

**Implementación de un sistema dual drive en la fan pump de la máquina de papel número 1  
en la empresa C y P del R S.A., Dosquebradas, Risaralda**

Dagnover Largo Bueno

Asesor

Diana Margarita Casas Gómez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD  
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI  
Ingeniería Electrónica

2026

### **Dedicatoria**

A Dios del cielo que nunca suelta mi mano para ayudarme a alcanzar mis metas.

A mi esposa e hijas a quienes dedico mi esfuerzo y sacrificio.

Y a mis padres, que con su ejemplo me motivan a ser mejor persona cada día.

### **Agradecimientos**

Agradezco con todo mi corazón a mi esposa e hijas por su infinita paciencia y por el tiempo que me concedieron para alcanzar este logro. Su apoyo incondicional ha sido mi mayor fortaleza para obtener mi título profesional.

A los tutores que hicieron parte de mi proceso de formación, quienes, sin escatimar en transmitir su conocimiento, me ayudaron a escalar paso a paso esta meta.

Y un especial agradecimiento al ingeniero Hernando Franco por compartir sus valiosas enseñanzas tanto técnicas como de vida. Su guía y conocimientos han dejado una huella significativa, no solo en el ámbito profesional, sino también en el crecimiento personal, su dedicación y ejemplo son una inspiración.

## Resumen

Este proyecto se enfoca en el diseño e implementación de un sistema de doble accionamiento (*dual drive*) para la bomba de dilución principal (*fan pump 3*) de la Máquina para Papel número 1, en la fábrica C y P del R S.A., ubicada en Dosquebradas, Risaralda. El objetivo es repotenciar y optimizar el sistema de bombeo en esta máquina, dedicada a la fabricación de papel *tissue*. El problema surge porque el sistema utiliza un motor DC de 315 kW controlado por un drive DC, que alcanza su límite operativo a 500 A, resultando en un flujo insuficiente hacia el *headbox* (caja de formación), limitando la velocidad de producción de la máquina. Para abordar esta problemática, se plantea diseñar e implementar un sistema dual drive, que incluye un motor auxiliar AC acoplado al eje doble de la bomba existente. La sincronización y el control se gestionan a través de un PLC, conectado a un variador de velocidad que regula el torque del motor AC para aligerar la carga del motor DC principal, optimizando el rendimiento del sistema. Como resultado, se logra aumentar la capacidad de bombeo y mejorar la velocidad operativa de la máquina.

**Palabras clave:** repotenciación, papel tissue, variación de velocidad, control de torque, sistema dual drive.

### **Abstract**

This project focuses on the design and implementation of a dual drive system for the main dilution pump (fan pump 3) of Paper Machine number 1 at the C y P del R S.A. mill, located in Dosquebradas, Risaralda. The objective is to upgrade and optimize the pumping system of this machine, which is dedicated to the production of tissue paper. The problem arises because the system uses a 315 kW DC motor controlled by a DC drive that reaches its operating limit at 500 A, resulting in insufficient flow to the headbox (forming box) and limiting the machine's production speed. To address this issue, a dual-drive system is designed and implemented, consisting of an auxiliary AC motor coupled to the double-coupling shaft of the existing pump. Synchronization and control are managed through a PLC connected to a variable speed drive, which regulates the torque of the AC motor to reduce the load on the main DC motor. This configuration optimizes system performance, increasing the pumping capacity and improving the machine's operating speed.

***Keywords:*** repowering, tissue paper, speed variation, torque control, dual drive system.

## Tabla de contenido

Introducción .....	15
Planteamiento del Problema .....	17
Justificación .....	19
Objetivos.....	21
Objetivo General.....	21
Objetivos Específicos .....	21
Marco Referencial.....	22
Marco Conceptual.....	22
Conceptos Básicos Sobre Bombas Centrífugas .....	22
Sistemas de Control de Velocidad en Bombas Industriales .....	26
Eficiencia Energética de Sistemas de Accionamientos Eléctricos .....	27
Bomba de Dilución Fan Pump en el Proceso de Fabricación de Papel Tissue.....	31
Agua Blanca en el Proceso de Fabricación de Papel Tissue.....	32
Flujo de Pasta Refinada y Sistema de Dilución en la Fabricación de Papel Tissue ...	33
Relación Chorro-Tela .....	36
Marco Teórico .....	38
Metodología .....	47
Recursos Necesarios .....	50
Resultados .....	51
Diagnóstico y Planeación .....	51
Inspección Técnica del Sistema Inicial.....	51
Análisis y Diagnóstico de Desempeño del Sistema de Bombeo Inicial .....	60

Síntesis de Resultados de la Inspección.....	62
Diseño del Sistema Dual Drive .....	64
Identificación de los Requerimientos de Potencia para el Dual Drive .....	65
Identificación de los Requerimientos de Control para el Dual Drive.....	74
Selección del Método de Control del Sistema Dual Drive .....	86
Definición y Diseño de las Curvas de Comportamiento del Motor Helper .....	93
Selección de Componentes del Sistema Dual Drive.....	97
Diseño de los Esquemas Eléctricos .....	100
Implementaciones y Configuración del Sistema Dual Drive .....	107
Implementación en el Sistema SCADA.....	107
Configuración del Variador de Frecuencia.....	115
Implementación en el Motor Helper de la Fan Pump .....	133
Montaje de Equipos y Puesta en Marcha del Sistema Dual Drive .....	135
Montaje de Equipos .....	135
Puesta en Marcha del Sistema Dual Drive.....	140
Análisis y Evaluación de la Implementación del Sistema Dual Drive .....	143
Capacidad de Bombeo de la Fan Pump .....	144
Velocidad de Operación de la Máquina para Papel N°1 .....	146
Productividad y Calidad.....	150
Consumo Energético por Tonelada Producida .....	154
Síntesis de Resultados Pretest-Postest .....	158
Plan de Mejoras.....	160
Mejora a Corto Plazo.....	160

Implementación de Analizadores de Energía .....	160
Mejora a Mediano Plazo.....	162
Migración del Sistema Drive-Motor DC a AC en el Motor Master. ....	162
Plan de Mantenimiento .....	166
Mantenimiento Correctivo (Reactivo).....	166
Herramientas y Recursos .....	167
Procedimiento de Atención.....	167
Plan de Contingencia .....	167
Mantenimiento Preventivo .....	168
Gabinetes y Climatización.....	168
Conexiones y cables.....	168
Máquinas rotativas.....	168
Sistemas de frenado y disipación.....	168
Electrónica y control.....	168
Mantenimiento Predictivo .....	169
Cámara termográfica.....	169
Estetoscopio electrónico .....	169
Analizador de vibraciones .....	169
Pinza amperimétrica y multímetro.....	169
Osciloscopio.....	169
Sistema SCADA .....	169
Conclusiones.....	170
Referencias Bibliográficas .....	172

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Variables Monitoreadas Durante las Pruebas Experimentales</i> .....	49
<b>Tabla 2</b> <i>Recursos Necesarios</i> .....	50
<b>Tabla 3</b> <i>Placa de Datos del Motor Existente</i> .....	51
<b>Tabla 4</b> <i>Principales Hallazgos de la Inspección Técnica del Sistema Inicial</i> .....	64
<b>Tabla 5</b> <i>Resumen de Resultados</i> .....	159

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Vista Lateral y Frontal de una Bomba Centrífuga Típica</i> .....	22
<b>Figura 2</b> <i>Curva de Operación de Bombas Centrífugas</i> .....	23
<b>Figura 3</b> <i>Curvas de Rendimiento Típicas de una Bomba Centrífuga</i> .....	24
<b>Figura 4</b> <i>Máquina para Papel Tissue</i> .....	30
<b>Figura 5</b> <i>Bomba de Dilución Fan Pump Marca Sulzer Tipo ZPP de Doble Succión</i> .....	31
<b>Figura 6</b> <i>Esquema de la Máquina para Papel 1 de Recolección de Aguas Blancas</i> .....	33
<b>Figura 7</b> <i>Esquema Flujo y Dilución de Pasta Refinada en Máquina para Papel 1</i> .....	35
<b>Figura 8</b> <i>Esquema de Variables Involucradas en el Control de Chorro-Tela</i> .....	38
<b>Figura 9</b> <i>Circuito Equivalente Motor de Inducción</i> .....	43
<b>Figura 10</b> <i>Placa de Características del Motor DC Existente</i> .....	52
<b>Figura 11</b> <i>Motor Existente en Planta</i> .....	52
<b>Figura 12</b> <i>Control de Velocidad Existente</i> .....	55
<b>Figura 13</b> <i>Control de Velocidad Existente</i> .....	56
<b>Figura 14</b> <i>Esquema de la Limitación de Corriente</i> .....	57
<b>Figura 15</b> <i>Led Indicador IdN</i> .....	58
<b>Figura 16</b> <i>Placa de datos de la Bomba Fan Pump</i> .....	59
<b>Figura 17</b> <i>Bomba Fan Pump Instalada</i> .....	59
<b>Figura 18</b> <i>Placa de Datos Original Bomba Fan Pump</i> .....	60
<b>Figura 19</b> <i>Velocidades de Motores Principales Cerca al Punto Crítico</i> .....	66
<b>Figura 20</b> <i>Mediciones de Campo en Sistema QCS</i> .....	68
<b>Figura 21</b> <i>Control Chorro-Tela Sistema QCS</i> .....	76
<b>Figura 22</b> <i>Control de Velocidad Fan Pump en el Sistema SCADA</i> .....	77

<b>Figura 23</b> <i>Diagrama de Bloques Sistema de Control Chorro Tela MPI</i> .....	78
<b>Figura 24</b> <i>Levantamiento Diagrama P&amp;ID del Sistema de Control Chorro Tela</i> .....	80
<b>Figura 25</b> <i>Diagrama Eléctrico de Potencia Motor DC Fan Pump 3</i> .....	82
<b>Figura 26</b> <i>Diagrama Eléctrico Conexiones Drive D.C. Motor Fan Pump 3</i> .....	83
<b>Figura 27</b> <i>Esquemas Generales de Representación Aplicaciones Maestro Seguidor</i> .....	86
<b>Figura 28</b> <i>Diagrama de Bloques Sistema Dual Drive con Control Seguidor de Velocidad</i> .....	88
<b>Figura 29</b> <i>Diagrama de Bloques Sistema Dual Drive con Control Maestro por Velocidad y Seguidor por Torque</i> .....	91
<b>Figura 30</b> <i>Curva Velocidad del Maestro Vs Limite de Velocidad del Helper</i> .....	95
<b>Figura 31</b> <i>Curva de Carga del Maestro Vs Aporte de Torque del Helper</i> .....	96
<b>Figura 32</b> <i>Algunos Elementos de Maniobra para Sistema Dual Drive</i> .....	99
<b>Figura 33</b> <i>Diagrama Potencia Fan Pump Helper</i> .....	102
<b>Figura 34</b> <i>Diagrama de Control Fan Pump Helper</i> .....	104
<b>Figura 35</b> <i>Diagrama de Señales Drive Fan Pump Helper</i> .....	106
<b>Figura 36</b> <i>Casilla de Indicaciones Motores Principales en Pantalla Principal</i> .....	111
<b>Figura 37</b> <i>Pantalla de Mando Motor Fan Pump Helper</i> .....	112
<b>Figura 38</b> <i>Pantalla de Calibraciones en el SCADA</i> .....	113
<b>Figura 39</b> <i>Uso del Ajuste de las Curvas de Respuesta del Motor Helper</i> .....	114
<b>Figura 40</b> <i>Paso a Paso del Proceso de la Adaptación Automática de Motor AMA</i> .....	118
<b>Figura 41</b> <i>Diagrama Equivalente del Motor para un Motor Asíncrono</i> .....	118
<b>Figura 42</b> <i>Display y Teclado del LCP Drive FC-302</i> .....	131
<b>Figura 43</b> <i>Visualización de Variables en el Display LCP</i> .....	132
<b>Figura 44</b> <i>Daños en Rodamientos Provocados por Corrientes Parasitas</i> .....	134

<b>Figura 45</b> <i>Rodamientos Aislados Eléctricamente</i> .....	134
<b>Figura 46</b> <i>Instalación de la Protección de Despacho Acometida Accionamiento Motor Fan Pump Helper</i> .....	135
<b>Figura 47</b> <i>Instalación de la Protección Intermedia Acometida Accionamiento Motor Fan Pump Helper</i> .....	136
<b>Figura 48</b> <i>Montaje del Gabinete Eléctrico</i> .....	137
<b>Figura 49</b> <i>Montaje de la Resistencia de Frenado</i> .....	138
<b>Figura 50</b> <i>Montaje del Motor Eléctrico</i> .....	139
<b>Figura 51</b> <i>Montaje de Aisladores Galvánicos Señales Analógicas Sistema Dual Drive</i> .....	139
<b>Figura 52</b> <i>Montaje de Aislamiento Galvánico Señales Digitales</i> .....	140
<b>Figura 53</b> <i>Desplazamiento del Punto de Trabajo en una Aproximación de la Curva H-Q de la Bomba</i> .....	145
<b>Figura 54</b> <i>Registro de Velocidad de Máquina y Presión del Head Box Pretest y Postest de la Implementación</i> .....	146
<b>Figura 55</b> <i>Registro de Evidencia Pretest de la Velocidad en Máquina para Papel 1</i> .....	147
<b>Figura 56</b> <i>Registro de Evidencia Postest de la Velocidad en Máquina para Papel 1</i> .....	147
<b>Figura 57</b> <i>Registro de Evidencia Postest, Variables de Funcionamiento del Variador de Frecuencia del Motor Helper</i> .....	148
<b>Figura 58</b> <i>Gráfica Comparativa Pretest Postest de Productividad Diaria (t/día)</i> .....	154
<b>Figura 59</b> <i>Mediciones de Campo Motor Máster Fan Pump</i> .....	156
<b>Figura 60</b> <i>Protección General y Contactor de Energizado Drive Fan Pump</i> .....	182
<b>Figura 61</b> <i>Fusibles Ultra Rápidos de Protección</i> .....	184
<b>Figura 62</b> <i>Reactor de Entrada Drive DC Fan Pump</i> .....	184

<b>Figura 63</b> <i>Placa de Características del Motor Seleccionado</i> .....	187
<b>Figura 64</b> <i>Placa de Características del Variador de Frecuencia</i> .....	188
<b>Figura 65</b> <i>Resistencia de Frenado</i> .....	190
<b>Figura 66</b> <i>Protección Principal Acometida</i> .....	191
<b>Figura 67</b> <i>Protección de Llegada Acometida</i> .....	192
<b>Figura 68</b> <i>Características de los Fusibles de Protección del Variador de Frecuencia</i> .....	193

**Lista de Apéndices**

<b>Apéndice A</b> <i>Tablas de Conversión Velocidad del JET Versus Presión de Cabeza Total</i> .....	177
<b>Apéndice B</b> <i>Detalles de Elementos del Levantamiento del Diagrama del Circuito Eléctrico del Sistema de Bombeo Inicial</i> .....	182
<b>Apéndice C</b> <i>Detalle de los Elementos de Potencia Seleccionados para el Sistema Dual Drive</i> .....	187
<b>Apéndice D</b> <i>Configuración Completa Drive FC-302</i> .....	194

## Introducción

La industria papelera enfrenta actualmente el desafío de modernizar sus procesos productivos con el fin de optimizar la eficiencia energética y fortalecer la confiabilidad operacional. En la fabricación de papel *tissue*, la bomba de dilución principal o *fan pump* cumple un rol estratégico, ya que regula el flujo y la dilución de la pulpa en la etapa previa a la formación de la hoja de papel. Por esta razón, su desempeño incide directamente en la estabilidad del proceso y en la calidad final del producto. En este escenario, la implementación de un sistema *dual drive*, definido como la integración de dos accionamientos eléctricos que operan de manera coordinada sobre un mismo equipo, surge como una alternativa tecnológica para incrementar la eficiencia, asegurar redundancia operativa y dotar de mayor flexibilidad al control de procesos. Su relevancia radica en la necesidad del sector de responder a exigencias crecientes de sostenibilidad, reducción de costos energéticos y modernización de la infraestructura productiva.

El presente proyecto se desarrolla en la empresa C y P del R S.A., dedicada a la fabricación de papeles suaves tipo *tissue*, y en particular se centra en la *fan pump* 3 de la máquina de papel número 1, con el propósito de establecer una estrategia que no solo optimiza el control del proceso, sino que también prolonga la vida útil de los equipos, incrementando la competitividad de la operación industrial, mejorando el desempeño de la bomba y garantizando calidad en la pulpa, lo que representa un avance significativo en la modernización tecnológica de la planta.

El presente trabajo se estructura en diferentes secciones que permiten una comprensión progresiva del estudio. En primera instancia, se expone el marco conceptual y el marco teórico que sustentan la investigación. Posteriormente, se presenta el diagnóstico inicial del sistema y los

principales problemas identificados. A continuación, se describe la propuesta de implementación del sistema dual drive, abordando tanto la fase de diseño como el proceso de integración en planta. Finalmente, se presentan los resultados alcanzados, la discusión de los hallazgos y las conclusiones, destacando el impacto del proyecto en la eficiencia y confiabilidad de la operación industrial.

## Planteamiento del Problema

La industria de pulpa y papel juega un rol relevante en el desarrollo industrial colombiano. Aporta aproximadamente el 4,6 % del PIB industrial, genera más de 9.000 empleos directos y mantiene participación en mercados internacionales. El sector se caracteriza por un uso intensivo de agua y energía en sus procesos productivos. El consumo energético representa uno de los principales desafíos, con valores cercanos a 3,8 MWh por tonelada producida, lo que impulsa la implementación de estrategias de eficiencia energética, tecnificación de procesos y adopción de tecnologías más eficientes (ANDI, 2022), alineadas con las tendencias de modernización industrial y con los principios de la Industria 4.0, donde la optimización de sistemas de accionamiento y control en equipos críticos es clave para mejorar la competitividad y sostenibilidad. En este contexto, diversos autores señalan que los motores de corriente continua presentan limitaciones asociadas a altos costos energéticos y de mantenimiento, envejecimiento tecnológico y mayor recurrencia de fallas; particularmente, Castillo (2023) advierte que su uso prolongado incrementa los costos operativos y afecta la confiabilidad del proceso, impactando el costo del producto terminado.

Esta situación se evidencia en la empresa C y P del R S.A., ubicada en Dosquebradas, Risaralda, dedicada a la producción de papel tissue a partir de celulosa y material reciclado. En la máquina de papel número, la formación de la hoja depende del flujo continuo y adecuado de agua y suspensión de fibra hacia el *head box* o caja de formación. Este flujo es impulsado por la *fan pump* la cual es accionada por un motor de corriente continua de 315 kW y regulado por un drive DC que opera cerca de su límite de capacidad nominal de 500 A. Esta condición limita el caudal de bombeo hacia la caja de formación, generando una distribución irregular de la suspensión de fibra en el proceso de formación del papel. Como consecuencia, la máquina no

alcanza su velocidad de diseño de 1200 m/min, operando actualmente a una velocidad aproximada de 1050 m/min durante la producción de papel higiénico blanco de 13 GMS (Gramos por metro cuadrado), lo que se traduce en una producción promedio cercana a 50 toneladas por día, frente a una capacidad potencial estimada de 60 toneladas por día. Esta diferencia representa una brecha productiva aproximada del 16,7 %, afectando los indicadores de productividad y eficiencia operativa de la planta.

Adicionalmente, la operación continua del sistema de accionamiento DC en condiciones cercanas a su capacidad máxima incrementa el estrés eléctrico y térmico sobre los componentes del variador y del motor, aumentando el riesgo de fallas y paradas no programadas. Este escenario impacta negativamente los indicadores de confiabilidad del proceso, incrementa los costos de mantenimiento correctivo y genera pérdidas económicas asociadas a interrupciones en la producción. La problemática identificada no solo afecta el rendimiento del sistema de bombeo, sino que también compromete la estabilidad del proceso de formación del papel, la eficiencia energética de la máquina y la capacidad productiva de la empresa. La magnitud del problema se evidencia en una pérdida de 10 toneladas diarias en la producción potencial, y la operación permanente del sistema de accionamiento en condiciones cercanas a su límite nominal.

Bajo este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación que orienta el desarrollo del presente proyecto:

¿Cómo incrementar el flujo bombeado por la fan pump de la máquina de papel N.º 1 para alcanzar la velocidad de diseño de 1200 m/min y una producción aproximada de 60 toneladas por día, sin comprometer la confiabilidad operativa del sistema de accionamiento existente?

## Justificación

La industria papelera enfrenta desafíos constantes en términos de eficiencia energética, optimización de procesos y mantenimiento de equipos críticos. En este contexto, la implementación de un sistema dual drive en una fan pump responde a una necesidad específica de C y P del R S.A., ubicada en Dosquebradas, Risaralda, orientada a mejorar la velocidad y estabilidad operativa, reducir el consumo energético y minimizar los tiempos de parada por mantenimiento. La fan pump es una bomba de alta exigencia, fundamental para el transporte de pulpa en el proceso de producción de papel, por lo que cualquier falla en su operación impacta directamente en la productividad de la planta.

La implementación del sistema dual drive busca automatizar y optimizar el control del funcionamiento de la bomba al integrar dos accionamientos que trabajan de manera coordinada. Esta solución permite una mayor flexibilidad operativa, una distribución equilibrada de la carga entre motores y un incremento en la confiabilidad del proceso. Entre los beneficios esperados se proyecta un aumento aproximado del 50 % en la capacidad del sistema de bombeo, así como una mejora en la disponibilidad de flujo hacia la caja de formación, permitiendo que la máquina alcance su velocidad de diseño de 1200 m/min en la producción de papel tissue de 13 g/m<sup>2</sup>. Esto equivale a una productividad estimada de 60 toneladas por día. Adicionalmente, se espera un ahorro energético entre el 5 % y el 10 % por tonelada producida, junto con una reducción significativa de paradas operativas y una extensión de la vida útil del sistema, lo que impacta positivamente la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de la planta.

Desde la perspectiva de la ingeniería electrónica, este proyecto constituye una oportunidad para aplicar conocimientos en automatización, control de motores eléctricos, integración de sistemas y optimización energética. La implementación de un sistema de doble

accionamiento permite profundizar en el uso de tecnologías como variadores de frecuencia, sincronización de motores y sistemas de supervisión y control. Asimismo, aporta a la disciplina al proponer una solución técnica susceptible de ser replicada en otras plantas con condiciones similares.

En el ámbito social y ambiental, la mejora en la eficiencia del proceso productivo contribuye a la sostenibilidad industrial mediante la reducción del consumo energético y del impacto ambiental asociado. Esto beneficia tanto a la empresa como a la comunidad, al disminuir la huella de carbono y promover prácticas industriales responsables. Además, la optimización de los procesos y la reducción de fallas operativas favorecen la estabilidad del empleo y el desarrollo económico regional.

En relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2018), el proyecto contribuye directamente a objetivos como el ODS 9, *Industria, Innovación e Infraestructura*, al fomentar la modernización de procesos industriales a través de tecnologías innovadoras como sistemas dual drive y control automático. Esto fortalece la infraestructura de la planta, mejora la eficiencia operativa y posiciona a C y P del R S.A. como una industria comprometida con la innovación y el desarrollo sostenible, que promueve una producción más eficiente, reduce desperdicios energéticos y optimiza los recursos disponibles en el marco del ODS 12, *Producción y Consumo Responsables*.

## Objetivos

### Objetivo General

Optimizar el funcionamiento de la bomba de dilución *fan pump* en la Máquina de Papel N.º 1 de la empresa C y P del R S.A. mediante la implementación de un sistema de doble accionamiento *dual drive*, con el fin de aumentar el flujo hacia la caja de formación *headbox*, superar la restricción de velocidad de 1050 m/min y mantener la calidad del papel tissue producido.

### Objetivos Específicos

Evaluar el estado inicial del sistema de bombeo de la fan pump 3 de la máquina de papel N.º 1 en la empresa C y P del R S. A., mediante el análisis de parámetros técnicos y operativos previos a la implementación.

Diseñar un sistema de doble accionamiento mediante la incorporación de un motor auxiliar de corriente alterna, sincronizado con el motor de corriente continua existente, para garantizar su integración y control de torque mediante PLC y variador de velocidad.

Evaluar el desempeño del sistema dual drive implementado mediante indicadores clave como potencia, velocidad de operación, calidad de producto, productividad y confiabilidad operativa.

## Marco Referencial

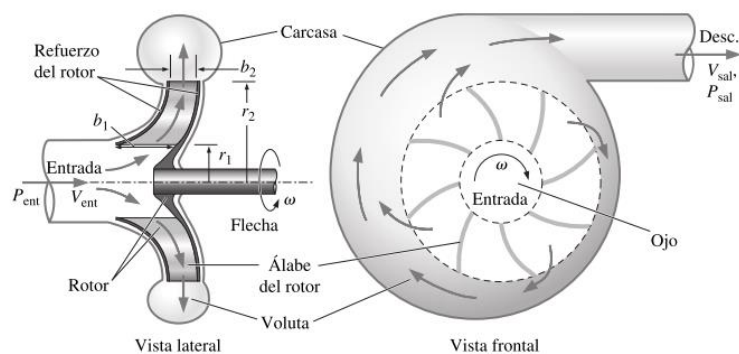
### Marco Conceptual

#### *Conceptos Básicos Sobre Bombas Centrífugas*

Según Çengel y Cimbala (2006) una bomba centrífuga es una *máquina rotodinámica* que transforma la energía mecánica (generalmente de un motor) en energía hidráulica (presión y velocidad) para mover líquidos. Utiliza un impulsor giratorio para acelerar el fluido radialmente hacia afuera, aumentando su presión y convirtiendo la energía cinética en presión dentro de una carcasa en forma de voluta. La fan pump corresponde a un tipo de bomba centrífuga de alta capacidad, ampliamente utilizada en procesos de transporte de pulpa en máquinas de fabricación de papel. Este equipo constituye un elemento central en el desarrollo del presente proyecto, debido a su influencia directa en el desempeño del sistema de formación del papel. Por esta razón, es fundamental comprender sus principios de funcionamiento y características operativas.

### Figura 1

#### *Vista Lateral y Frontal de una Bomba Centrífuga Típica*

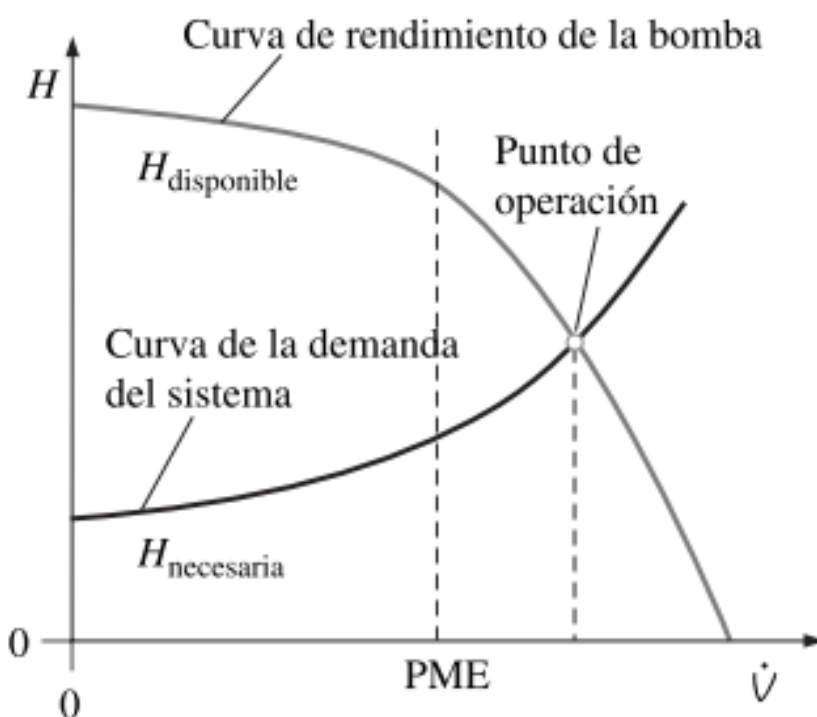


*Nota.* El fluido ingresa en forma axial en el punto medio de la bomba (el ojo), es lanzado hacia la parte exterior de los álabes del rotor (impulsor o rodete), luego pasa al difusor de expansión (voluta) y se descarga por un lado de la bomba. Tomado de Çengel y Cimbala (2006).

El desempeño de una bomba centrífuga se describe mediante su curva característica, que relaciona la altura desarrollada para vencer la altura estática, superar las pérdidas por fricción y mantener la presión requerida con el caudal suministrado. El punto de operación se determina por la intersección entre la curva de la bomba y la curva del sistema, esta última dependiente de las pérdidas por fricción, las cuales son proporcionales al cuadrado del caudal. Por tanto, incrementos en el flujo requerido generan aumentos no lineales en la energía necesaria para su transporte.

**Figura 2**

*Curva de Operación de Bombas Centrífugas*



*Nota.* El punto donde los valores de  $H$  (altura estática) disponibles y necesarios coinciden es el punto de operación. Tomado de Çengel y Cimbala (2006).

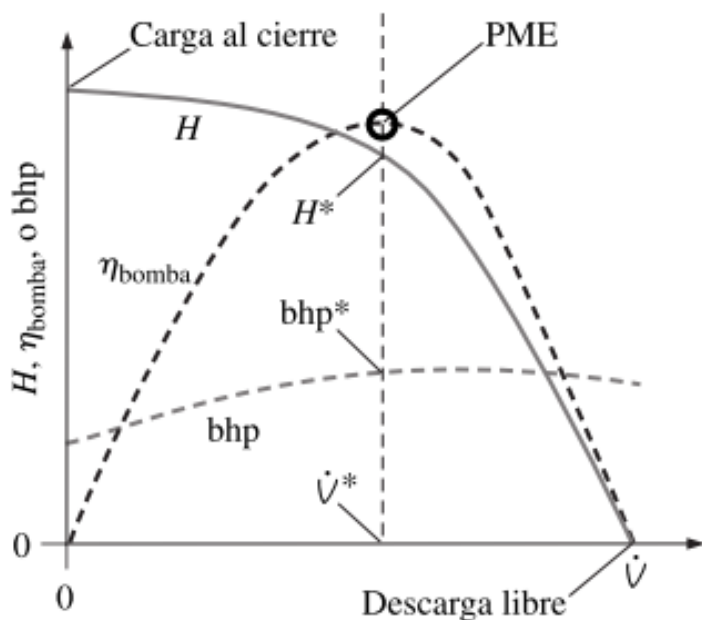
La potencia hidráulica suministrada por la bomba se expresa como el producto de la densidad del fluido  $\rho$ , la gravedad  $g$ , el caudal  $Q$  y la altura desarrollada  $H$ , según la ecuación 1.1:

$$P_{hidr} = \frac{\rho * g * H * Q}{\eta} \quad (1.1)$$

Sin embargo, la potencia real demandada depende de la eficiencia del equipo  $\eta$ , la cual alcanza su máximo valor en el punto de mejor eficiencia (PME) (véase la Figura 3).

**Figura 3**

*Curvas de Rendimiento Típicas de una Bomba Centrífuga*



*Nota.* La eficiencia de la bomba alcanza su valor máximo en algún punto entre la condición de cierre y la condición de descarga libre; este punto de operación de eficiencia máxima se denomina punto de la mejor eficiencia. Tomado de Çengel y Cimbala (2006).

Las leyes de afinidad establecen que el caudal es proporcional a la velocidad de rotación, la altura al cuadrado de la velocidad y la potencia al cubo de la velocidad, lo que implica que pequeños incrementos en la velocidad pueden generar aumentos significativos en la potencia requerida.

Para el Caudal Q se tiene la expresión:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1.2)$$

Siendo Q1 y N1 el caudal y las RPM de placa de la bomba.

Para la altura manométrica H (presión descarga de la bomba en metros de columna de agua) se tiene la expresión:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (1.3)$$

Siendo H1 y N1 la altura manométrica y las RPM de placa de la bomba.

Para la potencia hidráulica P se tiene la expresión:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (1.4)$$

Siendo P1 y N1 la potencia nominal de la bomba y las RPM de placa de la bomba.

Estos fundamentos permiten comprender la relación entre variables hidráulicas y demanda energética en sistemas industriales de bombeo y aplican en los procesos para determinar el estado del sistema y diseño del sistema con doble accionamiento.

### ***Sistemas de Control de Velocidad en Bombas Industriales***

Las bombas de dilución o fan pumps en el proceso papelerero son bombas de alta capacidad utilizadas en procesos de transporte de pulpa. Según Munguía y Melitón (2010), estas bombas “sirven para mezclar la pulpa con las aguas blancas y mandar la mezcla a la caja de entrada. La bomba de dilución es la mayor bomba del sistema de la máquina de papel, y los requerimientos que se le exigen son muy precisos. El caudal y la presión deben ser estables, sin pulsaciones, y la bomba tiene que ser capaz de funcionar en todo el rango de producción de la máquina” (p. 12).

Tradicionalmente, estas bombas están acopladas a motores de corriente directa (DC) de alta potencia, accionados por variadores de velocidad DC. Estos dispositivos permiten regular la velocidad y el torque del motor mediante el control de la tensión aplicada al inducido (armadura) utilizando diversas técnicas como, por ejemplo:

Control por Modulación de Ancho de Pulso (PWM por sus siglas en inglés), ajusta la tensión promedio aplicada al motor mediante pulsos de ancho variable.

Control por retroalimentación de corriente, mantiene una operación segura y estable del motor al limitar la corriente en el inducido.

Control en Lazo Cerrado (PID), utiliza sensores como tacómetros dinamométricos, encoders o generadores de pulso para ajustar continuamente la velocidad del motor de acuerdo con una referencia establecida.

Estos sistemas resultan adecuados cuando se necesita obtener alto torque a bajas

velocidades y mantener una rápida respuesta frente a variaciones de carga. Sin embargo, presentan desventajas importantes frente a los sistemas de control de velocidad en corriente alterna (AC), tales como altos costos operativos por mantenimiento, debido al desgaste de las escobillas y del colector por fricción; mayor tamaño y peso, en comparación con motores de corriente alterna equivalentes; riesgo de sobrecalentamiento y requieren sistemas adicionales de refrigeración; y generación de interferencia electromagnética (EMI), por el proceso de conmutación mecánica.

Actualmente, estas desventajas se superan mediante el uso de variadores de frecuencia AC (VFD por sus siglas en inglés), que permiten controlar la velocidad y el torque de motores de corriente alterna con mayor eficiencia y menor mantenimiento. Esta solución permite aprovechar el sistema DC existente sin necesidad de retirarlo, integrar un motor AC como "*Sistema Helper*" acoplado a la bomba de eje doble, de forma que se distribuye la carga entre el motor "*Máster*" de control DC y el motor "helper" de control AC para optimizar el funcionamiento del sistema.

El *sistema dual drive* combina dos motores eléctricos y sus respectivos accionamientos, y permite alternar o combinar su uso según las demandas del proceso, optimiza el consumo energético y proporciona un mayor control sobre la velocidad y el caudal, asegurando una operación eficiente y confiable.

### ***Eficiencia Energética de Sistemas de Accionamientos Eléctricos***

La eficiencia energética de un sistema de accionamiento eléctrico se define como la relación entre la potencia útil entregada al proceso y la potencia eléctrica suministrada desde la red. En aplicaciones industriales de bombeo, esta eficiencia no depende únicamente del motor, sino del conjunto integrado por el motor eléctrico, el sistema de control (drive o variador de velocidad), el sistema mecánico de transmisión y la bomba hidráulica.

La eficiencia global del sistema puede expresarse como:

$$\eta_{global} = \eta_{drive} * \eta_{motor} * \eta_{transmisión} * \eta_{bomba} \quad (1.5)$$

Donde  $\eta$  es eficiencia.

Esta relación evidencia que pequeñas pérdidas acumuladas en cada etapa pueden representar una disminución significativa en el rendimiento total del sistema y se hace importante determinar la eficiencia en cada equipo.

La eficiencia del motor eléctrico independientemente del tipo se define como:

$$\eta_{motor} = \frac{P_{mecánica}}{P_{eléctrica}} \quad (1.6)$$

Donde  $P$  es potencia.

Las pérdidas internas del motor incluyen pérdidas en cobre ( $I^2R$ ), pérdidas en el núcleo (histéresis y corrientes parásitas), pérdidas mecánicas (fricción y ventilación) y otras pérdidas adicionales. De acuerdo con Chapman (2012), los motores industriales alcanzan su máxima eficiencia cuando operan entre el 75 % y el 100 % de su carga nominal. La operación continua en condiciones de sobrecarga incrementa las pérdidas térmicas, reduce la eficiencia y acelera el deterioro del aislamiento eléctrico.

La eficiencia del sistema de control (Drive) es típica entre 95 % y 98 %, dependiendo de la topología y del nivel de carga (U.S. Department of Energy, 2014). Las principales pérdidas se generan por conmutación electrónica, pérdidas en rectificación, armónicos y calentamiento interno. El uso de control de velocidad mediante variadores de corriente alterna AC o corriente

continua DC permite ajustar la potencia demandada a la carga real, evitando consumos innecesarios asociados a operación a velocidad fija. Sin embargo, la tecnología DC presenta limitaciones asociadas a altos costos de mantenimiento, envejecimiento tecnológico y mayor recurrencia de fallas, que asociado con una operación continua en condiciones cercanas al 100 % de su capacidad nominal genera incremento en la corriente, elevación de temperatura, disminución de eficiencia y reducción de vida útil. Desde el punto de vista energético, esta condición implica mayor disipación térmica y menor margen operativo, lo que afecta la confiabilidad y estabilidad del proceso productivo.

Para evaluar la eficiencia general del sistema de accionamiento se pueden emplear los indicadores de desempeño energético que permiten de forma global determinar el desempeño del accionamiento del sistema.

El consumo específico de energía es un indicador que relaciona la energía eléctrica consumida con la cantidad de producto generado. Permite evaluar cuánta energía se requiere para producir una unidad de producto y está dada por:

$$SEC = \frac{\text{Energía consumida [kWh]}}{\text{Producción [ton]}} \quad (1.7)$$

Un consumo específico de energía alto indica un proceso energéticamente ineficiente y, por el contrario, un consumo específico de energía bajo indica un mejor aprovechamiento energético.

En el contexto del sistema de bombeo evaluado en este proyecto, la energía consumida es netamente eléctrica, por lo que se adopta el *kWh/día* como unidad de medida. Mientras que para la producción en toneladas se tiene en cuenta la producción en un día *ton/día*, como referencia

para la determinación de la producción máquina se tiene como referencia la velocidad lineal de la máquina en  $m/min$ , el ancho de la hoja en  $m$  y el peso base GSM (por sus siglas en inglés gramos por metro cuadrado) que es uno de los parámetros más importantes en la producción de papel tissue y en términos sencillos indica cuántos gramos pesa una muestra de papel de un metro cuadrado. En términos generales, la producción diaria se calcula con la ecuación 1.8:

$$\frac{ton}{día} = Vel. producción * Ancho de hoja * Peso Base * 60 min * 24 horas \quad (1.8)$$

#### Figura 4

*Máquina para Papel Tissue*



*Nota.* Variables de referencia en la máquina tissue para determinar la producción en toneladas por día. Tomado de *Máquina de fabricación de papel tissue para la producción de papel higiénico a la venta directa de fábrica* [Fotografía] por Made-in-China.com (2026),

<https://n9.cl/yvgol>

### ***Bomba de Dilución Fan Pump en el Proceso de Fabricación de Papel Tissue***

La *fan pump*, también conocida como bomba de dilución, es un componente crítico dentro del sistema de preparación y transporte de pulpa en la fabricación de papel, especialmente en el proceso de producción de papel tissue, donde se requiere alta precisión y control en la consistencia del material fibroso. Su función principal consiste en mezclar la pulpa con aguas blancas (agua recuperada del proceso que contiene fibras finas) y bombear esta mezcla hacia la caja de entrada de la máquina papelera (Headbox en inglés).

Según Munguía y Melitón (2010), esta bomba representa la de mayor tamaño y capacidad dentro del sistema de la máquina de papel, y su desempeño está sujeto a requisitos técnicos muy estrictos en cuanto a caudal constante, presión estable y sin pulsaciones, así como a una capacidad de operar de forma eficiente a lo largo de todo el rango de producción de la máquina.

#### **Figura 5**

*Bomba de Dilución Fan Pump Marca Sulzer Tipo ZPP de Doble Succión*



*Nota.* Se muestra el tipo de bomba instalada en la Fan Pump 3. Tomado de (Sulzer Ltd, 2024).

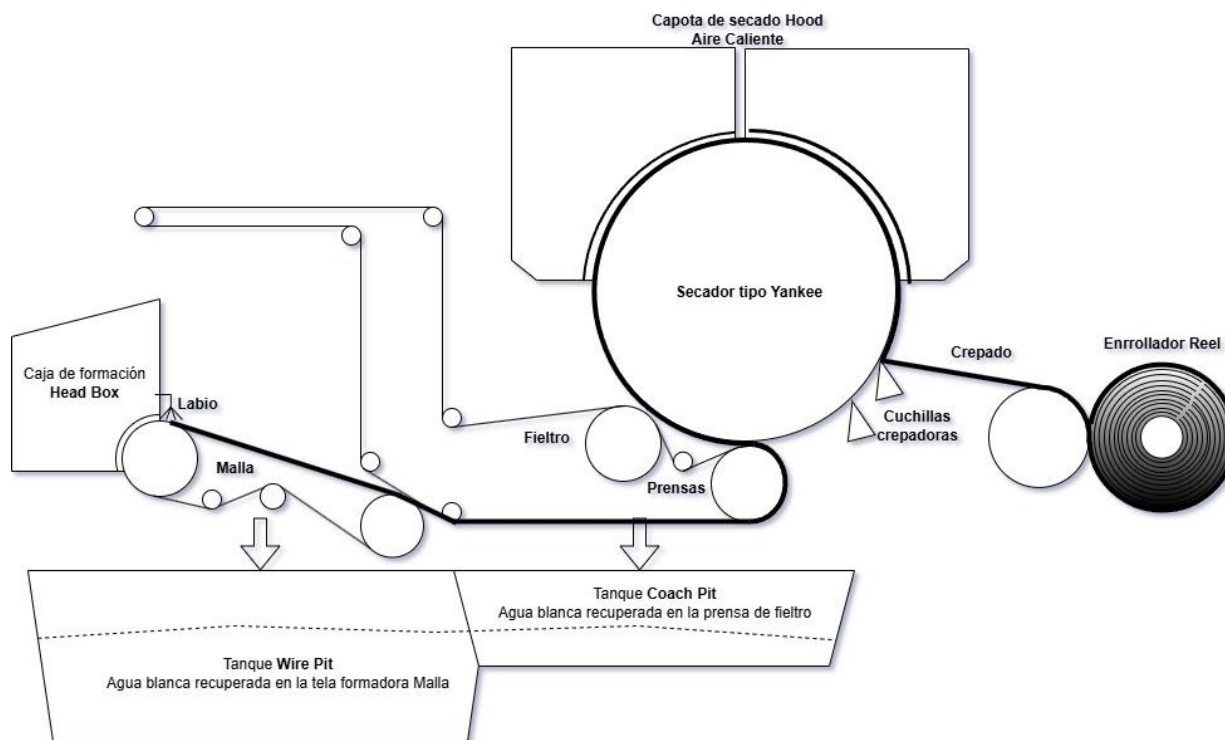
En el caso específico de la producción de papel tissue, que se caracteriza por requerir papeles ligeros, suaves y absorbentes, la uniformidad de la mezcla de pulpa es fundamental. Cualquier variación en la consistencia de la pulpa puede afectar directamente las propiedades del producto final, como la suavidad, la resistencia y la absorción. La importancia de la fan pump no solo radica en garantizar el transporte del material, sino que también contribuye de manera decisiva a la calidad del papel tissue.

### ***Agua Blanca en el Proceso de Fabricación de Papel Tissue***

Como agua blanca en el proceso de fabricación de papel, se tienen en cuenta las aguas recuperadas en los procesos de separación de fibra y secado en la máquina para papel. Estas aguas en el proceso específico son recolectadas principalmente en la tela formadora (conocida como *Malla*) por medio de rodillos y cajas de vacío, y en la tela de secado (conocida como *Fieltro*) por medio de prensado y vacío. El uso de esta agua recuperada del proceso es fundamental, ya que permite recuperar partículas de fibra y cargas minerales, reducir desperdicios y minimizar el consumo de agua fresca, así como el impacto ambiental del proceso (véase Figura 6).

