



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## MEJORA Y OPTIMIZACIÓN DE BÁSCULA DOSIFICADORA PYROCLON PARA LA ALIMENTACIÓN DEL HORNO EN UNA FÁBRICA DE CEMENTO

Autor: Laura Robles Roca

Director: Fernando Argente Dolz

Subdirector: Ana Baringo Morales

Madrid

Junio de 2026

### Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **MEJORA Y OPTIMIZACIÓN DE BÁSCULA DOSIFICADORA PYROCLON PARA LA ALIMENTACIÓN DEL HORNO EN UNA FÁBRICA DE CEMENTO**

de la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025/2026 es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

### Uso de Inteligencia Artificial<sup>1</sup>

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

- No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.
- He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:



He utilizado Inteligencia Artificial de forma puntual y limitada como apoyo en tareas menores, principalmente para resolver dudas de redacción y revisar la estructura general del texto y la memoria. En ningún caso se ha empleado para sustituir el trabajo personal, elaborar el contenido principal del documento ni realizar análisis o conclusiones. El desarrollo, la interpretación y la redacción final han sido realizados de forma autónoma.

Firmado (alumno): Laura Robles Roca

Fecha:25/05/2026

<sup>1</sup> Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

### Autorización para la entrega del Proyecto

| El Director del Proyecto  | El co-Director del Proyecto (si aplica)   |
|---|---|
|  |  |
| Fdo: Fernando Argente Dolz  | Fdo: Ana Baringo Morales  |
| Fecha: 26/05/2026   | Fecha: 28/05/2026   |

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Mejora y optimización de báscula dosificadora Pyroclon para la alimentación del horno en  
una fábrica de cemento en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia  
Comillas en el

curso académico 2025/26 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Laura Robles Roca

Fecha: 25/05/2026

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Fernando Argente Dolz

Fecha: 25/05/2026



# Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a mi director, D. Fernando Argente Dolz, y a mi subdirectora, D.<sup>a</sup> Ana Baringo Morales, por su orientación y apoyo durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

Asimismo, agradezco a CEMEX ESPAÑA OPERACIONES, S.L.U. la oportunidad de desarrollar este proyecto en sus instalaciones. En particular, quiero dar las gracias a D. Alfonso Conde, director de la fábrica, por las facilidades ofrecidas, y a D. Luis Gasca por su ayuda y asesoramiento técnico a lo largo del trabajo.

Por último, agradezco a todas las personas que me han acompañado durante esta etapa y que han contribuido, directa o indirectamente, a la elaboración de este proyecto.

# **MEJORA Y OPTIMIZACIÓN DE BÁSCULA DOSIFICADORA PYROCLON PARA LA ALIMENTACIÓN DEL HORNO EN UNA FÁBRICA DE CEMENTO**

Autor: Robles Roca, Laura.

Directores: Argente Dolz, Fernando. Baringo Morales, Ana

Entidad Colaboradora: Cemex España Operaciones S.L.U.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

El presente trabajo aborda la mejora y optimización del sistema de accionamiento y control de la báscula dosificadora PyroClon utilizada en la alimentación del horno en una fábrica de cemento. Se ha llevado a cabo un análisis del sistema existente, identificando limitaciones asociadas al uso de un motor de corriente continua y un sistema de medida analógico inestable. Como solución, se propone la modernización del sistema mediante la sustitución del accionamiento por un motor asíncrono trifásico controlado por un variador de frecuencia ABB ACS880, así como la implementación de un nuevo sistema de medida basado en un sensor NAMUR y un convertidor PR electronics 5225. Esta solución permite mejorar la estabilidad de la señal de velocidad, reducir el mantenimiento y optimizar el control del caudal.

Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la fiabilidad del sistema, una reducción de los costes operativos y una mayor precisión en la dosificación del material. El análisis económico confirma la viabilidad de la solución, con un periodo de retorno reducido y una alta rentabilidad.

**Palabras clave:** Báscula dosificadora, variador de frecuencia, NAMUR, control de velocidad, industria cementera.

## **1. Introducción**

En la industria cementera, el control preciso del caudal de alimentación al horno es un factor crítico para garantizar la estabilidad del proceso y la calidad del producto final. Las básculas dosificadoras, como el sistema PyroClon, desempeñan un papel fundamental en este proceso, regulando el flujo de material mediante el control de la velocidad del sistema de transporte.

Sin embargo, muchas instalaciones industriales continúan utilizando tecnologías obsoletas, como motores de corriente continua y sistemas de medida analógicos, que presentan problemas de mantenimiento, fiabilidad y precisión. Estas limitaciones pueden derivar en inestabilidad del proceso, aumento de costes operativos y dificultades de integración con sistemas de control modernos.

En este contexto, surge la necesidad de modernizar el sistema de accionamiento y control, adaptándolo a las tecnologías actuales y mejorando su comportamiento global.

## **2. Definición del Proyecto**

El proyecto tiene como objetivo la mejora y optimización del sistema de accionamiento y control de la báscula dosificadora PyroClon, empleada en la alimentación del horno en una fábrica de cemento. Este sistema es un elemento crítico dentro del proceso productivo, ya que regula el caudal de material introducido en el horno, influyendo directamente en la estabilidad térmica y en la calidad del producto final.

El punto de partida del trabajo ha sido el análisis del sistema existente, basado en un motor de corriente continua y un sistema de medida de velocidad de carácter analógico. Este tipo de configuración, aunque ampliamente utilizada en instalaciones industriales antiguas, presenta diversas limitaciones, entre las que destacan un elevado coste de mantenimiento, asociado principalmente al desgaste de escobillas y colector, y una baja robustez del sistema de medida, que se traduce en señales de velocidad inestables y con alto nivel de ruido.

A partir de este diagnóstico, el proyecto se orienta hacia la sustitución de estos elementos por una solución basada en tecnologías actuales, con el objetivo de mejorar la fiabilidad del sistema, reducir los costes operativos y aumentar la precisión en el control del caudal. En este sentido, se plantea la implementación de un sistema de accionamiento basado en motor asíncrono trifásico y variador de frecuencia, junto con un nuevo sistema de medida de velocidad basado en sensores digitales.

El alcance del proyecto se centra en la modernización del sistema de accionamiento y control, manteniendo la estructura mecánica de la báscula y su integración en el proceso productivo existente. De este modo, se busca una solución técnicamente viable y económicamente razonable, que pueda ser implementada en un entorno industrial real sin necesidad de modificaciones estructurales significativas.

## **3. Descripción del modelo**

La solución propuesta se basa en la sustitución del sistema de accionamiento original por una arquitectura moderna de control de velocidad, adaptada a los requerimientos actuales de la industria. El elemento principal del nuevo sistema es un motor asíncrono trifásico, seleccionado por su robustez, bajo mantenimiento y elevada fiabilidad en entornos industriales exigentes.

El control de velocidad del motor se realiza mediante un variador de frecuencia ABB ACS880, que permite regular la velocidad de giro de forma precisa mediante técnicas de control vectorial. Este tipo de control posibilita ajustar la velocidad del motor en función de la consigna generada por el sistema de control, garantizando una respuesta dinámica adecuada y un funcionamiento estable incluso en condiciones de carga variable.

Para la medida de velocidad, se ha sustituido el sistema analógico existente por un sensor inductivo de tipo NAMUR, asociado a una rueda dentada solidaria al eje del rotor. Este sensor genera una señal de frecuencia proporcional a la velocidad de giro, lo que permite obtener una medida más robusta y menos susceptible al ruido eléctrico.

Dado que el sistema de control requiere una señal analógica, se introduce un convertidor PR electronics 5225, encargado de transformar la señal de frecuencia en una señal de corriente normalizada de 4–20 mA. Este dispositivo se configura para cubrir el rango operativo de la instalación, permitiendo una relación lineal entre velocidad y señal de salida.

El sistema se completa con el PLC existente, que recibe la señal de velocidad y genera la consigna de control para el variador. De este modo, se establece un lazo de control cerrado en el que la velocidad del sistema se ajusta dinámicamente para mantener el caudal deseado.

#### **4. Resultados**

La implementación de la solución propuesta permite obtener una mejora significativa en el comportamiento del sistema de dosificación. Uno de los principales resultados es la estabilización de la señal de velocidad, que en el sistema original presentaba oscilaciones debidas al ruido y a la baja calidad del sistema de medida. Con la nueva configuración basada en sensor NAMUR y convertidor digital, se obtiene una señal más limpia y lineal, lo que se traduce en un control más preciso.

Asimismo, el uso del variador de frecuencia permite una regulación más eficiente de la velocidad del motor, adaptándose de forma continua a las necesidades del proceso. Esto mejora la estabilidad del lazo de control y reduce las desviaciones en el caudal de material, contribuyendo a una operación más uniforme del horno.

Desde el punto de vista del mantenimiento, la eliminación del motor de corriente continua supone una reducción significativa de las intervenciones necesarias, al eliminar componentes sujetos a desgaste como las escobillas. Esto se traduce en una disminución de los costes operativos y en un aumento de la disponibilidad del sistema.

En términos energéticos, el nuevo sistema permite optimizar el consumo eléctrico mediante el uso del variador de frecuencia, que ajusta la potencia suministrada al motor en función de la demanda real. Aunque el ahorro energético no es el principal objetivo del proyecto, se obtiene una mejora adicional en la eficiencia del sistema.

Finalmente, el análisis económico realizado confirma la viabilidad de la solución, mostrando un periodo de recuperación reducido y unos indicadores de rentabilidad favorables. En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la modernización propuesta no solo mejora el comportamiento técnico del sistema, sino que también constituye una inversión rentable desde el punto de vista industrial.

## **5. Conclusiones**

El desarrollo del presente trabajo ha permitido analizar en profundidad el sistema de accionamiento y control de la báscula dosificadora PyroClon, identificando sus principales limitaciones y proponiendo una solución de mejora basada en tecnologías actuales. A partir del estudio del sistema original, se ha puesto de manifiesto que el uso de un motor de corriente continua y un sistema de medida analógico introduce problemas significativos en términos de mantenimiento, fiabilidad y calidad de la señal de realimentación.

La solución propuesta, basada en la sustitución del accionamiento por un motor asíncrono trifásico controlado mediante variador de frecuencia, junto con la implementación de un sistema de medida digital basado en sensor NAMUR y convertidor de frecuencia a señal analógica, permite resolver de forma efectiva las deficiencias detectadas. Esta nueva arquitectura proporciona una mayor estabilidad en la señal de velocidad, una mejora en la respuesta dinámica del sistema y una reducción significativa de las necesidades de mantenimiento.

Desde el punto de vista del control, la mejora en la calidad de la señal de realimentación permite una regulación más precisa del caudal de material, contribuyendo a una operación más estable del horno y a una mayor eficiencia del proceso productivo. Asimismo, la integración del sistema en el entorno de control existente se realiza de forma compatible, sin requerir modificaciones estructurales relevantes, lo que facilita su implementación en planta.

El análisis económico realizado confirma que la solución propuesta es viable y rentable. La reducción de costes de mantenimiento, la disminución del riesgo de paradas no planificadas y el ahorro energético permiten recuperar la inversión en un plazo reducido, obteniéndose además indicadores financieros claramente favorables.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la modernización del sistema de accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon constituye una mejora significativa tanto desde el punto de vista técnico como económico, aportando una solución robusta, eficiente y alineada con los estándares actuales de la industria.

## **6. Referencias**

- [1] ABB. ACS880-01 drives hardware manual. ABB Oy, Finland.
- [2] ABB. ACS880 primary control program firmware manual. ABB Oy, Finland.
- [3] ABB. ACS880 Industrial Drives – Technical Catalogue. ABB Oy, Finland.
- [4] ABB. ACS880-01-09A4-3 product details. ABB.
- [5] Advanced Systems Baltic. ABB ACS880-01-09A4-3 frequency inverter, ficha comercial y precio orientativo.

[6] CEMEX España Operaciones, S.L.U. Documentación interna de procesos industriales, planos eléctricos, manual de la báscula dosificadora, datos de operación y estimaciones económicas de planta. Documento no publicado.

[7] Fernández Bernal, F. Apuntes y documentación docente de la asignatura Máquinas Eléctricas. Universidad Pontificia Comillas, ICAI. Documento docente no publicado.

[8] PR electronics. 5225 Programmable f/I – f/f Converter Manual. PR electronics A/S.

[9] PR electronics. 5225A Programmable f/I – f/f Converter, ficha técnica de producto.

