En línea]. Available: https://es.grundfos.com/Servicio_mantenimiento_bombas/buscar_enciclopedia/cooling-jacket.html. [Último acceso: 25 Octubre 2020].
- [31] Malcolm Thompson Pumps, «The Top 4 Causes of Bore Pump Failure and How You Can Avoid Them,» [En línea]. Available: <https://www.mtp.com.au/news/the-top-4-causes-of-bore-pump-failure-and-how-you-can-avoid-them/>. [Último acceso: 01 Agosto 2021].
- [32] C. Alcantarilla Martínez, Análisis de sobretensiones en motores asíncronos alimentados con PWM, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [33] J. D. Arcila, Armónicos en Sistemas Eléctricos, Medellín: IEB S.A.

- [34] KSB SE & Co. KGaA, «Official Statement on changed design of inner motor winding,» Frankenthal, 2019.
- [35] Ministerio de Minas y Energía, Reglamento Técnico de Etiquetado. RETIQ, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2015.
- [36] Ministerio de Minas y Energía, Resolución 40234 de 2017 - Por la cual se modifican y aclaran algunas excepciones y requisitos generales para la aplicación del Anexo General de la Resolución 41012 del 18 de septiembre de 2015 "Reglamento Técnico de Etiquetado - RETIQ", Bogotá D.C.: República de Colombia, 2017.
- [37] Ministerio de Minas y Energía, Resolución 40247 de 2020 - Por la cual se modifican condiciones de exigibilidad del etiquetado y se aclaran algunos requisitos establecidos en el Anexo General del Reglamento Técnico de Etiquetado RETIQ, Bogotá D.C.: República de Colombia, 2020.
- [38] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), «Resolución 196 de 2020 - Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para acceder a los beneficios tributarios de descuento en el impuesto de renta, deducción de renta y exclusión del IVA para proyectos de gestión eficiente de la energía,» República de Colombia, Bogotá D.C., 2020.
- [39] B. Orchard, «Understanding IEC Standards & Wastewater Pump Motor Efficiencies,» Waterworld, 30 Julio 2014. [En línea]. Available: <https://www.waterworld.com/international/wastewater/article/16200966/understanding-iec-standards-wastewater-pump-motor-efficiencies>. [Último acceso: 03 Octubre 2021].
- [40] U.S Department of Energy, Premium efficiency motor selection and application guide, Washington, D.C., 2014.
- [41] National Electrical Manufacturers Association (NEMA), «MG 1 FAQ,» NEMA, [En línea]. Available: <https://www.nema.org/directory/products/mg-1-faq>. [Último acceso: 01 Agosto 2021].
- [42] Yaskawa America, Inc., Yaskawa AC Drive-A1000 High Performance Vector Control Drive Technical Manual, Waukegan, Illinois, 2010.
- [43] KSB Aktiengesellschaft, Installation/Operation Manual UPA, Frankenthal, 2015.
- [44] Capriari S.p.A., «SUBMERSIBLES,» Capriari pumping power, [En línea]. Available: <http://www.capriari.it/submersibles>. [Último acceso: 12 Julio 2021].
- [45] Hidromecánica Andina, Características técnicas garantizadas BHSE10260, Medellín, 2020.
- [46] WILO SE, Operation of WILO Submersible Pumps with static frequency converters, Dortmund, 2016.
- [47] EBARA Bombas América do Sul Ltda., Tiempo de aceleración y desaceleración de motores ebara con variador de frecuencia, Bauru, 2020.
- [48] EBARA Bombas, Manual de Instrucciones y Terminos de Garantía - Modelo BHS/BHSE y 4BPS Motobombas Sumergibles, Bauru, 2017.
- [49] WILO SE, Series description: Wilo-EMU 12" ... 24", Dortmund, 2020.