**Figura 6**

*Esquema de la Máquina para Papel 1 de Recolección de Aguas Blancas*



*Nota.* Elaboración propia en draw.io, basado en el caso de estudio puntual de la máquina para papel 1 de C y P del R.S.A.

### ***Flujo de Pasta Refinada y Sistema de Dilución en la Fabricación de Papel Tissue***

En el proceso de fabricación de papel tissue, el medio de transporte de las fibras celulósicas es el agua blanca, un subproducto del propio proceso que se recupera en la sección de formación de la máquina papelera. Esta agua se recoge en el tanque *Wire Pit*, ubicado debajo de la tela formadora (malla), y se reutiliza estratégicamente en el sistema de dilución de la pulpa. Este sistema tiene como objetivo ajustar la consistencia de la mezcla de fibra y agua para

garantizar una correcta formación de la hoja en la caja de entrada (headbox), (Torres y Roncero, s/f).

Para el caso de estudio de este proyecto, la pulpa refinada proveniente de la sección de preparación llega con una consistencia del 3% al 4%, la cual debe reducirse progresivamente hasta alcanzar niveles entre 0,2% y 0,4% antes de su ingreso a la caja de formación (véase Figura 7). Esta reducción de consistencia se realiza en tres etapas de dilución:

Primera etapa (fan pump 1): La pulpa refinada se mezcla con agua blanca proveniente del sistema de recuperación, y luego pasa por un sistema de limpieza centrífuga conocido como *uniflow*, para remover partículas pesadas y contaminantes no fibrosos, mejorando la calidad del stock (pulpa).

Segunda etapa (fan pump 2): Se añade más agua blanca a la pulpa diluida, pasando nuevamente por una batería de limpieza centrífuga, esta vez denominada *posiflow*, que refina aún más la mezcla y asegura una buena preparación de la pulpa.

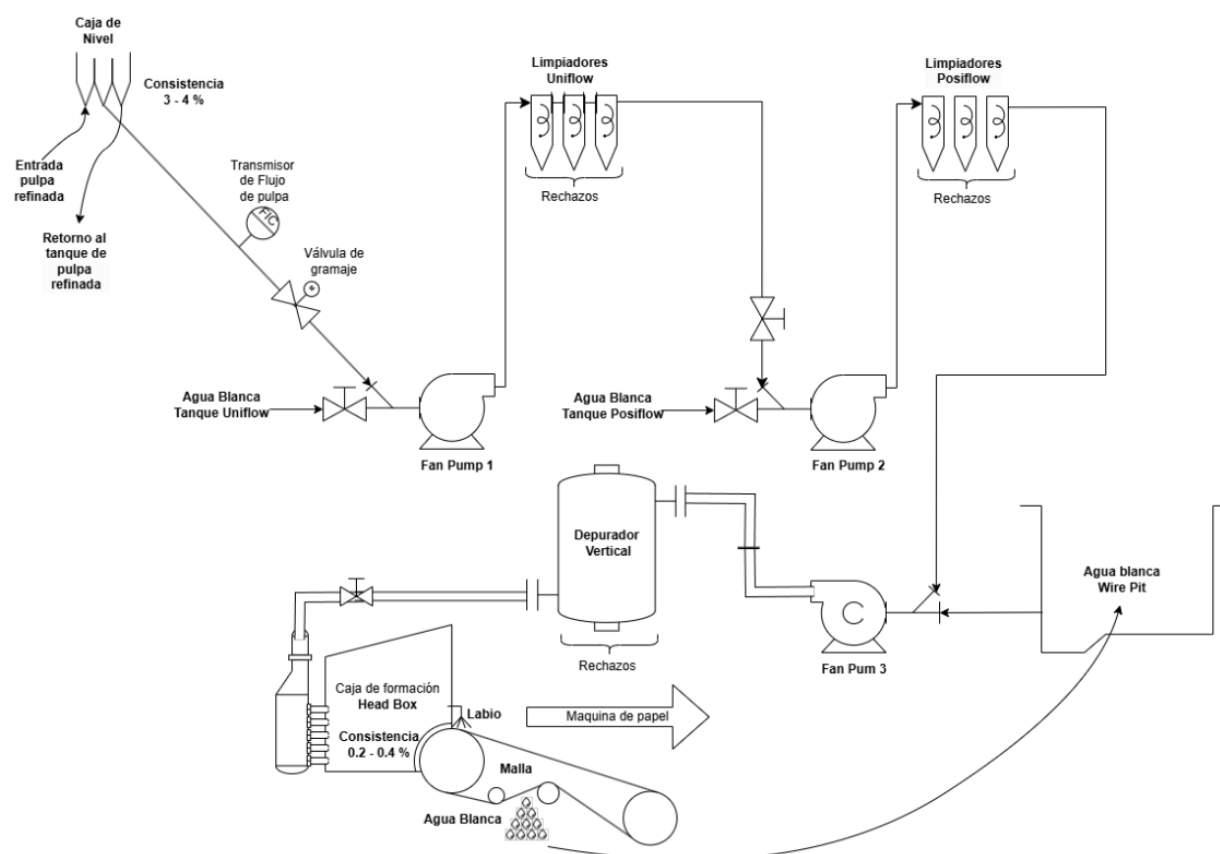
Tercera etapa (fan pump 3): Es la etapa final y más crítica del sistema de dilución. En esta fase, la fan pump 3 toma la mayor parte del agua blanca directamente del Wire Pit y la mezcla con la pulpa que viene de las etapas anteriores. Esta bomba entrega la mezcla con un caudal alto y una presión constante, ideal para una formación uniforme de la hoja. Antes de ingresar a la headbox, el flujo pasa por un depurador vertical (criba de limpieza), que elimina residuos finos y asegura que el stock esté en óptimas condiciones.

La *fan pump 3* es el eje principal del presente proyecto aplicado. Su correcto funcionamiento influye directamente en la calidad del producto final y en la estabilidad del proceso de formación del papel tissue, en adelante, cualquier referencia en este documento a la fan pump se enfoca específicamente en esta bomba de dilución.

Este flujo de pulpa diluida que viaja desde el sistema de refinado hasta la caja de entrada se conoce técnicamente como stock flow o corriente de pulpa, y debe mantener una consistencia, caudal y presión estables para garantizar una buena calidad del papel. La integración de tecnologías como el sistema dual drive en esta bomba busca optimizar el control del flujo, reducir el consumo energético y mejorar la flexibilidad operativa del sistema.

**Figura 7**

*Esquema Flujo y Dilución de Pasta Refinada en Máquina para Papel 1*



*Nota.* Elaboración propia en draw.io, basado en el caso de estudio puntual de la máquina para papel 1 de C y P del R S.A.

### ***Relación Chorro-Tela***

La *relación chorro-tela* es el cociente entre la velocidad de salida del chorro de pulpa desde la caja de formación (headbox) y la velocidad lineal de la tela formadora (Malla). Para obtener una formación óptima, este valor debe estar muy próximo a 1 ( $V_c / V_t \approx 1$ ), de modo que el chorro de pulpa se deposite sin desgarros ni arrastres sobre la tela en movimiento, (Munguía y Melitón, 2010)

Según Da Silva (2009), en tissue, *la uniformidad de fibra y la estructura de poros* son críticas para propiedades como suavidad, absorción y resistencia húmeda. La relación chorro-tela regula la forma y velocidad con que la suspensión fibrosa impacta la tela, afectando directamente la dispersión de la fibra y la evacuación inicial de agua. Siendo  $V_c$  la velocidad del chorro y  $V_t$  la velocidad de la tela formadora (malla), un valor de relación chorro-tela muy distinto de 1 provoca exceso de turbulencia (si  $V_c > V_t$ ) o arrastre excesivo de pulpa (si  $V_c < V_t$ ), generando defectos de formación que en tissue se traducen en zonas de densidad desigual y pérdida de rendimiento en secado.

Mantener el chorro-tela es, por tanto, esencial para garantizar hojas de tissue con perfil de humedad y grosor homogéneos, base indispensable para el secado eficiente y el bobinado final. En la estabilidad de un chorro tela ideal se involucran las siguientes variables de proceso:

*Presión hidráulica dentro de la headbox cerrada*, conocida en el argot papelerero como presión de cabeza total, se ajusta con la velocidad de giro de la fan pump en RPM, y define la velocidad del chorro según Bernoulli adaptado a sistemas presurizados en la ecuación 2.1:

$$V_c = \sqrt{\frac{2Ph}{\rho}} \quad (2.1)$$

Donde  $V_c$  es la velocidad del chorro (en m/s),  $Ph$  la presión hidráulica (en Pa) y  $\rho$  la densidad de la suspensión que depende de la consistencia del flujo de pulpa controlada en las etapas de dilución.

*Velocidad de la tela ( $V_t$ )*, gobernada por el sistema de arrastre de la malla formadora con motor y encoder, que determina la velocidad lineal de la hoja en formación en m/min.

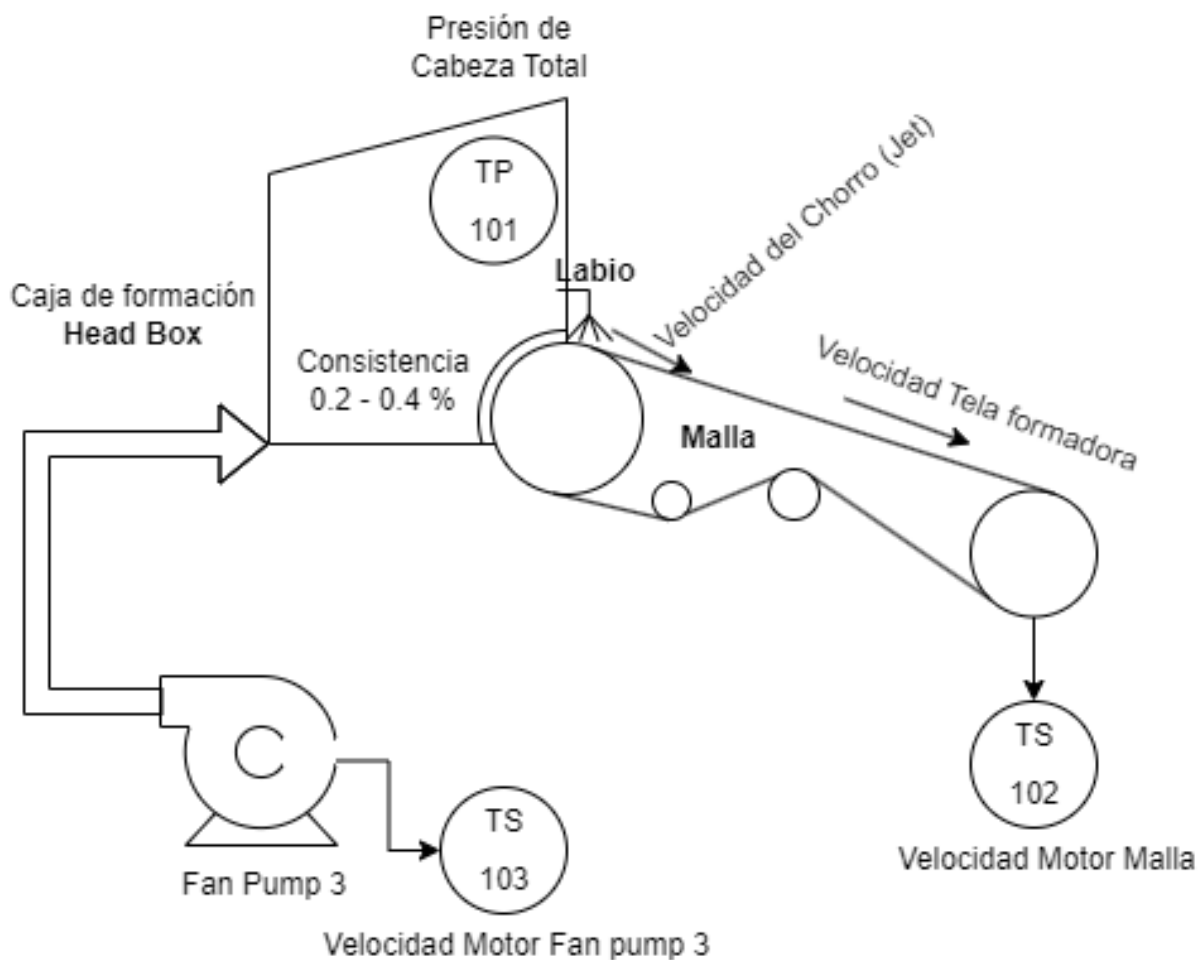
*La consistencia de la pulpa ( $C\%$ )* influye en la densidad y, por ende, en el perfil de velocidad del chorro dentro del headbox.

Teniendo en cuenta estas variables (véase Figura 8), podemos dimensionar la importancia del control de velocidad de la fan pump, pues esta debe mantener presión y caudal deseados en la headbox constantes para asegurar un perfil de velocidad uniforme al salir por el labio de formación de la headbox.

El control preciso de la velocidad del motor permite ajustar la velocidad de la bomba en tiempo real, compensando variaciones importantes en la consistencia o la demanda de producción, y preserva la relación chorro-tela estable. Al garantizar un control fino, evita variaciones en el grosor y la formación de la hoja, minimiza defectos como arrugas, estrías y poros en el papel tissue.

**Figura 8**

*Esquema de Variables Involucradas en el Control de Chorro-Tela*



*Nota.* Elaboración propia en draw.io, basado en el caso de estudio puntual de la máquina 1 de C y P del R S.A.

### **Marco Teórico**

Los retos crecientes en eficiencia energética, confiabilidad operativa y calidad de producto que enfrenta la industria papelera hacen de la modernización de sistemas de accionamiento, especialmente en equipos críticos como la fan pump, una oportunidad de desarrollar una estrategia técnica efectiva para lograr vencer estos retos en procesos críticos

como la impulsión de pulpa en máquinas papeleras. La transición desde motores DC o AC de velocidad fija hacia configuraciones con variadores de frecuencia (VFD por sus siglas en inglés) en topologías dual drive representa una solución para optimizar el rendimiento, reducir costos de operación y garantizar la continuidad del proceso.

La repotenciación de sistemas de accionamiento industriales mediante el acoplamiento de dos máquinas eléctricas sobre un mismo eje mecánico se fundamenta en los principios de la conversión electromecánica de energía y en la dinámica rotacional de sistemas acoplados. Desde el punto de vista físico, cuando dos motores están rígidamente conectados a un mismo eje, la condición fundamental que gobierna el sistema es la igualdad de velocidad angular impuesta por la restricción mecánica, mientras que el reparto de carga se determina por el equilibrio de torques desarrollado por cada máquina. Según se expone (Chapman, 2012), la potencia mecánica desarrollada por un motor se expresa como:

$$P = T\omega \quad (3.1)$$

Lo que implica que, si ambos motores comparten la misma velocidad angular  $\omega$ , el reparto de potencia depende directamente del torque  $T$  que cada uno aporte al eje común. Este principio constituye la base teórica del acoplamiento dual drive, ya que la sincronización no implica necesariamente identidad electromagnética entre máquinas (sistemas AC o DC, por ejemplo), sino equilibrio dinámico en el dominio mecánico.

La segunda ley de Newton para la rotación establece que, si sobre un cuerpo rígido actúa más de un torque en torno a un eje fijo, la suma de los torques es igual al momento de inercia por la aceleración angular:

$$\sum_i T_i = I\alpha \quad (3.2)$$

Donde  $\sum T$  representa la suma de los torques aplicados al sistema,  $I$  es el momento de inercia total del conjunto rotatorio y  $\alpha$  es la aceleración angular del eje (Ling et al., 2021).

La aceleración angular del eje  $\alpha$  en relación con la velocidad angular es:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (3.3)$$

En el caso de un sistema de accionamiento dual, sobre el eje actúan tres torques principales el torque desarrollado por el motor de corriente continua  $T_{DC}$ , el torque generado por el motor de corriente alterna  $T_{AC}$  y el torque resistente de la carga hidráulica de la bomba  $T_{carga}$ , considerando la convención de signos en la cual los torques de los motores impulsan el eje y el torque de la carga se opone al movimiento, la ecuación dinámica del sistema se expresa como:

$$T_{DC} + T_{AC} - T_{carga} = I \frac{d\omega}{dt} \quad (3.4)$$

Esta expresión representa el equilibrio dinámico del eje común y describe cómo la aceleración angular depende de la diferencia entre el torque total desarrollado por los motores y el torque requerido por la carga. Cuando el sistema alcanza régimen permanente de operación, la velocidad angular se mantiene constante y la aceleración angular se hace nula  $\left(\frac{d\omega}{dt} = 0\right)$ . En esta condición, la ecuación dinámica se simplifica a:

$$T_{DC} + T_{AC} = T_{carga} \quad (3.5)$$

Lo que indica que la suma de los torques generados por ambos motores debe igualar exactamente el torque exigido por la carga hidráulica de la bomba. Esta relación demuestra que el reparto de carga entre los dos accionamientos se produce de manera natural como resultado del equilibrio de torques en el eje común. En consecuencia, la sincronización mecánica entre los motores no depende de que ambos utilicen la misma tecnología de accionamiento, sino de que operen a la misma velocidad angular y contribuyan conjuntamente al torque requerido por el sistema.

La generación de torque en las máquinas eléctricas se basa en la interacción entre campos magnéticos y corrientes eléctricas, fenómeno descrito por los principios de la conversión electromecánica de energía. En el caso de los motores de corriente continua, el torque desarrollado es directamente proporcional al flujo magnético del campo y a la corriente que circula por la armadura. De acuerdo con lo expuesto por Chapman (2012) y por Kosow (1991), el torque electromagnético de un motor de corriente continua puede expresarse mediante la ecuación:

$$T = k\phi I_{Arm} \quad (3.6)$$

Donde  $T$  representa el torque electromagnético,  $k$  es una constante constructiva de la máquina,  $\phi$  es el flujo magnético generado por el sistema de excitación y  $I_{Arm}$  es la corriente de armadura. En motores DC con excitación constante, el flujo magnético puede considerarse aproximadamente constante, por lo que la ecuación se simplifica a:

$$T \propto I_{Arm} \quad (3.7)$$

Esta relación indica que el torque es prácticamente proporcional a la corriente de armadura. Como consecuencia, el control del torque en motores DC se realiza de forma directa mediante el control de la corriente, lo que históricamente ha hecho que estos motores sean ampliamente utilizados en aplicaciones industriales que requieren regulación precisa de velocidad y torque.

En contraste, el comportamiento del torque en los motores de corriente alterna, particularmente en los motores de inducción, es más complejo debido a la forma en que se produce la interacción electromagnética entre el campo giratorio del estator y el rotor. En estos motores, el torque es afectado, además de la aplicación de potencia eléctrica en el estator, por el deslizamiento del rotor. *El deslizamiento de un motor de inducción es la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor, expresada como un porcentaje (o por unidad) de la velocidad síncrona* (Wildi, 2007). El deslizamiento por unidad  $s$  está dado por la ecuación 3.8:

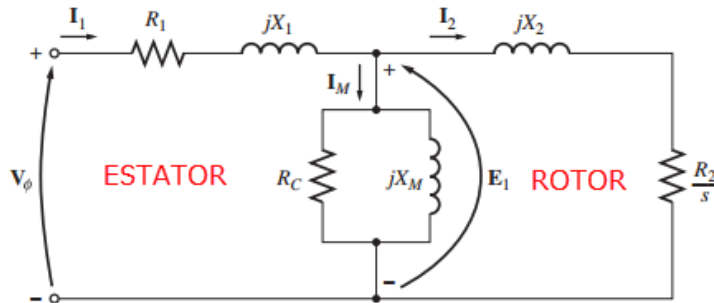
$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.8)$$

Donde  $n_s$  es la velocidad síncrona del campo magnético y  $n_r$  es la velocidad del rotor.

En la figura 9 se muestra el circuito equivalente por fase del motor de inducción, se toma como apoyo para evaluar el efecto del deslizamiento en los motores de inducción de corriente alterna.

**Figura 9**

*Circuito Equivalente Motor de Inducción*



*Nota.* Circuito equivalente por fase de un motor de inducción. Tomado de Chapman (2012).

A partir de este circuito, el análisis conlleva que la potencia mecánica desarrollada  $P_{Conv}$  sea:

$$P_{Conv} = (1 - s) * P_{EH} \quad (3.9)$$

Siendo  $P_{EH}$  la potencia eléctrica inducida al entrehierro del rotor.

Y el torque mecánico desarrollado sea:

$$T_{ind} = \frac{(1 - s)P_{EH}}{\omega_m} \quad (3.10)$$

Donde  $\omega_m$  es la velocidad angular del eje del motor.

El torque inducido en una máquina  $T_{ind}$  se define como el torque generado por la conversión de potencia interna de eléctrica a mecánica. Este torque difiere del par realmente disponible en el eje del motor por una cantidad igual a los torques de fricción y de rozamiento

con el aire en la máquina (Chapman, 2012). El accionamiento de control de un motor AC por variador de frecuencia, además del control de velocidad, puede regular el torque del motor ajustando la relación entre voltaje y frecuencia (control  $V/f$ ) o mediante técnicas más avanzadas como el control vectorial. Estas estrategias permiten mantener el flujo magnético del motor aproximadamente constante y controlar la corriente del estator, lo cual influye directamente en el torque desarrollado según las ecuaciones del motor de inducción. En consecuencia, el variador puede aumentar o disminuir el torque disponible en el eje del motor modificando las variables eléctricas que determinan el deslizamiento y la corriente del rotor (Wildi, 2007). De esta manera, el sistema de control electrónico permite adaptar el aporte de torque del motor a las condiciones de carga mecánica del sistema, facilitando su integración en aplicaciones industriales donde el motor debe compartir carga con otros accionamientos acoplados al mismo eje.

Desde el punto de vista del control, la sincronización entre motores eléctricos acoplados mecánicamente requiere comprender los principios de regulación de velocidad y control de torque en sistemas de lazo cerrado. De acuerdo con la literatura de Ogata (2010), los sistemas de accionamiento industrial se modelan como sistemas de control cuya variable principal es la velocidad angular, la cual debe mantenerse en un valor de referencia a pesar de las perturbaciones producidas por cambios en la carga mecánica. En un sistema de accionamiento dual para controlar la velocidad angular aplicada a la fan pump, el motor de corriente continua mantiene la mayor potencia en el sistema y el papel de controlador maestro de velocidad, conservando su lazo de regulación original. El motor de corriente alterna, accionado mediante variador de frecuencia, se configura como accionamiento auxiliar o *helper*, cuya función es seguir la velocidad impuesta por el motor maestro y aportar una fracción del torque requerido por la carga.

En esta arquitectura de control, la velocidad del eje común es determinada principalmente por el accionamiento DC, mientras que el accionamiento AC ajusta su aporte de torque en función de las condiciones de carga del sistema. Debido al acoplamiento mecánico rígido, ambos motores operan necesariamente a la misma velocidad angular; por lo tanto, cualquier incremento en la demanda de carga genera una variación en el torque requerido que es compartida por ambos accionamientos. El variador de frecuencia del motor AC regula su corriente y su deslizamiento para generar el torque adicional necesario, contribuyendo al equilibrio dinámico del sistema sin interferir con el control principal de velocidad. En estas condiciones, el comportamiento global del sistema depende de la interacción entre el lazo de velocidad del accionamiento maestro y el control de torque del accionamiento auxiliar. Si los parámetros de control están correctamente ajustados, el sistema converge hacia un punto de operación estable en el cual ambos motores comparten la carga mecánica mientras mantienen una velocidad común en el eje, garantizando una respuesta estable frente a perturbaciones de carga y evitando oscilaciones en el sistema.

El fundamento teórico del diseño presentado se apoya en la interacción entre dinámica rotacional, conversión electromecánica y teoría de control, estableciendo que la sincronización de motores AC y DC en un eje común es viable siempre que se garantice compatibilidad en velocidad nominal, adecuada regulación de torque y estabilidad de los lazos de control.

Casos de aplicación industrial sustentan la viabilidad de esta estrategia. Pittman (2021) en su trabajo documenta la sustitución de seis motores DC de 1000 HP por motores AC de 700 HP con VFDs en bombas dual-shafted. Los resultados incluyeron una disminución del consumo eléctrico del 60 %, mayor estabilidad del caudal, reducción de la temperatura ambiente y menor frecuencia de mantenimiento. Por su parte, Verma et al. (2013) propusieron un enfoque de *modernización modular* de sistemas de velocidad ajustable (por sus siglas en inglés, ASD), en el

cual la actualización de los sistemas de control permitió extender la vida útil del sistema completo, con una reducción de hasta *72 % del costo* frente a un reemplazo total. Kapp et al. (2024) en un análisis a nivel regional, se demuestra que la adopción masiva de variadores de frecuencia puede representar impactos económicos superiores a *USD 1.000 millones y evitar 4,7 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>*, aunque su penetración sigue siendo limitada (19 %), especialmente en medianas y pequeñas industrias.

La implementación de estos sistemas debe alinearse con normativas técnicas que garanticen eficiencia y compatibilidad. Entre las más relevantes se encuentran:

NTC 5105 / IEC 60034-30-1: Clasificación de eficiencia energética para motores eléctricos (IE1 a IE4), (ICONTEC, 2015).

IEEE 519: establece límites para la distorsión armónica en redes eléctricas industriales, (IEEE Power and Energy Society, 2022).

IEC 61800-2 / IEC 61800-9: definen requisitos funcionales y de eficiencia en variadores de velocidad, (IEC, 2023).

En el caso específico de la fan pump de la máquina de papel N° 1 en C y P del R S.A., la implementación de un sistema dual drive controlado por variador de frecuencia ofrece beneficios tangibles como adaptar el caudal a las variaciones de demanda de pulpa, mantener estable la relación chorro-tela, aumentar la velocidad de producción de la máquina para papel, mejorar la calidad del papel tipo tissue y disminuir el consumo energético del sistema de bombeo. Este conjunto de beneficios está respaldado por evidencia teórica, técnica, normativa y casos documentados, lo que justifica plenamente su implementación como solución estratégica dentro del plan de mejora energética y operativa de la planta, así como eje central de la solución propuesta.

## Metodología

El presente trabajo corresponde a un proyecto aplicado, orientado a resolver una problemática específica mediante la implementación de una solución tecnológica en un entorno real. Su objetivo es optimizar el funcionamiento de la *fan pump* en una planta papelera mediante la implementación de un sistema *dual drive*. Para ello, se adopta un enfoque técnico-experimental que permite evaluar el impacto de la solución a través de un diseño pretest-postest con un solo grupo, comparando las condiciones del sistema antes y después de la intervención.

La metodología se estructura en cinco fases que se desarrollan de manera secuencial. En primer lugar, se realiza la fase de diagnóstico y planeación, cuyo propósito es evaluar el estado inicial del sistema y definir las condiciones necesarias para la implementación. En esta etapa se lleva a cabo la inspección técnica del sistema existente, la recopilación de las especificaciones técnicas de la *fan pump*, la identificación de los requerimientos de potencia y control del sistema *dual drive* y la definición de los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto.

Posteriormente, se desarrolla la fase de diseño del sistema, en la cual se establece la configuración del sistema *dual drive* de acuerdo con las necesidades operativas de la planta. Esta fase incluye la selección de los componentes del sistema, el diseño de los esquemas eléctricos y mecánicos, y la programación del PLC para garantizar la integración y el control adecuado del sistema.

En la tercera fase se realiza la implementación y configuración del sistema *dual drive* en la *fan pump*. Esta etapa comprende la instalación de los equipos, la conexión de los elementos de campo y la configuración de los parámetros de control, tales como velocidad, torque y protecciones, con el fin de asegurar un funcionamiento seguro y eficiente del sistema.

A continuación, se lleva a cabo la fase de pruebas experimentales, cuyo objetivo es validar el desempeño del sistema en condiciones reales de operación. En esta etapa se analiza la interacción entre el motor de corriente continua que actúa como accionamiento *master* y el motor de corriente alterna configurado como accionamiento *helper*. Inicialmente, se realiza una verificación del sistema eléctrico y de control, seguida de la configuración del variador de frecuencia del motor auxiliar con base en los parámetros definidos en la fase de diseño. Posteriormente, se ejecutan pruebas controladas estableciendo límites de corriente y torque para evitar esfuerzos mecánicos durante la sincronización inicial. Finalmente, se realizan pruebas de funcionamiento con carga, operando la *fan pump* en condiciones reales de proceso.

Durante estas pruebas se monitorean variables eléctricas, mecánicas y de proceso que permiten evaluar el comportamiento del sistema de accionamiento y su impacto en el desempeño del sistema de bombeo. Entre estas variables se incluyen la corriente de los motores, la velocidad del eje, la potencia eléctrica del sistema, la presión en el *head box* y la velocidad de la máquina papelera, tal como se presenta en la Tabla 1. La información recolectada permite analizar el reparto de carga entre los accionamientos y determinar el efecto del sistema *dual drive* sobre la estabilidad operativa, la eficiencia energética y la capacidad productiva del proceso.

Finalmente, se desarrolla la fase de evaluación y documentación, en la cual se analizan los resultados obtenidos mediante un enfoque comparativo pretest-postest. En esta fase se evalúa el desempeño del sistema antes y después de la implementación, se elaboran las conclusiones del proyecto y se formulan recomendaciones orientadas a la mejora y mantenimiento del sistema. Para el análisis de los datos se emplean herramientas de estadística descriptiva, como el cálculo de medias, desviaciones estándar y porcentajes, así como análisis comparativos y de tendencias,

que permiten interpretar el comportamiento de las variables monitoreadas y determinar el impacto del sistema *dual drive* sobre la eficiencia, confiabilidad y productividad del proceso.

**Tabla 1**

*Variables Monitoreadas Durante las Pruebas Experimentales*

Variable	Descripción	Unidad	Instrumento o fuente de medición
Corriente motor DC	Corriente de armadura del motor DC	A	Pinza amperimétrica
Corriente motor AC	Corriente consumida por el motor AC	A	Pinza amperimétrica y Variador de frecuencia (VFD)
Velocidad del eje	Velocidad angular del eje común de la bomba	rpm	Sensor de velocidad / retroalimentación SCADA
Potencia eléctrica del sistema	Potencia consumida por accionamientos eléctricos	kW	Calculada a partir de voltaje y corriente
Presión de cabeza	Presión en el Head Box	m.c.a (metros columna de agua)	Sensor de Presión / retroalimentación SCADA
Velocidad de la maquina papelera	Velocidad lineal de producción del papel	m/min	Sensor de velocidad / retroalimentación SCADA

*Nota.* Variables monitoreadas que permiten determinar el impacto de la repotenciación del sistema de accionamiento sobre el proceso productivo.

## Recursos Necesarios

**Tabla 2**

*Recursos Necesarios*

RECURSO	DESCRIPCIÓN	PRESUPUESTO
Equipo Humano	Estudiante de Ingeniería Electrónica (salario estimado, en especie).	1.500.000
	Electricistas y mecánicos proporcionados por la empresa (salario días montaje).	6.000.000
	Ingeniero programador S7-300 y SCADA WINCC de SIEMENS, proporcionado por la empresa (2 días).	7.000.000
Equipos y Software	PLC y SCADA ya instalados en la empresa. Se contemplan módulos adicionales requeridos para la estrategia de control.	2.600.000
	PC con herramientas ofimáticas y software especializado (valor estimado como arriendo y licencias).	1.000.000
Viajes y Salidas de Campo	Visitas a la planta de C y P del R.	300.000
Materiales y suministros	Suministro de equipamiento para la implementación (motor, variador de frecuencia, protecciones, gabinetes y elementos de maniobra y control). Proporcionados por la empresa.	166.844.788
Bibliografía	Matrícula universitaria (en especie), que incluye acceso a la biblioteca virtual, red académica y licencias de software institucional.	1.600.000
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 186.944.788</b>

*Nota.* Este presupuesto incluye aportes en especie (dedicación académica, matrícula universitaria y equipo de cómputo) y recursos suministrados por la empresa (personal técnico, materiales y licencias existentes).

## Resultados

### Diagnóstico y Planeación

#### *Inspección Técnica del Sistema Inicial*

En esta sección se presenta la inspección técnica integral del sistema originalmente instalado para la operación de la fan pump. La evaluación incluye el análisis del motor de corriente directa, considerando las especificaciones técnicas de placa, características eléctricas y estado físico y funcional general. Se examina también el sistema de control, compuesto por un variador de velocidad para motor de corriente directa, detallando su configuración, características funcionales y condiciones operativas iniciales. Asimismo, se revisan los datos de placa de la bomba instalada, mediante un análisis de desempeño hidráulico en condiciones reales de operación, con el fin de calcular la potencia hidráulica teórica y la potencia efectivamente aplicada al eje. Finalmente, se desarrolla una evaluación energética del conjunto completo, para identificar limitaciones técnicas y oportunidades de mejora en la eficiencia del sistema.

**Inspección del Motor Existente.** El tipo de motor existente es un motor de corriente continua, con las características dadas en la tabla 3.

**Tabla 3**

#### *Placa de Datos del Motor Existente*

Marca: ABB			
Tipo: DMI 225S	Año: 2002	Estándar IEC 34-1 (1996)	
Clase de aislamiento: 200/H	Peso: 1000 Kg.	Disposición de montaje IM:1001	
kW: 315	Armadura: V: 520	A: 656	r/min: 1910
	Excitación: V: 220	A: 9.9	

*Nota.* En esta tabla se describen las principales características de la placa del motor existente.

**Figura 10***Placa de Características del Motor DC Existente*

*Nota.* Tomada en la Planta C y P del R S.A.

**Figura 11***Motor Existente en Planta*

*Nota.* Tomada en la Planta C y P del R S.A.

Durante la inspección técnica, el motor de corriente directa (D.C.) existente en operación se evalúa en condiciones reales de trabajo, encontrándose funcional y operando dentro de los parámetros esperados. Está instalado en un entorno con ventilación externa adecuada, lo que favorece la disipación térmica, y se toman las siguientes mediciones y observaciones de campo:

La temperatura del cuerpo del motor registra una máxima de 60 °C, valor dentro del límite permisible para su clase térmica de aislamiento H, equivalente a 180 °C, según la norma IEC 60085 (IEC, 2007). La temperatura al interior del motor se puede estimar sumándole a la temperatura exterior máxima 30 °C, por lo que se encuentra alrededor de 90 °C, muy por debajo del límite admisible para la clase de aislamiento H.

La corriente de trabajo en operación alcanza un pico máximo de 512 A, lo que representa aproximadamente el 78 % de la corriente nominal (656 A), sin indicios de sobrecarga eléctrica.

El circuito de excitación opera de manera estable a 225 VDC con 9,2 A.

El sistema de acoplamiento mecánico con la bomba se realiza mediante bandas trapezoidales, las cuales se encuentran en buen estado de tensión y sin desgaste aparente. Esto asegura una transmisión eficiente del torque desde el eje del motor a la bomba.

En cuanto a los elementos mecánicos internos del motor, las escobillas tienen un tamaño adecuado, y no presentan signos de desgaste acelerado, chispeo anormal ni irregularidades en el colector. Los rodamientos se examinan mediante auscultación con estetoscopio y no presentan ruidos anómalos, indicando condiciones normales de funcionamiento y adecuada lubricación.

El sistema de engrase tiene las graseras en buen estado y permite mantener el sistema de lubricación operativo.

Los cables y terminales de conexión no presentan signos de recalentamiento y tienen una temperatura máxima de 40 °C en conexiones eléctricas, lo cual está dentro del rango operativo aceptable.

En síntesis, el motor DC se encuentra en condiciones funcionales óptimas para continuar como unidad principal en el sistema de accionamiento de la fan pump. Esta evaluación respalda la decisión de implementar un segundo motor AC controlado por variador de frecuencia que opere como asistente en torque (helper) en configuración dual drive, sin necesidad de sustituir el sistema DC existente, en una integración que permite repartir la carga, aumentar la confiabilidad y reducir el esfuerzo mecánico sobre el motor principal.

**Inspección del Control del Motor Existente.** El sistema de control de la velocidad y torque del motor se realiza mediante un variador de corriente continua (DC) marca Klockner Moeller TPY3-2B de la serie Typact TPY3, diseñado para controlar motores de corriente directa con excitación independiente. Estos variadores son conocidos por su construcción robusta y su capacidad para proporcionar un control preciso de velocidad y torque en aplicaciones industriales exigentes.

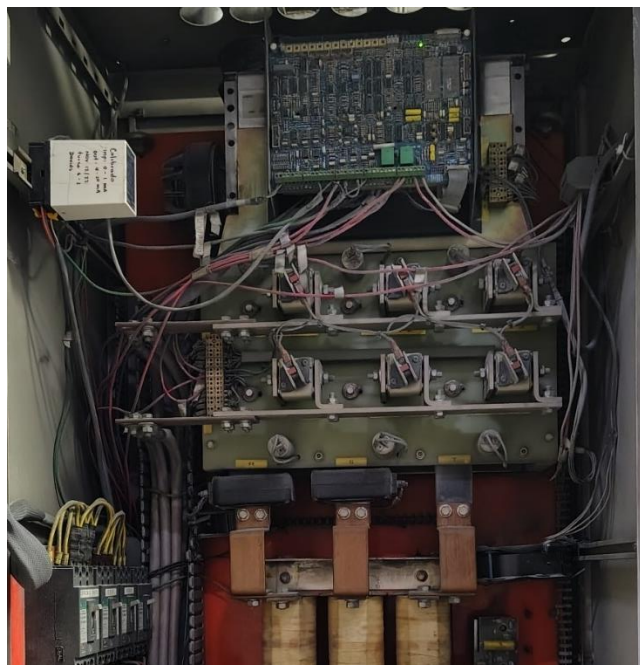
El variador TPY3-2B presenta diversas características técnicas relevantes para su aplicación en sistemas de accionamiento de motores de corriente continua. Según el manual de instrucciones de Klöckner Moeller (1986), este equipo utiliza una topología de potencia basada en dos puentes trifásicos totalmente controlados con tiristores (SCR), los cuales alimentan el inducido del motor DC. Esta configuración permite un control eficiente y preciso tanto de la velocidad como del torque del motor.

En cuanto al control de campo, el equipo incorpora un convertidor independiente encargado de gestionar la excitación del motor, lo que posibilita un control preciso del campo

magnético. Asimismo, el variador puede operar en uno o dos cuadrantes, lo que le permite regular la velocidad del motor en una sola dirección o en ambas, dependiendo de la configuración establecida.

### **Figura 12**

#### *Control de Velocidad Existente*



*Nota.* Tomada en la Planta C y P del R S.A.

Por otra parte, el sistema cuenta con un esquema de regulación de velocidad que permite mantener condiciones operativas estables ante variaciones de carga, contribuyendo a la estabilidad del proceso. De igual manera, dispone de protecciones integradas contra sobrecarga, cortocircuito y otras condiciones de falla, lo que garantiza la seguridad del sistema y favorece la prolongación de la vida útil del equipo.

En relación con la interfaz de usuario, el variador incorpora tarjetas de control y elementos de ajuste configurables que permiten su adaptación a diferentes condiciones de

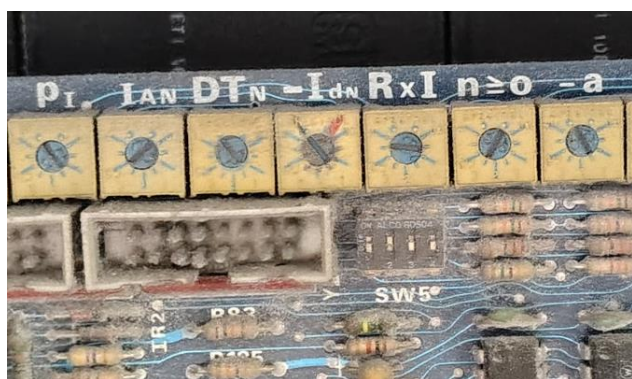
operación. Este proceso de parametrización se realiza de forma analógica, mediante el uso de potenciómetros, puentes o tarjetas externas.

El equipo instalado como controlador de la fan pump corresponde a un variador DC Klöckner Moeller modelo TPY-500/520-500 L-2B, diseñado para operar en un cuadrante. Este dispositivo funciona con un voltaje de entrada trifásico entre 440 V y 460 V  $\pm 10\%$ , y una frecuencia seleccionable de 50 o 60 Hz, con una corriente nominal de salida de 500 A. En condiciones normales de operación, el variador puede suministrar una tensión máxima de salida de aproximadamente 530 VDC, acorde con las especificaciones de diseño.

El variador se encuentra en condiciones funcionales aceptables y presenta un comportamiento adecuado en escenarios de carga media. No se evidencian problemas de recalentamiento ni en el equipo ni en sus conexiones. Sin embargo, debido a que opera en condiciones cercanas a su capacidad nominal, requiere ventilación constante y condiciones ambientales controladas, las cuales son garantizadas mediante sistemas de refrigeración por aire.

### Figura 13

*Control de Velocidad Existente*



*Nota.* Fotografía de los potenciómetros de ajuste de variador DC, tomada en la Planta C y P del R S.A.

No obstante, cuando la máquina trabaja en producción de papel higiénico de bajo gramaje ( $13,5 \text{ g/m}^2$ ) a velocidades superiores a  $1050 \text{ m/min}$ , el sistema alcanza ocasionalmente la corriente de limitación, registrando picos de hasta  $512 \text{ A}$ . Este límite se encuentra configurado mediante el potenciómetro “ $-I_{dN}$ ”, ajustado a su valor máximo en la tarjeta Ry32.

## Figura 14

### Esquema de la Limitación de Corriente

#### Internal current limitation

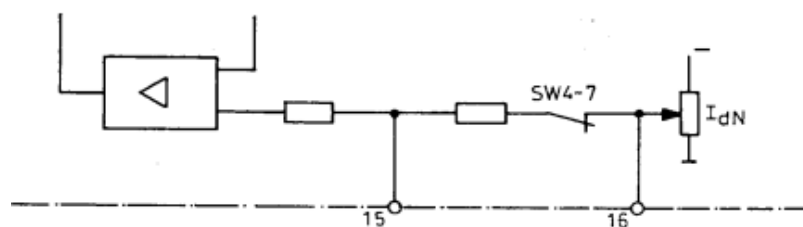


Fig. 5.5.1.1

- SW4-7 ON = Standard
- Current limitation is set with the potentiometer “ $-I_{dN}$ ” on card Ry32

*Nota.* Esquema de la limitación de corriente tomado de Klöckner Moeller (1986).

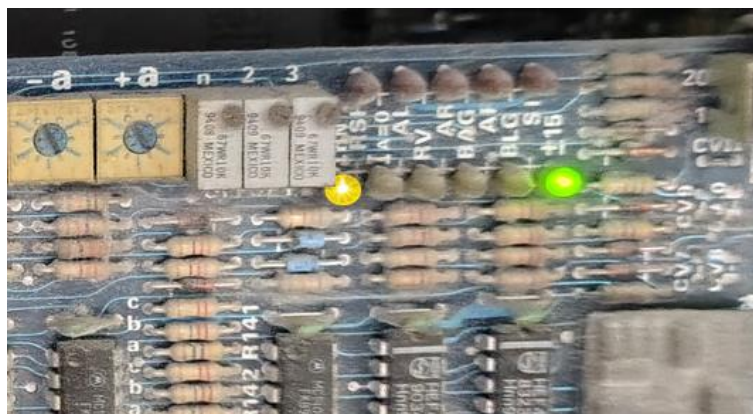
En condiciones de operación máxima, el variador DC alcanza su límite de entrega de corriente, lo que se evidencia mediante el encendido intermitente del indicador luminoso amarillo “ $I_{dN}$ ” (véase la Figura 15). Este indicador señala que el sistema se encuentra en condición de limitación de corriente continua. Cuando esto ocurre, el variador restringe la corriente disponible con el fin de proteger el sistema, lo que impide mantener el par necesario para sostener la velocidad requerida.