[10] RS Components España. PR Electronics 5225A1, acondicionador de señal / convertidor de frecuencia, ficha comercial y precio orientativo.

[11] Siemens AG. Electric Motors – SIMOTICS General Purpose Motors Catalogue.

[12] WEG. Low Voltage Motors – Technical Data and Selection Guide.

# **IMPROVEMENT AND OPTIMIZATION OF THE PYROCLON DOSING WEIGH FEEDER FOR KILN FEEDING IN A CEMENT PLANT**

Author: Robles Roca, Laura.

Supervisors: Argente Dolz, Fernando. Baringo Morales, Ana

Collaborating Entity: Cemex España Operaciones S.L.U

## **ABSTRACT**

This work presents the improvement and optimization of the drive and control system of the PyroClon dosing weigh feeder used for kiln feeding in a cement plant. The existing system, based on a DC motor and an analog measurement system, was analyzed, identifying limitations in reliability, maintenance, and signal stability. A modern solution based on a three-phase asynchronous motor controlled by a frequency converter, together with a digital measurement system using a NAMUR sensor and a PR electronics 5225 converter, is proposed. The results show improved system reliability, reduced operational costs, and more accurate material dosing, confirming the technical and economic feasibility of the solution.

Keywords: Weigh feeder, frequency converter, NAMUR, speed control, cement industry.

## **1. Introduction**

In the cement industry, precise control of the material feed rate to the kiln is essential to ensure process stability and product quality. Dosing weigh feeders, such as the PyroClon system, are critical components responsible for regulating material flow through speed control of the conveying system.

However, many industrial installations still rely on outdated technologies, including DC motors and analog measurement systems. These systems present significant drawbacks such as high maintenance requirements, reduced reliability, and poor signal quality. These limitations can lead to process instability, increased operational costs, and difficulties in integrating with modern automation systems.

In this context, the need arises to modernize the drive and control system using current industrial technologies, improving both system performance and maintainability.

## **2. Project Definition**

The main objective of this project is to improve and optimize the drive and control system of the PyroClon dosing weigh feeder used for kiln feeding in a cement plant. This system plays a key role in the production process, as it directly regulates the material flow entering the kiln, affecting both thermal stability and final product quality.

The project begins with a detailed analysis of the existing system, which is based on a DC motor and an analog speed measurement system. This configuration, although widely used in older industrial installations, presents several limitations, including high maintenance costs due to mechanical wear of brushes and commutators, and low robustness of the measurement system, leading to noisy and unstable signals.

Based on this analysis, the project proposes replacing these elements with a modern solution aimed at improving reliability, reducing operating costs, and increasing control accuracy. The proposed system includes a three-phase asynchronous motor controlled by a frequency converter and a digital speed measurement system.

### **3. Description of the Model/System/Tool**

The proposed solution replaces the original drive system with a modern speed control architecture adapted to industrial requirements. The core of the system is a three-phase asynchronous motor, selected for its robustness, low maintenance, and high reliability.

The motor speed is controlled by an ABB ACS880 frequency converter, which enables precise regulation using vector control techniques. This allows the system to dynamically adjust speed according to process demands, ensuring stable operation.

The speed measurement system is based on a NAMUR sensor installed on a toothed wheel mounted on the rotor shaft. This sensor generates a frequency signal proportional to the rotational speed. The signal is converted into a standard 4–20 mA analog signal using a PR electronics 5225 converter, enabling integration with the PLC, which manages the control loop.

### **4. Results**

The implementation of the proposed system results in a significant improvement in performance. The most notable result is the stabilization of the speed signal, which in the original system was affected by noise and instability. The new system provides a cleaner and more linear signal, improving control accuracy.

The use of a frequency converter also enhances speed regulation, allowing continuous adaptation to process conditions. This improves the stability of the control loop and reduces deviations in material flow.

Additionally, maintenance requirements are significantly reduced due to the elimination of wear components such as brushes. Energy efficiency is also improved, as the system adjusts power consumption according to demand.

The economic analysis confirms the feasibility of the solution, showing a short payback period and strong profitability.

## 5. Conclusions

This work demonstrates that the modernization of the PyroClon dosing weigh feeder drive system significantly improves both technical performance and economic efficiency. The proposed solution enhances system reliability, reduces maintenance costs, and improves control accuracy, while maintaining compatibility with the existing industrial environment.

## 6. References

- [1] ABB. ACS880-01 drives hardware manual. ABB Oy, Finland.
- [2] ABB. ACS880 primary control program firmware manual. ABB Oy, Finland.
- [3] ABB. ACS880 Industrial Drives – Technical Catalogue. ABB Oy, Finland.
- [4] ABB. ACS880-01-09A4-3 product details. ABB.
- [5] Advanced Systems Baltic. ABB ACS880-01-09A4-3 frequency inverter, ficha comercial y precio orientativo.
- [6] CEMEX España Operaciones, S.L.U. Documentación interna de procesos industriales, planos eléctricos, manual de la báscula dosificadora, datos de operación y estimaciones económicas de planta. Documento no publicado.
- [7] Fernández Bernal, F. Apuntes y documentación docente de la asignatura Máquinas Eléctricas. Universidad Pontificia Comillas, ICAI. Documento docente no publicado.
- [8] PR electronics. 5225 Programmable f/I – f/f Converter Manual. PR electronics A/S.
- [9] PR electronics. 5225A Programmable f/I – f/f Converter, ficha técnica de producto.
- [10] RS Components España. PR Electronics 5225A1, acondicionador de señal / convertidor de frecuencia, ficha comercial y precio orientativo.
- [11] Siemens AG. Electric Motors – SIMOTICS General Purpose Motors Catalogue.
- [12] WEG. Low Voltage Motors – Technical Data and Selection Guide.

## *Índice de la memoria*

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Capítulo 1. Introducción .....</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1 Contextualización.....  | 5         |
| 1.2 Motivación del proyecto.....  | 5         |
| 1.3 Descripción del trabajo.....  | 6         |
| 1.4 Objetivos .....   | 8         |
| 1.5 Metodología.....  | 9         |
| 1.6 Organización de la memoria.....   | 10        |
| <b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....</b>                                    | <b>11</b> |
| 2.1 Contexto industrial del proyecto .....  | 11        |
| 2.2 Importancia de la dosificación de combustible en el proceso de clinkerización.....    | 12        |
| 2.3 Proceso de molienda, transporte y alimentación de coque de petróleo en la planta..... | 13        |
| 2.4 Funcionamiento de una báscula dosificadora (tipo Pfister).....                        | 15        |
| 2.5 Diferencia entre motores de corriente continua y corriente alterna.....               | 19        |
| 2.6 Variador de frecuencia .....  | 21        |
| <b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión .....</b>  | <b>23</b> |
| 3.1 Situación actual de la instalación .....  | 23        |
| 3.1.1 El Armario de Control: Distribución y Funciones.....                                | 24        |
| 3.1.2 Accionamiento del Rotor y Motor .....   | 24        |
| 3.1.3 Sistema de Pesaje (Báscula).....  | 25        |
| 3.1.4 Componentes de Campo y Maniobra Externa.....  | 25        |
| 3.2 Motor de corriente continua .....   | 26        |
| 3.3 Medición de la velocidad del rotor.....   | 28        |
| 3.4 Variador de frecuencia .....  | 29        |
| <b>Capítulo 4. Modelo Desarrollado.....</b>   | <b>30</b> |
| 4.1 Análisis del Sistema .....  | 30        |
| 4.2 Diseño.....   | 32        |
| 4.2.1 Metodología para la selección del nuevo accionamiento .....                         | 32        |
| 4.2.2 Estudio de los motores eléctricos.....  | 33        |
| 4.3 Selección del motor.....  | 47        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.4 Integración del Variador de Frecuencia .....                 | 50        |
| 4.5 Implementación de la realimentación digital .....            | 57        |
| <b>Capítulo 5. Análisis de Resultados.....</b>                   | <b>65</b> |
| 5.1 Estudio Económico y Análisis de Rentabilidad .....           | 65        |
| 5.1.1 Inversión inicial (CAPEX).....                             | 65        |
| 5.1.2 Ahorros derivados del proyecto (OPEX).....                 | 65        |
| 5.1.3 Periodo de recuperación (Payback).....                     | 67        |
| 5.1.4 Valor Actual Neto (VAN).....                               | 67        |
| 5.1.5 Tasa Interna de Retorno (TIR) .....                        | 68        |
| 5.1.6 Ratio Beneficio / Coste (B/C) .....                        | 68        |
| <b>Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>          | <b>70</b> |
| 6.1 Conclusiones técnicas.....                                   | 70        |
| 6.2 Conclusiones económicas.....                                 | 71        |
| 6.3 Aportaciones del trabajo.....                                | 72        |
| 6.4 Limitaciones y trabajos futuros .....                        | 72        |
| <b>ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR</b> |           |
| <b>VELOCIDAD.....</b>  | <b>75</b> |
| <b>ANEXO II EXCEL DE CÁLCULO DEL MODELO EN L.....</b>            | <b>84</b> |
| <b>ANEXO III: REFLEXIÓN SOBRE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO</b>    |           |
| <b>SOSTENIBLE .....</b>  | <b>85</b> |

## *Índice de figuras*

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Proceso de molienda, transporte y alimentación de coque de petróleo .....   | 14 |
| Figura 2. Báscula Dosificadora Pfister DRW .....  | 16 |
| Figura 3. Plano de la báscula dosificadora Pfister DRW .....  | 17 |
| Figura 4. Funcionamiento de la báscula dosificadora Pfister en 3D .....   | 18 |
| Figura 5. Componentes principales de la báscula dosificadora .....  | 19 |
| Figura 6. Plano del motor de CC actualmente instalado .....   | 27 |
| Figura 7. Motores de 400V 50Hz IE4 2 y 4 polos .....  | 35 |
| Figura 8. Esquema de Simulink empleado para la simulación .....   | 36 |
| Figura 9. Curvas par-velocidad del accionamiento de 4 kW y 2 polos con compensación de tensión y límite de tensión.....     | 38 |
| Figura 10. Comparativa par-velocidad del motor de 4 kW y 2 polos .....  | 39 |
| Figura 11. Curvas par-velocidad del accionamiento de 5,5 kW y 2 polos con compensación de tensión y límite de tensión.....  | 41 |
| Figura 12. Comparativa par-velocidad del motor de 5,5 kW y 2 polos .....  | 42 |
| Figura 13. Curvas par-velocidad del accionamiento de 4 kW y 4 polos con compensación de tensión y límite de tensión .....   | 43 |
| Figura 14. Comparativa par-velocidad del motor de 4 kW y 4 polos .....  | 44 |
| Figura 15. Curvas par-velocidad del accionamiento de 5,5 kW y 4 polos con compensación de tensión y límite de tensión ..... | 46 |
| Figura 16. Comparativa par-velocidad del motor de 5,5 kW y 4 polos .....  | 47 |

## *Índice de tablas*

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Características electromecánicas del motor .....  | 28 |
| Tabla 2. Modelo en L obtenido de los motores considerados en pu .....                                      | 38 |
| Tabla 3. Resumen de las alternativas y su valoración .....   | 50 |
| Tabla 4. Parámetros básicos del motor en el variador ABB. Grupo 99 .....                                   | 53 |
| Tabla 5. Límites de operación y seguridad del variador ABB. Grupo 30 .....                                 | 54 |
| Tabla 6. Parámetros de rampas y control de velocidad del variador ABB. Grupos 23 y 28 .....                | 55 |
| Tabla 7. Parámetros de adaptación a la red de planta del variador ABB. Grupo 95 .....                      | 55 |
| Tabla 8. Parámetros de configuración de entradas y salidas del variador ABB .....                          | 56 |
| Tabla 9. Parámetro de optimización del lazo de control de velocidad del variador ABB. Grupo 25 .....       | 56 |
| Tabla 10. Comparación estimada de estabilidad entre el convertidor Taco-Flex y el PR electronics 5225..... | 58 |
| Tabla 11. Estimación del error de dosificación asociado a la deriva de señal .....                         | 59 |
| Tabla 12. Estimación económica del impacto de un error medio de dosificación .....                         | 59 |
| Tabla 13. Configuración general del convertidor PR electronics 5225 .....                                  | 61 |
| Tabla 14. Configuración de entrada del convertidor PR electronics 5225 .....                               | 62 |
| Tabla 15. Configuración de salida analógica del convertidor PR electronics 5225 .....                      | 63 |
| Tabla 16. Configuración de salidas digitales del convertidor PR electronics 5225 .....                     | 64 |
| Tabla 17. Alimentación y condiciones de operación del convertidor PR electronics 5225 .....                | 65 |

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## *1.1 CONTEXTUALIZACIÓN*

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objeto la sustitución y modernización del sistema de accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon, equipo fundamental dentro del proceso industrial en el que se encuentra integrada, en la fábrica de cemento de la empresa Cemex España en Morata de Jalón, Zaragoza. Este proyecto se enmarca en el ámbito de la ingeniería industrial, concretamente en el área de máquinas eléctricas, electrónica de potencia y control de procesos.