- [50] EBARA - Indústrias Mecânicas e Comércio Ltda., Informativo sobre faixa de frequência recomendada para aplicações de inversores de frequência em motobombas submersas Ebara, Bauru, 2006.
- [51] WILO SE, Wilo-EMU 10" - 24", Dortmund, 2020.
- [52] Capriari S.p.A., Electrobombas sumergidas E6 - 18, Modena: Capriari pumping power, 2006.
- [53] SAER Elettropompe spa, Product description 6VS-12A/3T, Guastalla, 2017.
- [54] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC TS 60034-25, Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide, Ginebra, 2014.
- [55] EUROPUMP, Variable speed electro submersible pumps - A guide the specific application of VSD'S for borehole and wet-well pumps, Brussels, 2008.
- [56] M. S. Santos-Azevedo, C. A. León-Benitez, J. Cabral-Leite y I. Pérez-Abril, «Procedimiento para el análisis energético de sistemas de bombeo centrífugos,» *DYNA*, vol. 83, nº 199, pp. 114-117, Octubre 2016.
- [57] Goulds pumps, Leyes de afinidad. Datos técnicos, ITT Industries.
- [58] Congreso de Colombia, Ley No. 1715, Bogotá D.C., 2014.
- [59] Grupo WEG - Unidad Motores, Guía Técnica - Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM, Jaraguá do Sul, SC, 2016.
- [60] O. Nuñez Mata, «Efecto de los variadores de velocidad electrónicos sobre los motores eléctricos de corriente alterna,» [En línea]. Available: <https://docplayer.es/16250227-Efecto-de-los-variadores-de-velocidad-electronicos-sobre-los-motores-electricos-de-corriente-alterna.html>. [Último acceso: 10 Octubre 2021].
- [61] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 60034-18-41, Rotating electrical machines – Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification and quality control tests, Ginebra, 2014.
- [62] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC/TS 61800-8, Adjustable speed electrical power drive systems – Part 8: Specification of voltage on the power interface, Ginebra, 2010.
- [63] M. Kaufhold, G. Börner, M. Eberhardt y J. Speck, «Failure Mechanism Of The Interturn Insulation Of Low Voltage Electric Machines Fed By Pulse-Controlled Inverters,» *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 12, nº 5, 1996.
- [64] Yaskawa Electric America, Inc., Product Application Note - Yaskawa G7 AC Drive, The World's First 480V 3-level Inverter, Waukegan, 2005.
- [65] MTE, «Bobinas de acoplamiento de CC,» [En línea]. Available: <https://www.mtecorp.com/spanish/products/dc-link-chokes/>. [Último acceso: 18 Octubre 2021].
- [66] Yaskawa American Inc., Yaskawa: Section 15172, Variable Frequency Drives A1000 - Aclaraciones técnicas especificaciones Yaskawa A1000- SG.A1000.01, Waukegan, 2012.

- [67] National Electrical Manufacturers Association (NEMA), ANSI/NEMA MG 1-2016, Motors and Generators, Rosslyn, 2016.
- [68] J. D. Rodriguez, Nota de aplicación: Medidas entre el motor y el variador de velocidad, Madrid: Fluke Corporation.
- [69] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), «Recepción e instalación filtros seno - Bocatoma San Nicolás (Confidencial),» Medellín, 2020.
- [70] Variadores S.A.S., «Informe mediciones bombeo Porvenir,» Medellín, 2021.
- [71] Yaskawa Electric Corporation, «Variador de CA Yaskawa A1000 - Guía rápida de inicio,» Waukegan, 2015.
- [72] Yaskawa Electric Corporation, «Frequently Asked Questions (FAQs) A1000 Drive,» Waukegan, 2012.
- [73] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 60034-18-42, Rotating electrical machines – Part 18-42: Partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification tests, Ginebra, 2017.
- [74] Variadores S.A.S., «Informe de mediciones bombeo Santa Catalina,» Medellín, 2019.
- [75] Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), «Informe medidas de campo filtros seno Porvenir (Confidencial),» Medellín, 2021.
- [76] D. Herres, «What's all this triplen harmonics stuff?,» Test & Measurement Tips, An EE World Online Resource, 20 Enero 2022. [En línea]. Available: testandmeasurementtips.com/whats-all-this-triplen-harmonics-stuff-faq/. [Último acceso: 3 Marzo 2022].

BIBLIOGRAFÍA

ALCANTARILLA, Cristina. Análisis de sobretensiones en motores asíncronos alimentados con PWM. Trabajo de grado Ingeniería Eléctrica. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2015. 86 p.

CAPRIARI S.P.A. Electrobombas sumergidas - Instrucciones de servicio. Modena: 2016. 88 p.

EBARA BOMBAS. Manual de Instrucciones y Terminos de Garantía - Modelo BHS/BHSE y 4BPS Motobombas Sumergibles. Bauru: 2017. 24 p.

EUROPUMP. Variable speed electro submersible pumps - A guide the specific application of VSD'S for borehole and wet-well pumps. Brussels: 2008. 68 p.

GRUPO WEG - UNIDAD MOTORES. Guía Técnica - Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM. Jaraguá do Sul: 2016. 36 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC 60034-18-41, Rotating electrical machines – Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification and quality control tests. Ginebra: 2014. 88 p.

----- . IEC 60034-18-42, Rotating electrical machines – Part 18-42: Partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification tests. Ginebra: 2017. 98 p.

----- . IEC TS 60034-25, Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide. Ginebra: 2014. 184 p.

----- . IEC/TS 61800-8, Adjustable speed electrical power drive systems – Part 8: Specification of voltage on the power interface. Ginebra: 2010. 68 p.

KSB AKTIENGESELLSCHAFT. Type Series Booklet Submersible Borehole Pumps. Frankenthal: 2008. 114 p.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION (NEMA). ANSI/NEMA MG 1-2016, Motors and Generators. Rosslyn: 2016. 710 p.

SAER ELETTROPOMPE S.P.A. Manuale uso e manutenzione motori sommersi. Guastalla: 2018. 88 p.

WILO SE. Raw water intake - borehole technology. Dortmund: 2012. 116 p.

YASKAWA AMERICA, INC. Yaskawa AC Drive-A1000 High Performance Vector Control Drive Technical Manual. Waukegan: 2010. 685 p.