Como consecuencia, el motor presenta variaciones continuas de velocidad en un intento por compensar la insuficiencia de torque. Este comportamiento genera oscilaciones que se

reflejan directamente en fluctuaciones de presión y caudal en la bomba, afectando la estabilidad del proceso.

### Figura 15

*Led Indicador IdN*



*Nota.* Anuncia que el sistema opera en el límite de corriente. Fotografía tomada en condiciones de trabajo críticas, en la planta de C y P del R S.A.

Estas perturbaciones afectan directamente la formación de la hoja, generando inestabilidad en la relación *chorro-tela*, lo cual impacta negativamente la calidad del papel tipo *tissue*. Debido a estas limitaciones, es necesario reducir la velocidad de la máquina para evitar defectos en el proceso, lo que restringe la capacidad productiva instalada.

Aunque el motor de corriente continua opera aproximadamente al 78 % de su capacidad máxima, el variador no puede suministrar una mayor corriente sin exceder su especificación nominal. En consecuencia, el sistema carece de margen eléctrico suficiente para sostener cargas de mayor exigencia o para absorber transitorios y picos de demanda sin comprometer la estabilidad del proceso.

**Inspección de la Bomba Existente (Fan Pump).** En la inspección de la bomba existente (*fan pump*), se identificó que el equipo instalado presenta las características técnicas mostradas en la Figura 16, con un rendimiento hidráulico estimado del 80 %.

**Figura 16**

*Placa de datos de la Bomba Fan Pump*

<b>CENTRIFUGAL PUMP</b> SULZER PUMPS FINLAND OY KARHULA PUMP FACTORY PAJATIE 75 FI-48600 KOTKA FINLAND		<b>No</b>	<i>Altura manométrica</i>	<b>H =</b> 151 ft ( $\approx 46.02$ m).
			<i>Caudal nominal</i>	<b>Q =</b> 15.852 USGPM (3600 m <sup>3</sup> /h $\approx 1$ m <sup>3</sup> /s)
			<i>Velocidad nominal</i>	<b>n =</b> 1190 rpm.
ZPP42-500.				

*Nota.* Editada a partir de imagen tomada de (Sulzer Ltd, 2024), con los datos obtenidos en la máquina para papel 1 de C y P del R S.A.

**Figura 17**

*Bomba Fan Pump Instalada*



*Nota.* Tomada en la Planta C y P del R S.A.

La *fan pump* encargada de la impulsión de pulpa hacia la caja de formación corresponde a una unidad Sulzer tipo ZPP, diseñada para servicios de alta capacidad con alta estabilidad hidráulica. Este tipo de bomba presenta una configuración de carcasa partida y doble succión, lo que permite operar a grandes caudales con un mínimo desequilibrio hidráulico.

Adicionalmente, esta configuración facilita las labores de mantenimiento, ya que permite el acceso a los componentes internos sin necesidad de desmontar las líneas principales del sistema, lo que reduce tiempos de intervención y mejora la disponibilidad operativa del equipo.

### **Figura 18**

*Placa de Datos Original Bomba Fan Pump*



*Nota.* Tomada de la bomba instalada en la planta C y P del R S.A.

### ***Análisis y Diagnóstico de Desempeño del Sistema de Bombeo Inicial***

A través del siguiente análisis paso a paso se determina que el sistema de bombeo cuenta con una disponibilidad de potencia superior a la utilizada y evidencia un margen técnico suficiente para cumplir con los requerimientos de optimización del proceso.

**Cálculo de Potencia Hidráulica del Sistema de Bombeo.** A partir de los datos de placa y un rendimiento estimado del 80 %, se determina una potencia en el eje de la bomba requerida para alcanzar la potencia hidráulica nominal de aproximadamente 563 kW, por medio de la

ecuación 4.1 tomada de la norma ISO 9906:2012 para bombas rotodinámicas que utiliza y define la potencia hidráulica como base para las pruebas de rendimiento, (ISO, 2012):

$$P_{hidr} = \frac{\rho * g * H * Q}{\eta} \quad (4.1)$$

Siendo:

$P_{hidr}$  = Presion Hidraulica en Watts

$\rho$  = densidad especifica del fluido en  $Kg/m^3$ , por la baja consistencia se asume en la densidad del agua a  $20^{\circ}C$   $998 Kg/m^3$ .

$g$  = Aceleración de la Gravedad.

$H$  = Altura manométrica total, Según placa 151 ft ( $\approx 46,02$  m).

$Q$  = Caudal nominal, Según placa 15.852 gal/min ( $\approx 1$  m<sup>3</sup>/s).

$\eta$  = Eficiencia hidráulica, estimada en 0,8 (80%).

Reemplazando en la ecuación 4.1 se tiene:

$$P_{hidr} = \frac{998 Kg/m^3 * 9,81m/s^2 * 46,02m * 1 m^3/s}{0,8} = 563.191,6 W \approx 563 kW$$

**Cálculo de la Potencia Aplicada a la Bomba con el Sistema Inicial.** Con los datos obtenidos en la inspección de las condiciones de trabajo del conjunto Variador DC - Motor DC, se determina una potencia eléctrica máxima aplicada al motor sin generar perturbaciones por

llegar al límite de corriente en el Drive DC con un voltaje DC aplicado de 530 Vdc y una corriente de carga de 500 ADC, mediante la ley de Watt con la ecuación 4.2:

$$P = V_{DC} * I_{DC} \quad (4.2)$$

Reemplazando tenemos:

$$P = 530 \text{ Vdc} * 500 \text{ Adc} = 265 \text{ kW}$$

Se determina la potencia aplicada al eje de la bomba, teniendo en cuenta el rendimiento de un motor DC antiguo de aproximadamente 80% a 90 %, que se asume en un valor conservador para los cálculos del 90%:

$$P_{Eje \text{ motor}} = 265 \text{ kW} * 0,9 = 238,5 \text{ kW}$$

Las pérdidas mecánicas en el acoplamiento por correas, aunque se encuentran en buen estado y buena tensión, pueden generar pérdidas de hasta un 5%:

$$P_{Eje \text{ Bomba}} = 238,5 \text{ kW} * 0,95 = 226,6 \text{ kW}$$

### ***Síntesis de Resultados de la Inspección***

Los datos del análisis energético del sistema inicial, compuesto por un variador DC, un motor de corriente continua y una transmisión por poleas con 8 bandas trapezoidales, evidencian

una brecha significativa entre la capacidad nominal de la bomba y la potencia efectivamente aplicada en condiciones reales de operación (véase Tabla 4). Según los datos de placa y mediante el cálculo, la bomba está diseñada para operar con una potencia aplicada de hasta 563 kW; sin embargo, con la configuración inicial, la potencia mecánica máxima disponible en el eje de la bomba es de apenas 226,6 kW, lo que representa un aprovechamiento aproximado del 40% de su capacidad nominal. Esta diferencia se debe principalmente a las limitaciones del sistema de accionamiento electrónico existente, tanto en eficiencia energética como en capacidad de entrega de potencia continua. La subutilización de la bomba no solo compromete el rendimiento del proceso de dilución de pulpa, sino que también genera ineficiencias operativas y posibles impactos en la calidad del producto final. Estos resultados ratifican y justifican técnicamente la necesidad de modernizar el sistema mediante la implementación de una solución dual drive para aprovechar la capacidad de la bomba instalada.

**Tabla 4***Principales Hallazgos de la Inspección Técnica del Sistema Inicial*

Hallazgo	Impacto
Motor DC en buen estado, con corriente al 78 % de la nominal.	Puede mantenerse en operación y ser integrado en el esquema dual drive.
El variador DC opera estable, pero llega al límite de corriente y genera oscilaciones.	Limita el desempeño de la bomba y la velocidad de la máquina, afectando la estabilidad del proceso.
Bomba Fan Pump diseñada para 563 kW, operando solo con 226,6 kW (40 % de capacidad).	Capacidad desaprovechada por restricciones del accionamiento.
El sistema global desaprovecha un 60 % del potencial hidráulico.	Justifica la repotenciación mediante la implementación del sistema dual drive.

*Nota.* La inspección permitió identificar el estado inicial del sistema de bombeo, evidenciando limitaciones en capacidad, control y eficiencia que justifican la repotenciación mediante la implementación del sistema dual drive.

## Diseño del Sistema Dual Drive

### *Identificación de los Requerimientos de Potencia para el Dual Drive*

La máquina para papel 1, a intervenir, está diseñada para 1200 m/min de velocidad de producción máxima y se toma esta velocidad de producción como objetivo en el diseño del sistema dual drive en la fan pump. La caja de formación (head box), que hace parte integral de la máquina, es marca OVER, diseñada para mesas inclinadas de producción de papel tissue, con rodillo cabecero aspirante y velocidad de hasta 1200 m/min. Una de las principales funciones de la caja de formación es proporcionar un chorro uniforme y estable en todo el ancho de la máquina, sin velocidades laterales, componentes aleatorios y rayas (Tuladhar Anil, 1995). La velocidad del chorro se conoce en el argot papelerero como *velocidad del JET* y su relación con la velocidad de la tela formadora (malla) es una variable de proceso fundamental para controlar la formación de la hoja de papel y la distribución de fibras que afectan la resistencia del papel. La velocidad del JET depende básicamente de la presión hidráulica al interior de la caja de formación y de la apertura del labio de descarga de la caja de formación, y según las tablas suministradas por el fabricante (ver Apéndice A), obedece a la ecuación 4.3:

$$H = \frac{V^2}{70608} * \left( 1 - \left( \frac{S}{A} * K \right)^2 \right) + 0,396 \quad (4.3)$$

Siendo,

H = Presión de cabeza. En altura de metros de agua y depende de la *fan pump*.

V= Velocidad del chorro. En *m/min*

S= Apertura del labio. En mm.

A= Altura de la sección de instalación del transmisor de presión. 75 mm.

K= Coeficiente de contracción. 0,98

El punto de trabajo en el que se presentan perturbaciones atribuibles a la falta de potencia en la fan pump se manifiesta cuando la máquina opera a una velocidad de 1050 m/min, con una relación chorro-tela cercana a 0,9, una apertura del labio de la caja de formación de 15 mm, y una producción de papel tissue entre 13 y 15 g/m<sup>2</sup>. En estas condiciones, el motor de la fan pump alcanza una velocidad de 1540 rpm. La Figura 19 muestra la velocidad de los motores principales de la máquina y de la fan pump durante una condición de operación cercana al punto crítico de perturbaciones.

### Figura 19

#### *Velocidades de Motores Principales Cerca al Punto Crítico*

MOTOR	POPE REEL	YANKEE	PRENSA S	PRENSA C	MALLA	FAN PUMP
VELOCIDAD m/s	892	1045	1046	0	1045	1514
CORRIENTE ARMADURA DC	32,0	248,1	134,8	0,0	166	491

*Nota.* Tomada en la HMI del sistema SCADA de la máquina para papel 1 de la planta C y P del R S.A.

Estos datos obtenidos en campo sirven como punto de partida para determinar los requerimientos de potencia del sistema dual drive explicados a continuación.

**Establecimiento de la Velocidad del Chorro (JET).** Conocida la velocidad de la máquina 1050 m/min y la relación Chorro Tela 0,9 se determina la velocidad del chorro:

$$V_c = 1050 \text{ m/min} * 0,9 = 945 \text{ m/min}$$

**Establecimiento de la Presión de Cabeza Total en el Head Box.** Con la velocidad del chorro conocida y la apertura del labio ajustada en 15 mm, se determina la presión de cabeza total en la caja de formación a través de la ecuación 4.3:

$$H = \frac{V^2}{70608} * \left( 1 - \left( \frac{S}{A} * K \right)^2 \right) + 0,396$$

Reemplazamos y obtenemos,

$$H = \frac{945^2}{70608} * \left( 1 - \left( \frac{15}{75} * 0,98 \right)^2 \right) + 0,396 = 12,56 \text{ mH}_2\text{O}$$

Para confirmar la confiabilidad del valor calculado, experimentalmente este es medido por el transmisor de presión instalado en la caja de formación, y se verifica bajo condiciones de operación por debajo del punto crítico, a una velocidad de máquina aproximada de 1020 m/min, una relación chorro-tela de 0,89 y una apertura de labio de 15 mm. Según el cálculo realizado con la ecuación 4.3 de la tabla correspondiente (véase Apéndice A), se espera una presión de 11,62 m de columna de agua, mientras que la medición real arroja un valor de 11,6 m. Esta coincidencia confirma que la caja de formación opera conforme a su curva de diseño (véase Figura 20) y la confiabilidad del cálculo para estimar los requerimientos del diseño.

Figura 20

*Mediciones de Campo en Sistema QCS*

Level 2 and CD Controls						Level 1 Controls				
	MV	SP	Mode	Status	New SP		MV	SP	Mode	Status
Control Peso Base	14,64	14,60	Auto		15,00	Ctrl Flujo Pasta	1029,9	1024,6	E1	
Control Peso Seco	13,6	13,5				Ctrl Presión Vapor Yan	7,8	7,8	Auto	
Control Humedad	6,52	6,00	Man		5,0	Ctrl Temp Lado Humedi	828,0	830,0	Auto	
Chorro / tela	0,89	0,89	Auto		0,8	Ctrl Temp Lado Seco	829,1	830,0	Auto	
Control de Velocidad	1023,62	1020,78	Auto		1037,0	Ctrl Cabeza Total	11,6	11,6	E1	
Crepe Control	15,00	15,00	Man		17,00	Ctrl Velocidad Maquina	1023,6	1020,8	E1	
Dry Stock Control	3,6	On				Ctrl Velocidad Reel	870,1	870,3	Auto	

*Nota.* Tomada del sistema QCS en la MP1 de la planta C y P del R S.A. Marcado con A control de chorro tela, con B control de presión de cabeza total en la caja de formación.

### Establecimiento de la Presión de Descarga de la Fan Pump en el Punto Crítico. Al

no existir elementos de medida de presión instalados en campo, se determina la presión de salida de la fan pump teórica y aproximada mediante las leyes de afinidad aplicadas a las bombas centrífugas (Çengel y Cimbala, 2006), y formuladas con las ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6 que relacionan la variación del caudal, la presión y la potencia de una bomba en función de su velocidad de rotación. De manera que para el caudal Q la expresión es:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4.4)$$

Siendo Q1 y N1 el caudal y las RPM de placa de la bomba.

Para la altura manométrica H (presión de descarga de la bomba en metros de columna de agua) se tiene:

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (4.5)$$

Siendo  $H_1$  y  $N_1$  la altura manométrica y las RPM de placa de la bomba.

Para la potencia  $P$ , se tiene:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (4.6)$$

Siendo  $P_1$  y  $N_1$  la potencia nominal de la bomba y las RPM de placa de la bomba.

Mediante las observaciones de campo se establece la velocidad del motor de la fan pump en el punto crítico en 1540 rpm (véase Figura 19), y se estima la velocidad de rotación de la fan pump teniendo en cuenta la relación de transmisión de poleas de 0,577 suministrada por el departamento técnico, de la siguiente manera:

$$RPM_{FanPump} = RPM_{motor} * Rel_{transm}$$

Reemplazando obtenemos,

$$RPM_{FanPump} = 1540 \text{ rpm} * 0,577 = 888,58 \text{ rpm}$$

La velocidad de rotación de la Fan Pump en el punto crítico y sus datos nominales obtenidos mediante la placa de características son utilizados en la ecuación 4.5, para estimar presión de cabeza de la Fan Pump en el punto de trabajo crítico:

$$\frac{H_2}{46,02 \text{ mH}_2\text{O}} = \left( \frac{888,58 \text{ rpm}}{1190 \text{ rpm}} \right)^2$$

$$H_2 = 25,66 \text{ mH}_2\text{O}$$

**Establecimiento de Relación Entre la Presión de Cabeza de la Fan Pump Vs Presión de Cabeza en la Head Box.** Conocidas la presión de cabeza de la fan pump y la presión de cabeza en la caja de formación, se establece la relación entre estas presiones teniendo en cuenta que los datos se obtienen en condiciones de operación óptimas de producción y estabilidad:

$$Rel_p = \frac{12,56 \text{ mH}_2\text{O}}{25,66 \text{ mH}_2\text{O}} = 0,49$$

**Estimación de la Presión de Cabeza en el Head Box a la Velocidad de Diseño.** Se determina la presión de cabeza en la caja de formación a la velocidad de máquina de 1200 m/min, con relación chorro-tela 0,9 y apertura de labio ajustada en 15 mm mediante los siguientes pasos de análisis:

Paso 1 cálculo de la velocidad del chorro multiplicando la velocidad de la tela que es aproximadamente la misma que la de la máquina por la relación chorro-tela:

$$V_c = 1200 \frac{m}{min} * 0,9 = 1080 \text{ m/min}$$

Paso 2 cálculo de la presión de cabeza en la caja de formación a 1080 m/min de velocidad del chorro mediante la ecuación 4.3:

$$H = \frac{1080^2}{70608} * \left( 1 - \left( \frac{15}{75} * 0,98 \right)^2 \right) + 0,396 = 16,28 \text{ mH}_2\text{O}$$

**Estimación de la Presión de Cabeza de la Fan Pump a la Velocidad de Diseño.** La relación entre la presión de cabeza de la Fan Pump y la presión de cabeza en la caja de formación calculada multiplicada por la presión de cabeza del Head Box ofrece una aproximación de la presión de cabeza de la Fan Pump en el punto de diseño de sistema dual drive:

$$H_{FP} = H_{HB} * Rel_p = 16,28 \text{ mH}_2\text{O} * 0,49 = 33,27 \text{ mH}_2\text{O}$$

**Estimación de las RPM de la Fan Pump en la Velocidad de Diseño.** La presión obtenida y los datos nominales de la bomba mediante las leyes de afinidad con la ecuación 4.5, determinan las rpm de la bomba necesarias para alcanzar esta presión de cabeza:

$$\frac{33,27 \text{ mH}_2\text{O}}{46,02 \text{ mH}_2\text{O}} = \left( \frac{N_2}{1190 \text{ rpm}} \right)^2$$

$$N_2 = \sqrt{\frac{33,27 \text{ mH}_2\text{O}}{46,02 \text{ mH}_2\text{O}}} * 1190 \text{ rpm} = 1009,79 \text{ rpm}$$

**Estimación de Potencia Aplicada a la Bomba en la Velocidad de Diseño.** Las rpm de la bomba obtenidas en el punto de diseño son determinantes de la potencia mediante leyes de afinidad en bombas aplicadas a la potencia (ecuación 4.6), teniendo en cuenta la potencia

nominal de la bomba estimada en 563 kW, según el diagnóstico inicial se obtiene la potencia en el punto de diseño:

$$\frac{P_2}{563 \text{ kW}} = \left( \frac{1009,79 \text{ rpm}}{1190 \text{ rpm}} \right)^3$$

$$P_2 = \left( \frac{1009,79 \text{ rpm}}{1190 \text{ rpm}} \right)^3 * 563 \text{ kW} = 344 \text{ kW}$$

Comprobación de cálculos teóricos con cálculos basados en mediciones de campo: En el diagnóstico inicial del funcionamiento del sistema de bombeo se determina una potencia aplicada al eje de la fan pump estimada en 226,6 kW partiendo de los datos eléctricos medidos en campo en el punto crítico de trabajo de la fan pump, sin embargo para dar más fidelidad al diseño se verifica la potencia de la fan pump en el punto crítico a 888,58 rpm en la bomba según leyes de afinidad para garantizar que este valor del que depende la determinación final de la potencia necesaria a implementar en el sistema dual drive estimado mediante el método teórico corresponde a la potencia estimada con los datos medidos.

$$\frac{P_2}{563 \text{ kW}} = \left( \frac{888,58 \text{ rpm}}{1190 \text{ rpm}} \right)^3$$

$$P_2 = \left( \frac{888,58 \text{ rpm}}{1190 \text{ rpm}} \right)^3 * 563 \text{ kW} = 234,4 \text{ kW}$$

El resultado obtenido mediante la verificación teórica arroja una potencia estimada de 234,4 kW en el eje de la bomba a una velocidad de 888,58 rpm, utilizando las leyes de afinidad a partir de la potencia nominal de 563 kW estimada en el diagnóstico inicial. Este valor se

encuentra muy próximo a la potencia calculada con base en las mediciones de campo (226,6 kW), lo que evidencia una alta fidelidad entre ambos métodos de estimación. Esta correlación no sólo valida la consistencia del diagnóstico energético realizado, sino que además fortalece la confiabilidad del criterio técnico empleado para determinar la potencia requerida en el diseño del sistema dual drive. En consecuencia, se puede afirmar con solidez que el valor de referencia definido para la selección del equipamiento necesario es representativo de las condiciones reales de operación, minimizando el riesgo de sobredimensionamiento o subestimación en el diseño final.

**Determinación de Requerimientos de Potencia del Sistema Dual Drive.** Para la determinación de los requerimientos de potencia se obtiene la diferencia entre la potencia para satisfacer la velocidad del chorro con la máquina en los estados operativos deseados a una velocidad de 1200 m/min y la potencia estimada en el punto crítico según el diagnóstico inicial, y se aplica un factor de seguridad del 25%:

$$P_{extra} = (344 \text{ kW} - 226,6 \text{ kW}) * 1,25 = 146,7 \text{ kW}$$

Este análisis permite establecer que la potencia adicional necesaria para garantizar el funcionamiento eficiente del sistema en las condiciones operativas deseadas, (velocidad de máquina de 1200 m/min y relación chorro-tela adecuada), es de 146,7 kW, considerando un factor de seguridad del 25 % aplicado a la diferencia entre la potencia crítica diagnosticada (226,6 kW) y la potencia requerida en el nuevo punto de operación (344 kW). Este valor representa la exigencia energética adicional que debe ser cubierta por el sistema dual drive para asegurar un desempeño óptimo y sin perturbaciones. En función de esta estimación y con base en

la disponibilidad de motores comerciales estandarizados, se recomienda la instalación de un motor de inducción trifásico de 150 kW. Esta selección garantiza un margen adecuado de operación, previene el trabajo forzado de los equipos, y respalda la confiabilidad del sistema frente a variaciones del proceso productivo.

### ***Identificación de los Requerimientos de Control para el Dual Drive***

El objetivo del sistema de control dual drive es asegurar que el sistema de bombeo de la fan pump, con dos motores, uno principal de corriente directa y el auxiliar/helper de corriente alterna, trabaje de forma coordinada para mantener estable la presión y el caudal de la fan pump, de manera que se pueda garantizar una relación chorro-tela óptima en la máquina para papel. Asimismo, el control debe evitar perturbaciones hidráulicas en el headbox a cualquier velocidad de la máquina y mejorar la eficiencia energética y el desempeño dinámico del sistema.

Desde el punto de vista del proceso, el sistema de control asociado al sistema de bombeo de la fan pump tiene como función principal garantizar la estabilidad de la relación chorro-tela, la cual depende directamente de la interacción entre la velocidad del chorro y la velocidad de la tela formadora (malla). Si bien la velocidad de la malla es regulada por el sistema principal de control de velocidad de la máquina y se encuentra adecuadamente controlada, el control de la velocidad del chorro recae sobre el conjunto fan pump caja de formación. En este caso, la velocidad del chorro está influenciada principalmente por la presión interna de la caja de formación, la cual varía en función directa de la velocidad de la fan pump, y de forma secundaria por la apertura del labio ( $\approx 15$  mm en producción de tissue de 13 GSM). En este contexto, el sistema de control que se implemente para el dual drive debe asegurar una regulación precisa y confiable de la velocidad de la bomba, ya que de ello depende directamente la calidad del perfil de hoja del papel. Es importante destacar que el nuevo sistema debe integrarse de manera

armónica con el sistema de control existente, evitando soluciones invasivas o que impliquen modificaciones significativas a la infraestructura ya operativa.

Para el proceso de identificación de requerimientos de control en el diseño e implementación del sistema dual drive se lleva a cabo el levantamiento y análisis de la documentación técnica correspondiente al sistema de control inicialmente instalado en la línea de producción. Esta documentación resulta fundamental para comprender el comportamiento operativo del sistema existente, identificar puntos críticos de integración y asegurar la compatibilidad del nuevo sistema con la infraestructura de control disponible. La información recopilada incluye como elementos clave el diagrama de bloques del control de relación chorro-tela, el diagrama P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) del sistema de control chorro-tela y el esquema eléctrico del control de velocidad de la fan pump.

**Diagrama de Bloques del Control de Relación Chorro–Tela.** El diagrama de bloques en la figura 23, permite visualizar de manera simplificada las variables de entrada y salida del sistema, así como la interacción entre los elementos principales que intervienen en la regulación de la relación chorro–tela, A través de este esquema se representa la interacción jerárquica entre los distintos niveles de control del sistema, destacando una arquitectura en cascada gestionada desde el sistema de control de calidad (QCS, por sus siglas en inglés). Este control se organiza en tres niveles funcionales:

***Nivel de Control 2 en el QCS.*** Control de relación chorro–tela, este es el nivel superior del lazo de control, encargado de mantener la proporción adecuada entre la velocidad del chorro y la velocidad de la tela formadora (malla). La velocidad del chorro se estima a partir de la presión de cabeza interna en la caja de formación, utilizando la ecuación hidráulica correspondiente (ver Ecuación 4.3), mientras que la velocidad de la tela se mide mediante un

taco generador cuya señal es adquirida y acondicionada por el SCADA para ser retransmitida al QCS. La razón entre ambas velocidades se compara con un setpoint de referencia, ajustado por el operario, usualmente cercano a 0,9, y el error resultante evaluado por un control PID en su salida se convierte en el setpoint dinámico del siguiente nivel.

**Nivel de Control 1 en el QCS.** Control de presión de cabeza, este nivel recibe como referencia el valor calculado en el nivel 2 y lo compara con la presión de cabeza medida en la caja de formación. El error entre ambas señales, evaluado mediante un control PID, genera una consigna de velocidad para el accionamiento de la fan pump, permitiendo modular la presión interna del sistema en función de los requerimientos hidráulicos del proceso.

**Figura 21**

*Control Chorro-Tela Sistema QCS*

Level 2 and CD Controls						Level 1 Controls				
	MV	SP	Mode	Status	New SP		MV	SP	Mode	Status
Control Peso Base	14,64	14,60	Auto		15,00	Ctrl Flujo Pasta	1029,9	1024,6	E1	
Control Peso Seco	13,6	13,5				Ctrl Presión Vapor Yan	7,8	7,8	Auto	
Control Humedad	6,52	6,00	Man		5,0	Ctrl Temp Lado Humed	828,0	830,0	Auto	
Chorro /tela	0,89	0,89	Auto		0,8	Ctrl Temp Lado Seco	829,1	830,0	Auto	
Control de Velocidad	1023,62	1020,78	Auto		1037,0	Ctrl Cabeza Total	11,6	11,6	E1	
Crepe Control	15,00	15,00	Man		17,00	Ctrl Velocidad Maquina	1023,6	1020,8	E1	
Dry Stock Control	3,6	On				Ctrl Velocidad Reel	870,1	870,3	Auto	

*Nota.* Tomado del sistema QCS de la MP1 en la planta C y P del R S.A. Marcado con A controles de nivel 2, con B controles de nivel 1.

**Nivel de Piso.** Control de velocidad de la fan pump, este nivel corresponde al control base del sistema, en el cual el variador de velocidad de corriente continua ajusta el voltaje aplicado al motor DC en función de la señal de consigna recibida. La regulación es supervisada desde el sistema SCADA, que actúa como interfaz operativa y de monitoreo entre el PLC y el operador. Este nivel también permite operar la bomba en modo manual o semiautomático, lo que resulta útil en condiciones de arranque, mantenimiento o contingencias. Esta arquitectura

multinivel de control proporciona flexibilidad, robustez y redundancia operativa, permitiendo una operación manual o automática desde el SCADA (nivel de piso), un control de presión de cabeza desde el QCS (nivel 1), con opción manual o automática y control de la relación chorro-tela desde el QCS (nivel 2); véase figuras 21 y 22.

La posibilidad de desacoplar los niveles de control otorga al sistema una alta capacidad de adaptación ante fallos de instrumentación, condiciones transitorias o cambios en los parámetros de producción, asegurando la estabilidad del proceso y la calidad del producto final.

### Figura 22

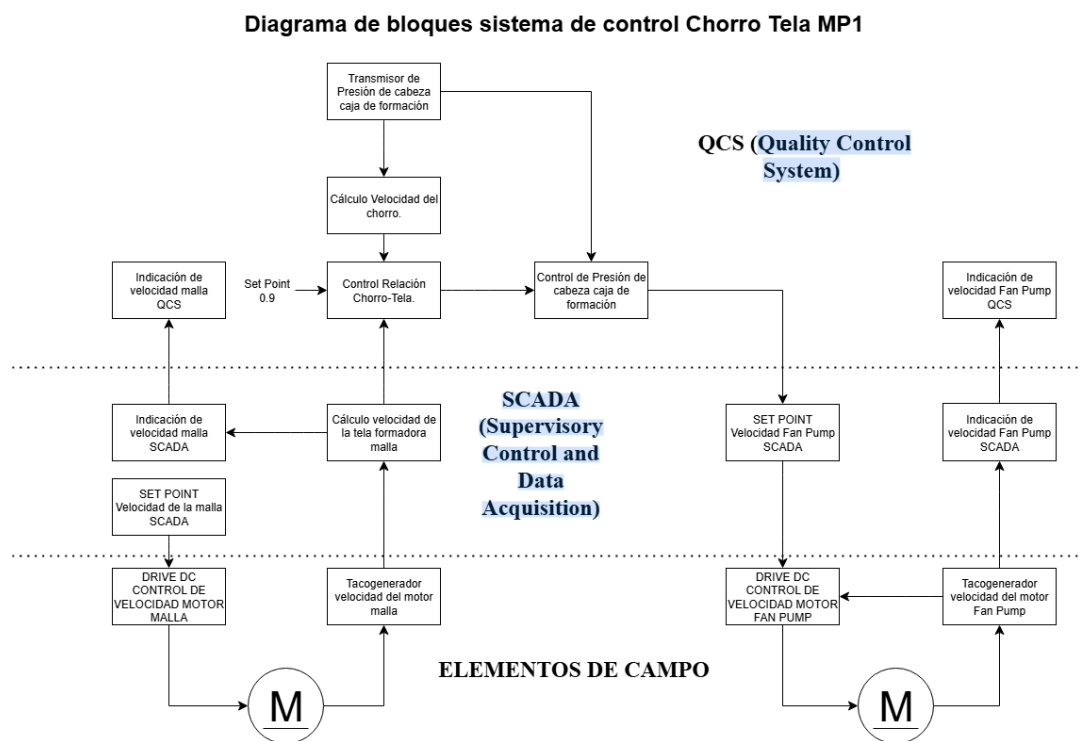
#### *Control de Velocidad Fan Pump en el Sistema SCADA*



*Nota.* Tomada de la HMI del sistema SCADA de la MP1 planta C y P del R S.A.

Figura 23

Diagrama de Bloques Sistema de Control Chorro Tela MP1



Nota. Elaboración propia en draw.io basada en los hallazgos del sistema de control de Chorro-Tela de la MP1, planta C y P del R S.A.

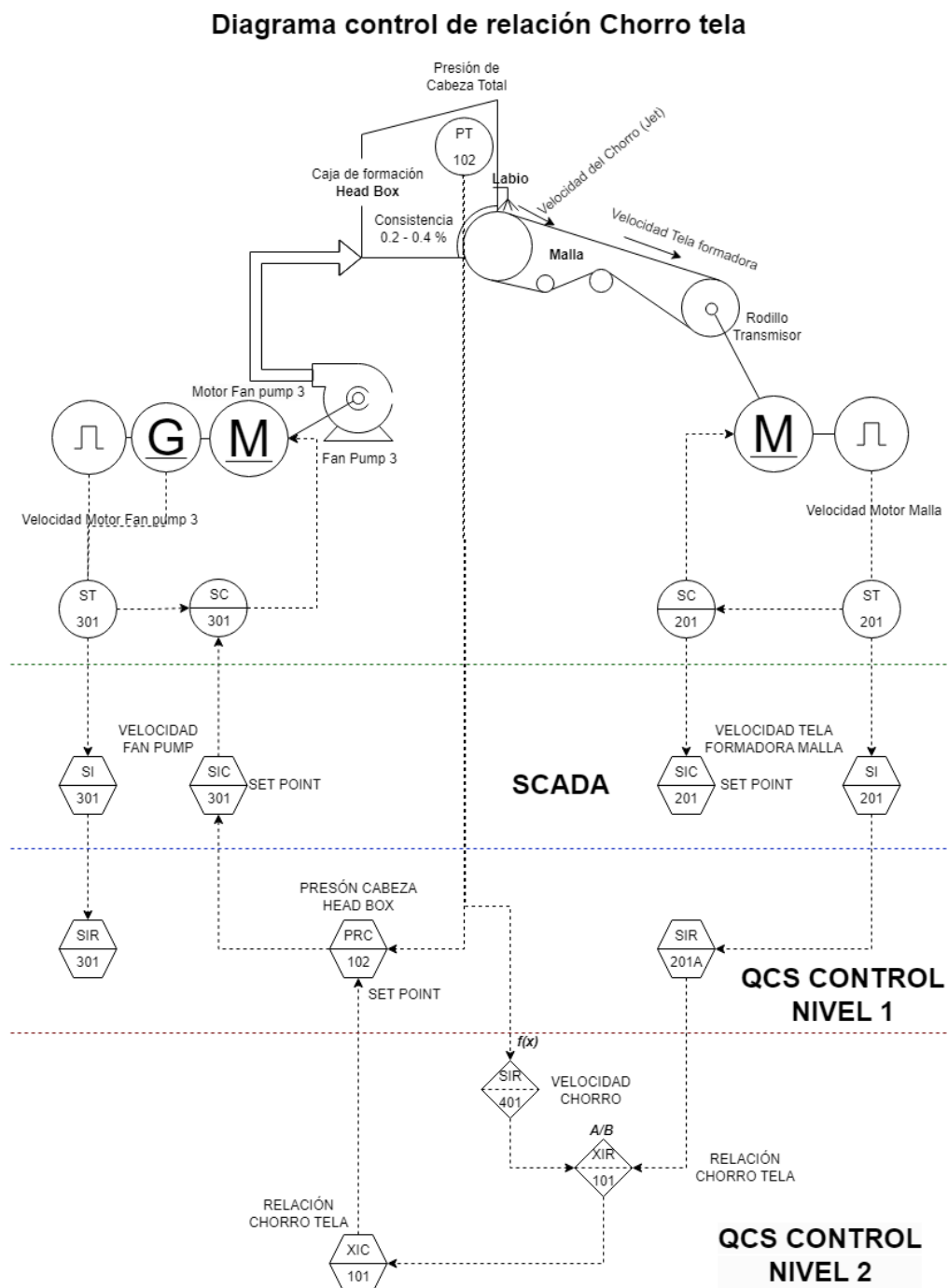
**Diagrama P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) del Sistema de Control Chorro-Tela.** El diagrama de la Figura 24 profundiza en los instrumentos, actuadores, sensores de presión y transmisores involucrados en el sistema, así como su interconexión con la fan pump y la caja de formación. La lectura del P&ID permite identificar los lazos de control iniciales y las condiciones de operación bajo las cuales se regula la presión y, por tanto, la velocidad del chorro.

El lazo de control de velocidad de la tela formadora (Malla) SC201 utiliza como elemento sensor un generador de pulsos de dos canales, uno de 600 PPR (pulsos por revolución)

que realimenta al variador de velocidad DC a través de un transductor de pulsos a 0,06 V por revolución, y otro de 1200 PPR cuya señal es capturada a través de una entrada de alta velocidad del PLC. Esta última señal es procesada para visualizar la velocidad en el sistema SCADA y, a su vez, retransmitida al sistema QCS, donde se utiliza para el cálculo de la relación chorro–tela. La presión de cabeza total en la caja de formación (PRC 102) se obtiene mediante un transmisor de presión con rango de 0 a 24 metros de columna de agua y salida estándar de 4–20 mA. Esta señal se utiliza como variable de realimentación en el nivel 1 de control, encargado de regular la presión de cabeza. La salida de este controlador ajusta el set point de velocidad de la fan pump, a través del lazo de control SIC 301, gestionado desde el sistema SCADA. De este modo, se garantiza la corrección dinámica de la presión interna en la caja de formación. Simultáneamente, la señal de presión generada por el transmisor PT 102 también es procesada por el sistema QCS, donde se utiliza para estimar la velocidad del chorro, como componente fundamental del cálculo de la relación chorro–tela. Esta relación, supervisada desde el nivel superior de control (nivel 2), ajusta de manera automática el set point de presión de cabeza, retroalimentando así el proceso hasta alcanzar la relación óptima, que asegure una buena formación de hoja, resistencia mecánica y el peso base adecuado del papel tissue.

Figura 24

Levantamiento Diagrama P&ID del Sistema de Control Chorro Tela



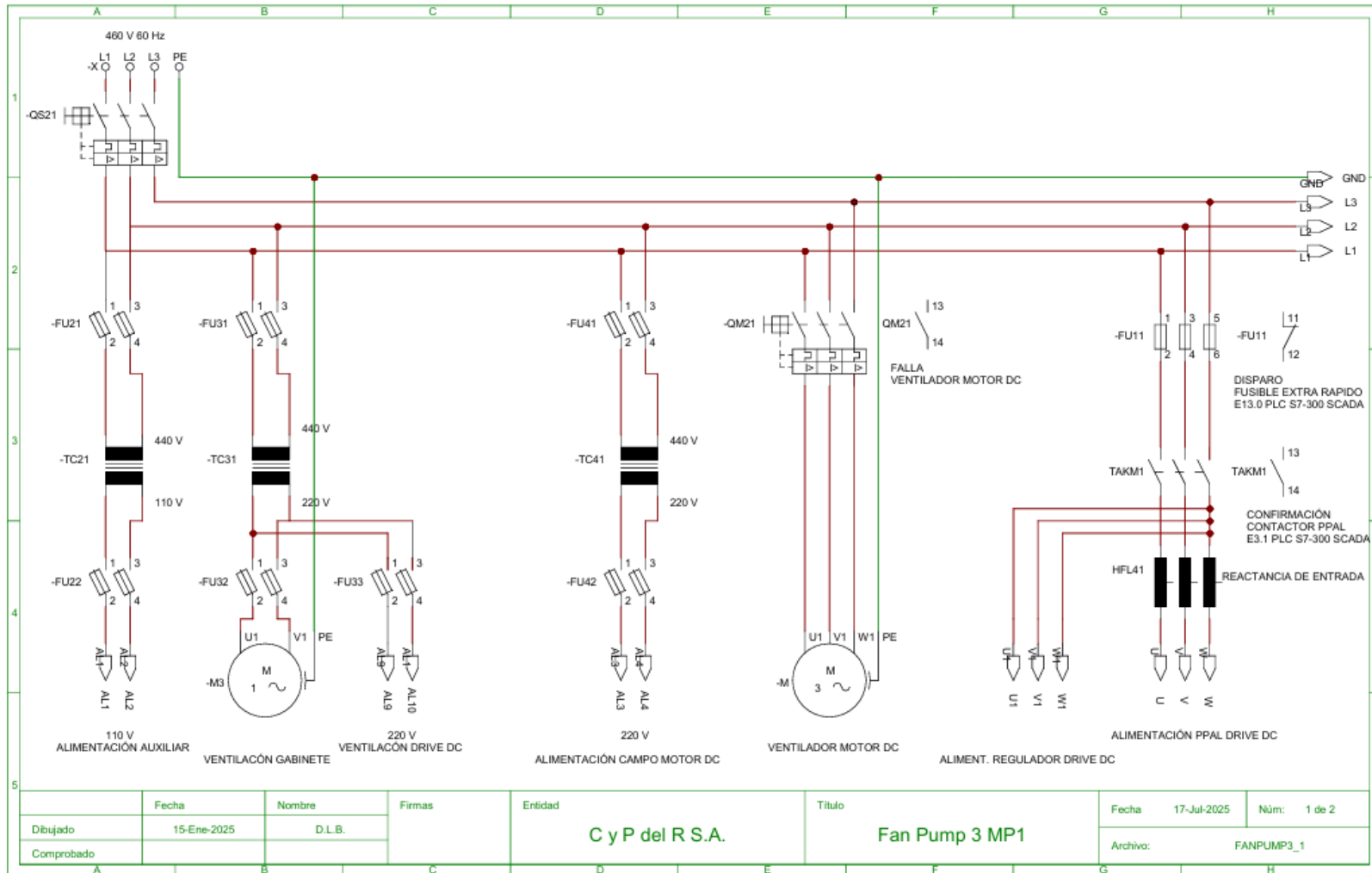
*Nota.* Elaboración propia en draw.io basada en los hallazgos del sistema de control de Chorro-Tela de la MP1, planta C y P del R S.A.

**Esquema Eléctrico del Control de Velocidad de la Fan Pump.** Este documento se centra en los componentes eléctricos asociados al accionamiento inicial de la fan pump, incluyendo el variador de velocidad de corriente directa, protecciones, sensores de realimentación y conexiones de control. Estos esquemas constituyen una base crítica para el diseño del nuevo sistema de control dual drive, ya que definen los puntos de conexión, señales disponibles y arquitectura de control vigente.

Mediante el levantamiento de los diagramas eléctricos asociados al accionamiento del motor DC de la fan pump, se identifica una distribución y coordinación de las protecciones eléctricas adecuadas en la parte de potencia, así como las interconexiones de control con el sistema SCADA y el QCS detallados en el apéndice B, que arrojan como resultado los diagramas eléctricos de potencia y control mostrados en las figuras 25 y 26.

Figura 25

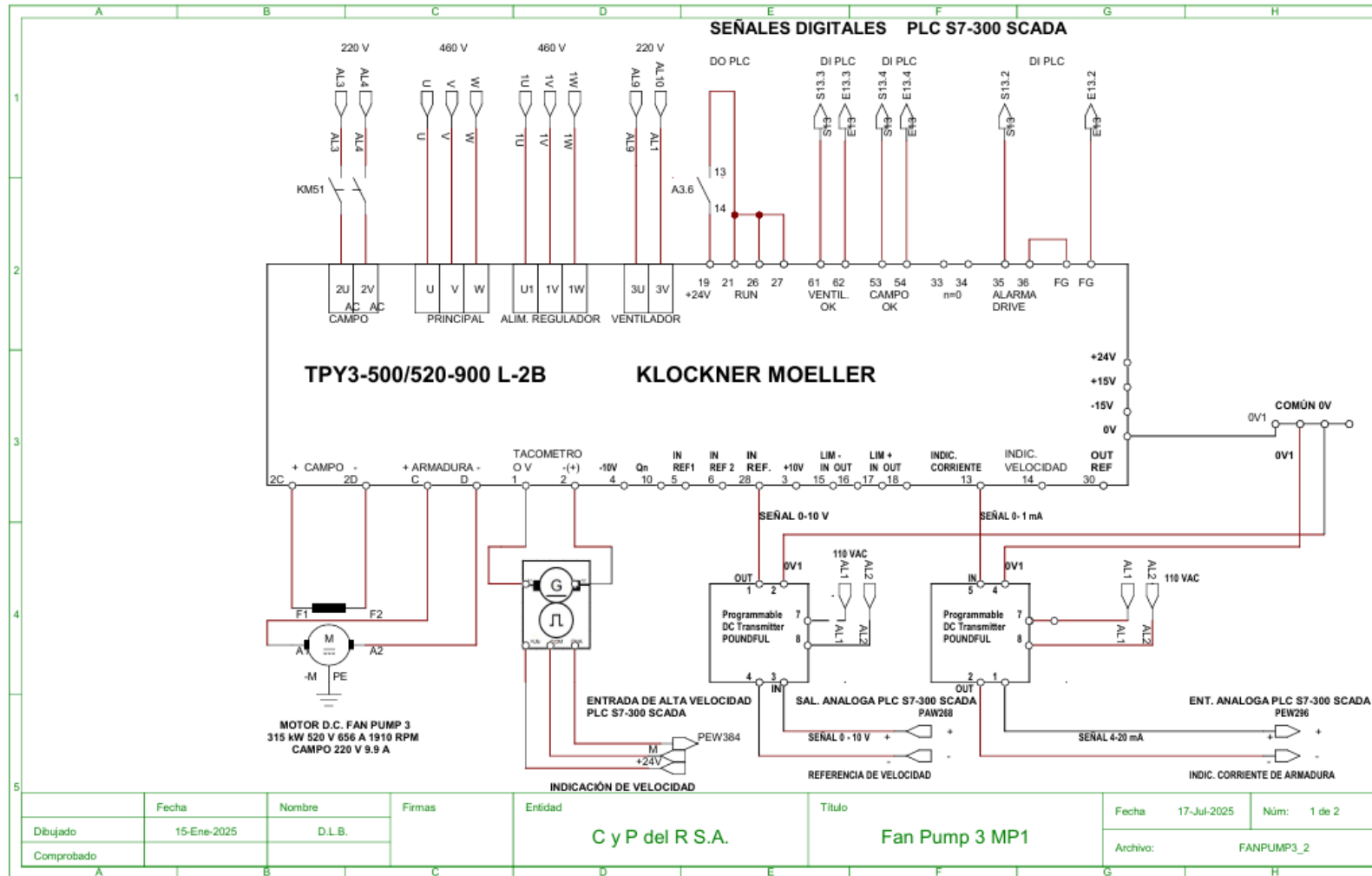
Diagrama Eléctrico de Potencia Motor DC Fan Pump 3



Nota. Elaboración propia en Cade Simu, basado en los diagramas en físico originales de la Fan Pump 3.