En los entornos industriales actuales, la fiabilidad, precisión y eficiencia energética de los sistemas de accionamiento resultan factores determinantes para garantizar la continuidad del proceso productivo. Los sistemas tradicionales, basados en tecnologías ya obsoletas o con limitaciones de control, pueden generar problemas de mantenimiento, falta de repuestos, menor precisión en la regulación o ineficiencias energéticas [6], [12], [13].

En este contexto, el proyecto aborda el análisis del sistema existente, la evaluación de sus limitaciones técnicas y la propuesta de una solución basada en tecnologías actuales de accionamiento eléctrico. Para ello, se estudian tanto los requisitos mecánicos y eléctricos de la báscula dosificadora como las características del nuevo sistema de accionamiento, justificando su selección desde el punto de vista técnico y funcional.

A lo largo del documento se describen los fundamentos teóricos necesarios, el estudio previo de la instalación, el dimensionamiento del nuevo accionamiento, la metodología seguida en su implementación y los resultados obtenidos.

## *1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO*

La motivación principal de este proyecto surge de la necesidad de modernizar el sistema de accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon, cuyo sistema original presentaba limitaciones técnicas asociadas a su antigüedad, disponibilidad de repuestos y prestaciones de control [6].

La disponibilidad de una línea de dosificación de respaldo plenamente operativa resulta esencial para garantizar una alimentación continua de combustible al horno y, en consecuencia, la estabilidad del proceso productivo. En la actualidad, el accionamiento de

la báscula PyroClon presenta un riesgo creciente de fallo y requiere intervenciones frecuentes de mantenimiento correctivo, lo que compromete su fiabilidad como equipo de reserva [6].

En este contexto, la motivación del proyecto se centra en asegurar la operatividad de la báscula de backup mediante una actualización tecnológica del accionamiento. Con dicha mejora se persigue reducir el riesgo de paradas no programadas, incrementar la eficiencia energética del sistema, simplificar las tareas de mantenimiento y disminuir los costes asociados, así como garantizar una integración completa y actualizada con la arquitectura de control existente en la planta, ya que cualquier desviación en la regulación de velocidad o en el control del par puede traducirse en errores de dosificación, pérdidas económicas o ineficiencias operativas [6].

Además, este proyecto representa una oportunidad para aplicar de forma integrada conocimientos adquiridos durante el grado en Tecnologías Industriales, tales como el estudio de máquinas eléctricas, electrónica de potencia, sistemas de regulación, protecciones eléctricas y análisis de procesos industriales reales.

En definitiva, la modernización del accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon responde tanto a una necesidad técnica real como a un objetivo formativo, permitiendo desarrollar una solución industrial viable, justificada y adaptada a los requerimientos del proceso.

### ***1.3 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO***

El sistema de accionamiento actualmente instalado en la báscula dosificadora Pfister PyroClon se basa en una tecnología que, si bien fue adecuada en el momento de su implantación, presenta en la actualidad limitaciones técnicas, operativas y estratégicas que comprometen su sostenibilidad a medio y largo plazo [6]. La sustitución del accionamiento no responde, por tanto, a una mejora estética ni a una actualización opcional, sino a una necesidad técnica real derivada de la evolución tecnológica del sector industrial.

En primer lugar, desde el punto de vista tecnológico, el empleo de motores de corriente continua en aplicaciones industriales de nueva implantación es hoy en día prácticamente residual. La industria ha convergido de forma clara hacia soluciones basadas en motores asíncronos trifásicos gobernados mediante variadores de frecuencia con control vectorial. Esta transición no ha sido arbitraria, sino consecuencia de mejoras significativas en electrónica de potencia, algoritmos de control y fiabilidad de componentes semiconductores [1], [2], [3], [7]. Mantener un sistema basado en corriente continua implica operar con una

tecnología que ha dejado de ser estándar, lo que incrementa el riesgo asociado a la obsolescencia.

En segundo lugar, el accionamiento actual presenta limitaciones estructurales derivadas de la propia naturaleza del motor de corriente continua. La presencia de escobillas y colector introduce desgaste mecánico, necesidad de mantenimiento periódico y riesgo de generación de chispas [7]. En un entorno con presencia de polvo de coque pulverizado, potencialmente combustible, esta característica adquiere una relevancia adicional desde el punto de vista de la seguridad industrial. La sustitución por un motor asíncrono elimina estos elementos mecánicos críticos, aumentando la robustez del sistema y reduciendo intervenciones de mantenimiento.

Desde una perspectiva económica, el mantenimiento de un sistema obsoleto implica costes crecientes asociados a repuestos específicos, intervenciones correctivas y posibles tiempos de parada prolongados ante averías. En una planta cementera, el horno rotatorio constituye el corazón del proceso productivo, y cualquier interrupción no planificada puede suponer pérdidas económicas de gran magnitud. La fiabilidad del sistema de dosificación de combustible es, por tanto, estratégica. Un accionamiento moderno no solo reduce la probabilidad de fallo, sino que permite incorporar sistemas avanzados de diagnóstico y monitorización que anticipen incidencias antes de que se traduzcan en paradas de producción.

Adicionalmente, la evolución del sector industrial hacia modelos de digitalización e integración de datos, enmarcados dentro del concepto de Industria 4.0, exige que los equipos de planta sean capaces de comunicarse mediante protocolos industriales estandarizados y proporcionar información detallada sobre su estado operativo. El sistema actual presenta limitaciones claras en este ámbito, al estar basado en señales analógicas tradicionales y carecer de capacidades avanzadas de comunicación. La incorporación de un variador de frecuencia moderno permite la integración directa con el sistema de control distribuido de la planta, facilitando la supervisión remota, el registro histórico de parámetros y la implementación futura de estrategias de mantenimiento predictivo.

Desde el punto de vista energético, la optimización del consumo eléctrico constituye un objetivo prioritario en la industria cementera, caracterizada por elevados requerimientos energéticos. Los motores asíncronos modernos de alta eficiencia, combinados con variadores de frecuencia que ajustan la potencia consumida a la demanda real del proceso, permiten mejorar el rendimiento global del sistema [1], [3], [12], [13]. Aunque la báscula dosificadora no representa la mayor carga eléctrica de la planta, su funcionamiento continuo convierte cualquier mejora de eficiencia en un ahorro acumulativo relevante a lo largo del tiempo.

Si se analiza el proyecto desde una perspectiva de mercado y competitividad industrial, la modernización del accionamiento se alinea con las mejores prácticas actuales del sector cementero. Las principales plantas de producción a nivel internacional han migrado progresivamente sus sistemas críticos hacia soluciones basadas en variadores de frecuencia, precisamente por las ventajas en fiabilidad, integración y eficiencia descritas anteriormente. Mantener tecnologías obsoletas puede suponer una desventaja competitiva frente a instalaciones que operan con sistemas optimizados y digitalizados.

En términos de inversión, la sustitución del accionamiento puede considerarse una decisión estratégica orientada a reducir riesgos futuros y mejorar la disponibilidad operativa. Desde un enfoque comercial, el proyecto resulta atractivo porque ofrece un retorno indirecto en forma de reducción de mantenimiento, minimización de paradas imprevistas, mejora en la estabilidad del proceso y adaptación a estándares tecnológicos actuales. No se trata únicamente de cambiar un motor, sino de actualizar un elemento crítico del sistema térmico del horno, incrementando su fiabilidad y alineándolo con la evolución tecnológica del sector.

En definitiva, la justificación del proyecto se sustenta en cuatro pilares fundamentales: obsolescencia tecnológica del sistema actual, mejora de la fiabilidad y seguridad operativa, optimización energética y alineación con los estándares industriales modernos. La sustitución del accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon no responde a una iniciativa experimental, sino a una necesidad técnica objetiva que garantiza la continuidad, estabilidad y competitividad del proceso productivo.

## **1.4 OBJETIVOS**

El objetivo general del proyecto consiste en definir y justificar técnicamente la solución de accionamiento más adecuada para la aplicación, garantizando que el nuevo sistema no se encuentre sobredimensionado y que responda exactamente a las exigencias reales del proceso industrial.

El resto de los objetivos del trabajo se enumeran a continuación:

1. Definición de las características eléctricas del motor, selección de protecciones y cableados, diseño del montaje mecánico, modelado del control y supervisión del variador de frecuencia. Se busca que la solución resultante cumpla con la normativa vigente, con los estándares internos de la planta y con los requisitos de seguridad industrial.

2. Parametrización del variador de frecuencia, ajustando sus valores de operación para garantizar un funcionamiento estable y preciso. Esto incluye la configuración de rampas, modos de control, límites operativos, estrategias de protección y todas aquellas funciones necesarias para asegurar una dosificación repetible y fiable del material hacia el horno.
3. Análisis de la integración del nuevo accionamiento en el sistema de control existente. Para ello, se pretende estudiar la compatibilidad de las señales de mando y supervisión actualmente utilizadas, así como los requerimientos de comunicación con los PLC y su posterior supervisión desde el sistema SCADA de planta. Este análisis tiene como finalidad verificar la posibilidad de integrar el nuevo variador de velocidad sin necesidad de realizar modificaciones significativas en la arquitectura de control existente, manteniendo el uso de señales digitales y analógicas normalizadas, tales como 4–20 mA para realimentación y 0–10 V para la consigna de velocidad. De este modo, se busca garantizar que una eventual transición al nuevo accionamiento resulte transparente para los operadores y que la información generada por el variador pueda ser monitorizada y registrada con la misma funcionalidad que el resto de los equipos de la instalación.
4. Recopilación de un conjunto de documentos claros y completos que permitan no solo ejecutar la instalación del nuevo accionamiento, sino también facilitar futuras tareas de mantenimiento, ampliaciones o modificaciones en la planta. Esta documentación incluirá los cálculos justificativos, planos, esquemas eléctricos y de control y diagramas de conexiones.
5. Selección de la solución óptima desde el punto de vista técnico y económico, justificando su idoneidad mediante criterios de ingeniería, evitando sobredimensionamientos innecesarios y garantizando una operación robusta y segura en entorno industrial.

## **1.5 METODOLOGÍA**

Para alcanzar los objetivos definidos, se ha seguido una metodología estructurada basada en análisis técnico, modelado teórico y evaluación comparativa.

La primera fase del proyecto ha consistido en la recopilación y análisis de los datos disponibles del sistema actual. A partir de la información de placa del motor y de los parámetros operativos de la báscula dosificadora, se determinaron las magnitudes eléctricas

fundamentales, tales como potencia absorbida, factor de potencia, corriente nominal y velocidad de giro.

A continuación, se procedió al cálculo del deslizamiento y del par nominal del motor, permitiendo obtener el par transmitido al rotor a través de la relación total de transmisión. Este análisis permitió establecer una estimación precisa del par requerido por el proceso y evaluar si el motor instalado presenta sobredimensionamiento.

En una segunda etapa, se desarrolló el modelado eléctrico del motor asíncrono mediante el circuito equivalente por fase, expresando los parámetros en sistema por unidad. Ante la ausencia de ciertos datos constructivos, se emplearon valores típicos contrastados en bibliografía técnica especializada y se ajustaron en función de las condiciones nominales de funcionamiento.

Posteriormente, se analizaron las curvas características par-velocidad correspondientes a distintas soluciones de accionamiento: motor de corriente continua, motor asíncrono con arranque directo y motor asíncrono gobernado por variador de frecuencia. Este análisis permitió evaluar su comportamiento en régimen estacionario y transitorio, así como su idoneidad para aplicaciones de baja velocidad con elevada reducción mecánica.

## **1.6 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA**

El resto de la memoria se estructura en varios capítulos con el objetivo de presentar de forma ordenada el desarrollo del proyecto.

En el Capítulo 2 se describen las tecnologías relacionadas con el sistema estudiado, incluyendo el contexto industrial, el proceso de alimentación de coque, el funcionamiento de la báscula dosificadora, los tipos de motores analizados y el variador de frecuencia.