Figura 26

Diagrama Eléctrico Conexiones Drive D.C. Motor Fan Pump 3



Nota. Elaboración propia en Cade Simu, basada en los diagramas físicos originales de la Fan Pump 3.

**Síntesis de los Requerimientos de Control para la Repotenciación del Sistema de Bombeo Fan Pump.** El levantamiento y análisis del diagrama de bloques del control chorro/tela, el diagrama P&ID del sistema de control y los diagramas eléctricos del sistema de bombeo, tomados como punto de partida en los lineamientos técnicos y requerimientos de control para garantizar una integración efectiva del nuevo sistema, sin comprometer la estabilidad ni la fiabilidad de la operación, arrojan las siguientes anotaciones que se deben tener en cuenta en el proceso de diseño:

Se reafirma mediante este estudio funcional que la variable primordial para el control del chorro/tela es la *velocidad de la fan pump*, la cual determina de forma directa la relación entre el caudal del stock enviado a la caja de formación y la velocidad de la tela. Esta relación afecta directamente parámetros críticos de calidad como la orientación de fibras y la uniformidad del papel, que se ajustan desde el sistema de control de calidad (QCS por sus siglas en inglés). Por tal motivo, la estrategia de repotenciación debe centrarse en garantizar un control preciso, estable y confiable de esta variable. En este contexto, la implementación del sistema dual drive busca modernizar la etapa de potencia y control del motor principal, incorporando un motor auxiliar de apoyo, sin modificar el QCS, pero involucrando el sistema SCADA instalado en la planta y con el equipamiento de campo destinado a este proyecto.

En el diseño, es necesario *mantener las metodologías de control* comprobadas en el sistema inicial, particularmente el uso de aislamiento galvánico en la interconexión entre el sistema de potencia (variadores de velocidad) y el sistema de automatización (PLC/SCADA). Esta práctica demuestra ser efectiva para la protección de circuitos sensibles y la independencia funcional entre subsistemas eléctricos; además, contribuye a la integridad de las señales analógicas y digitales en condiciones industriales exigentes.

El sistema *SCADA instalado* en la planta, basado en tecnología Siemens, cuenta con una arquitectura distribuida compuesta por un PLC S7-300, interconectado con unidades remotas ET-200 mediante red Profibus DP, y operado por dos HMI Siemens MP-377. La CPU central mantiene comunicación con la estación de ingeniería WinCC a través de Profinet, permitiendo la supervisión completa del sistema. Aunque este sistema tiene más de dos décadas de funcionamiento, se encuentra operativo y cuenta con disponibilidad de entradas y salidas tanto digitales como analógicas, así como de repuestos y módulos compatibles en el mercado. Por tanto, no se contempla su reemplazo inmediato, sino que se busca aprovechar su infraestructura existente como base para la incorporación del sistema dual drive en la fan pump.

Para garantizar una operación adecuada del sistema dual drive, es fundamental implementar una lógica de control que asegure que el motor auxiliar no genera oscilaciones o interferencias en el control de velocidad global. Para lograrlo, el diseño debe garantizar que se vaya controlando progresivamente el aporte de potencia del motor auxiliar en función del requerimiento de carga y del nivel de esfuerzo del motor principal. En esta lógica, el SCADA debe continuar supervisando las condiciones del sistema y debe contar con parámetros ajustables desde la HMI, tales como velocidad objetivo del motor auxiliar, indicación de corriente consumida, límites de torque y cualquier otro ajuste que sea definido durante el diseño detallado del control.

Otro requerimiento importante y siguiendo la arquitectura inicial del sistema, es que el SCADA debe ser responsable de generar las referencias (setpoints) de velocidad o torque para el variador de frecuencia del motor auxiliar, mientras que el variador será el encargado de ejecutar estas referencias, garantizando un control preciso y estable. Esta separación de funciones

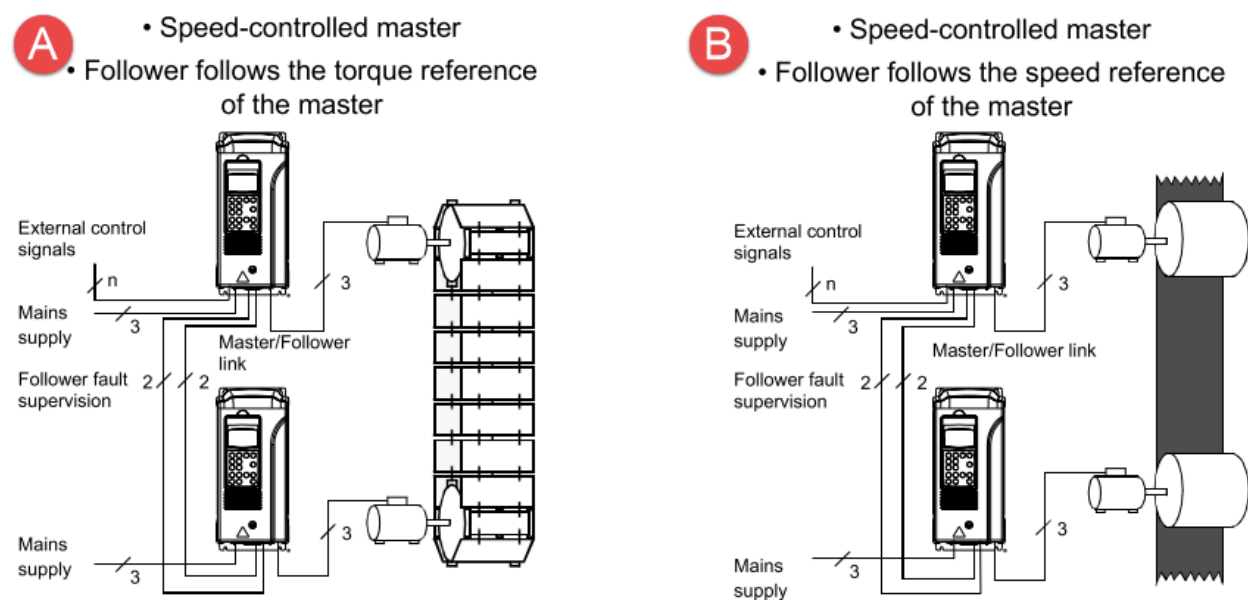
mantiene la coherencia con la filosofía de diseño implementada en la planta, asegurando compatibilidad operativa y continuidad técnica para el personal de mantenimiento.

Adicionalmente, el diseño del nuevo sistema debe cumplir con la normativa eléctrica vigente en Colombia RETIE, Resolución 40117 del 2 de abril de 2024, particularmente en lo relacionado con la selección y configuración de dispositivos de protección, maniobra y aislamiento. Asimismo, será necesario integrar el sistema dual drive a las cadenas de seguridad existentes en la máquina, para garantizar su detención segura ante eventos de emergencia o condiciones de fallo.

### ***Selección del Método de Control del Sistema Dual Drive***

**Figura 27**

*Esquemas Generales de Representación Aplicaciones Maestro Seguidor*



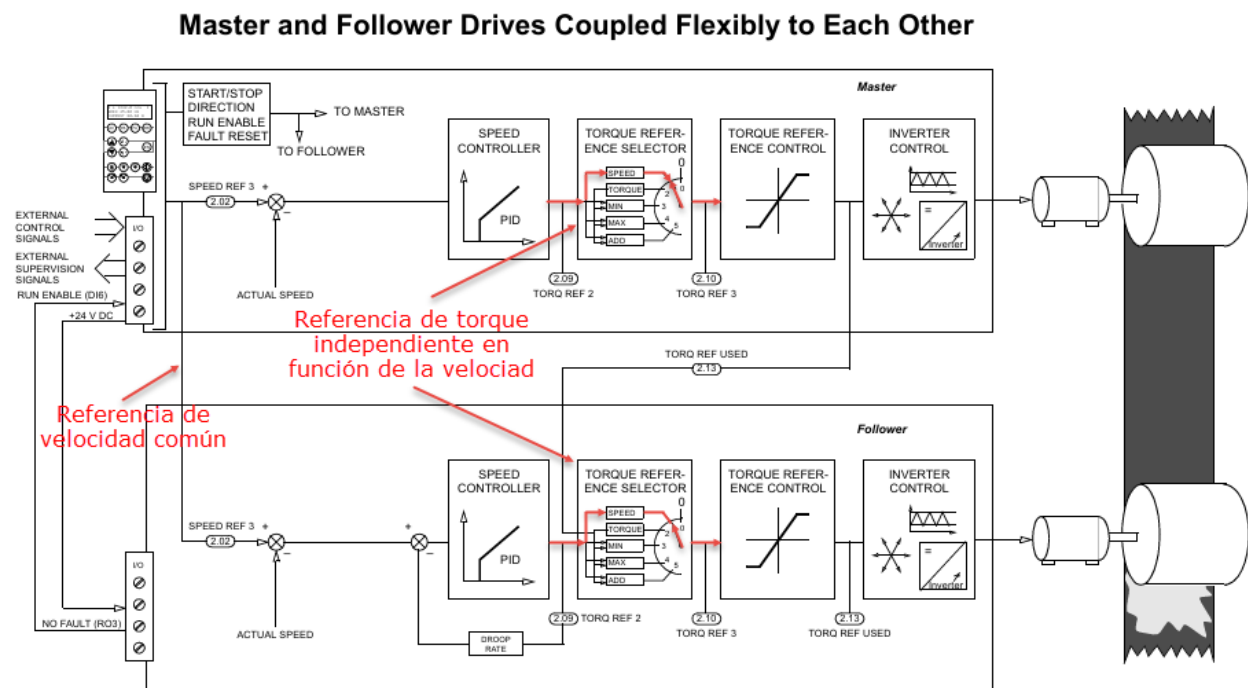
*Nota.* En la figura se muestran 2 métodos de aplicación maestro-seguidor, tomados de ABB (2002). Marcado con A control en modo seguidor de velocidad (Speed Follower) y B control en modo carga compartida maestro/esclavo (Master-Slave con control de torque).

Para el desarrollo del sistema dual drive a implementar en la fan pump, se evaluaron dos metodologías de control según ABB (2002), denominadas *Control en Modo Seguidor de Velocidad (Speed Follower)* y *Control en Modo Carga Compartida Maestro/Esclavo (Master-Slave con Control de Torque)* véase Figura 27. A continuación, se analiza cada uno de los métodos para seleccionar el que cumpla con el objetivo de asegurar un comportamiento estable, seguro y eficiente de la bomba, integrando un motor auxiliar AC en conjunto con el motor DC principal existente, según los lineamientos establecidos en los requerimientos tanto de control como de potencia.

**Control en Modo Seguidor de Velocidad (Speed Follower).** Según la guía de aplicación Maestro/Seguidor, que es un suplemento al manual de firmware del variador de frecuencia ACS800 del fabricante ABB, este tipo de control se utiliza en aplicaciones en las que el maestro y el seguidor están acoplados de forma flexible y para equilibrar la carga entre el maestro y el seguidor, se controlan con la misma referencia de velocidad. En esta aplicación, un control de par del seguidor no puede utilizarse debido a la fricción variable de la transmisión flexible, ya que una caída repentina de la fricción del eje del seguidor provocaría una aceleración del motor porque el variador intentaría mantener un determinado nivel de par aplicado. Se debe utilizar la función de caída de par para garantizar un funcionamiento suave y una distribución uniforme de la carga entre el maestro y el seguidor (ABB, 2002).

Figura 28

Diagrama de Bloques Sistema Dual Drive con Control Seguidor de Velocidad



Nota. Tomado y modificado de ABB (2002).

En la configuración maestro-esclavo seguidor por velocidad de la Figura 28, ambos motores (el maestro y el seguidor) reciben la misma referencia de velocidad desde el sistema de control. Sin embargo, cada variador de frecuencia ajusta internamente su torque para adaptarse a las condiciones mecánicas del proceso, permitiendo una distribución equilibrada de la carga.

Por ejemplo, si el motor seguidor encuentra menos fricción en su eje (como si una rueda estuviera sobre una superficie más resbalosa), comenzará a deslizarse ligeramente. Al detectar esta condición, el variador reduce el par aplicado para evitar que el seguidor supere la velocidad del maestro. Mientras tanto, si el maestro encuentra más resistencia (mayor carga), su variador incrementa el par interno para mantener la velocidad objetivo, lo que también incrementa la reducción de velocidad interna del variador y provoca una leve disminución en su velocidad real.

En este escenario, el seguidor comienza a girar apenas más rápido que el maestro. Cuando la fricción del seguidor vuelve a la normalidad, su carga aumenta y, en respuesta, su variador también incrementa el par interno, lo que aumenta su reducción de velocidad interna y disminuye ligeramente su velocidad real. Esto provoca que nuevamente el maestro cargue más, y el ciclo se repite de manera automática hasta que ambos motores logran una carga equilibrada. Para garantizar una operación segura y coordinada, la señal de arranque del motor maestro se controla a través de una salida de relé (RO3) del variador del seguidor. Así, ambos motores solo arrancan si el seguidor está en condiciones adecuadas para participar en el proceso (ABB, 2002).

Las ventajas del método maestro-esclavo seguidor por velocidad son una implementación relativamente simple en términos de lógica de control; una buena sincronización en condiciones de carga constantes o moderadas requiere menor procesamiento en el SCADA si se utiliza realimentación directa del tacogenerador.

Las desventajas del método maestro esclavo seguidor por velocidad son que no considera la distribución de carga entre ambos motores, por lo tanto, no garantiza que el motor auxiliar efectivamente aporte torque útil, en escenarios de carga variable o dinámica, el motor auxiliar puede entrar en una condición de arrastre (*back-driving*) o generar oscilaciones debido a la falta de regulación de torque, alto riesgo de sobrecarga o inestabilidad si la velocidad no está compensada adecuadamente en tiempo real y sensibilidad ante cambios bruscos de carga o eventos como desenganches mecánicos.

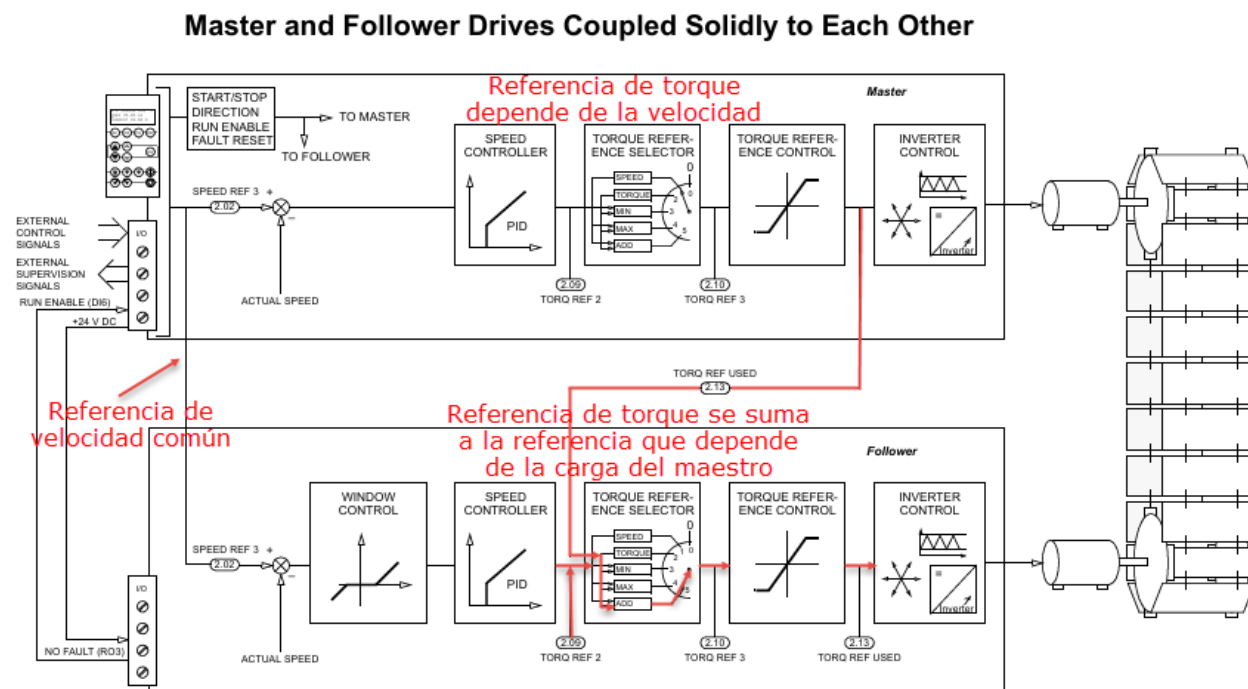
Debido a estos factores y a que el acople mecánico es rígido, esta metodología se considera inviable para garantizar estabilidad y robustez en condiciones reales de operación, especialmente considerando las variaciones de carga que se presentan en la bomba, y el hecho de que este sistema es el principal responsable de un control fino esencial del proceso.

**Control en Modo Carga Compartida Maestro/Esclavo (Master-Slave con Control de Torque).** Según ABB (2002), este tipo de control se utiliza en aplicaciones en las que el maestro y el seguidor están sólidamente acoplados mecánicamente (engranaje, cadena, etc.), y para equilibrar la carga entre el maestro y el seguidor, el maestro controla la velocidad y el seguidor sigue la velocidad, pero además adiciona la referencia de par generada por el maestro.

En el contexto del ejemplo del diagrama de bloques de la aplicación para cargas con acople rígido sugerido por ABB, véase Figura 29, en una configuración de control maestro por velocidad y seguidor por torque, el motor principal (maestro) determina la velocidad del sistema, mientras que el motor auxiliar (seguidor) aporta torque adicional según se requiera. En condiciones normales, el variador del seguidor mantiene su salida de torque, ya que opera dentro de una ventana de velocidad aceptable, durante este tiempo, simplemente acompaña al maestro, siguiendo su movimiento sin interferir. Sin embargo, si ocurre una pérdida de carga en el seguidor (por ejemplo, si se desacopla la carga o disminuye la resistencia mecánica), este motor puede empezar a acelerar más de lo previsto. Para evitar que el variador del seguidor alcance su límite máximo de velocidad, entra en acción un mecanismo llamado “control de ventana”. Este control detecta si la velocidad real del seguidor supera cierto umbral, definido por el parámetro de "ancho de ventana" (por ejemplo, parámetro 60.05 en el ACS800). Cuando se sobrepasa ese umbral, el sistema activa el controlador de velocidad del seguidor, el cual introduce una corrección negativa en su referencia de torque. Esta corrección reduce el par aplicado por el seguidor, lo que a su vez limita su velocidad real, evitando que acelere de forma incontrolada.

Figura 29

Diagrama de Bloques Sistema Dual Drive con Control Maestro por Velocidad y Seguidor por Torque



Nota. Tomado y modificado de ABB (2002).

Además, por seguridad, la señal de arranque del maestro está conectada a través de una salida de relé (RO3) del variador del seguidor. Esto significa que, si el seguidor presenta una falla o pierde alimentación, se interrumpe automáticamente la señal de marcha del maestro, protegiendo así el sistema completo frente a eventos no deseados.

Las ventajas del método maestro por velocidad esclavo seguidor por torque son que tiene una distribución activa y ajustable de carga entre ambos motores, una mayor eficiencia energética al reducir la exigencia del motor DC en picos de carga, previene el arrastre o sobrecompensación del motor auxiliar mediante el control directo del torque, es altamente

estable en operación continua con cargas variables y es compatible con el control existente del SCADA y permite ajustes dinámicos de referencia.

Las desventajas del método maestro por velocidad esclavo seguidor por torque son que requiere una lógica de control más compleja y una parametrización precisa del variador de frecuencia para evitar conflictos de control, puede tener mayor sensibilidad a errores de calibración en los lazos de realimentación, y el control de torque debe estar finamente ajustado para evitar oscilaciones cuando se aproxima al límite de carga.

**Determinación del Método de Control del Sistema Dual Drive en la Fan Pump.** Tras el análisis técnico y funcional de los posibles métodos de control, se concluye que la estrategia “maestro/seguidor” por velocidad no resulta viable para garantizar la estabilidad y robustez requeridas en condiciones reales de operación. Esto se debe principalmente a las variaciones de carga inherentes al funcionamiento de la bomba y al hecho de que el motor de corriente directa (DC) inicial es el responsable del control fino del proceso. Dado que ambos motores están acoplados al eje de la bomba mediante bandas trapezoidales y comparten un mismo eje impulsor, puede considerarse que existe un acoplamiento rígido desde el punto de vista funcional, lo que refuerza la necesidad de una coordinación precisa entre los dos accionamientos.

Tras el análisis técnico y funcional de los posibles métodos de control, se concluye que la estrategia “maestro/seguidor” por velocidad no resulta viable para garantizar la estabilidad y robustez requeridas en condiciones reales de operación. Esto se debe principalmente a las variaciones de carga inherentes al funcionamiento de la bomba y al hecho de que el motor de corriente directa (DC) es el responsable del control fino del proceso. Dado que ambos motores están acoplados al eje de la bomba mediante bandas trapezoidales y comparten un mismo eje

impulsor, puede considerarse que existe un acoplamiento rígido desde el punto de vista funcional, lo que refuerza la necesidad de una coordinación precisa entre los dos accionamientos.

Bajo estos conceptos, el método más adecuado para la repotenciación del sistema mediante una arquitectura dual drive es el control de carga compartida maestro/esclavo. En esta configuración, el motor DC conserva el control de velocidad del sistema que funciona inicialmente, mientras que el motor auxiliar de corriente alterna (AC) opera en modo de control de velocidad, con control del torque aplicado bajo la supervisión del sistema SCADA, dependiendo de la carga del motor principal DC, monitoreado a través de la corriente de armadura. Esta estrategia permite una integración armoniosa con la automatización existente, respeta la filosofía de control previamente implementada y proporciona la robustez necesaria para adaptarse a las fluctuaciones de carga del proceso, asegurando así un funcionamiento eficiente y confiable del sistema de bombeo.

### ***Definición y Diseño de las Curvas de Comportamiento del Motor Helper***

Con el objetivo de garantizar un comportamiento estable, seguro y eficiente en la arquitectura dual drive del sistema de bombeo, se han definido dos curvas de control para limitar la intervención del motor auxiliar (helper), tanto en función de la velocidad del motor maestro como de su carga (corriente de armadura). Estas curvas están diseñadas bajo la filosofía de que el motor DC, actuando como maestro, debe conservar el control fino de velocidad del sistema, mientras que el motor AC auxiliar debe asistir en la entrega de par únicamente cuando se requiera, sin comprometer la estabilidad del sistema ni generar comportamientos indeseados como oscilaciones, arranques asincrónicos o aceleraciones abruptas.

**Curva 1 Relación de Velocidad del Motor Maestro vs Límite de Velocidad del Helper.** En condiciones ideales, el motor auxiliar (*helper*) debe seguir exactamente la misma

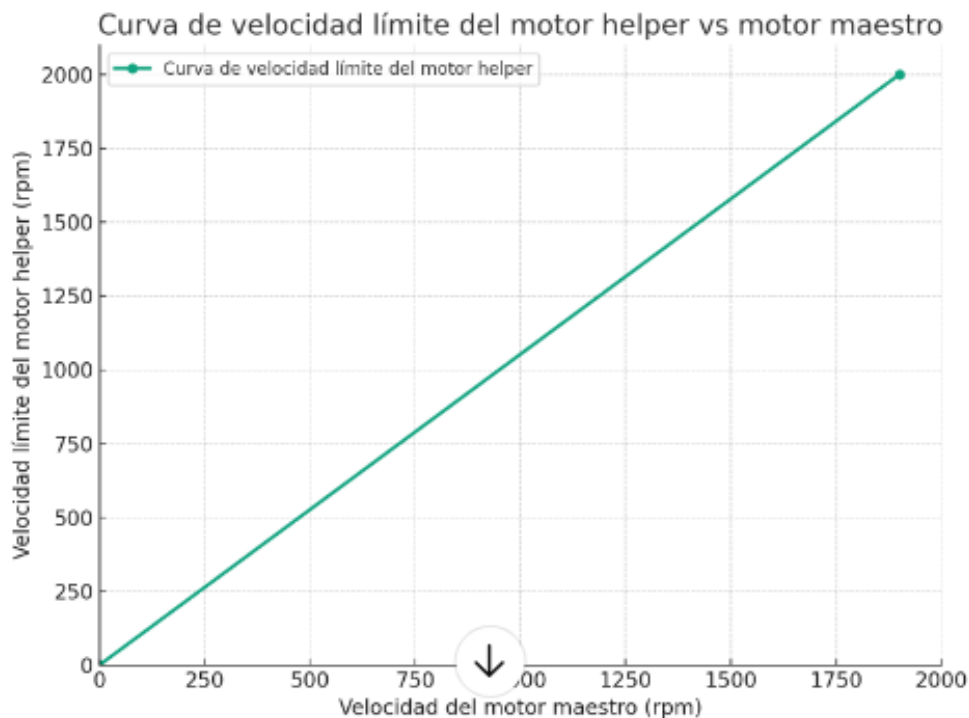
referencia de velocidad que el motor maestro (*máster*). Sin embargo, en esta aplicación específica se opta por prescindir de un sistema de realimentación de velocidad en el motor auxiliar, por lo que su referencia de velocidad debe establecerse ligeramente por encima de la velocidad del motor maestro. Esta estrategia asegura que el motor auxiliar siempre se mantenga en una condición activa de entrega de torque hacia el sistema, en lugar de arrastrarse pasivamente o generar esfuerzos opuestos, garantizando que la carga aportada dependa exclusivamente de su propia curva en función de la carga del motor principal.

La curva de control de velocidad establecida define la relación entre la velocidad del maestro y el límite máximo permitido de velocidad para el motor auxiliar. En situaciones de reposo del sistema (0 rpm en el motor maestro), se impone al motor helper una condición de reposo absoluto (0 rpm), evitando así arranques asincrónicos o acciones descoordinadas. Conforme el motor maestro incrementa su velocidad, la velocidad permisible del motor auxiliar también se incrementa de manera lineal, permitiendo que este último aporte torque útil de forma progresiva. Esta relación queda establecida desde 0 rpm del maestro hasta un máximo de 1900 rpm (1910 rpm en la placa del motor), momento en el cual el motor auxiliar puede alcanzar hasta 2000 rpm, véase Figura 30.

Este enfoque de diseño garantiza que el motor auxiliar no exceda en ningún momento la velocidad del maestro de forma autónoma, evitando así impulsos de par no deseados que puedan alterar la estabilidad del sistema, especialmente ante condiciones transitorias como pérdida súbita de carga o desacoples mecánicos. En síntesis, la velocidad del motor auxiliar, a pesar de no ser la misma que la del maestro, siempre permanece subordinada a la del maestro, lo cual ayuda a mantener una sincronía funcional, así como a prevenir retroalimentaciones parásitas o desbalances de par que comprometan la operación conjunta del sistema.

**Figura 30**

*Curva Velocidad del Maestro Vs Límite de Velocidad del Helper*



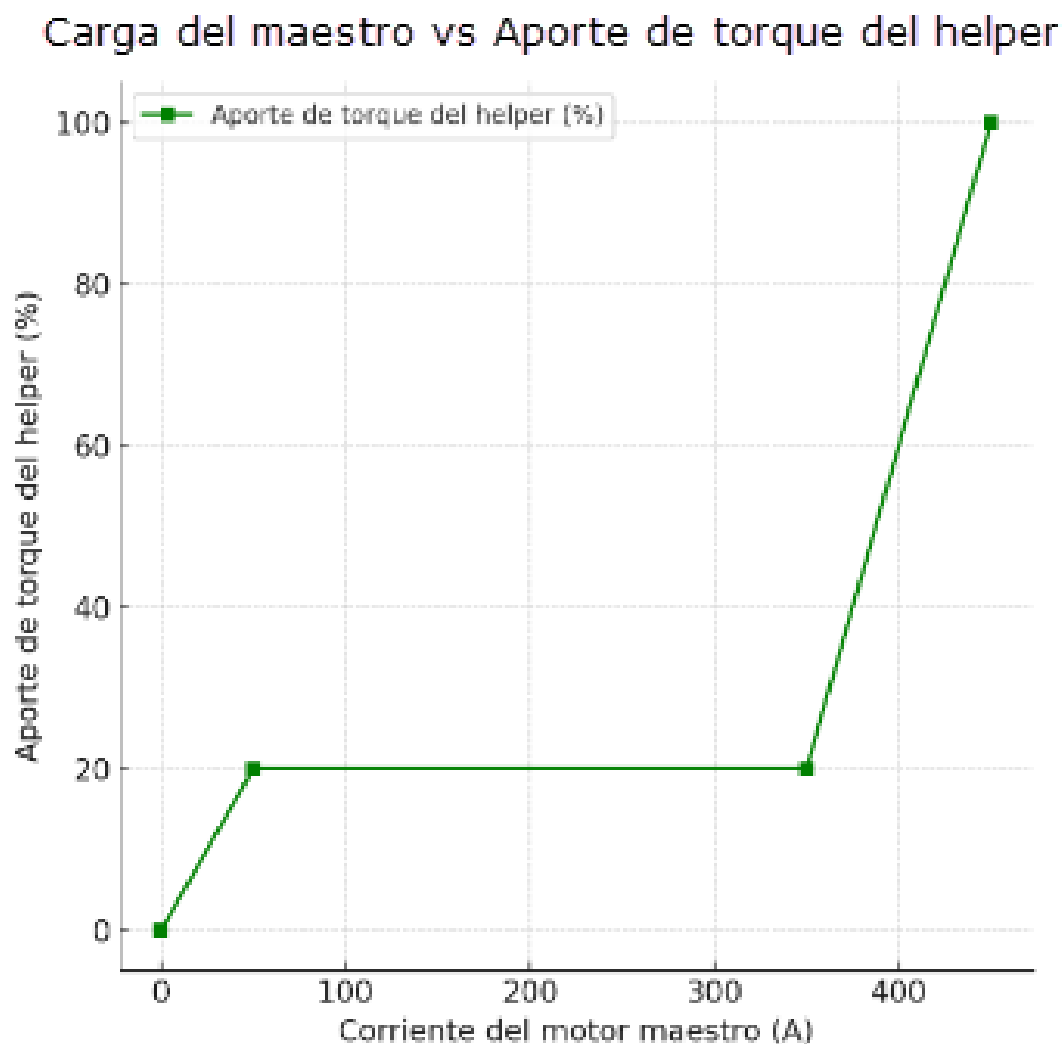
*Nota.* Elaboración propia a partir de los datos de placa de los motores y establecimientos del diseño.

**Curva 2 Relación entre la Carga del Maestro (Corriente de Armadura) y el Aporte de Torque del Helper.** La segunda curva, Figura 31, se basa en limitar el aporte de torque del helper de acuerdo con la demanda de carga registrada en el motor maestro. En condiciones de baja carga (corriente de armadura del maestro igual a 0 A), el helper no debe aportar torque, lo que garantiza que no interfiera con el control fino del maestro. A partir de ese punto, la curva se incrementa de manera lineal hasta que el maestro alcanza 50 A, momento en el cual el helper puede aportar hasta un 20% del torque nominal del motor AC. Este rango limitado de

intervención en cargas bajas garantiza una transición suave y evita que el auxiliar domine el sistema en condiciones en las que el maestro aún tiene margen de operación eficiente.

**Figura 31**

*Curva de Carga del Maestro Vs Aporte de Torque del Helper*



*Nota.* Elaborado a partir de los datos de placa de los motores y establecimientos del diseño.

Entre los 50 A y los 350 A, el aporte del helper se mantiene constante en ese 20%, actuando únicamente como asistente pasivo ante cargas moderadas. Sin embargo, al superar los 350 A, y ante una creciente demanda de par, el helper incrementa nuevamente su participación

de forma lineal, hasta alcanzar el 100% de su capacidad nominal cuando el maestro demanda 450 A. Esta zona superior de la curva permite al sistema mantener la capacidad de respuesta ante condiciones extremas, asegurando una distribución más equitativa del esfuerzo mecánico y térmico sin comprometer el control maestro.

Este comportamiento evita que el helper asuma un rol dominante en la entrega de torque, lo que podría provocar oscilaciones por competencia entre los motores. A su vez, garantiza que, incluso en condiciones críticas, el sistema mantiene una respuesta estable, alineada con los principios del control maestro/esclavo y compatible con la supervisión desde el SCADA, puesto que desde el sistema supervisor se pueden calibrar los puntos de quiebre de la curva del comportamiento de torque, así como la curva del límite de velocidad.

### ***Selección de Componentes del Sistema Dual Drive***

**Componentes Sistema de Control.** Se mantiene la base instalada del sistema de supervisión y control, compuesto por un sistema SCADA WinCC de SIEMENS, vinculado a un PLC S7-300 que cuenta con disponibilidad verificada en campo de entradas y salidas tanto digitales como analógicas. Esta decisión permite aprovechar la infraestructura existente, reducir costos de integración y asegurar una alta compatibilidad con los elementos nuevos del sistema.

**Componentes de Potencia.** La selección de los elementos de potencia para la implementación del sistema Dual Drive en la fan pump se realiza considerando los requerimientos eléctricos, mecánicos y operativos del proceso, garantizando confiabilidad, eficiencia energética y seguridad en la operación. Los componentes se definen con base en criterios de capacidad nominal, coordinación de protecciones y compatibilidad con los sistemas existentes en planta, asegurando que cada elemento cumpla una función específica dentro de la

cadena de conversión, control y protección de la energía, para ver detalles de los elementos seleccionados ver el Apéndice C.

Se selecciona un motor auxiliar trifásico Crompton Greaves de 150 kW (440 V, 238 A, 1775 rpm, eficiencia IEC 2), que aporta el torque adicional requerido para cubrir picos de carga y demandas dinámicas sin comprometer al motor principal.

El sistema de control se implementa sobre un variador de frecuencia Danfoss VLT FC 302 de 160 kW (Heavy Duty), con control vectorial VVC+ en lazo abierto, módulo regenerativo y múltiples interfaces de control y monitoreo. Para disipar la energía regenerativa se incorpora una resistencia de frenado de 6  $\Omega$ , con capacidad de 45 kW en continuo y hasta 90 kW en régimen intermitente.

La protección eléctrica se garantiza mediante una coordinación selectiva ofrecida por un interruptor termomagnético Schneider NSX 630H (65 kA, 250–630 A) en la subestación, un breaker Schneider NSX 400N (42 kA, 160–400 A) en la llegada al gabinete, y fusibles aR NH1 de 400 A / 170 kA para la protección específica del variador.

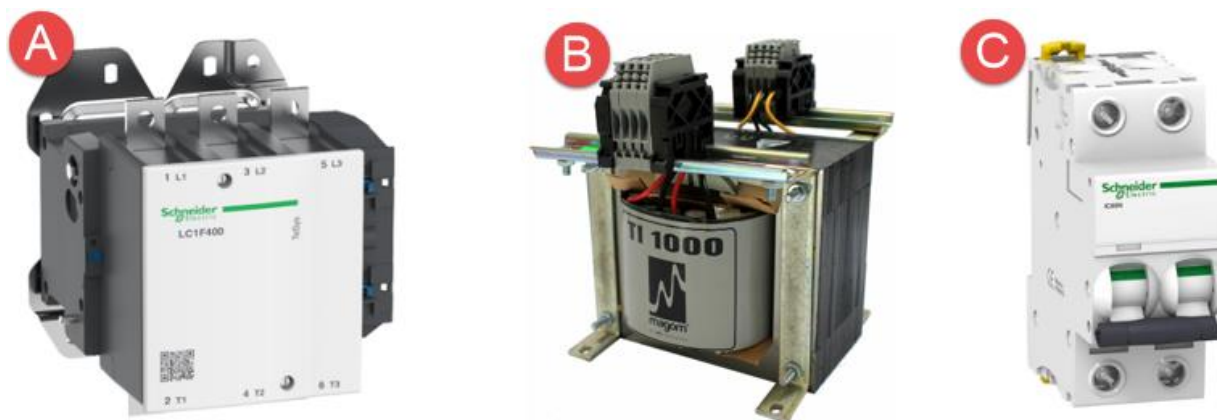
Finalmente, los conductores de potencia seleccionados para la acometida corresponden a cables de cobre THHN 250 MCM (90 °C), dimensionados para la corriente nominal del motor y considerando factores de instalación industrial.

**Selección de Elementos de Maniobra y Control.** Para el circuito de energización del variador de frecuencia se selecciona un contactor de potencia Schneider Electric LC1F400, el cual soporta una corriente nominal de 400 A en categoría AC-3, siendo adecuado para la conmutación de cargas inductivas como motores trifásicos. Este equipo está equipado con una bobina de control a 110 V AC, tensión que se obtiene mediante un transformador de control reductor de 440 V a 110 V AC con una potencia nominal de 1000 W. Este transformador

garantiza el aislamiento galvánico entre la potencia y el control, mejorando la seguridad del sistema y reduciendo el riesgo de sobrecargas en los dispositivos de mando.

### Figura 32

*Algunos Elementos de Maniobra para Sistema Dual Drive*



*Nota.* Tomado de los sitios web de Schneider Electric & Magomelectronica. Con A contactor de energizado, B transformador de control y C protecciones termomagnéticas del control.

Para la adecuada protección del transformador, se selecciona instalar protecciones termomagnéticas: un interruptor bipolar de 4 A en el primario (440 V) y un interruptor bipolar de 6 A en el secundario (110 V), dimensionados según la corriente nominal y considerando una capacidad de corriente de arranque aceptable, lo cual evita disparos intempestivos durante el encendido del sistema.

Estos dispositivos constituyen los elementos principales de maniobra y control del sistema dual drive. No obstante, en el desarrollo detallado del diseño se contempla la incorporación de componentes adicionales necesarios para garantizar la operación segura y confiable del sistema. Estos pueden incluir relés intermedios y auxiliares para señales de mando y enclavamientos, elementos de aislamiento galvánico como optoacopladores o interfaces de

entrada/salida para proteger los circuitos de control ante variaciones en la red de potencia, pulsadores de arranque y paro, seleccionadores de modo local/remoto y señales luminosas para brindar información clara del estado del sistema al operador, paros de emergencia que permitan una desconexión rápida y segura en caso de fallo o condición insegura y sistemas de bloqueo de energización ante fallas o condiciones anormales, a través de circuitos de realimentación y control desde el variador al PLC y SCADA.

La selección de estos elementos se realiza siguiendo criterios de seguridad, confiabilidad operativa, facilidad de mantenimiento y compatibilidad con el resto de la arquitectura de control ya instalada en la planta, especialmente con el sistema SCADA WinCC y el PLC Siemens S7-300. Esto garantiza una integración eficiente y estandarizada con la infraestructura existente, reduciendo tiempos de puesta en marcha y facilitando las labores de diagnóstico y operación.

### ***Diseño de los Esquemas Eléctricos***

En esta sección se presenta el diseño de tres esquemas eléctricos, esenciales para la implementación del sistema de control y accionamiento del motor Helper de la Fan Pump. Estos diagramas comprenden las conexiones de potencia, control y señales de interconexión entre el variador de frecuencia, los mandos de campo y el PLC del sistema SCADA. A continuación, se describen detalladamente:

**Diagrama de Potencia.** Este esquema representa el recorrido de la alimentación eléctrica desde la subestación 2 de la planta hasta el motor helper de la Fan Pump, incluyendo los elementos de protección y conmutación intermedios establecidos a continuación.

**Punto de Origen.** El suministro de 440 VAC a 60 Hz, parte desde el barraje de distribución de la subestación, protegido por un breaker regulable de 250-630 A, con una

capacidad de corte de 65 kA a 440 VAC, seleccionada conforme a la alta capacidad de cortocircuito disponible en cercanía con el transformador de potencia.

***Acometida al Gabinete.*** Previo al ingreso al tablero del sistema, se dispone de un breaker ajustable de 160-400 A, con una capacidad de cortocircuito de 42 kA a 440 VAC, encargado de recibir y distribuir la alimentación hacia el gabinete eléctrico del variador.

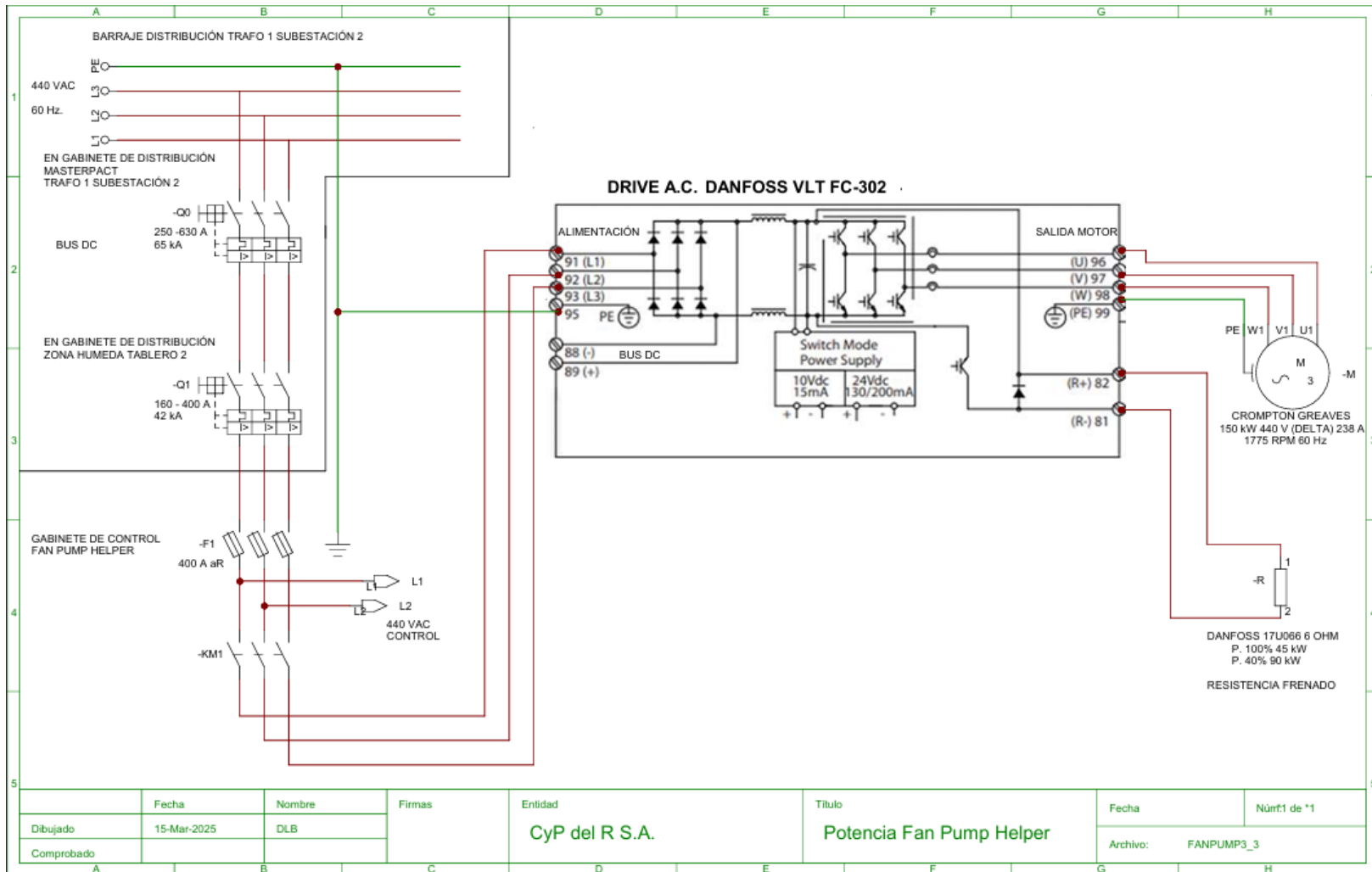
***Protección del Variador de Frecuencia.*** Dentro del gabinete, se instalan fusibles NH1 de 400 A clase aR, con una capacidad de corte de 170 kA a 690 VAC, óptimos para la protección de la electrónica de potencia del variador de frecuencia ante fallos por cortocircuito de alta potencia.

***Conmutación de Energizado del Variador de Frecuencia.*** Se dispone de un contactor tripolar con capacidad de 400 amperios en categoría AC-3.

***Variador de Frecuencia.*** Se representa siguiendo el esquema de conexiones suministrado por el fabricante, incluyendo bornes de entrada de alimentación trifásica, salidas hacia el motor, y la conexión de la resistencia de frenado. Este dispositivo regula el suministro eléctrico al motor de forma eficiente y controlada.

**Figura 33**

*Diagrama Potencia Fan Pump Helper*



*Nota.* Elaboración propia en Cade Simu, según el diseño de la estrategia de potencia Fan Pump Helper del sistema Dual Drive.

**Diagrama de Control.** Este plano describe el circuito de mando para la maniobra de energización y control del sistema en el que se incluye:

***Energizado de Control del Sistema.*** Depende de un selector de dos posiciones que, mediante el relé RC, energiza el control del sistema de la fan pump helper, dando la posibilidad de confirmar un estado de fallo de control al sistema SCADA con la entrada digital E22.6.

***Habilitación del Sistema.*** Depende de la señal del relé MAK3, que actúa por la serie del circuito de paradas de emergencia de la máquina y de una condición desde el SCADA que valida la ausencia de fallas en el sistema antes de permitir el arranque del variador. Una vez cumplidas las condiciones de seguridad, se activa el variador mediante una secuencia de arranque directo direccionado hacia el contactor de energizado del variador KM1.

***Confirmación de Energizado.*** A través de un contacto auxiliar del contactor KM1.

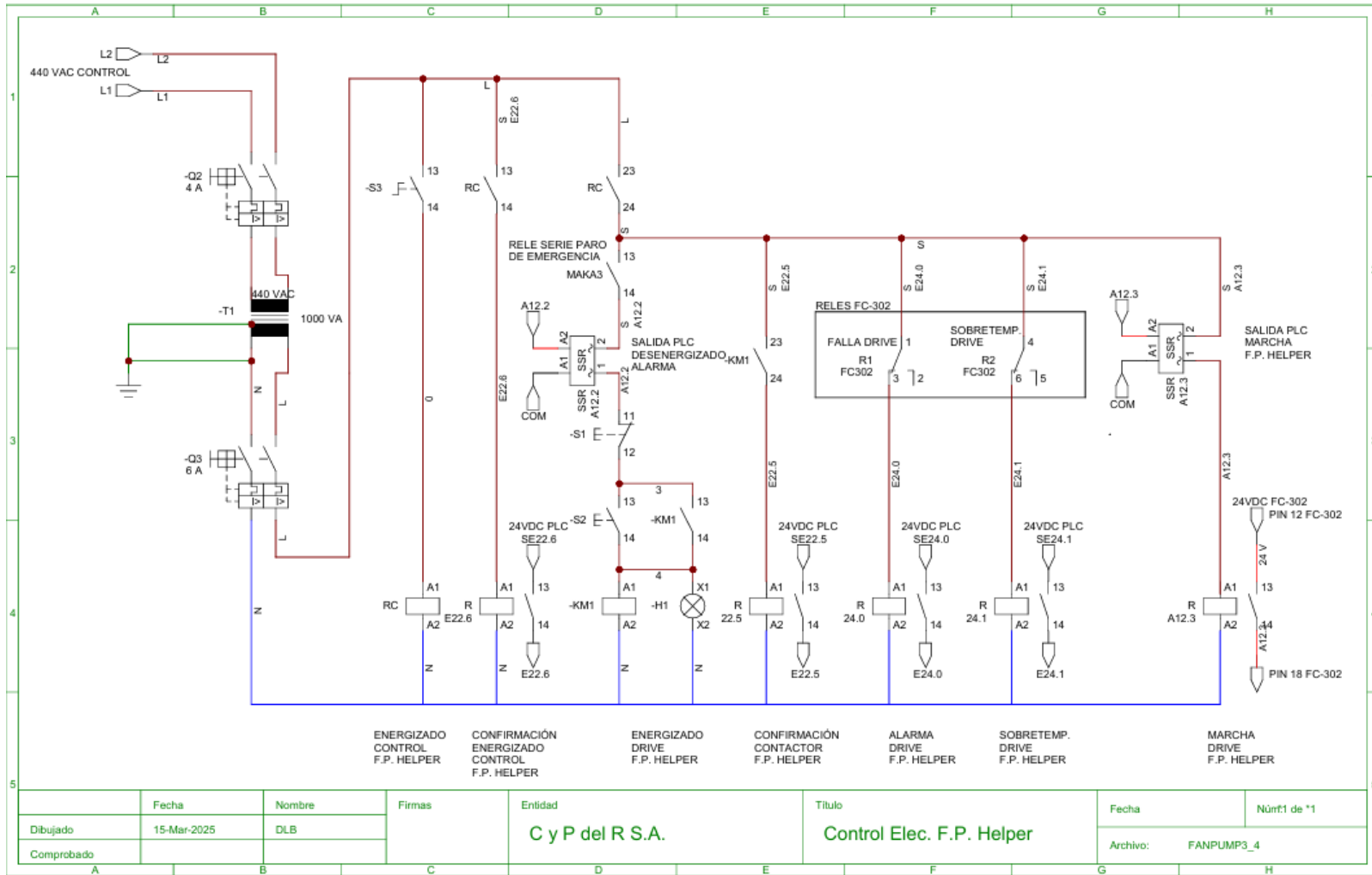
***Señales de Alarma y Falla del Variador.*** Transmitidas al SCADA mediante dos relés de variador dedicados, uno para fallo general y otro para condición de sobretensión en el variador.

***Señal de Marcha del Variador.*** También originada desde el SCADA y dirigida hacia el pin de marcha en el variador.

Todas las señales se diseñan cumpliendo con los principios de aislamiento galvánico, separando adecuadamente las fuentes de 110 VAC del gabinete de potencia y los 24 VDC del sistema de automatización (PLC/SCADA), con el fin de evitar interferencias o fallos por retorno de potenciales.

**Figura 34**

*Diagrama de Control Fan Pump Helper*



*Nota.* Elaboración propia en Cade Simu, según el diseño de la estrategia de control Fan Pump Helper de sistema Dual Drive.

**Diagrama de Señales PLC – Variador de Frecuencia.** Este tercer plano detalla las conexiones analógicas y digitales entre el variador y el PLC del sistema SCADA, necesarias para el control dinámico del torque y la velocidad del motor auxiliar:

***Señal de Referencia de Torque.*** Transmitida desde el PLC a través de la salida analógica PAW434 (4-20 mA), esta señal se ajusta según la curva ajustada en el SCADA según el diseño, que modula el aporte de torque del helper en función de la corriente de armadura del motor maestro (Fan Pump Principal). Esta señal se aísla galvánicamente mediante un transmisor analógico (entrada/salida 4-20 mA) antes de ingresar al pin 53 (AI1) del variador.

***Límite de Velocidad.*** Enviado por la salida PAW432 del PLC, también en formato 4-20 mA, ajustado conforme a una curva de referencia establecida desde el SCADA. La señal es igualmente aislada galvánicamente y conectada al pin 54 (AI2) del variador.

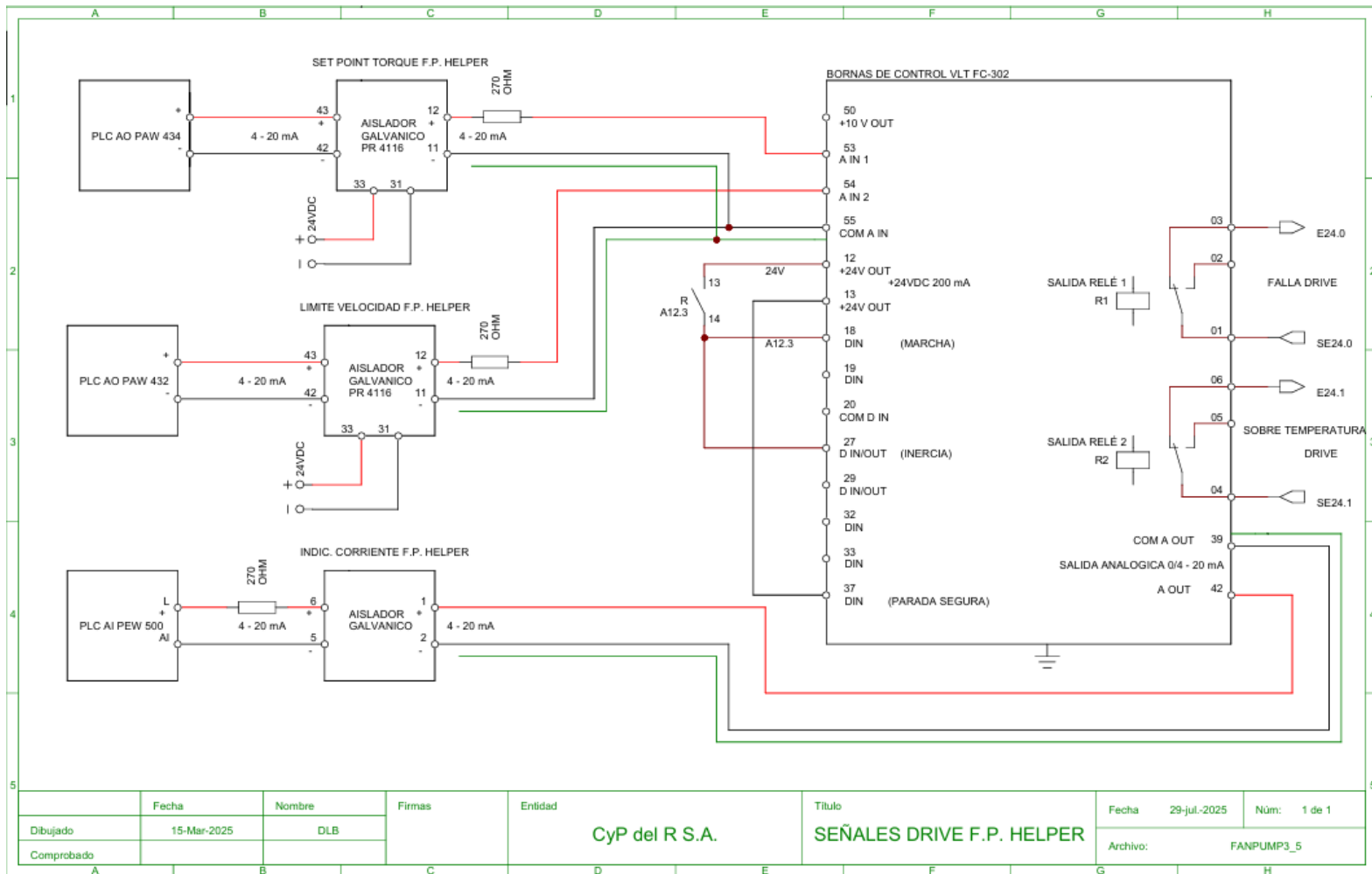
***Retroalimentación de Corriente del Motor Fan Pump Helper.*** El variador entrega esta señal por su salida analógica (4-20 mA), pines 42 y 39, que pasa por un aislador galvánico y llega a la entrada analógica PEW 500 del PLC, y permite tener esta indicación en las HMI.

***Señales Digitales.*** Este diagrama también incluye los bornes de conexión de los relés de alarma del variador y la señal de marcha, asegurando una identificación clara de cada terminal y su función específica.

Como complemento a los diagramas de conexión, se recomiendan algunas buenas prácticas de cableado para las señales, como el uso de cables trenzados, apantallados y blindados para todas las señales analógicas y digitales sensibles, con el objetivo de minimizar los efectos del ruido electromagnético generado por los equipos de potencia. El apantallamiento debe aterrizar en un solo punto, preferiblemente en el chasis del variador, para evitar la circulación de corrientes parásitas a través de las mallas de tierra.

**Figura 35**

*Diagrama de Señales Drive Fan Pump Helper*



*Nota.* Elaboración propia en Cade Simu, según el diseño de la estrategia de señales Fan Pump Helper del sistema Dual Drive.

## **Implementaciones y Configuración del Sistema Dual Drive**

### ***Implementación en el Sistema SCADA***

La implementación del diseño en el sistema SCADA se lleva a cabo con el acompañamiento de una firma local de ingeniería especializada en integración de sistemas SIEMENS. Como parte del proceso, se realizan las modificaciones necesarias en el controlador lógico programable (PLC), en las interfaces de operación (HMI) y en la estación de ingeniería del sistema SCADA. Estas acciones permiten adecuar la solución a las condiciones reales de operación de la planta. A continuación, se detallan los resultados implementados:

**Acondicionamiento de Entradas y Salidas Digitales.** El acondicionamiento de entradas y salidas digitales constituye una etapa fundamental en la implementación del sistema de control, ya que permite garantizar la supervisión, protección y operación segura del sistema dual drive. A través de la adecuada configuración de señales digitales en el PLC, es posible monitorear el estado de los equipos, detectar condiciones anómalas y ejecutar acciones de control en tiempo real, asegurando la integridad del proceso y la confiabilidad del sistema.

***Entradas Digitales.*** Con base en la filosofía de operación del sistema existente, se habilitan cuatro entradas digitales para supervisar en tiempo real el estado del sistema de control y del variador de frecuencia. Estas entradas están destinadas principalmente a la detección de fallas y generación de alarmas de seguridad:

E22.6 Confirmación de control energizado (Fan Pump Helper): Esta entrada confirma la presencia de tensión en el circuito de control del sistema auxiliar (Fan Pump Helper). En caso de ausencia de tensión, o si se detectan parpadeos asociados a bajones de voltaje, se genera una condición de alarma que ordena la desenergización del variador de frecuencia como medida preventiva.

E22.5 Confirmación de contactor energizado (Drive): El energizado del variador se realiza de forma local mediante un pulsador doble, que solo se activa si no hay fallos activos en el sistema. Esta entrada permite supervisar el estado del contactor de potencia mediante un contacto auxiliar. Si, transcurrido un tiempo determinado el contacto no se cierra, o si se abre de forma inesperada, se activa una alarma que detiene el sistema por razones de seguridad.

E24.0 Alarma general del variador (Fan Pump Helper): El relé 1 del variador está conectado al contacto normalmente cerrado (NC), y configurado para que se abra automáticamente ante cualquier falla interna del variador. Esta señal se conecta a la entrada E24.0, que, al activarse, genera una alarma y desactiva el variador.

E24.1 Alarma por sobret temperatura del variador (Fan Pump Helper): El relé 2 del variador también se encuentra cableado como contacto seco normalmente cerrado. Se configura para abrirse específicamente ante condiciones de sobret temperatura en el variador. Esta señal es recibida y, ante su activación, se genera una alarma y se ordena la desenergización del sistema.

**Salidas Digitales.** Con el objetivo de garantizar una operación segura y sincronizada del sistema dual drive, se configuran salidas digitales en el PLC que permitan actuar directamente sobre el variador de frecuencia del motor auxiliar (Fan Pump Helper), conforme a las condiciones de operación y seguridad definidas en la lógica de control. Las salidas configuradas son:

A12.2 Desenergizado drive Fan Pump Helper por alarmas: Esta salida permanece activa mientras no se detecten fallos en el sistema. En caso de activarse alguna condición de alarma (como pérdida de alimentación en el circuito de control, fallo del contactor de potencia o alarma del variador), esta señal se desactiva, provocando la desenergización inmediata del variador de frecuencia. Su función principal es proteger el sistema ante condiciones anómalas.

A12.3 Marcha Fan Pump Helper: Para garantizar el funcionamiento conjunto de los motores maestro y auxiliar, la señal de marcha hacia el Fan Pump Helper está condicionada a la marcha del motor maestro. Esta salida solo se activa si se detecta que la Fan Pump principal está en marcha, evitando el arranque aislado del motor auxiliar. Esta sincronización es esencial para preservar la integridad del proceso y asegurar un reparto adecuado de carga entre los motores.

**Acondicionamiento de Acciones ante Fallos.** Para garantizar la seguridad operativa del sistema y evitar daños por funcionamiento descoordinado, se implementa una lógica de protección que contempla el paro simultáneo de ambos accionamientos ante la detección de fallos críticos.

Los eventos de fallo que afectan ya sean al motor maestro (Fan Pump principal) o al motor auxiliar (Fan Pump Helper), generan una señal de alarma que provoca la desactivación inmediata de ambos accionamientos, sin embargo, para un re arranque alternativo el motor DC maestro puede arrancar de manera independiente así existan fallas en el sistema del motor helper, con el fin de tener disponibilidad de máquina en caso de daños graves en el accionamiento, motor o mecanismos del sistema helper. Esta acción coordinada asegura que ninguna de las unidades opere de manera independiente después de un arranque sincronizado, lo cual podría comprometer la estabilidad del proceso de bombeo, pero se garantiza que exista la posibilidad de trabajar la bomba de la manera habitual solo con el sistema maestro sin necesidad de intervenir en las conexiones.

La lógica de control está diseñada para detectar condiciones como: pérdida de tensión en el circuito de control, fallos en el arranque del contactor, alarmas internas del variador (fallos generales, sobretensión, etc.) o cualquier otra condición crítica definida. Ante cualquiera de

estos eventos, se inhibe la señal de marcha y se activa la orden de paro total del sistema dual drive.

**Acondicionamiento de Señales Analógicas.** Para lograr una sincronización precisa entre el motor maestro y el motor auxiliar en el sistema dual drive de la Fan Pump, se implementa el acondicionamiento de una entrada y dos salidas analógicas, las cuales permiten la transferencia y adaptación de señales críticas para el control de velocidad y torque.

***PEW 500 Indicación de Corriente Fan Pump Helper.*** Esta entrada analógica está configurada para recibir la señal de retransmisión de corriente del variador de frecuencia del motor auxiliar. El variador entrega esta señal en formato estándar de 4–20 mA, y el valor es interpretado por el PLC para ser visualizado tanto en la HMI como en el sistema SCADA. Esta corriente permite monitorear el esfuerzo real del motor auxiliar en tiempo real.

***PAW 432 Referencia Límite de Velocidad Fan Pump Helper.*** Esta salida analógica es generada por el PLC a partir del análisis de la señal de velocidad del motor maestro. Mediante una curva de control previamente diseñada (véase Figura 30), se escalan los valores para establecer un límite dinámico de velocidad que el motor auxiliar no debe exceder, permitiendo una operación sincronizada con el motor principal.

***PAW 434 Referencia Límite de Torque Fan Pump Helper.*** Similar a la referencia de velocidad, esta salida analógica se genera en el PLC a partir de la lectura de corriente del motor maestro. Con base en una curva de diseño (véase Figura 31), se establece un límite de torque dinámico para el motor auxiliar, de modo que su esfuerzo se ajuste según el nivel de carga demandado por el sistema.

**Acondicionamiento de las Interfaces de Operación HMI.** En el sistema de supervisión y control, se acondicionaron las interfaces gráficas en la HMI que permiten al operador

monitorear y actuar sobre las variables críticas del sistema dual drive de la Fan Pump. Estas interfaces facilitan una operación segura, eficiente y alineada con las condiciones del proceso.

En la pantalla principal del sistema HMI se incorporan casillas informativas que muestran en tiempo real las variables más relevantes del motor auxiliar (Fan Pump Helper), específicamente la velocidad y corriente reales del motor.

### Figura 36

*Casilla de Indicaciones Motores Principales en Pantalla Principal*

MOTOR	REEL	YANKEE	PRENSA S.	PRENSA C.	MALLA	FAN PUMP	F.P.HELP
VELOCIDAD m/min	903	1072	1072	1217	1072	1379	1378
CORRIENTE ARMADURA DC	27	278	735	0	151	385	121
CORRIENTE ENTRADA AC		0	0	0	0	0	0

*Nota.* Tomada de la HMI del sistema SCADA de la MP1 planta C y P del R S.A.

Se desarrolla un pantallazo específico para el control detallado del motor auxiliar. Esta visualización incluye: el botón de marcha/paro condicionado al estado del sistema maestro, la visualización de referencias límite de velocidad (consigna de velocidad) y torque (consigna en amperios) generadas por el algoritmo del PLC y la indicación de alarmas. Esta interfaz facilita la operación supervisada del sistema y permite al personal técnico intervenir en caso de desviaciones operativas en el funcionamiento del sistema.

**Figura 37***Pantalla de Mando Motor Fan Pump Helper*

*Nota.* Tomada de la HMI del sistema SCADA de la MP1 planta C y P del R S.A.

**Acondicionamientos en la Estación de Ingeniería del Sistema SCADA.** La estación de ingeniería del SCADA cumple un rol fundamental en el monitoreo avanzado, análisis de comportamiento y ajuste fino del sistema dual drive implementado en la Fan Pump. A diferencia de las interfaces locales HMI, esta estación proporciona herramientas ampliadas de supervisión y diagnóstico, lo que la convierte en un recurso esencial para el mantenimiento predictivo y la optimización operativa.

Entre las principales funcionalidades acondicionadas se destaca la visualización de tendencias en tiempo real e históricas de variables críticas como velocidad, corriente, señales de referencia y estados del variador, permitiendo detectar comportamientos anómalos o desviaciones sutiles en la operación. La gestión extendida de alarmas y eventos, con mayor

capacidad de almacenamiento y trazabilidad. Esto facilita el análisis de fallos intermitentes, tiempos de respuesta del sistema, y patrones de comportamiento recurrentes. El acceso a todas las herramientas de operación disponibles en las HMI, incluyendo comandos de control y visualización de estados, pero con privilegios extendidos para personal autorizado.

Para el desarrollo de esta ampliación se adecua un espacio para personal de ingeniería dispuesto para la configuración de la curva de referencia de torque del motor auxiliar, en función de la carga del motor maestro, que permite modificar los puntos de cambio de pendiente de la curva de torque, en el algoritmo del PLC, para ajustar la dinámica de respuesta del sistema auxiliar frente a variaciones de carga, de forma que el comportamiento global del sistema dual drive sea más estable, eficiente y adaptado a las condiciones operativas reales (ver figuras 38 y 39).

**Figura 38**

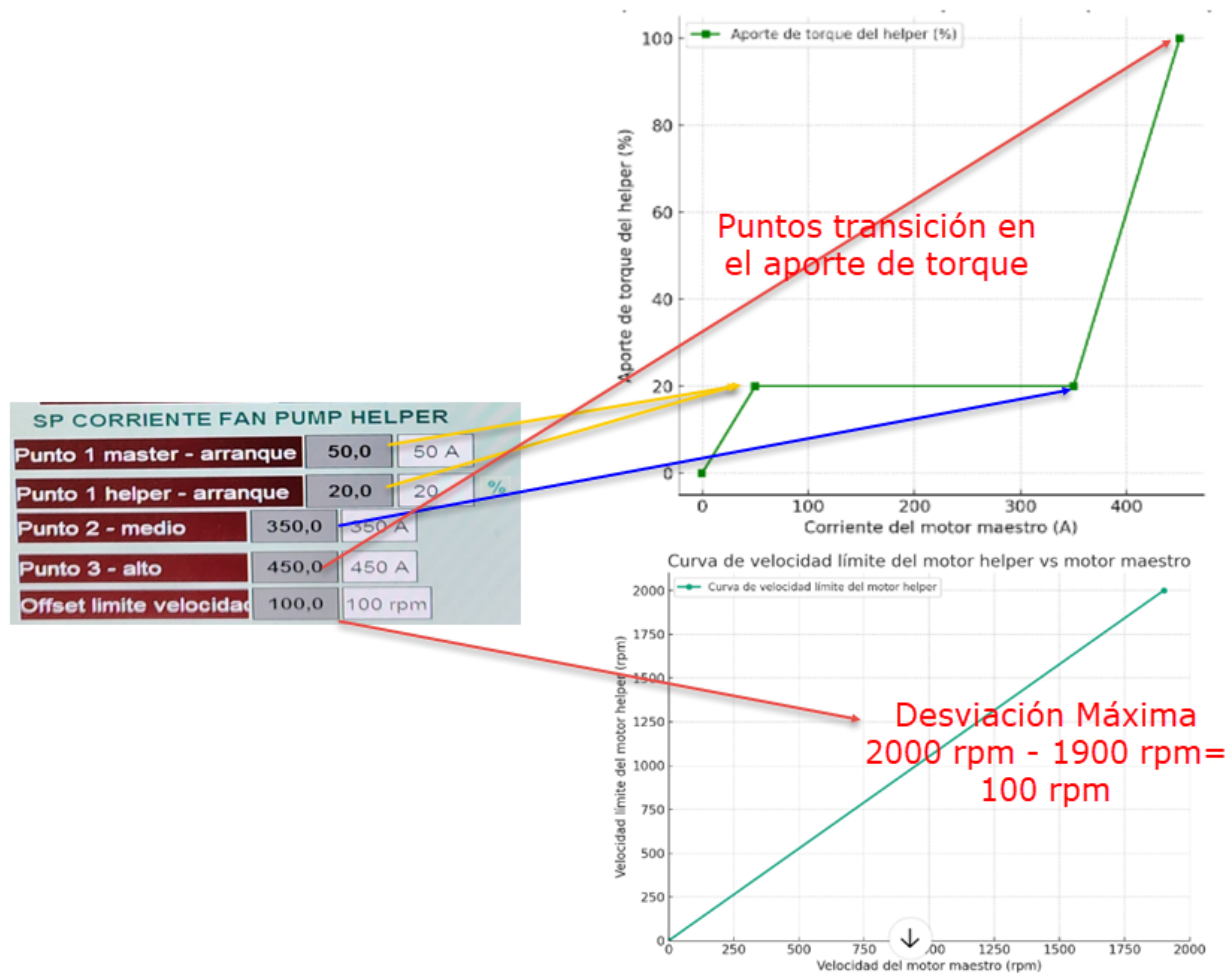
*Pantalla de Calibraciones en el SCADA*

DELTA ACURRAY			FACTOR LECTURA VELOCIDAD			SPAN LECTURA CORRIENTES ARMADURA		
Delta yankee up	2,0	2,0	Yankee	12,493	12,493	Yankee	735,000	735,0
Delta yankee down	2,0	2,0	Prensa succión	4,060	4,142	Prensa succión	620,000	620,0
Delta reel up	2,0	2,0	Prensa ciega	2,850	2,460	Prensa ciega	325,000	325,0
Delta fan pump up	1,0	12,0	Malla	2,610	2,610	Malla	280,000	280,0
SPAN (VELOCIDAD)			Reel	4,950	4,950	Reel	65,000	65,0
Yankee	1575,0	1575,0	Fan pump	1,000	1,035	Fan pump	860,000	780,0
Prensa ciega	1500,0	2350,0	Fan pump helper	1,000	1,0	Fan pump helper	120,000	121
Malla	2185,0	2250,0	SPAN LECTURA TEMPERATURA			SPAN LECTURA CORRIENTES ENTRADA		
Prensa succión	2143,0	2150,0	Campana l. Humedo	1000,0	1004,0	Yankee	500,000	500,0
Reel	1780,0	1780,0	Campana l. seco	998,0	1000,0	Prensa succión	500,000	500,0
Fan pump	1385,0	1385,0	SPAN LECTURA PRESION			Prensa ciega	500,000	500,0
Fan pump helper	1780,0	1000,0	Vapor yankee	10,0	10	Malla	500,000	500,0
CORRIENTE PRENSA CIEGA			Presión Dif. Yankee	2,0	2,0	Reel	100,000	100,0
Factor	18,0	13,8	Temp. Condensado	400,0	400	Fan pump	750,000	750,0
Span	250,0	250,0	SP Vapor Flash	90,0	90	Fan pump helper	500,000	500,0
Temperatura quemadores			Histérisi SP V Flash	5,0	5	SPAN CONTROL DE CAMPANAS		
Temp. Disparo Quem. LS	900,0	800	Aire general	146,0	146,0	Presión Min. Hab Camp.	2,0	2
Temp.reset Quemador LS	760,0	760	SP CORRIENTE FAN PUMP HELPER			Histérisis Min. Hab Camp.	0,5	0,5
Temp. Disparo Quem. LH	900,0	800	Punto 1 master - arranque	50,0	50 A	Vel. Min. Hab. Camp.	300,0	300
Temp.reset Quemador LH	760,0	760	Punto 1 helper - arranque	20,0	20 %	Histérisis Min. Hab. Camp.	10,0	10
PORCENTAJES			Punto 2 - medio	350,0	350 A			
% Dif. vel yankee-prensa	5,0	5	Punto 3 - alto	450,0	450 A			
% Dif. vel prensa-malla	8,0	8	Offset limite velocidad	100,0	100 rpm			

*Nota.* Tomada del sistema SCADA WinCC MP1 C y p del R S.A., se resaltan las casillas que involucran acondicionamiento del sistema Dual Drive.

Figura 39

Uso del Ajuste de las Curvas de Respuesta del Motor Helper



Nota. Elaboración Propia a partir del sistema SCADA WinCC MP1 C y p del R S.A. y las curvas de diseño sistema Dual Drive.

Esta capacidad de ajuste es clave para garantizar que el motor helper no se sobrecargue ni opere fuera del rango de sincronismo deseado, especialmente en este proceso de alta sensibilidad como la dilución de pulpa a través de la Fan Pump.

### ***Configuración del Variador de Frecuencia***

La implementación del sistema dual drive para el accionamiento de la Fan Pump requiere una configuración precisa y adaptada del variador de frecuencia Danfoss VLT FC-302, con el fin de garantizar un funcionamiento coordinado, estable y seguro entre el motor maestro de corriente directa y el motor auxiliar (helper) de corriente alterna. Esta configuración se realiza tomando como base la estructura de programación definida en la Guía de programación VLT® Automation Drive FC 301/302 (Danfoss, 2024), complementada con los lineamientos técnicos establecidos en la Guía de diseño de la serie FC 300 (Danfoss, 2017).

En esta sección se describen de forma detallada los principales parámetros que deben ser configurados en el FC-302 para lograr una adecuada integración con el sistema maestro, así como las funciones específicas habilitadas para el seguimiento de referencia, limitación de torque, acondicionamiento de señales de entrada/salida y estrategias de protección ante fallos. Esta configuración se fundamenta tanto en las necesidades operativas de la planta como en los criterios técnicos establecidos durante el diseño del sistema dual drive y se describe teniendo en cuenta la funcionalidad en la implementación del sistema dual drive en la fan pump.

**Principio de Control del Motor.** El FC 302 es un convertidor de frecuencia de alto rendimiento para aplicaciones exigentes y puede manejar varias clases de principios de control de motor, tales como el modo especial de motor U/f, VVCplus o control del motor por vector de flujo. Para esta implementación se trabaja bajo el principio de control motor VVCplus, seleccionado en el parámetro 1-01 Principio control motor: [1] VVC+. El principio de control vectorial de la tensión es adecuado para la mayoría de las aplicaciones. La ventaja principal de la función VVC+ es que utiliza un modelo de motor fiable. Comparado con el control estándar de la proporción de tensión/frecuencia, el control vectorial de la tensión (VVC+) mejora la dinámica

y la estabilidad, tanto cuando se cambia la referencia de velocidad como en relación con el par de carga.

**Modo de Configuración de Control.** El convertidor de frecuencia puede controlar la velocidad o el par en el eje del motor. El ajuste del parámetro 1-00 Modo Configuración determina el tipo de control. En cuanto al control de velocidad, hay dos tipos de control de velocidad: el control de lazo abierto de velocidad, que no requiere realimentación del motor (sin sensor), y el control de PID de lazo cerrado de velocidad, que requiere una realimentación de velocidad hacia una entrada. En cuanto al par, permite el control de par de lazo cerrado con realimentación y el lazo abierto de par en modo VVC+ con ajuste de parámetros de sintonía en el grupo de parámetros 7-1\* Control de PI de par.

Para esta implementación se define en el diseño un control de velocidad en lazo abierto como control principal, limitado en torque por una referencia externa y razón por la que se ajusta el parámetro 1-00 Modo Configuración: [0] Veloc. Lazo abierto, lo que permite un control de velocidad (sin señal de realimentación del motor) con compensación de deslizamiento automática, para velocidad casi constante y carga variable.

**Selección y Datos de Motor.** FC 302 puede manejar motores síncronos de magnetización permanente (servomotores sin escobillas) así como motores de jaula de ardilla. En esta implementación se trabaja con un motor de inducción estándar y se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

**1-06 En Sentido Horario: [0] Normal.** Se utiliza para cambiar de forma sencilla el sentido de la rotación del eje sin intercambiar los cables del motor, en el ajuste seleccionado, el eje del motor gira en sentido horario cuando el convertidor de frecuencia está conectado  $U \Rightarrow U$ ;  $V \Rightarrow V$  y  $W \Rightarrow W$  al motor.

**1-10 Construcción del Motor: [0] Asíncrono.** Se utiliza para motores asíncronos.

**1-11 Modelo del Motor: [1] Std. Asynchron.** Modelo del motor predeterminado cuando la construcción del motor está seleccionada en asíncrono.

**1-18 Min. Current at No Load: 0%.** Se ajusta esto para obtener un funcionamiento más suave del motor sin carga.

**1-20 Potencia Motor [kW]: 150 kW.**

**1-22 Tensión Motor: 440 V.**

**1-23 Frecuencia Motor: 60 Hz.**

**1-24 Intensidad Motor: 238 A.**

**1-25 Veloc. Nominal Motor: 1780 RPM.**

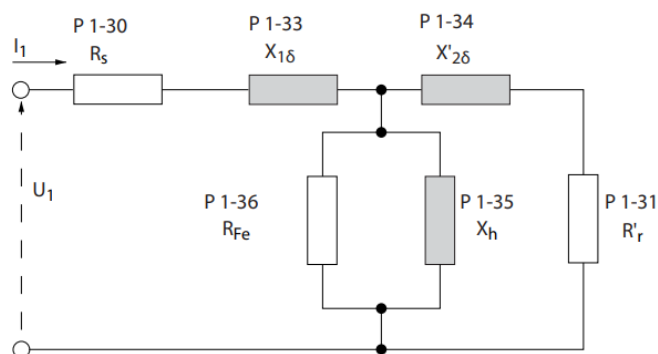
**1-29 Adaptación Automática del Motor (AMA).** La función Adaptación automática del motor (AMA por sus siglas en inglés) mejora el rendimiento dinámico del motor optimizando automáticamente los parámetros avanzados del motor grupo 1-3\*. La función AMA se activa pulsando la tecla [Hand on] después de seleccionar [1] Act. AMA completo o [2] Act. AMA reducido. Después de una secuencia normal, aparece en pantalla lo siguiente: «Pulse [OK] para finalizar AMA». Después de pulsar [OK], el convertidor de frecuencia está listo para su uso, véase Figura 40. La realización de un procedimiento AMA garantiza un rendimiento óptimo y es de vital importancia realizarlo para medir los valores a partir del diagrama equivalente del modelo de motor que utiliza el principio de control VVC+.

**Figura 40***Paso a Paso del Proceso de la Adaptación Automática de Motor AMA*

*Nota.* Elaboración propia, simulado mediante Danfoss VFD Drive LCP Simulator Tool.

Señalado con A selección de parámetro para realizar la AMA, con B la solicitud de inicio de la AMA, con C progreso de la AMA y D AMA finalizada.

**Subgrupo 1-3\* Dat Avanz. Motor:** en este grupo de parámetros se establecen los valores avanzados del motor (véase figura 41), si no se conocen, se obtienen mediante un proceso de adaptación AMA.

**Figura 41***Diagrama Equivalente del Motor para un Motor Asíncrono*

*Nota.* Tomado del manual de Programación Danfoss VLT FC 300/2 (Danfoss, 2024).

**1-30 Resistencia Estator (Rs): 0.0074 Ohm.**

**1-31 Resistencia Rotor (Rr): 0.0070 Ohm.**

**1-33 Reactancia Fuga Estátor (X1): 0.1063 Ohm.**

**1-34 Reactancia de Fuga del Rotor (X2): 0.1701 Ohm.**

**1-35 Reactancia Princ. (Xh): 4.4642 Ohm.**

**1-36 Resistencia Pérdida Hierro (Rfe): 208.975 Ohm.**

**1-39 Polos Motor: 4**

**1-47 Calibrac. de Par Baja Veloc: [0] Desactivado.**

**Ajustes de Arranque.** En el sistema *dual drive*, es fundamental una sincronización suave en el proceso de arranque de los motores para evitar perturbaciones y oscilaciones de carga que afecten el control de velocidad en la fan pump. El ajuste de los siguientes parámetros se enfoca en este objetivo:

**1-50 Magnet. Motor a Veloc. Cero: 0%.** Este parámetro se utiliza junto con el parámetro **1-51 Veloc. mín. con magn. norm. [RPM]** para obtener una carga térmica distinta en el motor cuando funciona a velocidad lenta. Se ajusta un valor que es un porcentaje de la intensidad de magnetización nominal. Si el ajuste es muy pequeño, puede reducirse el par en el eje del motor.

Este parámetro por defecto viene a 100% para garantizar el par nominal del motor a velocidad cero. Para la aplicación *dual drive* es necesario garantizar que a velocidad cero el motor helper no aporte torque a la bomba y se ajusta a 0%.

**1-51 Veloc. Mín. con Magn. Norm. [RPM]: 300 RPM.** Ajuste de la velocidad necesaria para una intensidad de magnetización normal. Se configura a 300 RPM para garantizar que hasta esta velocidad el motor helper no aporta torque a la bomba y evitar perturbaciones de carga producidas en el arranque.

**1-71 Retardo Arranque: 0.0 s.** Este parámetro hace referencia a la función de arranque seleccionada en el parámetro 1-72 Función de arranque y da el retardo de tiempo requerido antes de comenzar la aceleración.

**1-72 Función de Arranque: [2] Tiempo Inerc/ Retardo.** Selecciona la función de arranque durante el retardo de arranque. En este ajuste el motor se encuentra en inercia durante el tiempo de retardo de arranque (inversor desconectado).

**1-73 Motor en Giro: [1] Activado.** Permite al convertidor de frecuencia atrapar y controlar un motor en giro. Cuando parámetro *1-73 Motor en giro* está activo, el parámetro *1-71 Retardo arr.* y el parámetro *1-72 Función de arranque* carecen de función. Cuando esté activado el parámetro *1-73 Motor en giro*, el parámetro *1-58 Intens. imp. prueba con motor en giro* y el parámetro *1-59 Frec. imp. prueba con motor en giro* se utilizan para especificar las condiciones de la función de motor en giro. En el sistema *dual drive*, este ajuste resulta crítico en situaciones de re arranque sin que el sistema se haya detenido por completo o en arranques desincronizados entre los motores. Al activarlo, el variador del motor *helper* puede detectar la velocidad real de la bomba si se encuentra en movimiento, sincronizarse con ella antes de inyectar torque y, de esta forma, evitar perturbaciones tanto en la carga hidráulica como en la estabilidad de la velocidad del conjunto.

**1-58 Intens. Imp. Prueba con Motor en Giro: 30%.** Establece el nivel de corriente de los pulsos de prueba de motor en giro que se usan para detectar el sentido del motor.

**1-59 Frec. Imp. Prueba con Motor en Giro: 200%.** En motores asíncronos, se establece la frecuencia de los pulsos de prueba de la función de motor en giro que se usan para detectar el sentido del motor.

**1-74 Veloc. Arranque [RPM]: 0 RPM.** Tras la señal de arranque, la velocidad de salida salta al valor ajustado.

**1-76 Intensidad Arranque: 0 A.** Algunos motores (por ejemplo, de rotor cónico) necesitan intensidad o velocidad de arranque adicional para desembragar el rotor. Para obtener esta intensidad adicional, se debe ajustar la intensidad de arranque necesaria. En esta aplicación no es necesario y se ajusta a 0.

**Ajustes del Frenado Dinámico por Resistencia.** Válido para los convertidores de frecuencia con interruptor de freno. En el sistema dual drive de la fan pump, la incorporación de frenado dinámico mediante resistencia en el motor helper es esencial para optimizar la respuesta ante cambios bruscos de carga. Cuando la carga hidráulica disminuye repentinamente, el motor auxiliar tiende a acelerar por inercia, generando un exceso de energía cinética que se refleja como sobretensión en el bus de continua del variador. El módulo de frenado dinámico permite disipar rápidamente esta energía a través de la resistencia, reduciendo el tiempo de desaceleración y evitando que el motor sobrepase su referencia de velocidad. De esta manera, se mejora la estabilidad del sistema, se mantiene el par bajo control y se reduce el riesgo de oscilaciones o esfuerzos mecánicos no deseados en el acoplamiento y en la bomba. Se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

**2-10 Función de Freno: [1] Freno con Resistencia.** Esta función consiste en una resistencia de freno incorporada al sistema para disipar el exceso de energía de frenado como calor. La conexión de una resistencia de freno permite una mayor tensión de CC durante el frenado (funcionamiento de generación).

**2-11 Resistencia Freno (Ohmios): 60 Ohm.**

**2-12 Límite Potencia de Freno (kW): 90 kW.**

**2-13 Ctrol. Potencia Freno: [0] No.** No se requiere ningún control de potencia de frenado.

**2-15 Comprobación Freno: [0] No.** Controla si hay cortocircuito en la resistencia de freno y en el IGBT del freno durante su funcionamiento. Si se produce un cortocircuito, aparece *Advertencia 25 Resist. freno cortocircuitada*, sin detener el funcionamiento del sistema.

**2-16 Intensidad Máx. de Frenado de CA: 80 %.** Intensidad máxima admisible al usar el frenado de CA para evitar el recalentamiento de las bobinas del motor.

**2-17 Control de Sobretensión: [0] Desactivado.** No se requiere control de sobretensión (OVC).

**2-18 Estado Comprobación Freno: [0] Al Encender.** La comprobación del freno se efectúa en el encendido.

**2-19 Ganancia Sobretensión: 100%.**

**Ajuste de Referencia de Velocidad.** Este grupo de parámetros define el manejo de referencias del control de velocidad.

**3-00 Rango de Referencia: [0] Mín – Máx.** Selecciona el intervalo de señal de referencia y señal de realimentación. Los valores de señal pueden ser solo positivos o positivos y negativos. En la implementación del sistema dual drive, la referencia de velocidad solo se maneja en el rango positivo.

**3-01 Referencia/Unidad Realimentación: [2] RPM.** Selecciona la unidad a utilizar en las referencias de velocidad y realimentaciones del control de PID de procesos.

**3-02 Referencia Mínima: 0.000 RPM.** La referencia mínima es el valor mínimo que puede obtenerse sumando todas las referencias.

**3-03 Referencia Máxima: 2000 RPM.** La referencia máxima es el valor más alto que puede obtenerse sumando todas las referencias.

**3-04 Función de Referencia: [0] Suma.** Suma las fuentes de referencia externa e interna.

**Subgrupo 3-1\* Referencias:** ajustes para seleccionar las referencias internas.

**3-10 Referencia Interna: 0%.** Es posible programar hasta ocho referencias internas distintas (0-7) en este parámetro, utilizando una programación indexada. La referencia interna se indica en forma de porcentaje del valor RefMÁX. En la implementación del sistema dual drive no se utilizan las referencias internas y se mantienen en 0%.