En el Capítulo 3 se analiza el estado actual de la instalación, describiendo sus principales componentes: armario de control, accionamiento del rotor y motor, sistema de pesaje y elementos de campo.

El Capítulo 4 recoge el análisis del sistema, el diseño de la solución propuesta y la selección del motor eléctrico más adecuado para la aplicación.

En el Capítulo 5 se presentan y analizan los resultados obtenidos. Finalmente, el Capítulo 6 recoge las conclusiones y posibles trabajos futuros, mientras que al final de la memoria se incluye la bibliografía empleada, así como los anexos que contienen el código de MATLAB y el archivo Excel utilizados en el desarrollo del proyecto.

## **Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

El presente capítulo tiene como finalidad describir en detalle las tecnologías, equipos y fundamentos técnicos implicados en el desarrollo del proyecto. Dado que la sustitución del accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon se enmarca en un proceso industrial complejo, resulta necesario comprender el contexto productivo, la función específica del sistema dentro del proceso global y los principios de funcionamiento de las básculas dosificadoras de tipo gravimétrico.

Se abordarán, por tanto, el proceso de molienda y transporte de carbón, la función de la báscula dosificadora en el sistema, el papel específico del sistema PyroClon en la alimentación al horno y el funcionamiento técnico de una báscula dosificadora tipo Pfister.

### ***2.1 CONTEXTO INDUSTRIAL DEL PROYECTO***

El proyecto se desarrolla en el entorno de una planta industrial dedicada a la producción de cemento. Dentro de este proceso, la alimentación controlada de combustible al sistema de combustión resulta crítica para garantizar la estabilidad térmica del horno y la calidad del producto final.

La báscula dosificadora PyroClon forma parte del sistema de alimentación de combustible sólido, permitiendo regular el caudal másico suministrado al proceso [6]. Este equipo opera de manera continua y está sometido a condiciones exigentes de funcionamiento, tanto desde el punto de vista mecánico como eléctrico.

En este contexto, la fiabilidad del sistema de accionamiento es un factor clave. Cualquier fallo o desviación en la regulación de velocidad puede afectar directamente al balance energético del horno, provocar inestabilidades térmicas o generar paradas no planificadas con el consiguiente impacto económico [6].

La sustitución del accionamiento se plantea, por tanto, dentro de una estrategia de modernización tecnológica orientada a mejorar la disponibilidad del sistema, optimizar su rendimiento y asegurar la continuidad operativa del proceso industrial.

## ***2.2 IMPORTANCIA DE LA DOSIFICACIÓN DE COMBUSTIBLE EN EL PROCESO DE CLINKERIZACIÓN***

El proceso de clinkerización requiere un control preciso de la temperatura en el horno rotatorio, alcanzando valores del orden de 1400–1500 °C [6]. Para mantener dichas condiciones térmicas, es imprescindible regular de forma exacta el aporte energético mediante la dosificación de combustible.

Una variación en el caudal de combustible puede traducirse en oscilaciones térmicas que afecten a la calidad del clínker, alterando sus propiedades físicas y químicas. Además, un control inadecuado puede generar ineficiencias energéticas, incremento del consumo específico o mayores emisiones contaminantes [6].

La báscula dosificadora desempeña un papel esencial en este control, ya que permite ajustar el flujo de material en función de las consignas del sistema de regulación del proceso. Por ello, el accionamiento que gobierna el movimiento del sistema de alimentación debe garantizar estabilidad, precisión y capacidad de respuesta ante cambios de carga.

La mejora del sistema de accionamiento contribuye directamente a una regulación más fina del caudal, reduciendo desviaciones y mejorando la eficiencia global del proceso de clinkerización.

### 2.3 PROCESO DE MOLIENDA, TRANSPORTE Y ALIMENTACIÓN DE COQUE DE PETRÓLEO EN LA PLANTA

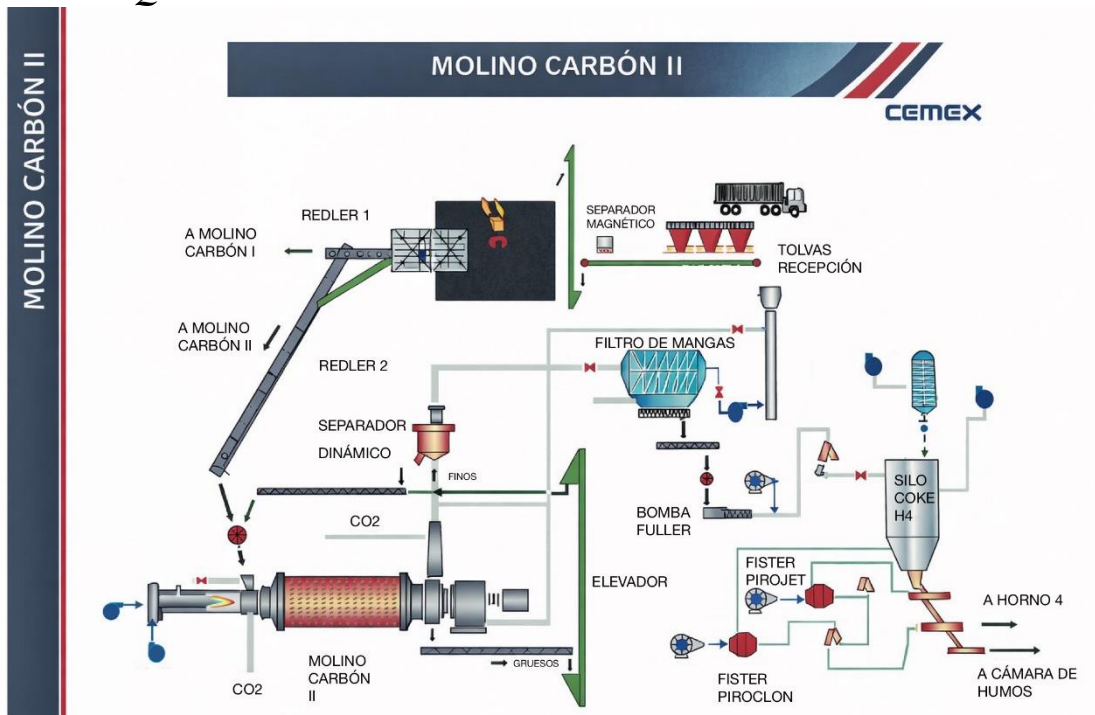


Figura 1: Proceso de molienda, transporte y alimentación de coque de petróleo [6]

La Figura 1 muestra el esquema general de la instalación de molienda, transporte y alimentación de coque de petróleo en la planta de carbón. El coque de petróleo, empleado como combustible sólido principal en el proceso de clinkerización por su elevado poder calorífico, sigue una serie de etapas mecánicas, neumáticas y de control desde su recepción hasta su inyección en el sistema de combustión.

El material llega a fábrica mediante camión y se descarga en una tolva de recepción, desde donde es conducido mediante una cinta transportadora y un elevador de cangilones hasta la zona de almacenamiento. Durante este recorrido, un separador magnético elimina posibles elementos metálicos presentes en el coque, evitando daños en los equipos posteriores, especialmente en el molino.

Desde el box de almacenamiento, el coque es trasladado mediante el puente grúa hasta la tolva de proceso. A partir de ella, el material cae al redler 1, que puede alimentar el Molino de Carbón I en situaciones de mantenimiento o indisponibilidad del Molino de Carbón II, o bien conducirlo hacia el redler 2, que constituye la vía habitual de alimentación. Antes de

*DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS*

---

entrar al Molino de Carbón II, el coque atraviesa una esclusa rotativa, encargada de mantener la estanqueidad del sistema y evitar retornos de aire.

En el Molino de Carbón II, el material es secado mediante el aporte térmico de un quemador de fuel y posteriormente molido mediante bolas de acero hasta alcanzar la granulometría requerida. El coque molido es transportado hacia un separador dinámico de velocidad variable, donde las partículas gruesas son recirculadas al molino, mientras que las partículas finas son enviadas al filtro de mangas como producto terminado.

En el filtro de mangas se separa el coque pulverizado del flujo gaseoso. El material recogido cae a los sinfines y, posteriormente, a una esclusa que alimenta la bomba Fuller. Mediante transporte neumático, el combustible pulverizado es impulsado hasta el pantalón distribuidor, desde donde puede enviarse hacia el Horno III, actualmente inoperativo, o hacia la tolva de almacenamiento del Horno IV, correspondiente a la línea activa de producción.

Finalmente, desde la tolva del Horno IV, el coque pulverizado es alimentado al quemador principal del horno rotatorio mediante una soplante y la báscula dosificadora Pfister PyroJet. Este equipo constituye el sistema principal de dosificación, garantizando un suministro preciso, estable y continuo del combustible sólido en función de la demanda térmica del proceso.

La instalación dispone además de una báscula Pfister PyroClon, asociada a su correspondiente soplante, que permite alimentar coque pulverizado a la cámara de humos o actuar como sistema alternativo en caso de indisponibilidad de la PyroJet. Esta configuración aporta redundancia y flexibilidad operativa, aspectos fundamentales en un proceso industrial continuo como la fabricación de cemento

## **2.4 *FUNCIONAMIENTO DE UNA BÁSCULA DOSIFICADORA (TIPO PFISTER).***



*Figura 2: Báscula Dosificadora Pfister DRW [6]*

La Figura 2 muestra la báscula dosificadora Pfister DRW, un sistema electromecánico diseñado para la dosificación gravimétrica continua de combustibles sólidos finamente molidos, como coque de petróleo, carbón o cenizas, en procesos de fabricación de clínker. Su diseño cerrado y compacto integra en una misma unidad la extracción del material, el pesaje, la regulación del caudal y la descarga hacia el transporte neumático, garantizando una alimentación estable y precisa al sistema de combustión [6].

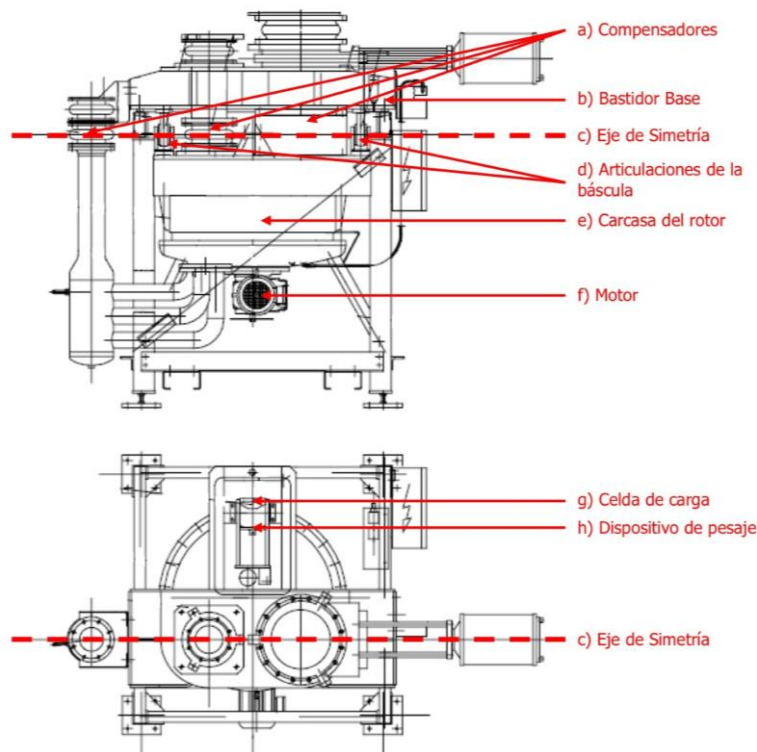
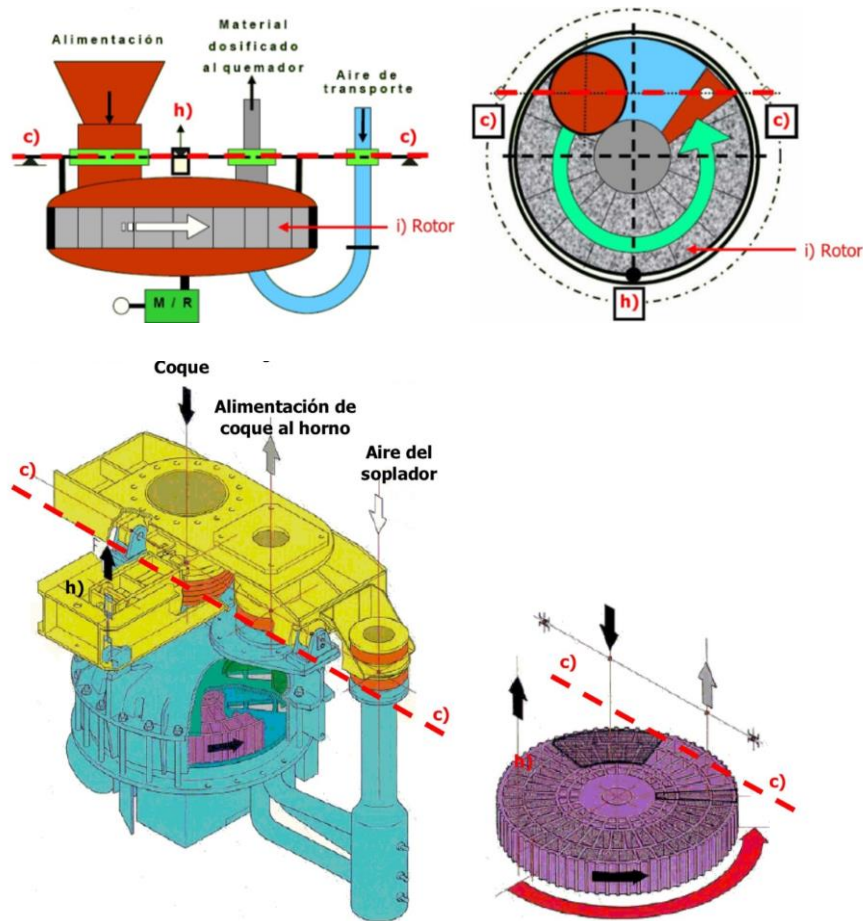