**3-12 Valor de Enganche/Arriba-Abajo: 0%.** Es un valor de porcentaje (relativo) que se suma o resta a la referencia real para el enganche arriba o abajo, respectivamente, mediante una entrada digital.

**3-13 Lugar de Referencia: [0] Conex. a Manual/ Auto.** Con este ajuste se utiliza la referencia local cuando se trabaja en modo manual o la referencia remota cuando se trabaja en modo automático.

**3-14 Referencia Interna Relativa: 0.00%.**

**3-15 Recurso de Referencia 1: [2] Entrada Analógica 54.** Selecciona la entrada de referencia que se utiliza para la primera señal de referencia. En la implementación del sistema dual drive, esta entrada toma la referencia proveniente del PLC administrada por el SCADA según la curva de diseño para el límite de velocidad.

**3-16 Recurso de Referencia 2: [0] Sin Función.** Selecciona la entrada de referencia que se utiliza para la segunda señal de referencia.

**3-17 Recurso de Referencia 3: [0] Sin Función.** Selecciona la entrada de referencia que se utiliza para la tercera señal de referencia.

**3-18 Recurso Refer. Escalado Relativo: [0] Sin Función.**

**3-19 Velocidad Fija [RPM]: 150 RPM.** Valor para la velocidad fija. El convertidor de frecuencia funciona a esta velocidad cuando la función de velocidad fija (JOG) está activada.

**Ajuste de Rampas.** Se definen el tipo y los tiempos de rampa de aceleración y desaceleración.

**3-40 Rampa 1 Tipo: [0] Lineal.** Una rampa lineal proporciona una aceleración constante durante la rampa.

**3-41 Rampa 1 Tiempo Acel. Rampa: 30 s.** Define el tiempo de aceleración de rampa, es decir, el tiempo de aceleración desde 0 r/min hasta la velocidad del motor síncrona (nominal).

**3-42 Rampa 1 Tiempo Desacel. Rampa: 30 s.** El tiempo de deceleración de rampa, es decir, el tiempo de desaceleración desde la velocidad de motor síncrona hasta 0 r/min.

Los tiempos de rampas de aceleración y desaceleración se ajustan de tal manera que no generen sobrecorrecciones ni retardos en la sincronización del sistema dual drive en la fan pump.

**Ajustes de Límites y Advertencias de Motor.** Define los límites de par, corriente y velocidad para el motor y la reacción del convertidor de frecuencia cuando se sobrepasen los límites. Un límite puede generar un mensaje en la pantalla. Una advertencia genera siempre un mensaje en pantalla o en el bus de campo. Una función de control puede iniciar una advertencia o una desconexión, a partir de la cual el convertidor de frecuencia se para y genera un mensaje de alarma. En este grupo de parámetros se realizan los ajustes necesarios para lograr un control del límite de torque aplicado por el motor helper en función de la carga del motor maestro.

**4-10 Dirección Veloc. Motor: [0] Izqda. a Dcha.** La referencia se ajusta a la rotación en sentido horario.

**4-11 Límite Bajo Veloc. Motor [RPM]: 0 RPM.** Límite mínimo para la velocidad del motor.

**4-13 Límite Alto Veloc. Motor [RPM]: 2000 RPM.** Límite máximo para la velocidad del motor.

**4-16 Modo Motor Límite de Par: 100%.** Esta función limita el par en el eje para proteger la instalación mecánica. Se puede escalar mediante una entrada analógica y es clave en el desarrollo de la implementación del sistema dual drive, para limitar el torque aplicado por el motor helper según la entrada analógica 53, configurada en el parámetro 4-20. En el funcionamiento del sistema dual drive el motor intenta alcanzar la velocidad de referencia calculada por el PLC y administrada por el SCADA, que se encuentra por encima de la velocidad real del motor máster, pero al llegar al límite de torque, limita la inyección de corriente y sacrifica la corrección de velocidad adaptándose a la velocidad real del motor máster, a la vez que aplica el torque necesario en función de la carga del motor maestro. El límite de par reacciona en el par real no filtrado, incluyendo picos de par, garantizando un control efectivo en la aplicación del torque necesario.

**4-17 Modo Generador Límite de Par: 100 %.** Esta función limita el par en el eje para proteger la instalación mecánica. Este límite de par funciona cuando el motor actúa como generador en una sobrecarga.

**4-18 Límite Intensidad: 160 %.** Esta es una auténtica función de límite de intensidad que continúa en el rango sobre síncrono. Sin embargo, debido al debilitamiento del campo inductor, el par motor al límite de intensidad caerá en consecuencia cuando el incremento de la tensión se detenga por encima de la velocidad sincronizada del motor.

**4-19 Frecuencia Salida Máx: 72 Hz.** Proporciona un límite final en la frecuencia de salida para aumentar la seguridad en aplicaciones en las que se debe evitar una sobrevelocidad accidental.

**4-20 Fuente del Factor de Límite de Par: [2] Ent. Analóg. 53.** Selecciona una entrada analógica para el escalado de los ajustes en el parámetro 4-16 Modo motor límite de par y el parámetro 4-17 Modo generador límite de par desde 0 % hasta 100 % (o a la inversa). Los niveles de señal correspondientes al 0 % y al 100 % se definen en el escalado de la entrada analógica. En la implementación del sistema dual drive, se determina la entrada analógica del variador usada como referencia de torque calculado en el PLC según la carga del motor máster.

**4-21 Fuente del Factor de Límite de Velocidad: [0] Sin Función.** Seleccionar una entrada analógica para el escalado de los ajustes en el parámetro 4-19 Frecuencia salida máx. desde 0 % hasta 100 % (o a la inversa). Los niveles de señal correspondientes al 0 % y al 100 % se definen en el escalado de la entrada analógica.

**4-23 Fuente del Factor de Límite de Comprobación del Freno: [0] DC-Link Voltaje.** El convertidor de frecuencia realiza la comprobación del freno mediante un seguimiento de la tensión del enlace de CC. El convertidor de frecuencia aplica intensidad a la resistencia de freno, que reduce la tensión del enlace de CC.

**4-24 Factor de Límite de Comprobación del Freno: 98%.**

**4-50 Advert. Intens. Baja: 0 A.** Cuando la intensidad del motor cae por debajo de este límite, la pantalla indica Baja intensidad. Las salidas de señal se pueden programar para producir una señal de estado.

**4-51 Advert. Intens. Alta: 238 A.** Si la intensidad del motor supera este límite, la pantalla indica Alta intensidad. Las salidas de señal se pueden programar para producir una señal de estado.

**4-52 Advert. Veloc. Baja: 0 RPM.** Cuando la velocidad del motor supera este límite, la pantalla indica baja velocidad. Las salidas de señal se pueden programar para producir una señal de estado.

**4-53 Advert. Veloc. Alta: 2000 RPM.** Cuando la velocidad del motor supera este valor, en la pantalla se indica alta velocidad. Las salidas de señal pueden programarse para que emitan una señal de estado.

**4-54 Advertencia Referencia Baja: -999999.999.** Cuando la referencia real desciende por debajo de este límite, la pantalla indica *RefBAJA*. Las salidas de señal se pueden programar para producir una señal de estado.

**4-55 Advertencia Referencia Alta: 999999.999.** Cuando la referencia real supera este límite, la pantalla indica *Ref. Alta*. Las salidas de señal se pueden programar para producir una señal de estado.

**4-56 Advertencia Realimentación Baja: -999999.999.** Cuando la realimentación cae por debajo de este límite, la pantalla indica *RealimBAJA*. Las salidas de señal se pueden programar para producir una señal de estado.

**4-57 Advertencia Realimentación Alta: 999999.999.** Cuando la realimentación supera este límite, la pantalla indica *Realim.Alta*. Las salidas de señal se pueden programar para producir una señal de estado.

**Ajustes de Entradas y Salidas Digitales.** En este grupo de parámetros para ajustar las entradas y salidas digitales, incluyendo los controles de relé.

**5-00 Modo E/S Digital: [0] PNP.** Acción en pulsos direccionales positivos. Los sistemas PNP son descargados a GND (conexión a tierra).

**5-01 Terminal 27 Modo E/S: [0] Entrada.** Define el terminal 27 como entrada digital. Es posible definirla como entrada o salida digital.

**5-02 Terminal 29 Modo E/S: [0] Entrada.** Define el terminal 29 como entrada digital. Es posible definirla como entrada o salida digital.

**5-10 Terminal 18 Entrada Digital: [8] Arranque.** Selecciona la entrada 18 para un comando de arranque/parada. 1 lógico = arranque, 0 lógico = parada.

**5-11 Terminal 19 Entrada Digital: [0] Sin Función.** No hay reacción a las señales que llegan al terminal.

**5-12 Terminal 27 Entrada Digital: [2] Inercia.** Entrada invertida y paro por inercia (NC). El convertidor de frecuencia deja el motor en el modo libre. «0» lógico ⇒ paro por inercia.

**5-13 Terminal 29 Entrada Digital: [0] Sin Función.** No hay reacción a las señales que llegan al terminal.

**5-14 Terminal 32 Entrada Digital: [0] Sin Función.** No hay reacción a las señales que llegan al terminal.

**5-15 Terminal 33 Entrada Digital: [0] Sin Función.** No hay reacción a las señales que llegan al terminal.

**5-19 Terminal 37 Parada Segura: [1] Alarma Parada Seg.** Hace que el convertidor de frecuencia entre en modo de inercia cuando se activa la Safe Torque Off. Reinicio manual desde el LCP, entrada digital o bus de campo.

**5-40 Relé 1 de Función: [9] Alarma.** Una alarma activa la salida.

**5-40 Relé 2 de Función: [21] Advertencia Térmica.** La advertencia térmica se activa cuando la temperatura sobrepasa el límite en el motor, en el convertidor de frecuencia, en la resistencia de freno o en el termistor.

**5-41 Retardo Conex, Relé 1: 0.01 s.** Retardo del tiempo de conexión del relé.

**5-41 Retardo Conex, Relé 2: 0.01 s.** Retardo del tiempo de conexión del relé.

**5-42 Retardo Desconex, Relé 1: 0.01 s.** Retardo del tiempo de corte del relé.

**5-42 Retardo Desconex, Relé 2: 0.01 s.** Retardo del tiempo de corte del relé.

**Ajuste de Entradas y Salidas Analógicas.** Este grupo de parámetros sirve para ajustar entradas y salidas analógicas.

En el FC-302 las entradas analógicas pueden asignarse a cualquier entrada de tensión (de 0 a  $\pm 10$  V) o de intensidad (de 0/4-20 mA) según los switches correspondientes S201 y S202. Y se ajustan según los siguientes parámetros:

**6-00 Tiempo Límite Cero Activo: 10 s.**

**6-01 Función Cero Activo: [0] No.**

La entrada analógica 53 se configura en mA mediante el switch S201 ajustado en ON.

**6-12 Terminal 53 Escala Baja mA: 4 mA.** Esta señal corresponde al valor de límite bajo de torque 0%.

**6-13 Terminal 53 Escala Alta mA: 20 mA.** Esta señal corresponde al valor límite de torque ajustado en el parámetro 4-16 Modo motor límite de par 100%.

**6-16 Terminal 53 Tiempo Filtro Constante: 0.001 s.** Se trata de una constante del tiempo de filtro de paso bajo digital de primer nivel para suprimir el ruido eléctrico en el terminal 53. Un valor alto mejorará la amortiguación, pero también aumentará el retardo del filtro.

La entrada analógica 54 se configura en mA mediante el switch S202 ajustado en ON.

**6-22 Terminal 54 Escala Baja mA: 4 mA.** Esta señal de referencia debe corresponder al valor de referencia mínimo, ajustado en el parámetro 3-02 Referencia mínima 0 RPM.

**6-23 Terminal 54 Escala Alta mA: 20 mA.** Valor de intensidad alta que corresponde al valor alto de referencia 2000 RPM.

**6-24 Term. 54 Valor Bajo Ref./Realim: 0 RPM.** Valor de escalado de entrada analógica correspondiente al valor de realimentación de referencia mínimo ajustado en el parámetro 3-02 Referencia mínima.

**6-25 Term. 54 Valor Alto Ref./Realim: 2000 RPM.** Valor de escalado de la entrada analógica que corresponde al valor de referencia máximo ajustado en el parámetro 3-03 Referencia máxima.

Configuración de la salida analógica terminal 42:

**6-26 Terminal 54 Tiempo Filtro Constante: 0.001 s.**

**6-50 Terminal 42 Salida: [133] Int. Motor 4-20 mA.** El valor se toma del parámetro 16-37 Máx. Int. Inv. La intensidad máxima del inversor (160 % de intensidad) es igual a 20 mA.

**6-51 Terminal 42 Salida Esc. Mín: 0%.**

**6-52 Terminal 42 Salida Esc. Máx: 200%.**

**6-55 Terminal 42 Filtro de Salida: [0] No. Filtro desactivado.**

**Ajustes de visualización en el display del mando local LCP.** Subgrupo 0-0\* Ajustes básicos.

**0-01 Idioma: [4] Español.**

**0-02 Unidad de Velocidad de Motor: [0] RPM.** Se selecciona para mostrar las variables y parámetros de velocidad del motor en función de la velocidad del motor (r/min).

**0-03 Ajustes Regionales: [0] Internacional.** Activa parámetros de configuración del motor para ajuste de la potencia del motor en kW.

**0-04 Estado Operación en Arranque (Manual): [1] Par. Forz., Ref. Guard.** Tras una pérdida de tensión, se reinicia el convertidor de frecuencia con una referencia local guardada, después de restablecerse la tensión de red y tras pulsar [Hand On] véase Figura 42.

**Figura 42**

*Display y Teclado del LCP Drive FC-302*



*Nota.* Imagen de referencia para ubicar los botones y estructura de parámetros. Tomada del Simulador Danfoss VFD Drive LCP Simulator Tool.

**Subgrupo 0-2\* Display LCP.** Parámetros que definen las variables mostradas en el display LCP.

**0-20 Línea de Pantalla Pequeña 1.1: [1613] Frecuencia.** Se muestra la frecuencia del motor, es decir, la frecuencia de salida del convertidor de frecuencia en Hz.

**0-21 Línea de Pantalla Pequeña 1.2: [1614] Intensidad motor.** Se muestra la corriente de fase del motor medida como valor efectivo.

**0-22 Línea de Pantalla Pequeña 1.3: [1662] Entrada analógica 53.** Se muestra el valor real en la entrada 53 como referencia o valor de protección.

**0-23 Línea de Pantalla Grande 2: [1616] Par [Nm].** Se muestra el par real del motor en Nm.

**0-24 Línea de Pantalla Grande 3: [1601] Referencia [Unidad].** Se muestra la Referencia total (la suma de las ref. digital, analógica, interna, de bus, mantenida y de enganche arriba y abajo) en la unidad seleccionada.

### Figura 43

*Visualización de Variables en el Display LCP*



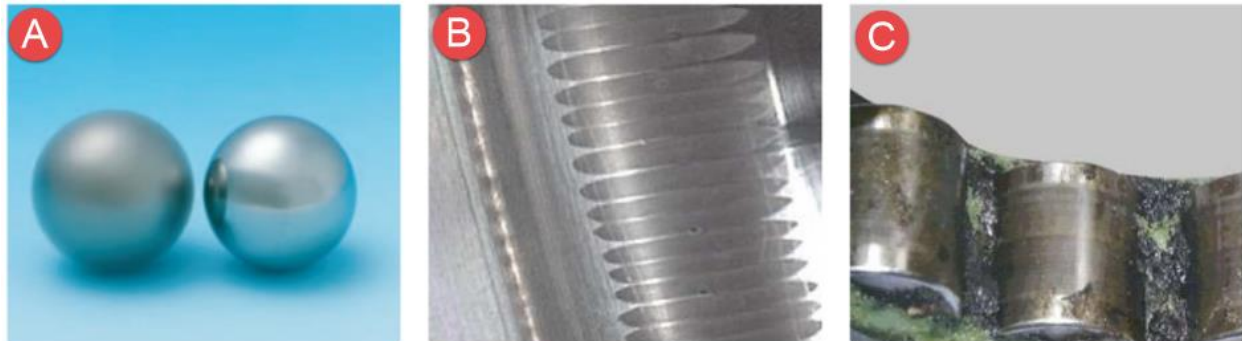
*Nota.* Imagen generada en simulador para mejor visualización, con las variables mostradas en el drive implementado en el sistema dual Drive.

Los parámetros expuestos tienen influencia directa en el funcionamiento de sistema dual drive de la fan pump. Para ver la configuración completa del variador de frecuencia ver el Apéndice D.

### ***Implementación en el Motor Helper de la Fan Pump***

El motor de inducción se selecciona basado en las necesidades de potencia calculadas en el proceso de diseño juiciosamente llevado a cabo; sin embargo, teniendo en cuenta conceptos técnicos de instalación de motores con variación de frecuencia, se deben realizar implementaciones que garanticen el correcto funcionamiento y alargamiento de la vida útil del motor.

La modulación de alta frecuencia en los variadores AC puede generar corrientes parásitas en el motor eléctrico que pasan por los rodamientos para llegar a tierra, especialmente en los motores de alta potencia. Según el manual de rodamientos aislados eléctricamente de SKF (SKF, 2008), cuando una corriente eléctrica pasa por un rodamiento, puede provocar microcráteres en los caminos de rodadura de los aros interior y exterior y en las superficies de los elementos rodantes (véase Figura 44). El calor que generan las descargas funde los componentes metálicos localmente, creando pequeños cráteres y cambios en la estructura del metal. A consecuencia de este daño inicial, pueden aparecer ondulaciones en caminos de rodadura y elementos rodantes (véase Figura 44). Este daño secundario es el desgaste provocado por el efecto dinámico de los elementos rodantes al rodar sobre los pequeños cráteres. Las descargas eléctricas también cambian la composición del lubricante, que se degrada más rápido y falla prematuramente. Una vez iniciado el daño por la erosión eléctrica, el aumento de ruido, la menor eficacia del lubricante, el aumento de calor y finalmente una vibración excesiva contribuyen a reducir considerablemente la vida útil del rodamiento.

**Figura 44***Daños en Rodamientos Provocados por Corrientes Parasitas*

*Nota.* Tomado del manual de rodamientos aislados eléctricamente de SKF (2008). Marcado con A daños en bolas rodantes, C daños en caminos de rodadura y D daños en rodillos.

**Figura 45***Rodamientos Aislados Eléctricamente*

*Nota.* Tomado del manual de rodamientos aislados eléctricamente de SKF, (SKF, 2008).

Para evitar este problema en uno de los cojinetes de los rodamientos se debe instalar un rodamiento aislado eléctricamente, comúnmente en el lado del ventilador que no está sometido directamente a la carga mecánica. En el caso del motor helper se cambia el rodamiento trasero 6319 C3, por un rodamiento aislado SKF con tecnología INSOCOAT de las mismas características, con el fin de garantizar el bloqueo de paso de las corrientes parásitas a través de los rodamientos.

## **Montaje de Equipos y Puesta en Marcha del Sistema Dual Drive**

### ***Montaje de Equipos***

El montaje de los equipos seleccionados del sistema Dual Drive para la fan pump se realiza conforme a los planos eléctricos definidos en la fase de diseño, garantizando el cumplimiento de las especificaciones técnicas y de seguridad industrial aplicables.

En este proceso se ejecutan las siguientes actividades principales como la Instalación de protecciones eléctricas de despacho e intermedia para el circuito de potencia, que aseguran la correcta coordinación entre las etapas de protección contra sobrecorriente por cortocircuito.

### **Figura 46**

*Instalación de la Protección de Despacho Acometida Accionamiento Motor Fan Pump Helper*



*Nota.* Tomada en MP1 planta C y P del R.S.A.

**Figura 47**

*Instalación de la Protección Intermedia Acometida Accionamiento Motor Fan Pump Helper*



*Nota.* Tomada en MP1 planta C y P del R S.A.

La instalación del gabinete eléctrico del accionamiento del motor de la fan pump helper, de características metálico de grado de protección IP54, diseñado para alojar los elementos de potencia (portafusibles, contactor principal y variador de frecuencia) y control (elementos de maniobra, transformador de control, protecciones y borneras). La disposición interna de los equipos fue seleccionada para optimizar la disipación térmica y facilitar el acceso durante labores de mantenimiento preventivo y correctivo. El cableado se organizó en canaletas internas con separación física entre líneas de potencia y señales de control para minimizar interferencias electromagnéticas, véase Figura 48.

**Figura 48***Montaje del Gabinete Eléctrico*

*Nota.* Tomada en MP1 planta C y P del R S.A.

El Montaje de la resistencia de frenado, en un punto con acceso directo a flujo de aire, con el objetivo de favorecer la disipación térmica durante el proceso de frenado regenerativo del motor. Se adapta una guarda metálica protectora, diseñada para impedir la acumulación excesiva de polvo y evitar salpicaduras directas de agua, manteniendo la resistencia dentro de los parámetros de seguridad establecidos. Se verifica la correcta conexión eléctrica y la continuidad del circuito de frenado, asegurando el apriete mecánico de terminales y el aislamiento del cableado.

**Figura 49***Montaje de la Resistencia de Frenado*

*Nota.* Tomada en MP1 planta C y P del R S.A.

El Montaje del motor helper del sistema Dual Drive, acoplado al eje disponible de la fan pump destinado a esta configuración, utilizando un sistema de transmisión por bandas trapezoidales dimensionado gemelo al sistema de transmisión del motor DC Máster. Se incluye una guarda de seguridad fabricada en material metálico con ventilación adecuada, que cubre completamente el conjunto de poleas y bandas, en cumplimiento de las normativas de seguridad industrial y prevención de accidentes. Por parte del equipo mecánico de la planta, se verifica la correcta alineación de las poleas y la tensión de las bandas, asegurando un acoplamiento eficiente y sin vibraciones excesivas. También se verifican aprietes y conexiones a tierra para evitar recalentamientos y fallos prematuros en el sistema.

**Figura 50***Montaje del Motor Eléctrico*

*Nota.* Tomada en MP1 planta C y P del R S.A.

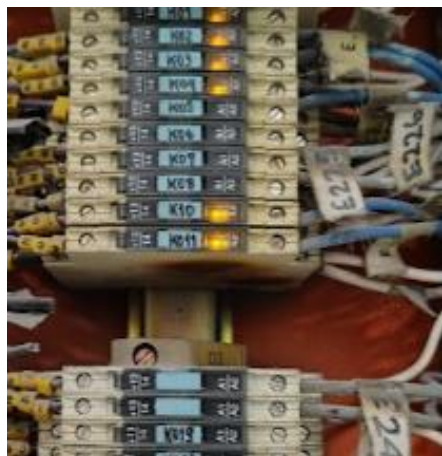
El Montaje de elementos de aislamiento galvánico de interconexión entre las líneas de señal entre el drive y el PLC, con el fin de proteger los equipos ante posibles diferencias de potencial y garantizar la integridad de las señales de control. Los módulos se fijaron sobre riel DIN en el gabinete de la ET-200 del PLC que recolecta las señales, respetando la polaridad y asegurando la correcta conexión a tierra.

**Figura 51***Montaje de Aisladores Galvánicos Señales Analógicas Sistema Dual Drive*

*Nota.* Tomada en MP1 planta C y P del R S.A.

## Figura 52

### *Montaje de Aislamiento Galvánico Señales Digitales*



*Nota.* Tomada en MP1 planta C y P del R S.A.

### ***Puesta en Marcha del Sistema Dual Drive***

La puesta en marcha del sistema dual drive para la fan pump se realiza siguiendo un protocolo técnico que garantiza la correcta operación de los equipos y la seguridad de las personas involucradas. Esta fase comprende las siguientes actividades:

**Inspección Previa a la Energización.** Se verifica la correcta conexión de todos los conductores de potencia y control conforme a los planos eléctricos.

Se mide la resistencia de aislamiento del motor y del cableado de potencia utilizando un megóhmetro a 1000 VDC, confirmando valores superiores al mínimo recomendado por la norma IEC 60034 ( $>1 \text{ M}\Omega$ ). Es importante recalcar que estas pruebas se deben realizar con el motor desconectado del variador de frecuencia, ya que se alteran las lecturas y se pueden dañar los tiristores del circuito inversor.

Se comprueba la continuidad de las líneas de tierra, asegurando una conexión confiable entre el gabinete eléctrico, las carcasas de los motores y el sistema de puesta a tierra general de la planta.

Se revisa la polaridad y ausencia de cortocircuitos en las líneas de control mediante multímetro.

**Configuración Inicial de los Variadores de Frecuencia.** Se carga en el drive del accionamiento del motor helper los parámetros definidos en el prediseño; sin embargo, para las pruebas de arranque se opta por tener una limitación inicial de torque para seguridad en el acoplamiento mecánico del motor auxiliar (“motor helper”) y evitar golpes mecánicos o sobrecargas en la bomba en caso de problemas de sincronización inicial. Se limitó el torque máximo al 50% (parámetro 4-16 Modo motor límite de par) y la corriente máxima a la corriente nominal de placa del motor.

**Integración PLC–Drive.** Se verifica el mapeo correcto de señales digitales y analógicas entre el PLC y cada drive, a través de los aisladores galvánicos instalados, mediante simulación de señales para asegurar una comunicación confiable.

**Pruebas Funcionales sin Carga.** Con la transmisión mecánica desacoplada, se realizan arranques del drive individualmente, verificando el sentido de giro y el comportamiento de las rampas de aceleración.

**Pruebas Funcionales con Carga.** Se acopla el motor auxiliar mediante el sistema de bandas trapezoidales y se ejecutan pruebas con la bomba en operación real. Durante esta fase de puesta en marcha eléctrica y electrónica del sistema Dual Drive de la fan pump, se identifican y resuelven diversas situaciones técnicas que requieren ajustes en el variador de frecuencia, en la

instrumentación y en la integración de señales de control. A continuación, se detallan los principales hallazgos y acciones correctivas implementadas:

***Problemas de ruido en señales de control (PLC – Drive).*** Se genera inestabilidad en el control debido al ruido eléctrico en las señales analógicas 4–20 mA entre drives y PLC, provocando disparos por sobrecorriente en el variador del motor helper. La causa de este problema se encuentra en el uso inicial de aisladores galvánicos sin alimentación externa (2 hilos), muy sensibles al ruido. Y se corrige mediante la sustitución por aisladores galvánicos con alimentación externa (4 hilos) y fuente independiente, que generan su propia señal de salida de 4–20 mA. Con lo que se logra la eliminación total del problema de ruidos y una mejora significativa en la estabilidad de la comunicación de control.

***Problemas de sincronismo en el arranque del sistema dual drive.*** Durante las pruebas con ambos motores acoplados después de solucionar el problema de ruido, se detectaron oscilaciones de carga y falta de sincronización en el arranque del sistema dual drive, causadas por inyección de torque por parte del motor auxiliar antes de alcanzar sincronía con el motor principal y la velocidad de la bomba. Este problema se corrige mediante el ajuste de parámetros críticos del variador para garantizar una sincronización suave y evitar perturbaciones mostrados a continuación:

*1-50 Magnet. motor a veloc. cero:* ajustado a 0% para que el motor auxiliar no aporte torque en reposo.

*1-51 Veloc. mín. con magn. norm.:* ajustada a 300 RPM para evitar aporte de torque hasta alcanzar esta velocidad.

*1-73 Motor en giro:* activado para permitir al variador detectar la velocidad real de la bomba y sincronizarse antes de inyectar torque.

*1-58 Intensidad imp. prueba con motor en giro:* 30% para detección eficiente del sentido de giro.

*1-59 Frecuencia imp. prueba con motor en giro:* 200% para mejorar la respuesta en sincronización.

Resultado: Se logra un arranque suave y sincronizado, incrementando progresivamente el torque límite del 50% al 100%, con pruebas satisfactorias de arranque.

***Problemas de Sobretensión en el Circuito Intermedio.*** Con el sistema inicialmente montado sin resistencia de frenado, las rampas de desaceleración entre ambos drives no se sincronizaban y se generaba alarma en el variador del motor helper por sobretensión en el circuito intermedio, que puede causar desajustes y posibles esfuerzos en la bomba, así como en el accionamiento DC del motor máster. Esto se debe a que la energía regenerativa no es disipada de forma controlada, afectando la dinámica de aceleración y desaceleración. Para la corrección de este problema se opta por la instalación de resistencia de frenado y configuración de la función de frenado dinámico en el drive del motor helper, lo que permite paradas controladas, sincronizadas y libres de oscilaciones fuertes.

Las acciones implementadas permitieron optimizar el arranque, operación y parada del sistema Dual Drive, garantizando la sincronización de los motores, la protección de los equipos mecánicos, la estabilidad de las señales de control y la seguridad de la operación. Las soluciones aplicadas no sólo resolvieron los problemas detectados, sino que establecieron configuraciones y prácticas recomendadas para futuros trabajos de este tipo en la planta.

### **Análisis y Evaluación de la Implementación del Sistema Dual Drive**

La implementación del sistema Dual Drive en la fan pump representa una mejora significativa en la arquitectura de accionamiento, orientada a optimizar el desempeño hidráulico

de la fan pump y la confiabilidad de operación de la máquina papelera. Este análisis se desarrolla bajo la metodología pretest–postest, comparando indicadores clave antes y después de la instalación para cuantificar los beneficios obtenidos. Se evalúan aspectos técnicos como capacidad de bombeo, velocidad de operación de la máquina de papel, calidad del papel, consumo energético, y el impacto en la productividad global medido en toneladas diarias. Los resultados permiten determinar el grado de cumplimiento de los objetivos planteados y así como un indicativo para estimar un retorno de la inversión.

### ***Capacidad de Bombeo de la Fan Pump***

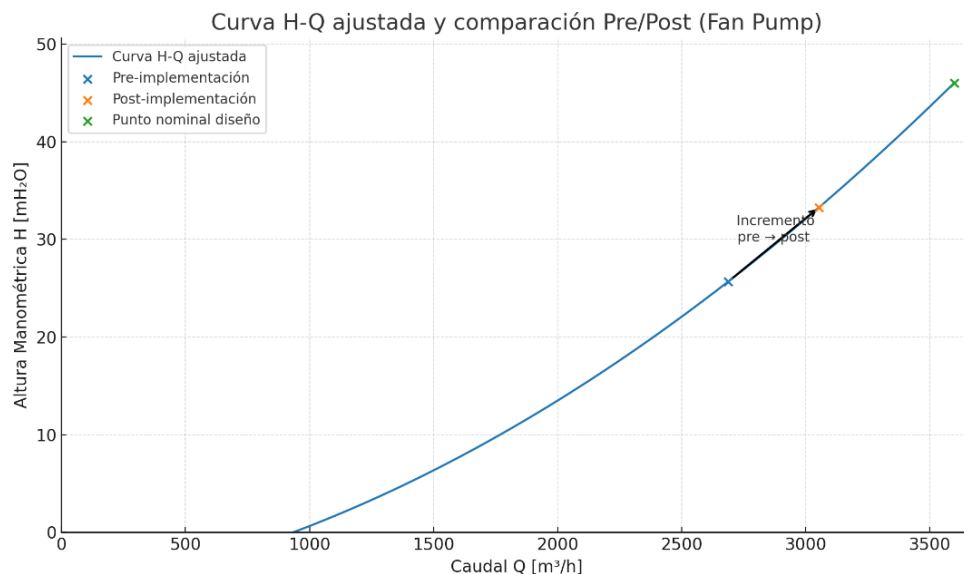
Antes de la implementación, basado en la inspección del estado del sistema, este operaba limitado por la capacidad del accionamiento del motor DC maestro y su restricción de carga, alcanzando únicamente el 55,8% de su altura manométrica nominal (25,66 mH<sub>2</sub>O frente a 46,02 mH<sub>2</sub>O nominales de la bomba), aprovechando únicamente 226,6 kW de los 563 kW de potencia nominal de la bomba, equivalentes al 40,25% de la capacidad máxima.

El diseño basado en los requerimientos de la máquina de papel para trabajar a 1200 m/min, implementado sobre el sistema Dual Drive, hace posible suministrar potencia adicional al eje, elevando la carga hidráulica disponible y logrando un incremento de la altura manométrica hasta 33,27 mH<sub>2</sub>O, equivalente al 72,3 % de la capacidad máxima de la bomba (+29,7 % respecto a la condición inicial).

La potencia hidráulica requerida también se incrementó de 226,6 kW a 344 kW, equivalente al 61,1 % de la potencia nominal de la bomba (+51,8 % respecto a la condición inicial), lo cual confirma que el aporte energético adicional del motor helper permite acercar la bomba a su curva de diseño (véase Figura 53), sin sobrecargar el accionamiento del motor principal ni someter a la bomba a la zona de trabajo crítico.

**Figura 53**

*Desplazamiento del Punto de Trabajo en una Aproximación de la Curva H-Q de la Bomba*



*Nota.* Elaboración propia a partir de las leyes de afinidad con los datos de la placa de la bomba Fan Pump.

En síntesis, la inspección mecánica de la bomba confirma que el estado hidráulico y mecánico es adecuado para soportar la operación en los nuevos puntos de trabajo. El ajuste del control del variador del motor helper y la sincronización en el arranque garantizan que este aumento de capacidad se logra de forma estable, sin golpes hidráulicos ni fluctuaciones de presión que puedan afectar al sistema de formación. Logrando que, a nivel del proceso, la presión al interior de la caja de formación, que depende directamente de la presión de cabeza de la fan pump, se pudiera aumentar, en la figura 54 se muestra en el sistema QCS un incremento tanto en la velocidad de la máquina como en la presión del head box, evidenciando el adecuado aporte de potencia hidráulica del sistema dual drive.

## Figura 54

*Registro de Velocidad de Máquina y Presión del Head Box Pretest y Postest de la Implementación*

Level 1 Controls			
	MV	SP	Mode
Ctrl Flujo Pasta	744.1	744.1	Man
Ctrl Presion Vapor Yar	7.0	7.0	Auto
Ctrl Temp Lado Hume	603.6	600.0	Auto
Ctrl Tempo Lado Seco	619.5	620.0	Auto
Ctrl Cabeza Total	10.2	10.2	E1
Ctrl Velocidad Maquina	1030.2	1030.0	Auto
Ctrl Velocidad Reel	876.4	875.6	E1

Level 1 Controls			
	MV	SP	Mode
Ctrl Flujo Pasta	866.9	866.4	E1
Ctrl Presion Vapor Yar	6.6	6.7	Auto
Ctrl Temp Lado Hume	747.5	750.0	Auto
Ctrl Tempo Lado Seco	742.3	740.0	Auto
Ctrl Cabeza Total	12.9	12.9	E1
Ctrl Velocidad Maquina	1100.2	1100.0	E1
Ctrl Velocidad Reel	926.8	926.3	E1

*Nota.* Tomadas de la pantalla de operación del sistema QCS MP1, planta C y P de R S.A.

Marcados con A datos pretest y con B datos postest.

Este incremento en la capacidad de bombeo constituye la base para cumplir con los objetivos de aumento de la velocidad de la máquina y del potencial de producción, asegurando al mismo tiempo que las presiones y caudales en la caja de formación se mantengan estables dentro de los rangos de control del proceso.

### ***Velocidad de Operación de la Máquina para Papel N°1***

Antes de la implementación, la máquina operaba en una condición crítica cuando la carga en el motor DC de la fan pump se acercaba al límite de corriente que puede manejar el accionamiento DC. Esta limitación permitía una corriente máxima de 500 A y se generaban perturbaciones en el chorro tela y en la calidad de la producción aproximadamente a 1050 m/min de velocidad de máquina. En la figura 55, como evidencia de registro pretest, se tienen las indicaciones del estado de los principales motores de la máquina en operación cerca del límite crítico con los siguientes valores:

- Velocidad operativa de la máquina en 1045 m/min.

- Motor Fan Pump (único / máster) operativo a 1514 RPM con corriente de 491 A, evitando el límite de carga y el riesgo de perturbaciones en la formación de la hoja.

### Figura 55

*Registro de Evidencia Pretest de la Velocidad en Máquina para Papel 1*

MOTOR	REEL	YANKEE	PRENSA S.	PRENSA C.	MALLA	FAN PUMP
VELOCIDAD m/min	891	1045	1046	0	1046	1514
CORRIENTE ARMADURA DC	24	211	124	0	166	491

*Nota.* Tomada de la HMI de operación de sistema SCADA MP1 planta C y P del R S.A.

Mediante la implementación del sistema dual drive en la fan pump se logran importantes alcances en el aumento de la velocidad de la máquina para papel 1, registrados como evidencia postest en la figura 56.

### Figura 56

*Registro de Evidencia Postest de la Velocidad en Máquina para Papel 1*

MOTOR	REEL	YANKEE	PRENSA S.	PRENSA C.	MALLA	FAN PUMP	F.P.HELP
VELOCIDAD m/min	903	1160	1160	0	1159	1678	1678
CORRIENTE ARMADURA DC	27	378	135	0	228	410	151

*Nota.* Tomada de la HMI de operación de sistema SCADA MP1 planta C y P del R S.A.

En este registro podemos detallar variables de interés como:

Una velocidad operativa de la máquina de 1160 m/min.

Los motores de la fan pump (master + helper) operando a 1678 RPM con corrientes en el motor *Master* de 410 A y en el motor *Helper* de 151 A.

En la Figura 57, en el mismo punto de operación posttest de la máquina, se evidencia, según el registro del display LCP del variador Danfoss FC-302 instalado, que el motor helper aporta un 68% del par nominal, equivalente a 150 A (corriente de placa 238 A). Con una referencia de velocidad según lo establecido por la curva, por encima de la velocidad real del motor maestro 1778 RPM, y trabajando alrededor de 57 Hz sincronizado con la velocidad del motor maestro (alrededor de los 1680 rpm).

### Figura 57

*Registro de Evidencia Posttest, Variables de Funcionamiento del Variador de Frecuencia del Motor Helper*



*Nota.* Toma del display LCP del Drive FC302 Fan Pump Helper MP1 planta C y P del R.S.A.

A partir de los datos evaluados, se observa mediante comparaciones cuantitativas (pre → post) en cuanto a la velocidad de la máquina lo siguiente:

- Pre: 1045 m/min → Post: 1160 m/min

- Incremento absoluto: 115 m/min
- Incremento relativo:  $115/1045 \approx 11\%$

En cuanto a la velocidad de la fan pump:

- Pre (motor DC): 1514 RPM → Post (motores DC master + AC helper): 1678

RPM (con ambos motores sincronizados).

- Evidenciando un aumento de RPM disponible para la bomba, que permite un mayor caudal y presión acordes al H–Q analizado previamente.

En cuanto a corriente y reparto de carga:

- Pre: máster = 491 A (single drive, próximo al límite de 512 A).
- Post: master = 410 A, helper = 151 A → Corriente total = 561 A.
- El cambio en la corriente del motor maestro es de 491 A a 410 A (equivalente a –16,5 % de carga en el motor maestro reflejado en la corriente de trabajo).
- La corriente del motor *helper* representa el 26,9% de la corriente total en postest consumida por ambos motores.

Con este análisis se establece en resumen que se logra pasar de 1045 m/min a 1160 m/min, lo que representa un aumento del 11 %, proporcionando una mayor capacidad hidráulica para suministrar el caudal y la presión en la fan pump requeridos para estabilizar el chorro–tela a velocidades incluso superiores a 1160 m/min, que sin embargo, debido a limitaciones propias de la edad de la máquina y de otros sistemas auxiliares (no abordados en este proyecto), no fue posible incrementar más la velocidad global de producción.

En cuanto al reparto de carga, el motor *helper* asume una fracción significativa del par total, descargando al *máster* y evitando que opere en el límite de corriente, eliminando las inestabilidades previas y el riesgo de daños prematuros en el accionamiento DC al trabajar en su

límite de diseño. Ahora el sistema demanda mayor corriente total (561 A), coherente con la mayor potencia hidráulica entregada, pero con una distribución de carga más equilibrada acorde a las necesidades del proceso y con un control de chorro-tela estable.

### ***Productividad y Calidad***

El fin principal de esta implementación es incrementar la producción diaria de la máquina manteniendo los estándares de calidad establecidos para el papel *tissue* fabricado, garantizando que el aumento de velocidad no comprometa parámetros críticos de resistencia, suavidad y formación. En función de este objetivo se tienen las siguientes observaciones:

En cuanto a la calidad del producto durante el periodo de evaluación posimplementación, se mantienen los parámetros de calidad en rangos aceptables de acuerdo con los estándares de la planta para papel *tissue*, incluyendo:

*Resistencia a la tracción (MD y CD)*, según especificaciones mínimas de la planta, la resistencia en sentido máquina longitudinal (MD Machine Direction) entre 440 y 500 gf/50 mm. Y la resistencia en el sentido contra máquina transversal (CD Cross Direction) entre 240 y 290 gf/50 mm.

*Alargamiento*, dentro del rango de deformación controlada para el confort del usuario final entre 15 y 17 %.

*Peso base*, mantenido en 13 g/m<sup>2</sup> con tolerancia máxima  $\pm 0,2$  g/m<sup>2</sup>.

*Calibre*, entre 0,068 y 0,074 mm.

*Contenido de humedad final*, ajustado a los límites definidos para conversión y empaque puede variar entre un 4 y 6 %.

*Absorbencia (S)*, entre 15,5 y 18,5 también llamada capacidad de absorción específica *S*.

$$S = \frac{g \text{ de agua absorbida}}{g \text{ de papel seco}}$$

Además, un control estable del *chorro-tela*, facilitado por el sistema Dual Drive, evita variaciones bruscas, garantizando una formación uniforme incluso a velocidades superiores.

En cuanto a la productividad diaria, se estima el cálculo pretest y postest teniendo en cuenta el producto que exige mayor capacidad de bombeo con las siguientes características:

Producto: *Papel Higiénico Blanco (fibra reciclada)*.

Peso Base: *13 GSM (gramos/metro cuadrado)*.

Ancho de hoja: *2,64 m*.

**Productividad inicial (Pretest).** El Área producida por minuto se obtiene de multiplicar la velocidad de producción lineal por el ancho de la hoja, según la Ecuación 5.1.

$$\frac{Area}{min} = V * Ancho \quad (5.1)$$

Reemplazamos,

$$\frac{Area}{min} = 1045 \frac{m}{min} * 2,64 m = 2758,8 m^2/min$$

La masa producida por minuto se obtiene de multiplicar el área por minuto por el peso base de la hoja, (ecuación 5.2).

$$\frac{Masa}{min} = \frac{Area}{min} * P_B \quad (5.2)$$

Reemplazamos,

$$\frac{Masa}{min} = 2758,8 \frac{m^2}{min} * 13 \frac{g}{m^2} = 35864,4 \frac{g}{min} = 35,86 \frac{kg}{min}$$

La producción diaria en toneladas se obtiene de

$$\frac{t}{dia} = 35,86 \frac{kg}{min} * 60 \frac{min}{h} * 24 \frac{h}{dia} = 51644,736 \frac{kg}{dia} = 51,65 \frac{t}{dia}$$

**Productividad final (postest).** Siguiendo el mismo proceso se obtiene, el área producida por minuto:

$$\frac{Area}{min} = 1160 \frac{m}{min} * 2,64 m = 3062,4 m^2/min$$

La masa producida por minuto:

$$\frac{Masa}{min} = 3062,4 \frac{m^2}{min} * 13 \frac{g}{m^2} = 39811,2 \frac{g}{min} = 39,81 \frac{kg}{min}$$

La producción diaria en toneladas:

$$\frac{t}{dia} = 39,81 \frac{kg}{min} * 60 \frac{min}{h} * 24 \frac{h}{dia} = 57328128 \frac{kg}{dia} = 57,33 \frac{t}{dia}$$

Realizando un análisis cuantitativo, se tiene un incremento absoluto de:

$$57,33 \frac{t}{dia} - 51,65 \frac{t}{dia} = 5,68 \frac{t}{dia}$$

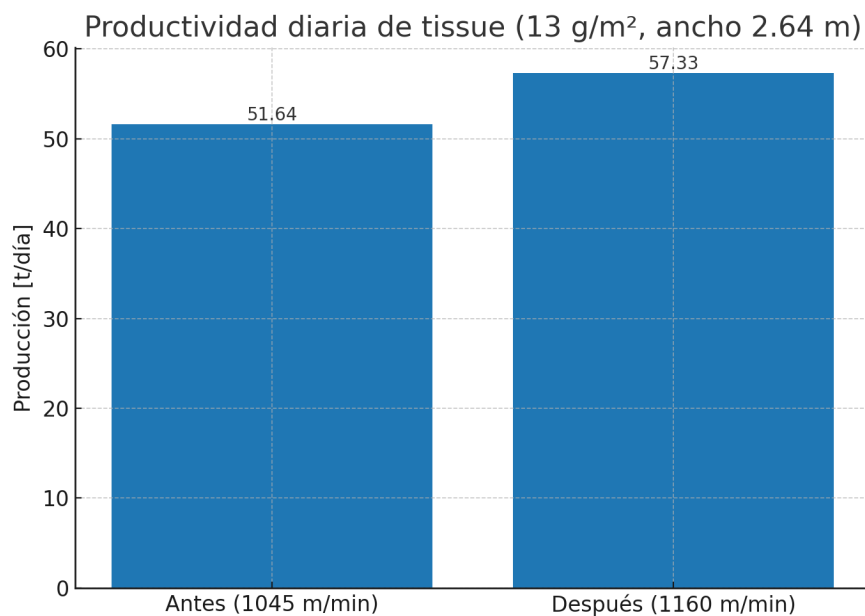
Un incremento relativo de:

$$\frac{5,68 \frac{t}{dia}}{51,65 \frac{t}{dia}} * 100 \approx 11\%$$

El aumento de la velocidad de la máquina de 1045 m/min a 1160 m/min se traduce en *un incremento del 11,0 % en la producción diaria*, manteniendo la calidad del producto en los parámetros definidos por la planta. Se logró una calidad preservada, pues no se detectaron desviaciones significativas en resistencia, suavidad, peso base ni uniformidad de formación, con una productividad mejorada que implicó 5,68 t adicionales de papel *tissue* por día, generando un impacto operativo consistente con el objetivo del sistema Dual Drive de liberar capacidad hidráulica y de control para operar a mayores velocidades sin comprometer la estabilidad de la hoja.