Figura 3: Plano de la báscula dosificadora Pfister DRW [6]

Como se observa en la Figura 3, el principio de funcionamiento se basa en una estructura pivotante apoyada sobre un bastidor mediante articulaciones de báscula y suspendida de un dispositivo de pesaje con celda de carga. El eje pivotante se encuentra alineado con las juntas compensadoras de entrada y salida, de forma que las fuerzas externas generadas por la presión del aire o por las tuberías se compensan y no afectan a la medición del peso del material.

El proceso comienza con la alimentación del material desde el silo principal hacia una pretolva, pasando por una guillotina de aislamiento y una válvula rotatoria. Esta pretolva mantiene una cantidad de material estable antes de su entrada al rotor, evitando fluctuaciones en la alimentación. Para ello, el sistema cuenta con celdas de carga que permiten controlar el nivel de llenado y ajustar la velocidad de la válvula rotatoria.

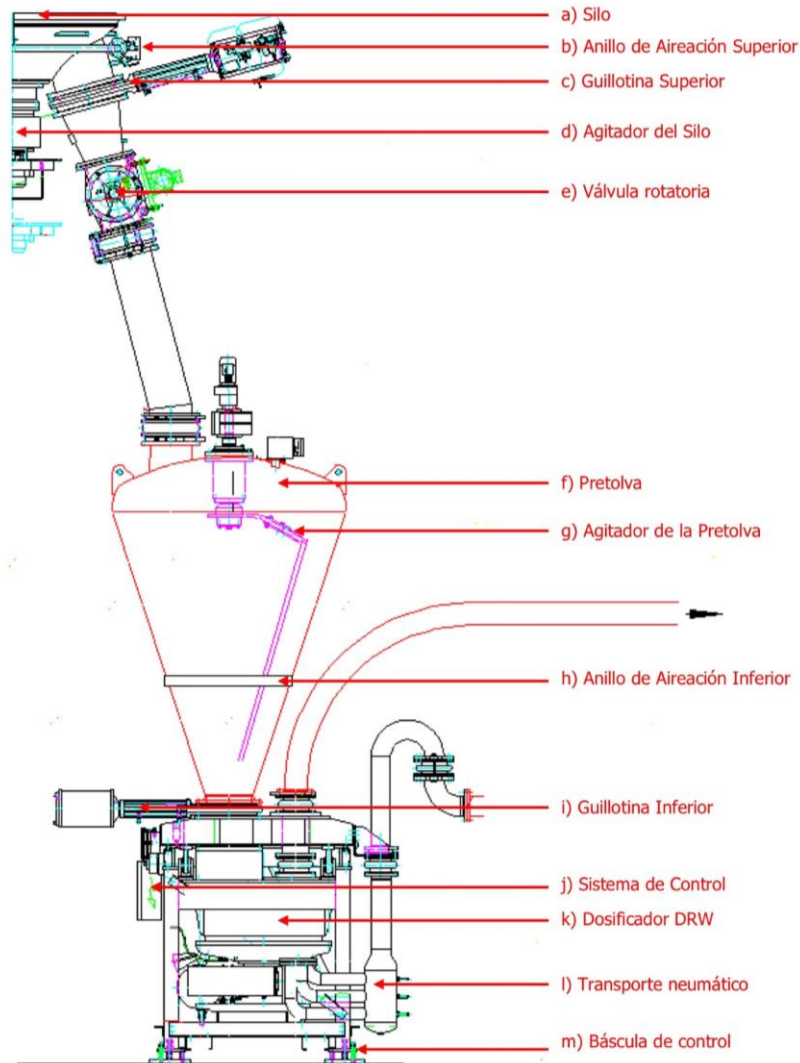


*Figura 4: Funcionamiento de la báscula dosificadora Pfister en 3D [6]*

La Figura 4 representa el funcionamiento interno de la báscula dosificadora. El material cae por gravedad en las cámaras del rotor giratorio, donde se realiza el pesaje dinámico. A partir de la señal de peso obtenida, el controlador regula automáticamente la velocidad angular del rotor para adaptar el caudal real al valor establecido por el operador, compensando posibles variaciones de densidad o llenado.

Finalmente, el material pesado es descargado mediante aire de transporte neumático, que atraviesa el dosificador y conduce el coque pulverizado hacia el quemador. Además, el sistema incorpora rutinas de calibración, como el ajuste del cero dinámico, y mecanismos de compensación de presión, con el fin de mantener la precisión de la dosificación durante el funcionamiento continuo.

La Figura 5 muestra los componentes principales de la báscula:



*Figura 5: Componentes principales de la báscula dosificadora [6]*

Los más críticos se enumeran a continuación [6]:

1. **Rotor Dosificador:** Es el elemento motriz que desplaza el material. Su velocidad es controlada por un motor de CA con variador de frecuencia y un encoder que garantiza la trazabilidad del giro.
2. **Báscula de Control:** Compuesta por cuatro celdas de carga en la base del sistema, su función es monitorizar el peso total de la pretolva para gestionar la recarga desde el silo y permitir la calibración en línea.

3. **Sistema de Control (CSC):** Es el "cerebro" electrónico (CAN System Controller) que recibe señales de las celdas de carga y el encoder, realiza los cálculos gravimétricos en tiempo real y envía la orden de mando al accionamiento del rotor.
4. **Compensación de Presión:** Debido a que el sistema opera bajo presión neumática, una celda de presión mide constantemente el interior de la pretolva para compensar matemáticamente cualquier empuje que pudiera falsear la lectura de la báscula de control.
5. **Calibración en Línea (Check-Bin):** Una característica distintiva de la Pfister DRW es su capacidad de autocalibrarse sin detener el proceso. Durante este procedimiento, se cierra la guillotina superior y se mide el vaciado real de la pretolva mediante la báscula de control. Este valor se compara con el totalizado por el rotor; si existe una desviación, el sistema calcula un factor de corrección que el operador puede aceptar para mantener la exactitud operativa.

## **2.5 DIFERENCIA ENTRE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA Y CORRIENTE ALTERNA**

Los motores eléctricos constituyen el elemento fundamental de conversión electromecánica en sistemas industriales. En aplicaciones como la dosificación de combustible en procesos de clinkerización, el tipo de motor empleado condiciona directamente la precisión de regulación, la robustez del sistema, el mantenimiento requerido y la integración con los sistemas modernos de control. Históricamente, los motores de corriente continua (CC) fueron ampliamente utilizados en aplicaciones que requerían regulación precisa de velocidad y par. Sin embargo, la evolución de la electrónica de potencia y de los sistemas de control ha impulsado la sustitución progresiva de estos por motores de corriente alterna (CA) gobernados mediante variadores de frecuencia [7].

El motor de corriente continua basa su funcionamiento en la interacción entre el campo magnético del estator y la corriente que circula por el inducido [7]. La característica principal de este tipo de máquina es que el par desarrollado es directamente proporcional a la corriente del inducido, mientras que la velocidad es proporcional a la tensión aplicada. Esta relación lineal facilita el control independiente de velocidad y par, lo que históricamente convirtió al motor de corriente continua en la solución preferida para aplicaciones de regulación fina.

No obstante, el motor de corriente continua presenta una serie de inconvenientes estructurales derivados de la presencia de colector y escobillas. Estos elementos mecánicos introducen desgaste, necesidad de mantenimiento periódico, limitaciones de velocidad y

posibles problemas de fiabilidad en entornos industriales severos [7]. Además, la generación de chispas en el colector puede representar un riesgo en atmósferas con polvo combustible, como es el caso de instalaciones de molienda y transporte de carbón o coque pulverizado. En este tipo de entornos debe considerarse la posible clasificación ATEX de la zona de trabajo, ya que la presencia de polvo combustible en suspensión puede generar atmósferas potencialmente explosivas [6], [10]. Por tanto, la eliminación de escobillas y colector supone una mejora relevante no solo desde el punto de vista del mantenimiento, sino también desde el punto de vista de la seguridad de la instalación.

Por el contrario, los motores de corriente alterna, especialmente los motores asíncronos trifásicos de jaula de ardilla presentan una construcción mucho más robusta y sencilla. Carecen de escobillas y colector, lo que reduce significativamente las tareas de mantenimiento y aumenta la fiabilidad operativa. Su principio de funcionamiento se basa en la creación de un campo magnético giratorio en el estator, que induce corrientes en el rotor, generando el par motor como consecuencia de la interacción entre ambos campos [7], [12], [13].

Tradicionalmente, el principal inconveniente de los motores de corriente alterna era la dificultad para regular su velocidad con precisión, ya que esta depende directamente de la frecuencia de la red eléctrica. Sin embargo, la aparición de los variadores de frecuencia ha eliminado esta limitación, permitiendo controlar la velocidad y el par de motores asíncronos con niveles de precisión comparables e incluso superiores a los de los motores de corriente continua [1], [2], [7].

En aplicaciones como la báscula dosificadora del sistema PyroClon, donde se requiere estabilidad a baja velocidad, respuesta dinámica adecuada y funcionamiento continuo, la combinación de motor asíncrono trifásico y variador de frecuencia ofrece claras ventajas. Entre ellas destacan la reducción del mantenimiento, mayor robustez mecánica, mejor integración con sistemas digitales de control, menor coste de ciclo de vida y mayor seguridad en entornos con polvo combustible.

Desde el punto de vista energético, los motores de corriente alterna modernos presentan elevados rendimientos, especialmente cuando cumplen con clasificaciones de eficiencia IE3 o IE4, lo que contribuye a reducir el consumo eléctrico y mejorar la eficiencia global del proceso industrial [12], [13]. En consecuencia, la sustitución de sistemas basados en corriente continua por soluciones de corriente alterna con variador de frecuencia no solo responde a criterios tecnológicos, sino también a criterios de sostenibilidad, fiabilidad y optimización económica.

## **2.6 VARIADOR DE FRECUENCIA**

El variador de frecuencia constituye el elemento central del sistema de accionamiento moderno implementado en la báscula dosificadora. Su función principal es regular la velocidad y el par del motor de corriente alterna mediante el control electrónico de la frecuencia y la tensión de alimentación, permitiendo adaptar de forma continua el régimen de giro a las necesidades del proceso [1], [2], [3].

Desde el punto de vista estructural, un variador de frecuencia se compone de tres etapas principales: rectificación, filtrado y conversión inversora. En la primera etapa, la tensión alterna trifásica de la red se convierte en tensión continua mediante un puente rectificador de diodos o tiristores. Posteriormente, esta tensión continua se estabiliza mediante un bus de corriente continua que incorpora condensadores de filtrado para reducir el rizado. Finalmente, un inversor basado en dispositivos electrónicos de potencia, generalmente IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), convierte nuevamente la tensión continua en una señal alterna trifásica de frecuencia y amplitud variables [1], [2], [3].