**Figura 58**

*Gráfica Comparativa Pretest Postest de Productividad Diaria (t/día)*



*Nota.* Elaboración propia relacionando el análisis pretest-postest de la productividad.

### **Consumo Energético por Tonelada Producida**

Uno de los objetivos importantes de este proyecto es mejorar la eficiencia energética en el sistema de bombeo de la fan pump de la máquina 1. Para el análisis pretest-postest de este parámetro se toman como referencia el consumo energético del sistema y la productividad, antes y después de la implementación.

**Consumo Energético Pre (Motor DC Máster Single Drive).** En el punto de operación pretest el voltaje aplicado al motor se encontró en el límite regulable por el variador de velocidad DC en 530 VDC, con una corriente de trabajo de 490 A muy cerca al límite del accionamiento (500 A), partiendo de estos datos se tiene:

Cálculo de potencia eléctrica aplicada al motor DC (Ley de Watt):

$$530 V * 490A = 259,7 kW$$

Consumo de energía diario:

$$E_{dia} = 259,7 kW * \frac{24h}{día} = 6232,8 \frac{kWh}{día}$$

Consumo específico por tonelada:

$$SEC = \frac{kWh/día}{t/día} \quad (5.3)$$

Equivalente a,

$$SEC = \frac{6232,8 \frac{kWh}{día}}{51,65 \frac{t}{día}} = 120,67 \frac{kWh}{t}$$

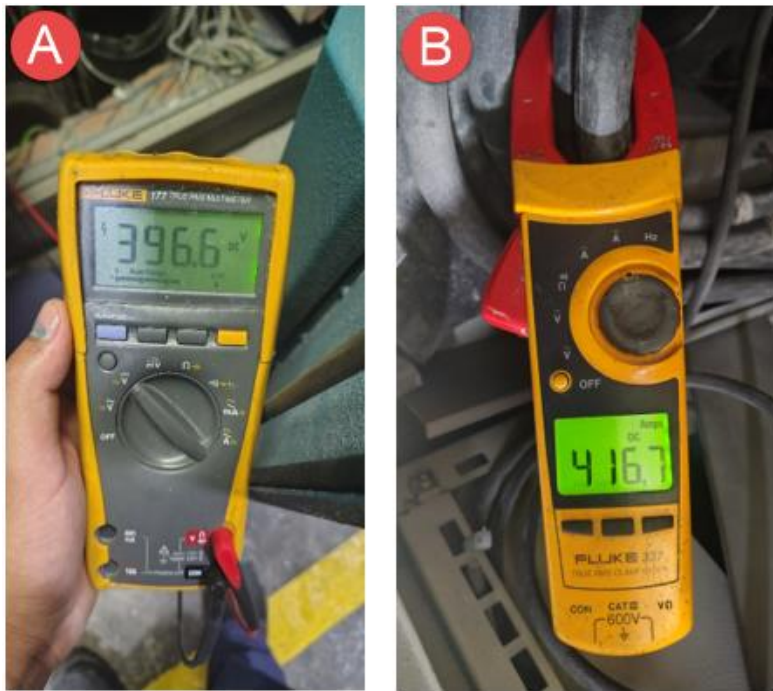
**Consumo Energético Post (Motores DC Máster y AC Helper Dual Drive).** En el caso del sistema dual drive se toman independientemente las potencias de cada motor y la productividad calculados postimplementación:

Potencia absorbida por el motor DC máster: En el punto de operación de evaluación la corriente aplicada al motor DC máster medida en campo se encontró en 416,7 A, a un voltaje de 397 VDC (véase Figura 59). Datos de los cuales se obtiene de forma directa la potencia aplicada al motor por ley de Watt:

$$P_{Mmaster} = 396,6 V * 416,7A = 165,26 kW$$

**Figura 59**

*Mediciones de Campo Motor Máster Fan Pump*



*Nota.* Tomadas en el accionamiento motor DC Fan Pump Máster MP1 planta C y P del R S.A.  
Marcado con A medición de voltaje y con B medición de corriente.

Potencia absorbida por el motor AC helper: Teniendo en cuenta la referencia del límite del torque nominal aplicado en el motor helper de un 68% (véase Figura 57), este puede relacionarse directamente con la potencia aplicada al motor.

$$P_{Mhelper} = P_{nominal} * 68\%$$

$$P_{Mhelper} = 150 \text{ kW} * 68\% = 102 \text{ kW}$$

Potencia total absorbida por el sistema dual drive (máster + helper):

$$P_{post} = 165,26 \text{ kW} + 102 \text{ kW} = 267,26 \text{ kW}$$

Consumo de energía diario:

$$E_{dia} = 267,26 \text{ kW} * \frac{24h}{día} = 6414,24 \frac{kWh}{día}$$

Consumo específico por tonelada:

$$SEC = \frac{6232,8 \frac{kWh}{día}}{57,33 \frac{t}{día}} = 111,88 \frac{kWh}{t}$$

Realizando un análisis cuantitativo, se tiene que en cuanto a la potencia absorbida total pre de 259,7 kW y post de 267,26 kW, se tiene un incremento de 7,56 kW, equivalente al 2,9 %. Pero teniendo en cuenta que la productividad de la máquina para papel aumentó en un 11%, que es mucho mayor se tiene una mejora en la eficiencia energética representada por el pre de  $120,67 \frac{kWh}{t}$  y el post de  $111,88 \frac{kWh}{t}$  que reflejan un ahorro de energía de:

$$\text{Ahorro SEC} = \frac{120,67 \frac{kWh}{t} - 111,88 \frac{kWh}{t}}{120,67 \frac{kWh}{t}} * 100 = 7,28\%$$

Es decir, se produce más con menos energía por tonelada gracias al reparto de carga y la nueva condición operativa.

En síntesis, el consumo energético por tonelada producida disminuye, aunque la potencia aplicada aumente debido a que en la condición post, la bomba y el sistema hidráulico trabajan a un punto de mayor rendimiento hidráulico que permite más caudal por solo un pequeño aumento de energía total. El reparto de par reduce el esfuerzo del máster y mejora la eficiencia global del tren de accionamiento. Además, el máster opera con menor corriente y menor VDC respecto al pretest, su potencia individual cae (259,7 kW → 165,25 kW), y se incorpora el helper con un aporte controlado (102 kW) y el balance resultante (267 kW) es cercano al anterior, pero con mayor producción.

La implantación del sistema dual drive genera un impacto práctico, ya que mejora la eficiencia energética específica (kWh/t) de la Fan Pump en la condición medida. Y reduce la carga sobre el motor máster (corriente y estrés), lo que mejora la confiabilidad y reduce el riesgo de paradas por sobrecorriente en el accionamiento del motor DC máster, evitando tiempos de parada y sobrecostos por mantenimiento.

### ***Síntesis de Resultados Pretest-Postest***

La implementación del sistema Dual Drive en la Fan Pump de la máquina de papel 1 en C y P del R S.A. constituye una mejora tecnológica que no solo incrementa la capacidad de producción, sino que también optimiza el consumo energético específico y la confiabilidad del accionamiento principal. El análisis comparativo pretest–postest demuestra de manera

consistente beneficios tanto en desempeño hidráulico como en eficiencia global del proceso (véase tabla 5).

**Tabla 5**

*Resumen de Resultados*

Indicador	Unidad	Pretest (Antes)	Postest (Después)	Variación	Observación
Capacidad de bombeo (Potencia Hidráulica)	kW	226,6 kW	344 kW	+51,8%	Este aumento hace posible incrementar la velocidad de la máquina hasta 1200 m/min con margen de seguridad.
Velocidad de operación de la máquina para papel 1	m/min	1045 m/min	1160 m/min	+11,0 %	Se logra optimizar la máquina a 1160 m/min, limitada por otros factores ajenos a este proyecto.
Productividad	t/día	$51,65 \frac{t}{dia}$	$57,33 \frac{t}{dia}$	+11,0 %	Este incremento se logra manteniendo la calidad del producto en los parámetros definidos por la planta.
Consumo energético	$\frac{kWh}{t}$	$120,67 \frac{kWh}{t}$	$111,88 \frac{kWh}{t}$	-7,28%	Se produce más con menos energía por tonelada, gracias al reparto de carga, a mejorar el punto de trabajo de la bomba y a la inyección de únicamente la potencia necesaria en el sistema.

*Nota.* La tabla resume los principales indicadores de desempeño antes y después de la implementación del sistema dual drive.

## Plan de Mejoras

### Mejora a Corto Plazo

#### *Implementación de Analizadores de Energía*

La implementación de analizadores de energía tiene como objetivo mejorar la capacidad de medición y gestión del consumo energético del sistema dual drive, permitiendo obtener datos precisos que faciliten el análisis de indicadores como consumo específico de energía (kWh/t o kWh/m<sup>3</sup>), demanda eléctrica, factor de potencia y distorsión armónica total (THD). La disponibilidad de esta información permite gestionar el sistema con base en datos confiables y evaluar con mayor precisión el desempeño energético del sistema de bombeo.

Actualmente, las mediciones realizadas durante el análisis del consumo energético se efectúan en momentos específicos de operación de la máquina, lo que permite estimar el comportamiento del sistema a partir de lecturas puntuales de voltaje y corriente. Sin embargo, el sistema dual drive no dispone de un monitoreo energético permanente y detallado, lo cual limita la obtención de datos confiables sobre el consumo real de potencia y la eficiencia operativa del sistema. Esta situación dificulta realizar una evaluación objetiva del desempeño energético e identificar oportunidades de optimización en el uso de la energía dentro del sistema de bombeo.

Como propuesta de mejora, se plantea la instalación de analizadores de energía en los circuitos de alimentación de los motores que conforman el sistema dual drive. Esta medida permitirá obtener información precisa y en tiempo real del consumo eléctrico de cada accionamiento, lo cual resulta fundamental para establecer una línea base de eficiencia energética del sistema. Los datos recopilados facilitarán la identificación de patrones de operación, la cuantificación de pérdidas energéticas y servirán como soporte técnico para futuros

procesos de optimización del sistema de control y de toma de decisiones orientados a la mejora del desempeño energético.

Desde el punto de vista técnico, la implementación inicia con una revisión de la infraestructura eléctrica existente, verificando los puntos de conexión disponibles en los tableros de control y en las acometidas de los variadores de velocidad, con el fin de identificar los lugares más adecuados para la instalación de los analizadores de energía. Posteriormente se realiza la selección de equipos que permitan la medición en tiempo real de variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia activa y reactiva, así como el factor de potencia. Estos equipos deben contar con capacidad de comunicación industrial, por ejemplo, mediante protocolos como Profibus, Ethernet/IP o Profinet, para facilitar su integración futura con el sistema SCADA de la planta.

La implementación también requiere la adquisición de los sensores y accesorios necesarios para la medición, entre los cuales se incluyen transformadores de corriente (TC), fusibles de protección, cables de señal y módulos de comunicación. Una vez disponibles los equipos, se procede a la instalación física de los analizadores dentro de los tableros eléctricos, asegurando la correcta conexión de los transformadores de corriente y la adecuada configuración de las entradas de medición. Posteriormente se realiza la configuración inicial de los equipos, programando parámetros como el rango de medición, el tipo de red eléctrica y las direcciones de comunicación necesarias para su integración con los sistemas de supervisión.

Una vez configurados los equipos, se llevan a cabo pruebas de funcionamiento con el fin de verificar la precisión de las lecturas y asegurar la correcta operación de los analizadores dentro del sistema eléctrico. De manera complementaria, se realiza la documentación técnica correspondiente, registrando los puntos de instalación, los parámetros configurados y los

esquemas de conexión en los planos eléctricos actualizados del sistema. Finalmente, se contempla una capacitación básica dirigida al personal de operación y mantenimiento, orientada a la interpretación de las variables energéticas registradas y a la identificación de posibles condiciones anormales en el consumo eléctrico del sistema.

La implementación de esta mejora permitirá contar con una identificación más precisa de los costos energéticos asociados al sistema de bombeo, además de generar una base de datos confiable que facilite el análisis del desempeño energético y el soporte para la toma de decisiones técnicas. Asimismo, la disponibilidad de información detallada sobre el consumo eléctrico permitirá en el futuro desarrollar programas de eficiencia energética orientados a optimizar el uso de la energía en el proceso productivo.

Para llevar a cabo esta implementación se requieren analizadores de energía con capacidad de comunicación industrial, personal técnico especializado para su instalación y configuración, así como tiempo para la integración de los equipos al sistema SCADA y la realización de pruebas de calibración. Se estima que el tiempo de ejecución del proceso completo, incluyendo instalación, configuración y puesta en marcha, se encuentra en un rango aproximado de dos a tres semanas.

### **Mejora a Mediano Plazo**

#### ***Migración del Sistema Drive-Motor DC a AC en el Motor Master.***

La migración del sistema drive–motor de corriente directa (DC) a un sistema de accionamiento de corriente alterna (AC) en el motor maestro se plantea como una estrategia de mejora orientada a optimizar la eficiencia energética y la confiabilidad operativa del sistema dual drive que acciona la fan pump. Esta iniciativa busca sustituir el motor maestro de tecnología DC por un sistema moderno compuesto por un motor de corriente alterna acoplado a un variador de

velocidad, con el propósito de reducir los costos de mantenimiento asociados al sistema actual y disminuir los riesgos operativos derivados de fallas en la electrónica de potencia del accionamiento existente.

Actualmente, el sistema maestro basado en tecnología DC presenta ciertas limitaciones técnicas y económicas propias de este tipo de accionamientos. Entre estas se encuentran los sobrecostos derivados del reemplazo periódico de escobillas, la vulnerabilidad de la electrónica de potencia frente a condiciones de operación exigentes y una eficiencia energética menor en comparación con soluciones modernas basadas en motores de corriente alterna. Estas condiciones incrementan la probabilidad de fallas y generan paradas no programadas del sistema, lo cual repercute directamente en el aumento de los costos de operación y mantenimiento, además de afectar la competitividad del proceso desde el punto de vista energético y tecnológico.

Como alternativa de mejora, se propone implementar un sistema de accionamiento basado en un motor de corriente alterna de alta eficiencia, controlado mediante un variador de velocidad de última generación. Esta solución elimina la necesidad de escobillas y reduce significativamente las intervenciones de mantenimiento, al tiempo que permite mejorar el rendimiento energético del sistema y aumentar la vida útil de los equipos. Adicionalmente, los sistemas de accionamiento AC ofrecen mayores capacidades de integración con plataformas modernas de automatización y monitoreo industrial, facilitando la supervisión de variables operativas, el registro de datos energéticos y la implementación de estrategias de control más avanzadas.

Desde el punto de vista técnico, la implementación de esta mejora inicia con la selección de un motor de corriente alterna cuya potencia nominal sea equivalente a la del motor maestro actual, considerando la curva de torque requerida y las condiciones de operación de la fan pump.

Posteriormente se selecciona un variador de frecuencia con capacidad de control vectorial, funciones de optimización energética y compatibilidad con los protocolos de comunicación utilizados en el sistema de automatización existente. De manera paralela, se definen los parámetros de instalación mecánica necesarios para garantizar una adecuada transición entre el sistema actual y el nuevo sistema de accionamiento, incluyendo aspectos como la alineación del eje, el tipo de acoplamiento mecánico y las condiciones de montaje del motor en la base estructural.

Una vez definidos los equipos principales, se procede a la ejecución del plan de instalación eléctrica, el cual contempla el cableado de potencia y control, la implementación de protecciones eléctricas y la adecuación de los tableros necesarios para la operación del nuevo variador de velocidad. Posteriormente se realiza la configuración inicial del variador, estableciendo parámetros como rampas de aceleración y desaceleración, límites de torque y funciones de protección del sistema. El nuevo sistema de accionamiento se integra posteriormente con el PLC, la interfaz HMI y el sistema SCADA de la planta, permitiendo la supervisión de variables operativas, el registro de alarmas y el monitoreo del consumo energético del sistema.

Finalmente se realizan pruebas de puesta en marcha bajo condiciones de operación nominal, con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del nuevo sistema y comparar indicadores de desempeño como consumo energético, estabilidad operativa y respuesta dinámica frente al sistema anterior. Como parte del proceso de implementación, también se elabora la documentación técnica correspondiente, incluyendo la actualización de planos eléctricos, parámetros de configuración y procedimientos operativos. De manera complementaria, se

desarrolla una capacitación dirigida al personal de operación y mantenimiento con el fin de asegurar el uso adecuado del nuevo sistema de accionamiento.

La implementación de esta mejora permitirá reducir los costos de mantenimiento asociados al reemplazo de escobillas y disminuir la probabilidad de fallas en la electrónica de potencia, aumentando la confiabilidad operativa del sistema. Asimismo, se espera una mejora en la eficiencia energética del proceso y una modernización tecnológica del sistema de accionamiento, alineada con las tendencias actuales de automatización industrial y con los principios de eficiencia energética y digitalización propios de la industria 4.0. Para llevar a cabo esta implementación se requiere la adquisición de un motor AC industrial acorde con las condiciones de carga de la fan pump, un variador de frecuencia de alta capacidad, servicios de ingeniería mecánica y eléctrica para el diseño e integración del sistema, así como personal técnico especializado para el montaje y puesta en marcha. El tiempo estimado de ejecución de esta mejora se encuentra en un rango aproximado de ocho a nueve meses, considerando las etapas de diseño, adquisición de equipos, instalación e integración con el sistema existente.

## Plan de Mantenimiento

Este plan combina acciones *reactivas, preventivas y predictivas*, garantizando confiabilidad, reducción de paradas no programadas y prolongación de la vida útil de los componentes críticos, del que se esperan beneficios como reducción de fallas inesperadas en el sistema dual drive, mayor vida útil de motores, variadores y componentes electrónicos, disminución de paradas no programadas de producción, optimización del consumo energético por un sistema en condiciones óptimas y seguridad eléctrica y operativa reforzada.

### Mantenimiento Correctivo (Reactivo)

Consiste en las operaciones de mantenimiento destinadas a restablecer la operación normal del sistema tras la ocurrencia de una falla, el tiempo de ejecución depende de la falla (entre 4h – 48h). Para el sistema dual drive implementado se contemplan las siguientes acciones de mantenimiento correctivo:

Sustitución de escobillas del motor maestro cuando presenten desgaste excesivo.

Cambio de escobillas de la dinamo del tacogenerador en caso de falla o pérdida de señal.

Reparación o reemplazo del colector del motor maestro ante deterioro o fisuras.

Sustitución inmediata de ventiladores dañados en variadores (AC y DC), gabinetes y ventilación forzada del motor máster.

Cambio de cables eléctricos con daño en el aislamiento o signos de recalentamiento.

Reparación del acople del tacogenerador cuando presente desgaste.

Reemplazo de rodamientos en motor o bomba tras falla mecánica.

Recuperación o reemplazo de resistencias de frenado en caso de sobrecalentamiento o falla.

Sustitución de tarjetas electrónicas de variadores o módulos de control defectuosos.

Restauración de funcionalidad en el sistema SCADA frente a fallos de software o hardware.

### ***Herramientas y Recursos***

Herramientas básicas (destornilladores, llaves, multímetro, etc.), y especializadas según el caso a intervenir.

Repuestos de emergencia (fusibles, cables, rodamientos, etc.).

Personal técnico especializado en sistemas eléctricos y mecánicos.

### ***Procedimiento de Atención***

Detección de la falla (alerta del sistema o personal en sitio).

Diagnóstico rápido para identificar el problema.

Reparación o reemplazo inmediato del componente averiado.

Pruebas funcionales para verificar que el sistema opere correctamente.

Registro de la intervención para seguimiento y análisis de fallas recurrentes.

### ***Plan de Contingencia***

En caso de daño en el sistema helper implementado, es posible arrancar con el motor máster en las condiciones originales de limitación, sin realizar modificaciones en el sistema. En el caso contrario, es posible arrancar con limitaciones severas de potencia y modificaciones en el sistema complejas a evaluar y verificar.

Se recomienda tener un stock de repuestos de los elementos consumibles tanto eléctricos como mecánicos.

## **Mantenimiento Preventivo**

Consiste en las actividades de mantenimiento programadas para prolongar la vida útil de los equipos y evitar fallas inesperadas. Para el sistema dual drive implementado se contemplan las siguientes acciones y periodicidad de mantenimiento preventivo:

### ***Gabinetes y Climatización***

Inspección y limpieza periódicas del aire acondicionado del gabinete del motor DC (semanales).

Verificación de la operación de ventiladores de disipadores y gabinetes (Semanal).

Limpieza de filtros (Semanal) y ductos de ventilación (Mensual).

### ***Conexiones y cables***

Revisión y reapriete de conexiones eléctricas (Trimestral).

Inspección visual del estado de los cables de alimentación y control (Trimestral).

### ***Máquinas rotativas***

Verificación del estado de rodamientos en motor y bomba (Trimestral).

Inspección periódica de escobillas del motor maestro y tacogenerador (Mensual).

Limpieza del colector y verificación de uniformidad en el desgaste (Mensual).

Revisión del acople del tacogenerador (Mensual).

### ***Sistemas de frenado y disipación***

Inspección y limpieza de la resistencia de frenado (Mensual).

### ***Electrónica y control***

Limpieza de gabinetes eléctricos (Mensual).

Revisión de calibración y ajuste de aisladores galvánicos analógicos (Semestral).

Verificación de alarmas, registros y actualizaciones en el sistema SCADA (Semestral).

## **Mantenimiento Predictivo**

Consiste en el uso de herramientas de diagnóstico avanzado para anticipar fallas antes de que ocurran. Para el sistema dual drive implementado se contemplan las siguientes herramientas de diagnóstico, acciones y periodicidad de mantenimiento predictivo:

### ***Cámara termográfica***

Inspección mensual de puntos calientes en conexiones eléctricas, variadores, motores y resistencias de frenado.

### ***Estetoscopio electrónico***

Detección de ruidos anómalos en rodamientos y ventiladores (Trimestral).

### ***Analizador de vibraciones***

Monitoreo de vibraciones en motor maestro, bomba y tacogenerador (Trimestral).

### ***Pinza amperimétrica y multímetro***

Medición de corrientes de operación, desbalances y sobrecargas (Mensual).

Revisión de tensiones en bornes de alimentación y control (Mensual).

### ***Osciloscopio***

Evaluación de señales analógicas de aisladores galvánicos (Trimestral).

Revisión de señales del tacogenerador y del sistema de control (Trimestral).

Revisión del tren de pulsos DC del accionamiento del motor master (Trimestral).

### ***Sistema SCADA***

Análisis de tendencias históricas como corriente, temperatura, vibraciones y alarmas (Semestral).

Verificación de actualizaciones del sistema (Semestral).

## Conclusiones

La implementación del sistema dual drive en la fan pump de la Máquina de Papel N.º 1 de la empresa C y P del R S.A. cumple de manera satisfactoria con el objetivo general de este proyecto, al optimizar el funcionamiento del sistema de bombeo y permitir un incremento comprobado en el flujo hacia el *headbox*. Este resultado se refleja en el aumento de la velocidad de operación de la máquina hasta 1160 m/min, superando la restricción previa de 1050 m/min, sin comprometer la calidad del papel *tissue* producido.

La metodología aplicada en la evaluación del estado inicial del sistema permite identificar las condiciones mecánicas, eléctricas y de control del motor de corriente continua (DC) y del variador asociado, que constituyen el insumo principal para determinar los requerimientos de implementación en el sistema de bombeo. El levantamiento de datos técnicos y operativos proporciona una línea base confiable, esencial para el diseño y la justificación del nuevo esquema de accionamiento, evidenciando que la principal restricción del sistema inicial radica en el accionamiento electrónico del motor DC, que opera en zonas cercanas a su límite de corriente, lo que restringe la capacidad de bombeo y afecta la estabilidad del proceso.

El diseño e integración del sistema dual drive, conformado por un motor auxiliar de corriente alterna (AC) sincronizado con el motor DC existente, demuestran la viabilidad técnica y operativa del concepto de control coordinado mediante el PLC y el variador de velocidad, que asegura una distribución equilibrada del torque entre ambos motores, mejorando la eficiencia del sistema y reduciendo la carga individual de cada accionamiento. La comunicación y lógica de control implementadas en el entorno SCADA garantizan además un monitoreo confiable y un desempeño estable en condiciones variables de producción.

La evaluación del desempeño posterior a la implementación confirma mejoras significativas en los indicadores de productividad, eficiencia energética y confiabilidad operativa. La capacidad de bombeo se incrementa en un 51,8 %, la productividad diaria aumenta en un 11 %, y el consumo energético específico disminuye en un 7,28 %, lo que demuestra un uso más racional de la energía al inyectar únicamente la potencia necesaria para la demanda real del proceso.

De manera general, el proyecto evidencia que la incorporación del sistema dual drive constituye una solución técnica efectiva y sostenible, capaz de ampliar el rango operativo del sistema de bombeo y mejorar el desempeño global de la máquina papelera. La metodología aplicada, basada en diagnóstico, diseño, implementación y evaluación, valida la pertinencia del enfoque de ingeniería electrónica en procesos industriales de alta demanda energética, fortaleciendo la transición hacia sistemas más eficientes, automatizados y alineados con los principios de la Industria 4.0.

### Referencias Bibliográficas

- ABB industrial drives. (2019). *ACS880 rod pump control program (option +N5250) Firmware manual*.  
[https://library.e.abb.com/public/617ed84ebd774a1e9f3dcc6fe5322f02/EN\\_ACS880\\_Rod\\_pump\\_ctrl\\_prg\\_FW\\_C\\_A4.pdf?x-sign=uLj5en27c00F6aIpdSStvg8g3ys35%2f3rneJdUCTEhrkykZbFxFxNwjIu%2fS4Z1xj7D9](https://library.e.abb.com/public/617ed84ebd774a1e9f3dcc6fe5322f02/EN_ACS880_Rod_pump_ctrl_prg_FW_C_A4.pdf?x-sign=uLj5en27c00F6aIpdSStvg8g3ys35%2f3rneJdUCTEhrkykZbFxFxNwjIu%2fS4Z1xj7D9)
- ABB. (2002). *ACS800 Master/Follower Application Guide Supplement to Firmware Manual for ACS800 Standard Application Program*.
- ANDI Asociación Nacional de Empresarios de Colombia. (2022). *Resumen Ejecutivo - Informe de Sostenibilidad 2018 - 2020 - COMPROMETIDOS CON UN FUTURO SOSTENIBLE*.  
 Cámara de la Industria de Pulpa, Papel y Cartón.  
<https://www.andi.com.co/Uploads/RE%20INFORME%20SOSTENIBILIDAD%20CA%20C%81MARA%20DIC%2022.pdf>
- Castillo Rodas, G. A. (2023). *Estudio para el reemplazo de motor de 137 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa* (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).  
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/18285/1/Gustavo%20Adolfo%20Castillo%20Rodas.pdf>
- Çengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos* (Primera Edición). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Chapman, S. J. (2003). *Electric machinery fundamentals* (Vol. 5). McGraw-Hill Education.  
[https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/20762/mod\\_resource/content/1/Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf](https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/20762/mod_resource/content/1/Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf)

Da Silva, E. (2009). *CURSO DE PREPARACIÓN DE LA PASTA*.

[https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2009\\_Curso\\_Preparacion\\_Pasta.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2009_Curso_Preparacion_Pasta.pdf)

Danfoss. (2017). *Guía de diseño VLT® AutomationDrive FC 302 90-710 kW, tamaños de alojamiento D y E*.

Danfoss. (2024). *Programming Guide VLT® AutomationDrive FC 301/FC 302*.

Fleiter, T., Fehrenbach, D., Worrell, E., & Eichhammer, W. (2012). Energy efficiency in the German pulp and paper industry—A model-based assessment of saving potentials. *Energy*, 40(1), 84-99.

ICONTEC. (2015). *NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5105*.

<https://silo.tips/download/norma-tecnica-colombiana-5105>

IEC. (2007). *IEC 60085 INTERNATIONAL STANDARD NORME INTERNATIONALE Electrical insulation-Thermal evaluation and designation Isolation électrique-Evaluation et désignation thermiques*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/2584c3d3-f618-40cc-b0fd->

IEC. (2023). *INTERNATIONAL STANDARD NORME INTERNATIONALE Adjustable speed electrical power drive systems (PDS)-Part 9-2: Ecodesign for motor systems-Energy efficiency determination and classification Entraînements électriques de puissance (PDS) à vitesse variable-Partie 9-2: Écoconception des systèmes moteurs-Détermination et classification de l'efficacité énergétique*. [www.iec.ch](http://www.iec.ch)

IEEE Power and Energy Society. (2022). *519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE. <https://ieeexplore-ieee-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9848440>

ISO. (2012). *Rotodynamic pumps-Hydraulic performance acceptance tests-Grades 1, 2 and 3*  
*COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT.*

Kapp, S., Wang, C., McNelly, M., Romeiko, X., & Choi, J. K. (2024). A comprehensive analysis of the energy, economic, and environmental impacts of industrial variable frequency drives. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140474.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.140474>

Klößner Moeller. (1986). *Manual-TPY3-2B*.  
<https://www.inverter.co.uk/applications/manuals&datasheets/Manual-TPY3-4B.pdf>

Kosow I. L., González Pozo V. tr. (1991). *Máquinas eléctricas y transformadores*. México, D.F: Prentice-Hall Hispanoamericana.

Ling, S J., Sanny, J., Moebs, W. (2021) *Física Universitaria Volumen I*. OPENSTAX  
 VERSIÓN DE TAPA BLANDA ISBN-13 978-1-711494-63-0 VERSIÓN DIGITAL ISBN-13 978-1-951693-90-9 AÑO DE PUBLICACIÓN ORIGINAL 2021.  
<https://openstax.org/details/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-1>

Munguía, J. L., y Melitón, E. (2010). *Control de la relación chorro-tela en una máquina para la fabricación de papel* [Instituto Politécnico Nacional].  
<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/8007/1/im%20203.pdf>

Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. [www.issuu.com/publicacionescepal/stacks](http://www.issuu.com/publicacionescepal/stacks)

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna Quinta Edición*. PEARSON EDUCACIÓN.  
<https://ingenierovizcaino.com/material/libros/sd/ingenieria-de-control-moderna-ogata-5ed.pdf>

- Paredes, M. T. (2020). *DISEÑO Y CONTROL DE UNA TREFILADORA*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pittman, S. (2021). Replacement of (6) 1000hp DC Drives and Motors with AC. *IEEE Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2021-June*.  
<https://doi.org/10.1109/PPIC47846.2021.9620470>
- Quispe, J. F. (2012). *ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ELECTROBOMBAS CONTROLADOS POR VARIADORES DE VELOCIDAD* [UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA].  
[https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/2973/Quispe%20Choquelahu a.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/2973/Quispe%20Choquelahu%20a.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rockwell Automation. (2013). *PowerFlex 700 AC Drives User Manual – Series A, Frames 0...6*.
- Siemens AG. (2012). *Answers for industry. SINAMICS SINAMICS G120 Convertidor de frecuencia con las Control Units CU240B-2 CU240E-2 CU240B-2 DP CU240E-2 DP CU240E-2 F CU240E-2 DP-F CU240E-2 PN CU240E-2 PN-F*.
- SKF. (2008). *Rodamientos aislados eléctricamente de SKF*.
- Sulzer Ltd. (2024). *ZPP double suction axially split single-stage centrifugal pump*.  
[https://www.sulzer.com/en/-/media/files/products/pumps/axially-split-pumps/brochures/zpp\\_double\\_suction\\_axially\\_split\\_pump\\_e00502.pdf](https://www.sulzer.com/en/-/media/files/products/pumps/axially-split-pumps/brochures/zpp_double_suction_axially_split_pump_e00502.pdf)
- Torres, A. L., & Roncero, M. B. (s/f). *CIRCUITOS DE CABEZA DE MÁQUINA*.  
[https://www.eucalyptus.com.br/artigos/02\\_RIADICYT\\_Taller\\_Parte+Humeda\\_Torres\\_2007.pdf](https://www.eucalyptus.com.br/artigos/02_RIADICYT_Taller_Parte+Humeda_Torres_2007.pdf)

Tuladhar, A. (1995). *DYNAMIC MODELLING AND CONTROL OF A PAPER MACHINE HEADBOX* [Doctoral dissertation, University of British Columbia].

<https://open.library.ubc.ca/media/download/pdf/831/1.0065140/2>

U.S. Department of Energy (2014). *Improving Motor and Drive System Performance: A Sourcebook for Industry*. Copper Development Association.

[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo\\_motors\\_sourcebook\\_web.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motors_sourcebook_web.pdf)

Verma, M., Dick, B., Phares, D., & Bondy, S. (2013). Bringing new life to high-capacity systems: Modernization of legacy adjustable-speed drives. *IEEE Industry Applications Magazine*, 19(6), 66–74. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2012.2215997>

Wildi, T. (2007). *Electrical machines, drives, and power systems*. Pearson Educación.

<https://lc.fie.umich.mx/~jorgeahb/Pagina/materias/Libro2.pdf>

## Apéndices

### Apéndice A

#### Tablas de Conversión Velocidad del JET Versus Presión de Cabeza Total

OBJECT	JET SPEED VERSUS STATIC HEAD TABLE								SHEET 1
CUSTOMER	RISARALDA								
	A480								
$H = \frac{V^2}{70608} * \left( 1 - \left( \frac{S}{A} * K \right)^2 \right) + 0.396$									
CAPTION	H – STATIC HEAD mm H2O V – SPEED JET m/min S – SLICE OPENING mm A – SECTION HEIGHT AT D/P CELL 75 mm K- CONTRACTION COEFFICIENT 0.98								
SPEED RANGE					TRANSMITTER RANGE				
MIN – 400 m/min					MIN – 2 mH2O				
MAX – 1300 m/min					MAX – 24 mH2O				
JET SPEED	HYDRAULIC HEAD BOX (FLO-SET MK II)								
(m/min)	CASSA D’AFFLUSSO IDRAULICA PER TAVOLA PIANA INCLINATA								
	S=6	S=8	S=10	S=12	S=14	S=16	S=18	S=20	S=22
400	2,65	2,64	2,62	2,61	2,59	2,56	2,54	2,51	2,47
410	2,76	2,75	2,74	2,72	2,70	2,67	2,65	2,61	2,58
420	2,88	2,87	2,85	2,83	2,81	2,79	2,76	2,72	2,69
430	3,00	2,99	2,97	2,95	2,93	2,90	2,87	2,84	2,80

440	3,12	3,11	3,09	3,07	3,05	3,02	2,99	2,95	2,91
450	3,25	3,23	3,21	3,19	3,17	3,14	3,11	3,07	3,03
460	3,37	3,36	3,34	3,32	3,29	3,26	3,23	3,19	3,15
470	3,51	3,49	3,47	3,45	3,42	3,39	3,35	3,31	3,27
480	3,64	3,62	3,60	3,58	3,55	3,52	3,48	3,44	3,39
490	3,78	3,76	3,74	3,71	3,68	3,65	3,61	3,56	3,52
500	3,91	3,90	3,88	3,85	3,82	3,78	3,74	3,69	3,64
510	4,06	4,04	4,02	3,99	3,96	3,92	3,88	3,83	3,78
520	4,20	4,18	4,16	4,13	4,10	4,06	4,01	3,96	3,91
530	4,35	4,33	4,31	4,28	4,24	4,20	4,15	4,10	4,05
540	4,50	4,48	4,46	4,42	4,39	4,35	4,30	4,24	4,18
550	4,65	4,63	4,61	4,57	4,54	4,49	4,44	4,39	4,33
560	4,81	4,79	4,76	4,73	4,69	4,64	4,59	4,53	4,47
570	4,97	4,95	4,92	4,88	4,84	4,80	4,74	4,68	4,62
580	5,13	5,11	5,08	5,04	5,00	4,95	4,90	4,83	4,77
590	5,30	5,27	5,24	5,20	5,16	5,11	5,05	4,99	4,92
600	5,46	5,44	5,41	5,37	5,32	5,27	5,21	5,15	5,07
610	5,63	5,61	5,58	5,54	5,49	5,44	5,37	5,31	5,23
620	5,81	5,78	5,75	5,71	5,66	5,60	5,54	5,47	5,39
JET SPEED (m/min)	HYDRAULIC HEAD BOX (FLO-SET MK II) CASSA D’AFFLUSSO IDRAULICA PER TAVOLA PIANA INCLINATA								
	S=6	S=8	S=10	S=12	S=14	S=16	S=18	S=20	S=22
630	5,98	5,96	5,92	5,88	5,83	5,77	5,71	5,63	5,55

640	6,16	6,13	6,10	6,05	6,00	5,94	5,88	5,80	5,72
650	6,34	6,31	6,28	6,23	6,18	6,12	6,05	5,97	5,89
660	6,53	6,50	6,46	6,41	6,36	6,30	6,22	6,14	6,06
670	6,71	6,68	6,65	6,60	6,54	6,48	6,40	6,32	6,23
680	6,90	6,87	6,83	6,78	6,73	6,66	6,58	6,50	6,40
690	7,10	7,07	7,02	6,97	6,91	6,84	6,77	6,68	6,58
700	7,29	7,26	7,22	7,17	7,10	7,03	6,95	6,86	6,76
710	7,49	7,46	7,41	7,36	7,30	7,22	7,14	7,05	6,95
720	7,69	7,66	7,61	7,56	7,49	7,42	7,33	7,24	7,13
730	7,90	7,86	7,81	7,76	7,69	7,61	7,53	7,43	7,32
740	8,10	8,07	8,02	7,96	7,89	7,81	7,72	7,62	7,51
750	8,31	8,28	8,23	8,17	8,10	8,01	7,92	7,82	7,70
760	8,53	8,49	8,44	8,38	8,30	8,22	8,12	8,02	7,90
770	8,74	8,70	8,65	8,59	8,51	8,43	8,33	8,22	8,10
780	8,96	8,92	8,87	8,80	8,72	8,64	8,54	8,42	8,30
790	9,18	9,14	9,08	9,02	8,94	8,85	8,75	8,63	8,50
800	9,40	9,36	9,31	9,24	9,16	9,06	8,96	8,84	8,71
810	9,63	9,59	9,53	9,46	9,38	9,28	9,17	9,05	8,92
820	9,86	9,81	9,76	9,68	9,60	9,50	9,39	9,27	9,13
830	10,09	10,05	9,99	9,91	9,83	9,73	9,61	9,49	9,35
840	10,33	10,28	10,22	10,14	10,05	9,95	9,84	9,71	9,56
850	10,57	10,52	10,45	10,38	10,29	10,18	10,06	9,93	9,78
860	10,81	10,76	10,69	10,61	10,52	10,41	10,29	10,16	10,01

870	11,05	11,00	10,93	10,85	10,76	10,65	10,52	10,38	10,23
880	11,30	11,24	11,18	11,09	11,00	10,88	10,76	10,61	10,46
890	11,55	11,49	11,42	11,34	11,24	11,12	10,99	10,85	10,69
900	11,80	11,74	11,67	11,59	11,48	11,37	11,23	11,08	10,92
910	12,05	12,00	11,92	11,84	11,73	11,61	11,48	11,32	11,15
920	12,31	12,25	12,18	12,09	11,98	11,86	11,72	11,56	11,39
930	12,57	12,51	12,44	12,34	12,24	12,11	11,97	11,81	11,63
940	12,83	12,77	12,70	12,60	12,49	12,36	12,22	12,06	11,88
950	13,10	13,04	12,96	12,86	12,75	12,62	12,47	12,30	12,12
960	13,37	13,31	13,23	13,13	13,01	12,88	12,73	12,56	12,37
970	13,64	13,58	13,49	13,39	13,28	13,14	12,98	12,81	12,62
980	13,91	13,85	13,77	13,66	13,54	13,40	13,25	13,07	12,87
990	14,19	14,13	14,04	13,94	13,81	13,67	13,51	13,33	13,13
1000	14,47	14,40	14,32	14,21	14,08	13,94	13,78	13,59	13,39
1010	14,75	14,69	14,60	14,49	14,36	14,21	14,04	13,86	13,65
1020	15,04	14,97	14,88	14,77	14,64	14,49	14,32	14,12	13,91
1030	15,33	15,26	15,16	15,05	14,92	14,76	14,59	14,40	14,18
1040	15,62	15,55	15,45	15,34	15,20	15,04	14,87	14,67	14,45
JET SPEED (m/min)	HYDRAULIC HEAD BOX (FLO-SET MK II) CASSA D'AFFLUSSO IDRAULICA PER TAVOLA PIANA INCLINATA								
	S=6	S=8	S=10	S=12	S=14	S=16	S=18	S=20	S=22
1050	15,91	15,84	15,74	15,63	15,49	15,33	15,15	14,94	14,72
1060	16,21	16,14	16,04	15,92	15,78	15,61	15,43	15,22	14,99

1070	16,51	16,43	16,33	16,21	16,07	15,90	15,71	15,50	15,27
1080	16,81	16,73	16,63	16,51	16,36	16,19	16,00	15,79	15,55
1090	17,12	17,04	16,94	16,81	16,66	16,49	16,29	16,07	15,83
1100	17,43	17,35	17,24	17,11	16,96	16,78	16,58	16,36	16,12
1110	17,74	17,66	17,55	17,42	17,26	17,08	16,88	16,65	16,40
1120	18,05	17,97	17,86	17,72	17,57	17,39	17,18	16,95	16,69
1130	18,37	18,28	18,17	18,04	17,88	17,69	17,48	17,25	16,99
1140	18,69	18,60	18,49	18,35	18,19	18,00	17,78	17,54	17,28
1150	19,01	18,92	18,81	18,67	18,50	18,31	18,09	17,85	17,58
1160	19,34	19,25	19,13	18,98	18,82	18,62	18,40	18,15	17,88
1170	19,66	19,57	19,45	19,31	19,13	18,94	18,71	18,46	18,18
1180	19,99	19,90	19,78	19,63	19,46	19,25	19,03	18,77	18,49
1190	20,33	20,23	20,11	19,96	19,78	19,58	19,34	19,08	18,79
1200	20,66	20,57	20,44	20,29	20,11	19,90	19,66	19,40	19,10

*Nota.* Tabla tomada y adaptada de referencia del sistema QCS de la MP1 planta C y P del R S.A.