La regulación de la velocidad del motor se basa en la relación entre la velocidad síncrona del campo giratorio y la frecuencia de alimentación, definida por la expresión [2], [7]:

$$n_s = 60 \cdot f / p$$

donde  $n_s$  es la velocidad síncrona en revoluciones por minuto,  $f$  la frecuencia en hercios y  $p$  el número de pares de polos del motor. Al modificar la frecuencia de salida del variador, se modifica directamente la velocidad del motor, permitiendo un control continuo desde velocidad cero hasta el régimen nominal e incluso superior en determinadas configuraciones.

En aplicaciones industriales exigentes como la dosificación de combustible, no basta con variar la frecuencia; es necesario mantener una relación adecuada entre tensión y frecuencia para preservar el flujo magnético en el motor y garantizar un par estable. Este principio da lugar al control escalar  $V/f$ , empleado en aplicaciones sencillas. Sin embargo, para sistemas donde la precisión dinámica y la estabilidad a baja velocidad son críticas, se emplean técnicas de control vectorial o control orientado al campo, que permiten desacoplar matemáticamente el control del flujo y del par, ofreciendo un comportamiento dinámico comparable al de los motores de corriente continua.

El variador de frecuencia implementado en la sustitución del accionamiento de la báscula permite, además de la regulación de velocidad, incorporar funciones avanzadas de protección y diagnóstico. Entre ellas se incluyen protecciones frente a sobrecorriente, sobretensión, subtensión, sobret temperatura y pérdida de fase, así como monitorización de

parámetros eléctricos en tiempo real. Estas funcionalidades incrementan la seguridad operativa y reducen el riesgo de paradas no programadas [2].

Otra ventaja significativa del variador es la posibilidad de integración mediante protocolos de comunicación industrial con el sistema de control distribuido de la planta. Esta integración permite enviar consignas digitales de velocidad, recibir información de estado, registrar alarmas y supervisar el rendimiento del sistema desde el puesto central de operación. En un entorno industrial orientado hacia la digitalización y la mejora continua, esta capacidad de comunicación resulta esencial [1], [2], [6].

Desde el punto de vista energético, el variador de frecuencia contribuye a mejorar la eficiencia del sistema al adaptar en cada momento la potencia consumida a la demanda real del proceso. En aplicaciones de carga variable, esta característica puede suponer reducciones significativas en el consumo eléctrico respecto a sistemas de regulación mecánica o motores funcionando a velocidad fija [1],[3].

En el contexto específico de la báscula dosificadora PyroClon, el variador de frecuencia constituye el elemento clave que permite transformar una consigna de caudal másico procedente del sistema de control en una velocidad de giro precisa del órgano dosificador. Su correcta selección, dimensionamiento y parametrización resultan determinantes para garantizar la estabilidad térmica del horno, la calidad del clínker y la continuidad operativa del proceso productivo.

## **Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

En el ámbito de la dosificación de combustible sólido en plantas cementeras, la evolución tecnológica ha sido especialmente significativa en las últimas décadas. Tradicionalmente, muchas instalaciones empleaban motores de corriente continua para aplicaciones que requerían regulación precisa de velocidad y par, como es el caso de las básculas dosificadoras gravimétricas [6], [7]. Sin embargo, la aparición y consolidación de los variadores de frecuencia para motores de corriente alterna ha supuesto un cambio de paradigma en el diseño de accionamientos industriales.

Actualmente, la práctica totalidad de las nuevas instalaciones industriales destinadas a la dosificación continua de materiales pulverulentos se diseñan con motores asíncronos trifásicos gobernados por variadores de frecuencia. Los fabricantes de sistemas de pesaje continuo, como las básculas tipo Pfister, ofrecen sus soluciones integradas con este tipo de tecnología debido a sus ventajas en fiabilidad, mantenimiento y precisión dinámica [1], [2], [3], [7].

Desde el punto de vista académico y técnico, numerosos estudios en el ámbito de la electrónica de potencia y el control de máquinas eléctricas han demostrado que los sistemas de accionamiento basados en motores de corriente alterna permiten alcanzar prestaciones dinámicas comparables e incluso superiores a las de los motores de corriente continua, eliminando al mismo tiempo los inconvenientes asociados al colector y a las escobillas.

En consecuencia, ante la necesidad de intervenir sobre el accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon, resulta pertinente analizar la situación actual de la instalación y evaluar en qué medida el sistema existente se encuentra alineado o no con las soluciones tecnológicas actuales.

### **3.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA INSTALACIÓN**

A continuación, se detalla la situación actual de la instalación del dosificador de coque Pfister en la planta de cemento de Morata de Jalón (Zaragoza), a partir de la documentación técnica y de los planos de ingeniería elaborados por IMDEAM. El sistema se articula en torno a un armario de control centralizado (+CCM), desde el cual se gestionan tanto la potencia como la lógica de control asociada al accionamiento del rotor y al sistema de pesaje [6].

### 3.1.1 EL ARMARIO DE CONTROL: DISTRIBUCIÓN Y FUNCIONES

El armario eléctrico es el núcleo operativo del sistema. Según el plano de distribución, se divide en varias secciones clave que gestionan la energía y la comunicación, las cuales se enumeran a continuación:

1. **Sistema de Alimentación y Transformación.** El armario recibe una acometida principal de 3x550V. Para la maniobra interna, dispone de un transformador -T1 de 10KVA (550/380V) que alimenta los servicios auxiliares y la refrigeración mediante un ventilador -MV para evitar el sobrecalentamiento de los componentes electrónicos.
2. **Fuentes de Alimentación de Maniobra.** Para garantizar el funcionamiento de la lógica de control, el sistema cuenta con dos fuentes de alimentación principales:
  - 2.1. **Fuente de 24Vdc (-R24).** Una unidad SITOP SMART de Siemens que alimenta el PLC, los sensores y la interfaz hombre-máquina (HMI) de Schneider.
  - 2.2. **Fuente de 48Vdc (-R48).** Utilizada específicamente para la maniobra de fuerza y relés auxiliares (como los de marcha y enclavamientos), proporcionando una tensión de control más robusta frente a caídas de tensión en distancias largas.
3. **Lógica de Control (PLC).** El sistema es gobernado por un PLC de la gama Modicon M340 (BMX). Este procesa todas las señales críticas:
4. **Entradas Digitales.** Monitorizan el estado de marcha, paros de emergencia, selectores de modo (Local/Auto) y confirmaciones de equipos externos como la soplante PyroClon o ventiladores de aire primario.
5. **Salidas Digitales.** Envían órdenes de mando para la aireación del compensador, apertura de compuertas y el arranque del rotor.
6. **Gestión Analógica.** A través de módulos específicos (BMXAMI y BMXAMO), el PLC recibe el peso de la báscula y envía la consigna de velocidad al variador del rotor. El PLC recibe señales de 4-20mA que representan el peso real de la celda de carga (-CV1) y el peso de la tolva (-CV4). A su vez, emite una consigna de velocidad hacia el variador del rotor para ajustar el caudal en tiempo real.

### 3.1.2 ACCIONAMIENTO DEL ROTOR Y MOTOR

El movimiento del rotor DRW es gestionado por un equipo de potencia de Telemecanique (-U2), que puede actuar como variador de frecuencia o arrancador suave dependiendo de la configuración [6].

El accionamiento del rotor DRW es el elemento motriz que desplaza el material. Sus características principales según el esquema de accionamiento son las siguientes:

- **Control de Potencia.** El motor es gestionado por un equipo de Telemecanique (-U2) que actúa como variador de frecuencia o arrancador, permitiendo un control preciso de las revoluciones.
- **Motor Principal (-M1).** Es un motor trifásico conectado a través de la regleta -X12. Para su protección, cuenta con un disyuntor motor y relés de sobrecarga que envían una señal de fallo (-KX1/-KX2) al PLC en caso de anomalía térmica.
- **Retroalimentación de Velocidad.** Incorpora un sensor de velocidad TACOFLEXI (-CV2) que genera una señal de 4-20mA proporcional a las revoluciones del rotor, permitiendo que el PLC realice el ajuste fino para cumplir con el setpoint de dosificación.

### 3.1.3 SISTEMA DE PESAJE (BÁSCULA)

La medición gravimétrica se realiza mediante la integración de celdas de carga y transductores de alta precisión, los cuales se describen a continuación [6]:

- **Celdas de Carga (-B1, -B2, -B3).** Están instaladas en la estructura de la báscula para medir el peso real del material en el rotor y en la tolva de pesaje.
- **Transductores de Pesaje (-CV1, -CV4).** El armario contiene transductores de la serie PR2261. Estos dispositivos reciben la señal de milivoltios de las celdas de carga y la transforman en una señal normalizada de 4-20mA que el PLC interpreta como peso (kg/h).
- **Interconexión.** Toda la señalización de pesaje está protegida y dirigida a través de bornas específicas (-X5, -X6) para evitar interferencias electromagnéticas que pudieran falsear la medición.

### 3.1.4 COMPONENTES DE CAMPO Y MANIOBRA EXTERNA

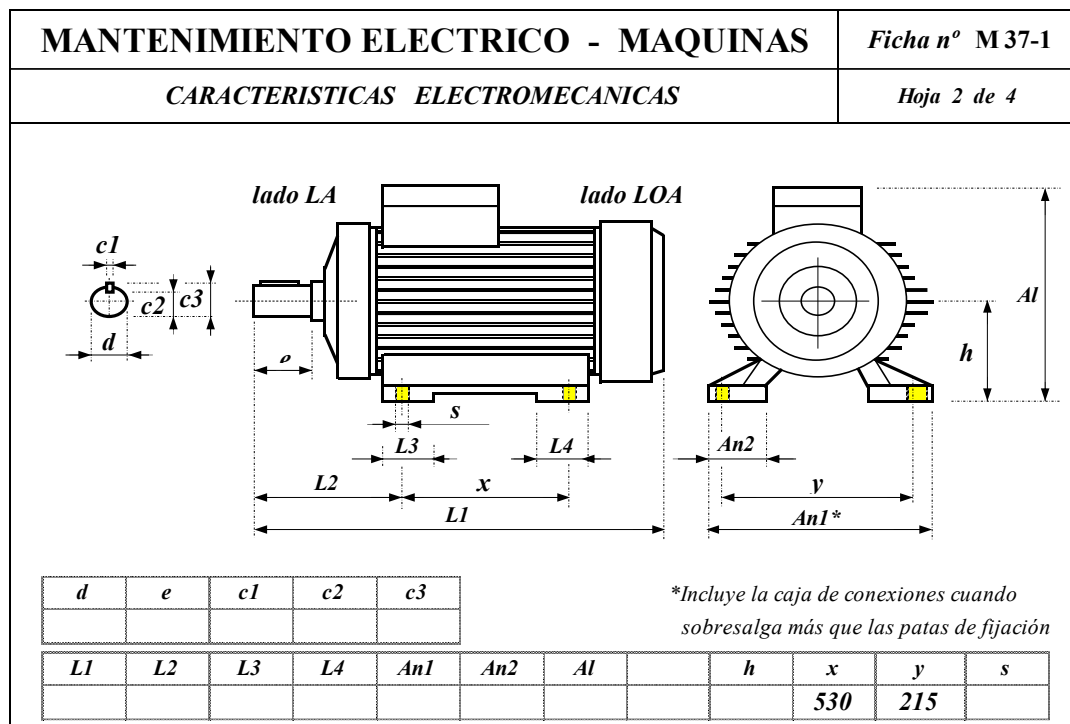
La instalación se completa con elementos de control situados "a pie de máquina" y señales de seguridad, los cuales se describen a continuación [6]:

- **Botonera de Mando:** Permite la operación manual (subir/bajar velocidad, arrancar/parar) desde la propia ubicación de la báscula para labores de mantenimiento.

- **Enclavamientos de Seguridad:** El relé de seguridades externas (-KEN) integra condiciones críticas, como el estado de la soplante o enclavamientos de proceso, impidiendo el giro del rotor si no se cumplen las condiciones de seguridad operativa.

### 3.2 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

El sistema de accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon (391.02) del Horno IV cuenta actualmente con un motor de corriente continua (CC) como elemento motriz principal. Según la ficha técnica de mantenimiento M 371-1, el equipo instalado es un motor de la marca ABB, modelo DMP 132-4L, que destaca por su capacidad de regulación de velocidad, factor crítico para la dosificación precisa de combustible [6].



*Figura 6: Plano del motor de CC actualmente instalado [6].*

La Figura 6 muestra el motor ABB instalado actualmente en el dosificador de coque Pfister. Se trata de un motor de construcción robusta, adecuado para las condiciones de trabajo propias de una planta cementera. Sus principales características electromecánicas se recogen en la Tabla 1, ya que estos datos resultan necesarios para analizar la sustitución del equipo y comprobar la compatibilidad del nuevo motor con la instalación existente.

| <b>Característica</b>       | <b>Valor</b>            |
|-----------------------------|-------------------------|
| Fabricante                  | ABB                     |
| Potencia nominal            | 6,1 kW                  |
| Velocidad máxima de diseño  | 3000 rpm                |
| Forma constructiva          | B3, montaje sobre patas |
| Grado de protección         | IP 54                   |
| Peso aproximado             | 170 kg                  |
| Tensión nominal del estator | 460 V                   |
| Intensidad nominal          | 15,4 A                  |
| Profundidad                 | 530 mm                  |
| Ancho                       | 215 mm                  |

*Tabla 1: Características electromecánicas del motor [6].*

Las dimensiones del motor actual, especialmente la profundidad y el ancho, deben tenerse en cuenta en la selección del nuevo accionamiento, ya que el espacio disponible en la báscula dosificadora es limitado. Por tanto, además de cumplir con los requisitos eléctricos y mecánicos de funcionamiento, el nuevo motor deberá ser compatible con el hueco existente y con la configuración de montaje de la instalación.

Al ser un motor de corriente continua, el sistema de conmutación es una de las partes que requiere mayor seguimiento. El motor utiliza escobillas de la marca SCHUNCK, específicamente del modelo S/P50485/016 con calidad de material F51. Las dimensiones nominales de estas piezas son de 12,5 x 25 x 32 mm.

El departamento de mantenimiento eléctrico realiza un control periódico de la longitud de estas escobillas, estableciendo un límite mínimo de seguridad de 16 mm, momento en el cual deben ser sustituidas para evitar daños en el colector. Según los registros históricos, el desgaste es monitorizado en dos soportes (A y B), manteniendo valores estables en torno a los 25-28 mm en las últimas revisiones documentadas.

La instalación mantiene una política de alta disponibilidad, contando con una unidad de repuesto completa del motor (Modelo Winkelman o ABB de 6,1 kW) y juegos adicionales de escobillas en almacén (Código ST00149416). El historial de la máquina muestra que el equipo actual de ABB fue instalado en abril de 2005. Desde entonces, se han realizado inspecciones constantes del colector y las escobillas, comprobando que el estado de la

superficie de contacto es el adecuado para garantizar una conmutación sin chispas excesivas [1], [9].

La última intervención mecánica de relevancia registrada consistió en la revisión y sustitución de los rodamientos en abril de 2007, una tarea preventiva fundamental para evitar vibraciones que puedan afectar a la señal de pesaje de la báscula Pfister. Esta configuración mecánica actual es la que se pretende analizar para su posible optimización o sustitución por un sistema de corriente alterna en los apartados posteriores de este trabajo.

### **3.3 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL ROTOR**

En el sistema actual de la báscula dosificadora PyroClon, la velocidad de giro del rotor se mide mediante un sensor de proximidad tipo NAMUR, que detecta el paso de los dientes de la polea conducida. Esta medición es fundamental para garantizar la precisión del caudal gravimétrico [6].

A diferencia de un encoder acoplado al eje del motor, este sistema mide directamente la polea de la báscula, lo que permite comprobar la continuidad mecánica real de la transmisión. Así, si se produce una rotura o deslizamiento de la correa, el sensor detecta la caída de velocidad o la ausencia de pulsos, permitiendo activar las protecciones correspondientes.

La transmisión mecánica se realiza mediante una correa dentada con un piñón motriz de 30 dientes y una polea conducida de 60 dientes, obteniéndose una relación de transmisión 2:1. Esta reducción permite duplicar el par disponible en el eje del rotor y adaptar la velocidad del motor de corriente continua a las necesidades de dosificación [6].

Los pulsos generados por el sensor NAMUR se envían actualmente a un convertidor analógico Taco Flex, que transforma la frecuencia en una señal normalizada de 4-20 mA para el PLC. No obstante, este equipo presenta limitaciones de estabilidad térmica y precisión de ajuste.

Como mejora, se propone sustituirlo por un transmisor digital de frecuencia PR electronics 5225, que ofrece mayor estabilidad de señal, configuración más precisa y aislamiento galvánico. Con ello se busca reducir las derivas de señal y asegurar una medición de velocidad más estable, contribuyendo a mantener un caudal de material constante y sin oscilaciones.

### **3.4 VARIADOR DE FRECUENCIA**

El control del accionamiento de la báscula Pyroclon se realiza actualmente mediante un convertidor de potencia de la marca Telemecanique, referenciado en los esquemas eléctricos como -U2. Dado que el motor instalado es un modelo de corriente continua (CC) ABB de 6,1 kW, este equipo no es un variador de frecuencia convencional (que son para motores de CA), sino un rectificador controlado o convertidor de tiristores.

El convertidor Telemecanique actual tiene como función principal transformar la corriente alterna de la red en corriente continua variable para controlar la velocidad del motor mediante la variación de la tensión de armadura. Sus características principales son [6]:

- **Regulación por Tensión de Armadura.** Controla la velocidad del motor ABB variando el voltaje de salida hasta los 400Vdc nominales.
- **Control de Excitación.** Dispone de una salida auxiliar para alimentar el devanado de excitación del motor a 310Vdc de forma constante.
- **Interfaz Analógica.** Recibe una consigna de 4-20 mA desde el PLC Modicon M340 y utiliza la realimentación del sistema Taco-Flex para cerrar el lazo de velocidad.

## Capítulo 4. MODELO DESARROLLADO

### 4.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA

Para el correcto dimensionamiento del nuevo accionamiento, es imperativo analizar los datos de explotación reales y la cadena cinemática que vincula la velocidad del motor con el caudal de combustible. El sistema está diseñado para un caudal máximo de 15 toneladas/hora, valor que corresponde al 100% de la capacidad de pesaje de la celda de carga.

A nivel mecánico, la transmisión de potencia se divide en dos etapas diferenciadas que definen la relación de reducción total:

1. Reductor principal. Según las mediciones y datos técnicos contrastados por el personal de planta, el reductor acoplado al motor presenta una relación de 91,71:1. [6]
2. Transmisión por poleas. Como se ha descrito anteriormente, la unión entre el eje de salida del reductor y el rotor de la dosificadora se realiza mediante una correa con una relación de 2:1 (30/60 dientes) [6]

Por tanto, la relación de transmisión total del conjunto se establece en:

$$i_{total} = 91,71 * 2 = 183,42$$

Un dato operativo crítico identificado es que la velocidad del motor actual se encuentra limitada electrónicamente a 2000 rpm. Esta restricción tiene como objetivo evitar el estrés mecánico excesivo y prevenir la rotura de la correa de transmisión, un punto débil del diseño original. Bajo esta premisa, la velocidad máxima real a la que puede girar el rotor de la dosificadora es:

$$n_{rotor} = \frac{2000}{183,42} = 10,904 \text{ rpm}$$

Partiendo de esta velocidad angular y del caudal máximo de proceso, podemos determinar la carga de material por cada revolución del rotor. Para un régimen de 15.000 kg/h (250 kg/min), la entrega de combustible por vuelta es:

$$Carga = \frac{250 \frac{kg}{min}}{10,904 rpm} = 22,93 \text{ kg /vuelta}$$

Estos valores son de vital importancia para el proyecto, ya que definen el punto de trabajo que el nuevo sistema de corriente alterna debe ser capaz de replicar. Cualquier propuesta de motorización futura debe asegurar que, a una frecuencia de trabajo estable, se mantenga esta capacidad de transporte de 22,93 kg por vuelta, garantizando que el par motor sea suficiente para desplazar dicha masa incluso ante variaciones en la densidad del carbón o posibles atascos en la cámara del rotor.

## Determinación del par nominal

En una báscula dosificadora, el criterio principal para seleccionar el nuevo accionamiento no debe ser únicamente la potencia nominal del motor, sino el par disponible en el eje del motor. El sistema debe ser capaz de mover una carga de 22,93 kg por vuelta del rotor a una velocidad máxima de 10,904 rpm, manteniendo además margen suficiente frente a variaciones de densidad del material, rozamientos internos o posibles compactaciones del coque.

Para establecer una referencia de diseño, se toma como punto de partida el motor de corriente continua actualmente instalado. Al tratarse de un motor de corriente continua con excitación independiente, la velocidad y el par pueden controlarse de forma prácticamente independiente: la velocidad depende principalmente de la tensión de armadura, mientras que el par está ligado a la corriente de armadura. Por tanto, que el motor trabaje limitado a 2000 rpm no implica una reducción directa del par disponible, siempre que pueda circular la corriente nominal.

A partir de los datos nominales del motor actual, con una potencia de 6,1 kW y una velocidad nominal de 3000 rpm, el par nominal se calcula mediante [7]:

$$M_n = \frac{9550 \cdot P_n}{n_n}$$
$$M_n = \frac{9550 \cdot 6,1}{3000} = 19,42 \text{ Nm}$$

Por tanto, el motor actual dispone de un par nominal aproximado de 19,4 Nm. Este valor se toma como referencia mínima para la selección del nuevo motor de corriente alterna, ya que representa el par continuo que el accionamiento existente puede proporcionar dentro de su rango de trabajo.

La limitación a 2000 rpm debe interpretarse como una condición de operación impuesta por el proceso y por la protección de la transmisión mecánica, lo que implica que la potencia mecánica realmente utilizada a esa velocidad es inferior a la potencia nominal instalada. Considerando el mismo par nominal de referencia:

$$P = M_n \cdot \omega$$
$$\omega = \frac{2\pi \cdot 2000}{60} = 209,44 \text{ rad/s}$$
$$P = 19,42 \cdot 209,44 = 4067 \text{ W} \approx 4,1 \text{ kW}$$

De este modo, aunque el motor instalado tiene una potencia nominal de 6,1 kW, en el punto máximo real de funcionamiento, limitado a 2000 rpm, la potencia mecánica asociada al par nominal es aproximadamente 4 kW. Por tanto, el sobredimensionamiento del sistema actual se debe a que la potencia instalada es superior a la potencia realmente necesaria en las condiciones de operación de la báscula.

En consecuencia, la selección del nuevo motor debe realizarse garantizando un par igual o superior al valor de referencia de 19,4 Nm, junto con una capacidad de sobrecarga suficiente para superar posibles atascos de material, pero sin exceder los límites mecánicos de la transmisión. Esta interpretación permite justificar con mayor precisión la elección de un motor de corriente alterna de menor potencia nominal, siempre que mantenga el par requerido en el rango real de funcionamiento.

## **4.2 DISEÑO**

### **4.2.1 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL NUEVO ACCIONAMIENTO**

La elección del motor y del variador no se plantea como una sustitución directa del sistema de corriente continua existente, sino a partir del análisis de los requerimientos reales de par y potencia del proceso de dosificación. Con ello se busca corregir el sobredimensionamiento detectado y garantizar la integridad de la transmisión.

Para el nuevo conjunto motor–variador se selecciona la serie ABB M3BP, perteneciente a una familia de motores asíncronos trifásicos de elevada robustez y ampliamente utilizada en aplicaciones industriales exigentes [12], [13]. Su elección se justifica principalmente por su construcción mecánica, basada en una carcasa de hierro fundido que proporciona rigidez estructural, resistencia frente a vibraciones y una adecuada disipación térmica. Estas características resultan especialmente adecuadas para una planta cementera, donde el accionamiento debe trabajar en condiciones de polvo, variaciones térmicas y funcionamiento continuo.

Además, los motores de la serie M3BP presentan un alto rendimiento energético, con clases de eficiencia IE3 o superiores, lo que permite reducir las pérdidas eléctricas y el consumo durante la operación. Esta mejora resulta especialmente relevante en equipos industriales que trabajan durante largos periodos, ya que contribuye a disminuir los costes de explotación y la generación de calor en el motor.

Otro criterio fundamental es su compatibilidad con variadores de frecuencia industriales. En este caso, el accionamiento previsto se basa en variadores de la familia ABB ACS880 o ABB

ACS580, ambos del mismo fabricante, lo que facilita la integración del conjunto y permite regular la velocidad del motor de forma precisa, estable y adaptada a las necesidades del proceso de dosificación.