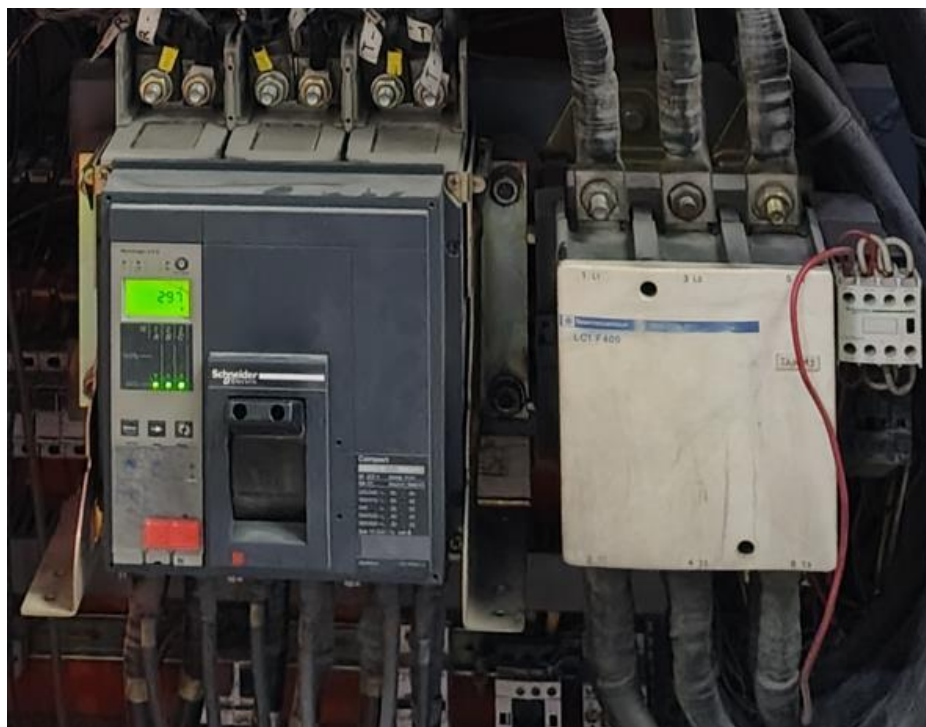
## Apéndice B

### *Detalles de Elementos del Levantamiento del Diagrama del Circuito Eléctrico del Sistema de Bombeo Inicial*

En el levantamiento del circuito eléctrico del sistema inicial se evidencia la existencia de circuitos auxiliares independientes, cada uno con su correspondiente protección, alimentados desde la fuente principal de red trifásica de 460 V / 60 Hz. La cual cuenta con una protección general termomagnética ajustada a 630 A (véase Figura 60).

#### **Figura 60**

##### *Protección General y Contactor de Energizado Drive Fan Pump*



*Nota.* Tomada del accionamiento del motor DC Fan Pump MP1 planta C y P del R.S.A.

Entre los circuitos auxiliares, acondicionados a sus niveles de tensión correspondientes mediante transformadores, se destacan los siguientes:

- Un circuito de 110 V AC destinado a la alimentación de los elementos de maniobra y control del sistema.
- Un circuito de 220 V AC para la ventilación del gabinete eléctrico y los disipadores térmicos del variador DC.
- Otro circuito de 220 V AC, destinado a la alimentación de la fuente DC del campo del motor, la cual se encuentra integrada dentro del Drive DC.

Además, directamente a nivel de la red principal, se alimenta el ventilador del motor DC, cuya operación continua es crítica incluso en condiciones de paro, siempre que exista excitación en el circuito de campo. Esto se debe al calentamiento natural generado por el bobinado de excitación, lo que exige mantener la ventilación activa para evitar daños por sobrettemperatura en el motor.

Cada uno de los circuitos críticos del sistema cuenta con señales de supervisión mediante contactos secos, los cuales son monitoreados en el sistema SCADA a través de entradas digitales, facilitando el diagnóstico y la gestión remota de fallas.

Por otra parte, la protección del circuito de potencia controlada del Drive DC, que modula la velocidad del motor a través de la inyección de corriente en el bobinado de armadura, se realiza mediante fusibles ultrarrápidos (véase Figura 61). Estos fusibles están específicamente diseñados para proteger los semiconductores de potencia en caso de fallas súbitas. Cada fusible cuenta con un microinterruptor de disparo, cuya señal también es monitoreada en el sistema SCADA para una detección inmediata de eventos.

**Figura 61***Fusibles Ultra Rápidos de Protección*

*Nota.* Tomada del accionamiento del motor DC Fan Pum MP1 planta C y P del R S.A.

Adicionalmente, se identifica la presencia de una reactancia de entrada que actúa como filtro o supresor de perturbaciones provenientes de la red eléctrica, protegiendo así los componentes sensibles del sistema electrónico de control (véase Figura 62).

**Figura 62***Reactor de Entrada Drive DC Fan Pump*

*Nota.* Tomada del accionamiento del motor DC Fan Pum MP1 planta C y P del R S.A.

En cuanto a la arquitectura de conexiones del sistema de control del drive DC (véase Figura 26), este equipo está diseñado para alimentar de manera independiente el circuito de campo, el circuito de armadura, el circuito de regulación del drive (control) y el sistema de ventilación del equipo. Esta separación permite una operación más segura, eficiente y con menor susceptibilidad a fallos entre subsistemas.

Para el monitoreo del estado operativo, el drive dispone de salidas de contacto seco que permiten confirmar el estado funcional del equipo, incluyendo el estado del circuito de campo y de la ventilación. Estas señales son monitoreadas desde el sistema SCADA a través de entradas digitales, permitiendo supervisión en tiempo real y gestión de alarmas.

Las señales de control que se intercambian entre el drive DC y el sistema SCADA están aisladas galvánicamente mediante un transductor de señales programable. Este transductor cumple dos funciones principales, acondicionar las señales para que sean compatibles con las entradas y salidas del sistema, y proteger eléctricamente los equipos, evitando que fallos o sobrecargas en el drive afecten al PLC o viceversa. De forma análoga, las señales digitales se aíslan mediante relés de estado sólido, los cuales permiten tanto la adaptación de niveles de tensión como el aislamiento eléctrico entre circuitos de control y de potencia.

Entre las señales intercambiadas con el SCADA se destacan:

1. Señal digital de marcha/parada del motor.
2. Señal analógica de referencia de velocidad, en un rango de 0–10 V.
3. Señal de corriente del motor, generada por el drive en un rango de 0–1 mA, acondicionada posteriormente a 4–20 mA para ser leída por una entrada analógica del PLC.

Para la realimentación de velocidad del motor DC, se cuenta con un sistema de tacometría de doble señal:

- Un taco generador tipo tacodinamo, que genera una señal de 0.06 V/rev y se utiliza como realimentación directa para el control del drive.
- Un generador de pulsos (encoder) de 1024 pulsos por revolución, cuya señal se usa para indicar la velocidad en el sistema SCADA y para ser retransmitida al sistema QCS (por sus siglas en inglés, Quality Control System), donde es utilizada en el cálculo de la relación Chorro/Tela.

*Nota.* En este apéndice se presentan los detalles observados en el levantamiento de los diagramas eléctricos del accionamiento del motor DC original del sistema de bombeo Fan Pump 3 de la máquina para papel 1.

## Apéndice C

*Detalle de los Elementos de Potencia Seleccionados para el Sistema Dual Drive*

### *Motor Auxiliar (Helper)*

#### Figura 63

*Placa de Características del Motor Seleccionado*

MACHINE No. XNADX88312TOP		REF ODAM1684	WT 950	kg
FRAME ND315M	AMB 40 - °C	Th.Cl. F	DUTY S1	
EFF (IE2) 95.00%	POLE 4	COS Ø 0.87	IP 55	
Volt 220D/380S/440D	Hz 60	PTC -	IC411	
A 476 D/275 S/238 D	kW (HP) 150(200)		RPM 1775	
BRG DE/DE 6319-C3/6319-C3	RELUB HRS 5000			
GREASE UNIREX N3	GREASE QTY: 90 gm			
TEFC S.F.1.15				
half-key balanced				
IEC 60034-1				

*Nota.* Tomada del motor adquirido para la implementación del sistema Dual Drive.

Se selecciona un motor trifásico marca Crompton Greaves con las siguientes especificaciones:

Potencia nominal: 150 kW	Tensión: 440 V Conexión: Delta
Corriente nominal: 238 A	Frecuencia: 60 Hz
Velocidad nominal: 1775 rpm	Eficiencia: IEC 2

Este motor cumple con los requerimientos de torque auxiliar establecidos en las curvas de aporte de par del sistema dual drive, permitiendo cubrir picos de carga y demandas dinámicas sin asumir la totalidad del esfuerzo mecánico, de acuerdo con la filosofía de control definida.

### *Variador de Frecuencia*

Se selecciona el variador Danfoss VLT FC 302, ya que es muy versátil e incluye el principio de control vectorial de la tensión VVC+, la ventaja principal de esta función es que utiliza un modelo de motor fiable por medio de los datos obtenidos en la adaptación automática del motor, lo que permite un control de torque en lazo abierto (sin necesidad de sensores externos de velocidad y/o toque del motor) ya que es calculado mediante el modelo matemático interno del motor y la mediciones eléctricas dinámicas del motor.

### **Figura 64**

#### *Placa de Características del Variador de Frecuencia*



*Nota.* Tomada del drive adquirido para la implementación del sistema Dual Drive.

El variador se seleccionó en su versión de 160 kW en carga alta (Heavy Duty), cuyas características técnicas coinciden con los requerimientos del motor y del sistema de control:

Alimentación: Trifásica 380–500 V / 50–60 Hz

Corriente de entrada: 304 A - 291 A

Salida: Trifásica 0 a  $V_{in}$ , 0–590 Hz

Corriente de salida: 315 A - 302 A.

Módulo de freno regenerativo integrado.

Conexiones de control integradas:

2 entradas analógicas configurables (0–10 V o 4–20 mA), una para referencia de torque y otra como límite de velocidad.

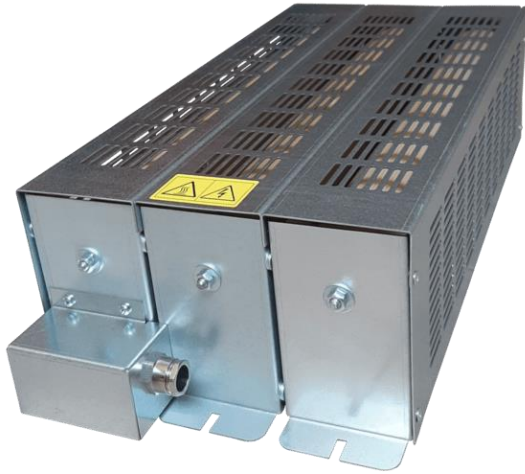
1 salida analógica (0/4–20 mA) para monitoreo remoto, por ejemplo, corriente del motor hacia el SCADA.

2 salidas a relé para alarmas o eventos.

7 entradas digitales, de las cuales 2 pueden actuar como salidas.

### ***Resistencia de Frenado***

Se selecciona una resistencia de frenado de 6 ohmios con capacidad nominal de 45 kW en operación continua y hasta 90 kW para un ciclo de trabajo del 40%, lo cual resulta adecuado para la arquitectura dual drive, ya que permite disipar eficientemente los picos de energía regenerativa generados por el motor AC en modo torque controlado durante desaceleraciones, arranques asincrónicos o variaciones abruptas de carga. Esta capacidad asegura la estabilidad del bus de corriente continua del variador y mejora el control dinámico del par, evitando activaciones no deseadas de protecciones por sobrevoltaje y contribuyendo a la robustez operativa del sistema.

**Figura 65***Resistencia de Frenado*

*Nota.* Imagen de resistencia de iguales características al adquirido. Tomado del sitio web

<https://nugar-resistor.com>.

***Elementos de Protección Eléctrica***

Para garantizar una protección adecuada del sistema dual drive y preservar la integridad de los equipos ante fallas eléctricas, se propone una coordinación selectiva de protecciones en baja tensión, siguiendo criterios de selectividad, capacidad de interrupción, limitación de energía y continuidad operativa. La coordinación busca asegurar que, ante una falla, actúe exclusivamente el dispositivo más cercano al evento, minimizando impactos sobre el resto del sistema.

**Protección Principal desde la Subestación.** Desde el barraje de distribución de la subestación, se selecciona un interruptor termomagnético regulable de la marca Schneider Electric Compact NSX 630H, con un rango de ajuste de 250 A a 630 A, con una capacidad de interrupción de cortocircuito de 65 kA a 440 VAC.

Esta selección se justifica por la cercanía al transformador de potencia, lo que implica una elevada corriente de cortocircuito disponible. El uso de un interruptor regulable permite ajustar la corriente nominal a la carga real del sistema y facilitar una coordinación precisa con las protecciones aguas abajo.

### Figura 66

#### *Protección Principal Acometida*



*Nota.* Imagen similar a la seleccionada tomada del sitio web de Schneider Electric.

**Conductores de Potencia.** Para la acometida hacia el gabinete del variador de frecuencia se emplean cables de cobre THHN 250 MCM (KCMIL) de 90 °C, con una capacidad de conducción de corriente de aproximadamente 290 A por fase, bajo condiciones de instalación canalizada y ambiente industrial. Se asegura de que los conductores estén correctamente dimensionados en función de la corriente nominal del motor de 238 A, aplicando factores de corrección por agrupamiento, temperatura ambiente y longitud de la acometida.

## Protección en Llegada al Gabinete.

### Figura 67

#### *Protección de Llegada Acometida*



*Nota.* Imagen Similar al seleccionado tomado del sitio web Schneider Electric.

En la entrada del gabinete de potencia, previo al seccionamiento y distribución interna, se selecciona instalar un breaker de la marca Schneider Electric Compact NSX 400N, regulable de 160 A a 400 A, con capacidad de ruptura de 42 kA a 440 VAC. Esta protección intermedia permite una adecuada coordinación selectiva con el interruptor de la subestación y proporciona aislamiento en mantenimiento, además de delimitar zonas de responsabilidad operativa y facilitar seccionamientos por áreas.

**Protección del Variador de Frecuencia – Fusibles Clase aR.** Para la protección específica del variador de frecuencia Danfoss VLT FC 302, se seleccionan fusibles tipo NH1 de 400 A, clase aR, con una capacidad de ruptura de 170 kA a 690 VAC.

La clase aR en los fusibles está diseñada específicamente para proteger componentes de electrónica de potencia, como IGBTs, frente a fallas de cortocircuito de alta intensidad y muy rápida evolución. Estos fusibles limitan la energía incidente ( $I^2t$ ) que alcanza los

semiconductores, evitando daños irreversibles y proporcionando una protección ultrarrápida. Su ubicación antes del contactor de energizado asegura su efectividad inmediata al detectar cualquier condición de falla severa.

### Figura 68

#### *Características de los Fusibles de Protección del Variador de Frecuencia*



*Nota.* Toma de los fusibles adquiridos para la implementación del sistema Dual Drive.

La selección y coordinación de los elementos de protección eléctrica se han realizado para garantizar la continuidad operativa del sistema dual drive, salvaguardar los equipos electrónicos críticos y asegurar una intervención rápida y localizada ante eventos de falla. Este enfoque permite reducir tiempos de parada, mejorar la confiabilidad del sistema y cumplir con los estándares de seguridad eléctrica exigidos en aplicaciones industriales de alta potencia.

*Nota.* Datos suministrados por C y P del R.S.A.

## Apéndice D

### Configuración Completa Drive FC-302

Listas de parámetros		VLT® AutomationDrive FC 301/302
<b>0-** Func./Display</b>		
Número del parámetro	Descripción del parámetro	Valor Ajustado
<b>0-0* Ajustes básicos</b>		
0-01	Idioma	[4] Español
0-02	Unidad de velocidad de motor	RPM
0-03	Ajustes regionales	[0] Internacional
0-04	Estado operación en arranque (Manual)	[1] Par. forz., ref. guard
0-09	Control de rendimiento	No aplica
<b>0-1* Operac. de ajuste</b>		
0-10	Ajuste activo	[1] Ajuste activo 1
0-11	Editar ajuste	[1] Ajuste activo 1
0-12	Ajuste actual enlazado a	[0] Sin relacionar
0-13	Lectura: Ajustes relacionados	0 N/A
0-14	Lectura: Editar ajustes / canal	0 N/A
0-15	Readout: actual setup	0 N/A
<b>0-2* Display LCP</b>		
0-20	Línea de pantalla pequeña 1.1	[1613] Frecuencia
0-21	Línea de pantalla pequeña 1.2	[1614] Intensidad de motor
0-22	Línea de pantalla pequeña 1.3	[1662] Entrada analógica 53

0-23	Línea de pantalla grande 2	[1616] Par [Nm]
0-24	Línea de pantalla grande 3	[1601] Referencia [Unidad]
0-25	Mi menú personal	ExpressionLimit
<b>0-3* Lectura LCP</b>		
0-30	Unidad lectura def. por usuario	[0] Ninguno
0-31	Valor mín. de lectura def. por usuario	0 CustomReadoutUnit
0-32	Valor máx. de lectura defin. usuario	100 CustomReadoutUnit
0-33	Source for User-defined Readout	[240] Default Source
0-37	Texto display 1	0 N/A
0-38	Texto display 2	0 N/A
0-39	Texto display 3	0 N/A
<b>0-4* Teclado LCP</b>		
0-40	Botón (Hand on) en LCP	[1] Activado
0-41	Botón (Off) en LCP	[1] Activado
0-42	[Auto activ.] llave en LCP	[1] Activado
0-43	Botón (Reset) en LCP	[1] Activado
0-44	Tecla [Off/Reset] en LCP	ExpressionLimit
0-45	[Bypass conv.] Llave en LCP	ExpressionLimit
<b>0-5* Copiar/Guardar</b>		
0-50	Copia con LCP	[0] No copiar
0-51	Copia de ajuste	[0] No copiar
<b>0-6* Contraseña</b>		
0-60	Contraseña menú principal	100 N/A

0-61	Acceso a menú princ. sin contraseña	[0] Acceso total
0-65	Contraseña Menú rápido	200 N/A
0-66	Acceso a menú rápido sin contraseña	[0] Acceso total
0-67	Contraseña acceso al bus	0 N/A
0-68	Safety Parameters Password	300 N/A
0-69	Password Protection of Safety Parameters	[0] Desactivado

### 1-\*\* Carga y motor

<b>1-0* Ajustes generales</b>		
1-00	Modo Configuración	[0] Veloc. Lazo abierto
1-01	Principio control motor	[1] VVC+
1-02	Realimentación encoder motor Flux	N/A
1-03	Características de par	[0] Par constante
1-04	Modo sobrecarga	[0] Par alto
1-05	Configuración modo local	[2] Según par. 1-00
1-06	En sentido horario	[0] Normal
1-07	Motor Angle Offset Adjust	N/A
<b>1-1* Selección de motor</b>		
1-10	Construcción del motor	[0] Asíncrono
1-11	Fabricante motor	[1] Std. Asychron
1-14	Factor de ganancia de amortiguación	N/A
1-15	Const. tiempo filtro a baja velocidad	N/A
1-16	Const. tiempo filtro a alta velocidad	N/A
1-17	Const. de tiempo del filtro de tensión	N/A

1-18	Min. Current at No Load	0 %
<b>1-2* Datos de motor</b>		
1-20	Potencia motor [kW]	150 kW
1-21	Potencia motor [CV]	200 HP
1-22	Tensión motor	440 V
1-23	Frecuencia motor	60 Hz
1-24	Intensidad motor	238 A
1-25	Veloc. nominal motor	1780 RPM
1-26	Par nominal continuo	N/A
1-29	Adaptación automática del motor (AMA)	[0] No
<b>1-3* Dat avanz. Motor</b>		
1-30	Resistencia estator (Rs)	0.0074 Ohm
1-31	Resistencia rotor (Rr)	0.0070 Ohm
1-33	Reactancia fuga estátor (X1)	0.1063 Ohm
1-34	Reactancia de fuga del rotor (X2)	0.1701 Ohm
1-35	Reactancia princ. (Xh)	4.4642 Ohm
1-36	Resistencia pérdida hierro (Rfe)	208.975 Ohm
1-37	Inductancia eje d (Ld)	N/A
1-38	Inductancia eje q (Lq)	N/A
1-39	Polos motor	4 Polos
<b>1-5* Aj. indep. Carga</b>		
1-50	Magnet. motor a veloc. cero	0 %
1-51	Veloc. mín. con magn. norm. [RPM]	300 RPM

1-52	Magnetización normal veloc. mín. [Hz]	N/A
1-53	Modo despl. de frec.	N/A
1-54	Reducción tensión en debilit. campo	N/A
1-55	Característica U/f - U	N/A
1-56	Característica U/f - F	N/A
1-58	Intens. imp. prueba con motor en giro	30%
1-59	Frec. imp. prueba con motor en giro	200%
<b>1-6* Aj. depend. Carga</b>		
1-60	Compensación carga baja veloc.	100 %
1-61	Compensación carga alta velocidad	100 %
1-62	Compensación deslizam.	100 %
1-63	Tiempo compens. deslizam. constante	5 s
1-64	Amortiguación de resonancia	100 %
1-65	Const. tiempo amortigua. de resonancia	5 ms
1-66	Intens. mín. a baja veloc.	N/A
1-67	Tipo de carga	N/A
1-68	Inercia mínima	N/A
1-69	Inercia máxima	N/A
<b>1-7* Ajustes arranque</b>		
1-70	Modo de inicio PM	N/A
1-71	Retardo arr.	0 s
1-72	Función de arranque	[2] Tiempo inerc/ retardo
1-73	Motor en giro	[1] Activado

1-74	Veloc. arranque [RPM]	0 RPM
1-75	Velocidad arranque [Hz]	0 Hz
1-76	Intensidad arranque	0 A
<b>1-8* Ajustes de parada</b>		
1-80	Función de parada	[0] Inercia
1-81	Vel. mín. para func. parada [RPM]	1 RPM
1-82	Vel. mín. para func. parada [Hz]	N/A
1-83	Función de parada precisa	[0] Det. precisa rampa
1-84	Valor de contador para parada precisa	100000 N/A
1-85	Demora comp. veloc. det. precisa	10 ms
<b>1-9* Temperatura motor</b>		
1-90	Protección térmica motor	[0] Sin protección
1-91	Vent. externo motor	[0] No
1-93	Fuente de termistor	[0] Ninguno
1-94	ATEX ETR cur.lim. speed reduction	0%
1-95	Tipo de sensor KTY	[0] Sensor KTY 1
1-96	Fuente de termistor KTY	[0] Ninguno
1-97	Nivel del umbral KTY	80 °C
1-98	ATEX ETR interpol. points freq.	N/A
1-99	ATEX ETR interpol points current	N/A

**2-\*\* Frenos**

<b>2-0* Freno CC</b>		
2-00	CC mantenida	50%

2-01	Intens. freno CC	50%
2-02	Tiempo de frenado CC	10 s
2-03	Velocidad activación freno CC [RPM]	No
2-04	Velocidad de conexión del freno CC [Hz]	N/A
2-05	Referencia máxima	N/A
2-06	Intensidad estacionamiento	N/A
2-07	Tiempo estacionamiento	N/A
<b>2-1* Func. energ. Freno</b>		
2-10	Función de freno	[1] Freno con resistencia
2-11	Resistencia freno (ohmios)	60 Ohm
2-12	Límite potencia de freno (kW)	90 kW
2-13	Ctrol. Potencia freno	[01] No
2-15	Comprobación freno	[0] No
2-16	Intensidad máx. de frenado de CA	80%
2-17	Control de sobretensión	[O] Desactivado
2-18	Estado comprobación freno	[O] Al encender
2-19	Ganancia sobretensión	100%
<b>2-2* Freno mecánico</b>		
2-20	Intensidad freno liber.	11 A
2-21	Velocidad activación freno [RPM]	300 RPM
2-22	Activar velocidad freno [Hz]	N/A
2-23	Activar retardo de freno	0 s
2-24	Retardo parada	N/A

2-25	Tiempo liberación de freno	N/A
2-26	Ref par	N/A
2-27	Tiempo de rampa de par	N/A
2-28	Factor de ganancia de refuerzo	N/A
2-29	Torque Ramp Down Time	N/A
<b>2-3* Adv. Mech Brake</b>		
2-30	Position P Start Proportional Gain	0.0000 N/A
2-31	Speed PID Start Proportional Gain	0.0150 N/A
2-32	Speed PID Start Integral Time	N/A
2-33	Speed PID Start Lowpass Filter Time	N/A

**3-\*\* Ref./Rampas**

<b>3-0* Límites referencia</b>		
3-00	Rango de referencia	[0] Min-Max
3-01	Referencia/Unidad realimentación	[2] RPM
3-02	Referencia mínima	0 RPM
3-03	Referencia máxima	2000 RPM
3-04	Función de referencia	[0] Suma
<b>3-1* Referencias</b>		
3-10	Referencia interna	0%
3-1 1	Velocidad fija [Hz]	N/A
3-12	Valor de enganche/arriba-abajo	0%
3-13	Lugar de referencia	[0] Conex. a manual/ auto
3 14	Referencia interna relativa	0%

3-15	Recurso de referencia 1	[0] Sin función
3-16	Recurso de referencia 2	[0] Sin función
3-17	Recurso de referencia 3	[0] Sin función
3-18	Recurso refer. escalado relativo	[0] Sin función
3-19	Velocidad fija [RPM]	150 RPM
<b>3-4* Rampa 1</b>		
3-40	Rampa 1 tipo	[0] Lineal
3-41	Rampa 1 tiempo acel. rampa	30 s
3-42	Rampa 1 tiempo desacel. rampa	30 s
3-45	Rel. Rampa1/Rampa-S comienzo acel	N/A
3-46	Rel. Rampa1 / Rampa-S al final de acel.	N/A
3-47	Rel. Rampa1 /Rampa-S comienzo dec.	N/A
3-48	Rel. Rampa1 /Rampa-S al final de decel.	N/A
<b>3-5* Rampa 2</b>		
3-50	Rampa 2 tipo	[0] Lineal
3-51	Rampa 2 tiempo acel. rampa	3 s
3-52	Rampa 2 tiempo desacel. rampa	3 s
3-55	Rel. Rampa2/Rampa-S comienzo acel	50%
3-56	Rel. Rampa2 / Rampa-S al final de acel.	50%
3-57	Rel. Rampa2/Rampa-S comienzo dec.	50%
3-58	Rel. Rampa2/Rampa-S al final de decel.	50%
<b>3-6* Rampa 3</b>		
3-60	Rampa 3 tipo	[0] Lineal

3-61	Rampa 3 tiempo acel. rampa	3 s
3-62	Rampa 3 tiempo desacel. rampa	3s
3-65	Rel Rampa3/Rampa-S comienzo acel	50%
3-66	Rel. Rampa3 / Rampa-S al final de acel.	50%
3-67	Rel. Rampa3/Rampa-S comienzo dec.	50%
3-68	Rel. Rampa3/Rampa-S al final de decel.	50%
<b>3-7* Rampa 4</b>		
3-70	Rampa 4 tipo	[0] Lineal
3-71	Rampa 4 tiempo acel. rampa	3 s
3-72	Rampa 4 tiempo desacel. rampa	3 s
3-75	Rel Rampa4/Rampa-S comienzo acel	50%
3-76	Rel. Rampa4 / Rampa-S al final de acel.	50%
3-77	Rel. Rampa4/Rampa-S comienzo dec.	50%
3-78	Rel. Rampa4/Rampa-S al final de decel.	50%
<b>3-8* Otras rampas</b>		
3-80	Tiempo rampa veloc. fija	10 s
3-81	Tiempo rampa parada rápida	30 s
3-82	Tipo rampa de parada rápida	[0] Lineal
3-83	Rel. rampa-S paro ráp. inicio decel.	N/A
3-84	Rel. rampa-S paro ráp. final decel.	N/A
3-89	Ramp Lowpass Filter Time	1 ms

<b>3-9* Potencióm. Digital</b>		
3-90	Tamaño de paso	0.10 %
3-91	Tiempo de rampa	1 s
3-92	Restitución de Energía	[0] No
3-93	Límite máximo	100%
3-94	Límite mínimo	-100%
3-95	Retardo de rampa	0.001

**4-\*\* Lím./Advert.**

<b>4-1* Límites motor</b>		
4-10	Dirección veloc. motor	[0] Izqda a dcha.
4-11	Límite bajo veloc. motor [RPM]	0 RPM
4-12	Límite bajo veloc. motor [Hz]	0 Hz
4-13	Límite alto veloc. motor [RPM]	2000 RPM
4-14	Límite alto veloc. motor [Hz]	67 Hz
4-16	Modo motor límite de par	100%
4-17	Modo generador límite de par	100%
4-18	Límite intensidad	160%
4-19	Frecuencia salida máx.	70 Hz
<b>4-2* Fact. Limitadores</b>		
4-20	Fuente del factor de límite de par	[2] Ent. Análogo. 53
4-21	Fuente del factor de límite de velocidad	[0] Sin función
4-23	Brake Check Limit Factor Source	[0] DC-link voltage
4-24	Brake Check Limit Factor	98%

<b>4-3* Mon. veloc. motor</b>		
4-30	Función de pérdida de realim. del motor	[0] Desconexión
4-31	Error de velocidad en realim. del motor	300 RPM
4-32	Tiempo lím. pérdida realim. del motor	0.05 s
4-34	Func. error de seguimiento	[0] Desactivado
4-35	Error de seguimiento	10 RPM
4-36	T. lím. error de seguimiento	1 s
4-37	Error de seguimiento rampa	100 RPM
4-38	T. lím. error de seguimiento rampa	1 s
4-39	Error seguim. tras tiempo lím. rampa	5 s
<b>4-4* Speed Monitor</b>		
4-43	Motor Speed Monitor Function	[0] Desactivado
4-44	Motor Speed Monitor Max	100 RPM
4-45	Motor Speed Monitor Timeout	0.1 s
<b>4-5* Ajuste Advert.</b>		
4-50	Advert. Intens. baja	0 A
4-51	Advert. Intens. Alta	238 A
4-52	Advert. Veloc. Baja	0 RPM
4-53	Advert. Veloc. Alta	2000 RPM
4-54	Advertencia referencia baja	-999999.999 N/A
4-55	Advertencia referencia alta	999999.999 N/A
4-56	Advertencia realimentación baja	-999999.999 N/A

4-57	Advertencia realimentación alta	999999.999 N/A
4-58	Función Fallo Fase Motor	[2] Desconex. 100 ms
4-59	Motor Check At Start	[0] No
<b>4-6* Bypass veloc.</b>		
4-60	Velocidad bypass desde [RPM]	0 RPM
4-61	Velocidad bypass desde [Hz]	0 Hz
4-62	Velocidad bypass hasta [RPM]	0 RPM
4-63	Veloc. bypass hasta [Hz]	0 Hz

## 5-\*\* E/S digital

<b>5-0* Modo E/S digital</b>		
5-00	Modo E/S digital	[0] PNP
5-01	Terminal 27 modo E/S	[0] Entrada
5-02	Terminal 29 modo E/S	[0] Entrada
<b>5-1* Entradas digitales</b>		
5-10	Terminal 18 Entrada digital	[8] Arranque
5-11	Terminal 19 entrada digital	[0] Sin Función
5-12	Terminal 27 Entrada digital	[2] Inercia
5-13	Terminal 29 Entrada digital	[0] Sin Función
5-14	N	[0] Sin Función
5-15	Terminal 33 entrada digital	[0] Sin Función
5-16	Terminal X30/2 Entrada digital	N/A
5-17	Terminal X30/3 Entrada digital	N/A
5-18	Terminal X30/4 Entrada digital	N/A

5-19	Terminal 37 parada segura	[1] Alarma parada Seg.
5-20	Terminal X46/1 Entrada digital	[0] Sin función
5-21	Terminal X46/3 Entrada digital	[0] Sin función
5-22	Terminal X46/5 Entrada digital	[0] Sin función
5-23	Terminal X46/7 Entrada digital	[0] Sin función
5-24	Terminal X46/9 Entrada digital	[0] Sin función
5-25	Terminal X46/11 Entrada digital	[0] Sin función
5-26	Terminal X46/13 Entrada digital	[0] Sin función
<b>5-3* Salidas digitales</b>		
5-30	Terminal 27 salida digital	N/A
5-31	Terminal 29 salida digital	N/A
5-32	Term. X30/6 salida dig. (MCB 101)	N/A
5-33	Term. X30/7 salida dig. (MCB 101)	N/A
<b>5-4* Relés</b>		
5-40	Relé de función	R1: [9] Alarma
		R2: [21] Adv. térmica
5-41	Retardo conex, relé	0.01 s
5-42	Retardo desconex, relé	0.01 s
<b>5-5* Entrada de pulsos</b>		
5-50	Term. 29 baja frecuencia	100 Hz
5-51	Term. 29 alta frecuencia	100 Hz
5-52	Term. 29 valor bajo ref./realim	0 RPM

5-53	Term. 29 valor alto ref./realim	1500 RPM
5-54	Tiempo filtro pulsos constante #29	100 ms
5-55	Term. 33 baja frecuencia	100 Hz
5-56	Term. 33 alta frecuencia	100 Hz
5-57	Term. 33 valor bajo ref./realim	0 RPM
5-58	Term. 33 valor alto ref./realim	1500 RPM
5-59	Tiempo filtro pulsos constante #33	100 ms
<b>5-6* Salida de pulsos</b>		
5-60	Termina 27 salida pulsos variable	[0] Sin función
5-62	Frec. máx. salida de pulsos #27	5000 Hz
5-63	Termina 29 salida pulsos variable	[0] Sin función
5-65	Frec. máx. salida de pulsos #29	5000 Hz
5-66	Terminal X30/6 var. salida pulsos	N/A
5-68	Frec. máx. salida de pulsos #X30/6	N/A
<b>5-7* Entr. encoder 24V</b>		
5-70	Term. 32/33 resolución encoder	1024 N/A
5-71	Term. 32/33 direc. encoder	[0] Izqda. a dcha.
<b>5-8* Salida de encoder</b>		
5-80	Retardo de reconexión de condensador AHF	25 s
<b>5-9* Controlado por bus</b>		
5-90	Control de bus digital y de relé	0 N/A
5-93	Control de bus salida de pulsos #27	0 %
5-94	Tiempo lím. predet. salida pulsos #27	0 %

5-95	Control de bus salida de pulsos #29	0 %
5-96	Tiempo lím. predet. salida pulsos #29	0 %
5-97	Control de bus salida de pulsos #X30/6	0 %
5-98	Tiempo lím. predet. salida pulsos #X30/6	0 %

**6-\*\* E/S analógica**

<b>6-0* Modo E/S analógico</b>		
6-00	Tiempo Límite Cero Activo	10 s
6-01	Función Cero Activo	[0] No
<b>6-1* Entrada analógica 1</b>		
6-10	Terminal 53 escala baja V	0.07 V
6-11	Terminal 53 escala alta V	10 V
6-12	Terminal 53 escala baja mA	4 mA
6-13	Terminal 53 escala alta mA	20 mA
6-14	Term. 53 valor bajo ref./realim	N/A
6-15	Term. 53 valor alto ref./realim	N/A
6-16	Terminal 53 tiempo filtro constante	0.001 s
<b>6-2* Entrada analógica 2</b>		
6-20	Terminal 54 escala baja V	0.07 V
6-21	Terminal 54 escala alta V	10 V
6-22	Terminal 54 escala baja mA	4 mA
6-23	Terminal 54 escala alta mA	20 mA
6-24	Term. 54 valor bajo ref./realim	0 RPM
6-25	Term. 54 valor alto ref./realim	2000 RPM

6-26	Terminal 54 tiempo filtro constante	0.001 s
<b>6-5* Salida analógica 1</b>		
6-50	Terminal 42 salida	[133] Int. Motor 4-20 mA
6-51	Terminal 42 salida esc. mín.	0 %
6-52	Terminal 42 salida esc. máx.	200%
6-53	Terminal 42 control bus de salida	0%
6-54	Terminal 42 Tiempo lím. salida predet.	0 %
6-55	Terminal 42 Filtro de salida	[0] No

**7-\*\* Controladores**

<b>7-0* Ctrlador PID vel.</b>		
7-00	Fuente de realim. PID de veloc.	Encoder 24 V
7-01	Speed PID Droop	0 RPM
7-02	Ganancia propor. PID veloc.	0.015
7-03	Tiempo integral PID veloc.	8.0 ms
7-04	Tiempo diferencial PID veloc.	30 ms
7-05	Límite ganancia dif. PID veloc.	5 N/A
7-06	Tiempo filtro paso bajo PID veloc.	10 ms
7-07	Relación engranaje realim. PID velocidad	1 N/A
7-08	Factor directo de alim. PID de veloc.	0%
7-09	Speed PID Error Correction w/ Ramp	300 RPM
<b>7-1* Control de PI de par</b>		
7-10	Torque PI Feedback Source	[0] Controller Off
7-12	Ganancia proporcional PI de par	100%

7-13	Tiempo integral PI de par	0.020 s
7-16	Torque PI Lowpass Filter Time	5 ms
7-18	Torque PI Feed Forward Factor	0 %
7-19	Current Controller Rise Time	N/A
<b>7-2* Ctrl. realim. proc.</b>		
7-20	Fuente 1 realim. lazo cerrado proceso	[0] Sin función
7-22	Fuente 2 realim. lazo cerrado proceso	[0] Sin función
<b>7-3* Ctrl. PID proceso</b>		
7-30	Ctrl. normal/inverso de PID de proceso.	[0] Normal
7-31	Saturación de PID de proceso	[1] Sí
7-32	Valor arran. para ctrldor. PID proceso.	0 RPM
7-33	Ganancia propor. PID de proc.	0.10
7-34	Tiempo integral PID proc.	10000 s
7-35	Tiempo diferencial PID proc.	0 s
7-36	Límite ganancia diferencial PID proceso.	5 N/A
7-38	Factor directo aliment. PID de proc.	0 %
7-39	Ancho banda En Referencia	5 %

**8-\*\* Comunic. y opciones**

<b>8-0* Ajustes generales</b>		
8-01	Puesto de control	[0] Digital y cód. ctrl
8-02	Fuente código control	FC RS485
8-03	Valor de tiempo límite cód. ctrl.	1 s
8-04	Función tiempo límite cód. ctrl.	No

8-05	Función tiempo límite	[1] Reanudar ajuste
8-06	Reiniciar si tiempo límite cód. ctrl.	[0] No reiniciar
8-07	Accionador diagnóstico	[0] Desactivar
8-08	Filtro lectura de datos	Filtr. Est. Datos mot
<b>8-1* Aj. cód. ctrl.</b>		
8-10	Trama Cód. Control	[0] Protocolo FC
8-13	Código de estado configurable STW	
8-14	Código de control configurable CTW	[1] Perfil por defecto
8-17	Configurable Alarm and Warningword	[0] Off
8-19	Product Code	0
<b>8-3* Ajuste puerto FC</b>		
8-30	Protocolo	[0] FC
8-31	Dirección	1 N/A
8-32	Veloc. baudios port FC	9600 Baudios
8-33	Paridad / Bits de parada	[0] Parid. par, 1b parada
8-34	Tiempo de ciclo estimado	0 ms
8-35	Retardo respuesta mín.	10 ms
8-36	Retardo respuesta máx.	1001 ms
8-37	Retardo máximo intercarac.	N/A
<b>8-4* Conf. protoc. FC MC</b>		
8-40	Selección de telegrama	[1] Telegram.estándarl
8-41	Páram. para señales	0
8-42	Config. escritura PCD	1685

8-43	Config. lectura PCD	1603
8-45	Orden de transacción de refuerzo	[0] Off
8-46	Estado transacción refuerzo	[0] Off
8-47	BTM tiempo sobrepasado	60 s
8-48	BTM Maximum Errors	21 N/A
8-49	BTM Error Log	0.255 N/A
<b>8-5* Digital/Bus</b>		
8-50	Selección inercia	[3] Lógico 0
8-51	Selección parada rápida	[3] Lógico 0
8-52	Selección freno CC	N/A
8-53	Selec. Arranque	[3] Lógico 0
8-54	Selec. sentido inverso	N/A
8-55	Selec. ajuste	[3] Lógico 0
8-56	Selec. referencia interna	[3] Lógico 0
8-57	Profidrive OFF2 Selección	[3] Lógico 0
8-58	Profidrive OFF3 Selección	[3] Lógico 0

**13.\*\* Lógica inteligente**

<b>13-0* Ajustes SLC</b>		
13-00	Modo Controlador SL	No
13-01	Evento arranque	[39] Comando de arranque
13-02	Evento parada	[40] Convert. Frec. Parado
13-03	Reiniciar SLC	[0] No reiniciar SLC
<b>13-1* Comparadores</b>		

13-10	Operando comparador	Desactivado
13-11	Operador comparador	igual
13-12	Valor comparador	0.000
<b>13-1* RS Flip Flops</b>		
13-15	RS-FF Operand S	Falso
13-16	RS-FF Operand R	Falso
<b>13-2* Temporizadores</b>		
13-20	Temporizador Smart Logic Controller	000:000:00.000
<b>13-4* Reglas lógicas</b>		
13-40	Regla lógica booleana 1	Falso
13-41	Operador regla lógica 1	Desactivado
13-42	Regla lógica booleana 2	Falso
13-43	Operador regla lógica 2	Desactivado
13-44	Regla lógica booleana 3	Falso
<b>13-5* Estados</b>		
13-51	Evento Controlador SL	Falso
13-52	Acción Controlador SL	Desactivado

**14-\*\* Func. especiales**

<b>14-0* Conmut. inversor</b>		
14-00	Patrón conmutación	[1] SFAVM
14-01	Frecuencia conmutación	5 kHz
14-03	Sobremodulación	Si
14-04	PWM aleatorio	[0] No

14-06	Compensación de tiempo muerto	[1] Si
<b>14-1* Alim. on/off</b>		
14-10	Fallo aliment.	[0] Sin función
14-11	Tensiön de red en fallo de red	400 V
14-12	Funciön desequil. Alimentación	[01] Desconexión
14-14	Kin. Backup Time Out	60 s
14-15	Kin. Backup Trip Recovery Level	N/A
14-16	Kin. Backup Gain	100%
<b>14-2* Reinicio desconex.</b>		
14-20	Modo Reset	[0] Reset manual
14-21	Tiempo de reinicio automático	10 s
14-22	Modo funcionamiento	[0] Funcion. normal
14-23	Ajuste de código descriptivo	ExpressionLimit
14-24	Retardo descon. con lím. de int.	N/A
14-25	Retardo descon. con lím. de par	No
14-26	Ret. de desc. en fallo del convert.	No
14-28	Aj. producción	[0] Sin acción
14-29	Código de servicio	0 N/A
<b>14-3* Ctrl. lím. intens.</b>		
14-30	Ctrol. lím. intens., Ganancia proporc.	100%
14-31	Ctrol. lím. intens., Tiempo integrac.	0.020 s

14-32	Control lím. intens., tiempo filtro	1 ms
14-35	Protección de Bloqueo	[1] Activado
14-36	Fieldweakening Function	[0] Auto
<b>14-4* Optimización energ</b>		
14-40	Nivel VT	66 %
14-41	Mínima magnetización AEO	N/A
14-42	Frecuencia AEO mínima	N/A
14-43	Cosphi del motor	N/A
<b>14-5* Ambiente</b>		
14-50	Filtro RFI	[1] Sí
14-51	Comp. del enlace de CC	N/A
14-52	Control del ventilador	[0] Autom.
14-53	Monitor del ventilador	[1] Advertencia
14-55	Filtro de salida	[0] Sin filtro
14-56	Capacitancia del filtro de salida	N/A
14-57	Inductancia del filtro de salida	N/A
14-59	Número real de inversores	N/A
<b>14-7* Compatibilidad</b>		
14-72	Código de alarma del VLT	0 N/A
14-73	Código de advertencia del VLT	0 N/A
14-74	Código estado VLT ampl.	0 N/A
<b>14-8* Opciones</b>		
14-80	Opción sumin. por 24 V CC ext.	[1] Sí

14-88	Option Data Storage	0 N/A
14-89	Option Detection	[0] Protect Option Config.
<b>14-9* Ajustes de fallo</b>		
14-90	Nivel de fallos	N/A

*Nota.* Tomado y modificado del manual de programación Danfoss VLT FC 300/2. (*Danfoss, 2024*).