#### **4.2.2 ESTUDIO DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS**

La selección del motor se ha realizado dentro de la serie ABB M3BP, considerando distintas configuraciones de potencia y número de polos. Se han estudiado motores asíncronos trifásicos compatibles con variadores de frecuencia industriales, principalmente modelos de cuatro polos, con velocidades próximas a 1500 rpm, y de dos polos, con velocidades cercanas a 3000 rpm.

Los motores de cuatro polos trabajan a velocidades más moderadas, lo que reduce los esfuerzos mecánicos y el nivel de ruido. Sin embargo, los motores de dos polos ofrecen una velocidad nominal superior y permiten ampliar el margen de regulación cuando se emplean junto con un variador de frecuencia.

A partir de los cálculos realizados en el apartado 4.1, el motor actualmente instalado presenta un par nominal aproximado de 19 Nm. Por tanto, el nuevo motor debe ser capaz de proporcionar un par equivalente o superior, con el fin de absorber las variaciones de carga del proceso de dosificación y los posibles picos de par durante el arranque o ante compactaciones del material en el rotor.

Con estos criterios, se han analizado distintos modelos de la serie M3BP dentro de un rango de potencias adecuado para la aplicación. La selección final se orienta hacia un motor de potencia moderada, capaz de cubrir el par requerido sin sobredimensionar el accionamiento, manteniendo un buen rendimiento energético y una regulación estable mediante variador de frecuencia.

Para la selección del motor dentro de la gama ABB M3BP (Process Performance), se ha realizado un análisis comparativo entre cuatro alternativas factibles, evaluando potencias de 4 kW y 5,5 kW con configuraciones de 2 y 4 polos cuyas características se presentan en la figura 7:

| Output<br>kW                | Motor type    | Product code   | Efficiency IEC<br>60034-30-1: 2014 |              |             |             | Current                |                  | Torque                         |                   |                                | Moment<br>of inertia<br>J = 1/4<br>GD <sub>2</sub> kgm <sub>2</sub> | Weight<br>kg | Sound<br>pressure<br>Level L <sub>PA</sub><br>dB |                                |
|-----------------------------|---------------|----------------|------------------------------------|--------------|-------------|-------------|------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|---|--------------|--|--------------------------------|
|                             |               |                | Speed<br>r/min                     | Full         | >3/4        | 1/2         | Power<br>factor<br>Cos | I <sub>n</sub> A | I <sub>s</sub> /I <sub>N</sub> | T <sub>N</sub> Nm | T <sub>f</sub> /T <sub>N</sub> |   |              |  | T <sub>b</sub> /T <sub>N</sub> |
|                             |               |                |                                    | load<br>100% | load<br>75% | load<br>50% |                        |                  |                                |                   |                                |   |              |  |                                |
| <b>3000 r/min = 2 poles</b> |               |                | <b>400 V 50Hz</b>                  |              |             |             | <b>BASIC-design</b>    |                  |                                |                   |                                |   |              |  |                                |
| 3                           | M3BP 100LKA 2 | 3GBP101810---M | 2920                               | 89,1         | 88,7        | 86,1        | 0,90                   | 5,4              | 9,6                            | 10,0              | 3,7                            | 5,2   | 0,0087       | 57   | 57                             |
| 4                           | M3BP 112MB 2  | 3GBP111320---M | 2882                               | 90,0         | 91,3        | 91,7        | 0,91                   | 7,1              | 8,8                            | 13,4              | 2,4                            | 3,9   | 0,0134       | 66   | 61                             |
| 5.5                         | M3BP 132SMB 2 | 3GBP131220---M | 2933                               | 90,9         | 91,8        | 91,9        | 0,90                   | 9,3              | 7,6                            | 17,9              | 2,0                            | 3,5   | 0,0158       | 85   | 62                             |

| Output<br>kW                | Motor type    | Product code   | Efficiency IEC<br>60034-30-1: 2014 |              |             |             | Current                |                  | Torque                         |                   |                                | Moment<br>of inertia<br>J = 1/4<br>GD <sub>2</sub> kgm <sub>2</sub> | Weight<br>kg | Sound<br>pressure<br>Level L <sub>PA</sub><br>dB |                                |
|-----------------------------|---------------|----------------|------------------------------------|--------------|-------------|-------------|------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|---|--------------|--|--------------------------------|
|                             |               |                | Speed<br>r/min                     | Full         | >3/4        | 1/2         | Power<br>factor<br>Cos | I <sub>n</sub> A | I <sub>s</sub> /I <sub>N</sub> | T <sub>N</sub> Nm | T <sub>f</sub> /T <sub>N</sub> |   |              |  | T <sub>b</sub> /T <sub>N</sub> |
|                             |               |                |                                    | load<br>100% | load<br>75% | load<br>50% |                        |                  |                                |                   |                                |   |              |  |                                |
| <b>1500 r/min = 4 poles</b> |               |                | <b>400 V 50Hz</b>                  |              |             |             | <b>BASIC-design</b>    |                  |                                |                   |                                |   |              |  |                                |
| 2.2                         | M3BP 100LKA 4 | 3GBP102810---M | 1460                               | 89,5         | 89,7        | 89,7        | 0,81                   | 4,4              | 7,4                            | 14,4              | 2,5                            | 3,9   | 0,0233       | 57   | 54                             |
| 3                           | M3BP 100LKB 4 | 3GBP102820---M | 1460                               | 90,4         | 90,3        | 90,4        | 0,78                   | 6,1              | 8,8                            | 19,8              | 3,0                            | 3,9   | 0,0266       | 62   | 54                             |
| 4                           | M3BP 112MB 4  | 3GBP112320---M | 1463                               | 91,1         | 91,6        | 90,8        | 0,77                   | 8,2              | 8,2                            | 26,3              | 3,3                            | 4,2   | 0,0244       | 70   | 55                             |
| 5.5                         | M3BP 132SMB 4 | 3GBP132220---M | 1468                               | 91,9         | 92,4        | 91,9        | 0,81                   | 10,6             | 7,3                            | 35,8              | 2,5                            | 3,7   | 0,0425       | 93   | 60                             |

*Figura 7: Motores de 400V 50Hz IE4 2 y 4 polos [12], [13].*

Para validar el comportamiento dinámico del accionamiento seleccionado y comprobar su viabilidad en las condiciones reales de la planta, se ha desarrollado un modelo de simulación en MATLAB/Simulink. Este modelo permite analizar el funcionamiento del motor con un control escalar V/f constante y estudiar la evolución de la característica par-velocidad al variar la frecuencia de consigna del variador.

En primer lugar, se observa que la curva par-velocidad se desplaza hacia nuevas frecuencias de sincronismo conforme aumenta la frecuencia. Sin embargo, en la zona de bajas frecuencias aparece una caída significativa del par disponible. Este efecto se debe principalmente a la influencia de la resistencia del estator, que provoca una caída de tensión interna y reduce el flujo magnético en el entrehierro. Para corregirlo, se incorpora en la simulación una compensación de caída de tensión en el estator, conocida como IR Compensation, que permite recuperar el par necesario durante el arranque.

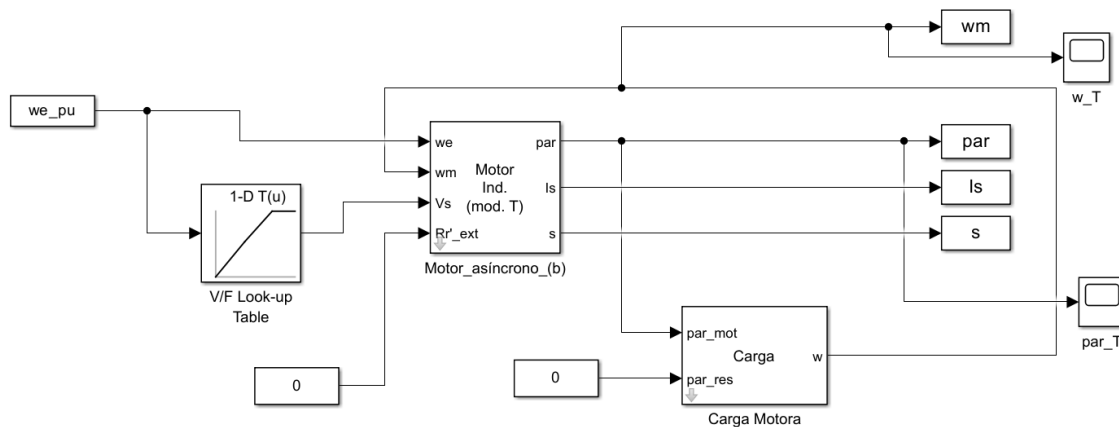
La simulación también representa los puntos asociados a la corriente nominal, que definen el par máximo en régimen permanente, y los correspondientes a la corriente máxima del inversor, que delimitan el par dinámico disponible ante situaciones puntuales, como arranques exigentes o posibles compactaciones del material en el rotor.

Otro aspecto relevante es la limitación impuesta por la alimentación eléctrica de la planta. El transformador disponible proporciona una tensión de 380 Vca, que es rectificadas por el variador para generar el bus de continua. Aunque el valor teórico del bus es aproximadamente 1,41 veces la tensión eficaz de entrada, la tensión máxima de salida del variador depende también de la estrategia de modulación, las pérdidas internas y las

condiciones de carga. Por ello, no puede asumirse directamente que el variador entregue la tensión nominal completa requerida por el motor.

Esta limitación puede provocar que el motor entre en zona de debilitamiento de campo antes de alcanzar su frecuencia nominal, especialmente si no se dispone de tensión suficiente para mantener constante la relación V/f. Como consecuencia, el flujo magnético disminuye y se reduce el par disponible a velocidades elevadas.

El modelo tiene en cuenta este efecto para evaluar el margen real de par bajo las condiciones de suministro existentes. A continuación, la figura 8 muestra el esquema de Simulink:



*Figura 8: Esquema de Simulink empleado para la simulación*

Para validar el comportamiento de las diferentes alternativas motoras propuestas, se ha procedido a la obtención de los parámetros eléctricos del circuito equivalente en "L" para cada uno de los motores objeto de análisis. Dado que los catálogos comerciales de la serie ABB M3BP no proporcionan de forma directa las magnitudes internas de la máquina, se ha desarrollado un procedimiento de cálculo basado en los datos nominales garantizados por el fabricante, tales como la potencia, la intensidad, el factor de potencia, el deslizamiento y la relación de par máximo. Mediante este proceso de caracterización, se han determinado las resistencias y reactancias del estátor y del rotor, así como la reactancia de magnetización, permitiendo la construcción de un modelo dinámico preciso en el entorno MATLAB/Simulink. La integración de estos parámetros en el bloque de la máquina asíncrona es fundamental para obtener las curvas de par-velocidad que definen la capacidad de arrastre del sistema bajo diferentes condiciones de carga y frecuencia. Todo el desarrollo matemático, así como los scripts de programación empleados para la resolución de los circuitos equivalentes y la ejecución de las simulaciones, se han incluido de forma detallada en los anexos I y II de la presente memoria.

Este análisis permite verificar de forma previa a la implementación física cómo afecta la limitación de tensión de la red de la planta, establecida en 380 V (0,95 p.u.), a la característica mecánica de cada motor, garantizando que la alternativa seleccionada disponga del par suficiente para operar de forma estable a la velocidad máxima de 2000 rpm y responder con solvencia ante posibles sobrecargas en la báscula Pyroclon.

Para la obtención de los parámetros del modelo equivalente en "L" de los motores analizados, se ha seguido una metodología de cálculo basada en las magnitudes nominales en por unidad (p.u.). El proceso se divide en cuatro etapas fundamentales [7]:

En primer lugar, se determinan las magnitudes base de par y potencia para normalizar los datos. El par nominal,  $m_n$ , en p. u. y el deslizamiento,  $s_n$ , permiten obtener la resistencia del rotor  $r_2$  mediante la expresión:

$$r_2 \approx \frac{s_n}{m_n}$$

En segundo lugar, se calculan la resistencia del estátor,  $r_1$ , y la resistencia de pérdidas en el hierro,  $r_m$ . Para ello, se utiliza el balance de potencias a partir de los datos de rendimiento a plena carga  $\eta_n$  y a tres cuartos de carga  $\eta_{3/4}$ , resolviendo el sistema:

$$((1/\eta) - 1) * p_{MEC} \approx p_0 + p_{MEC}^2 * r_{cc}$$

Donde  $p_{MEC}$  representa la potencia mecánica útil en el eje,  $r_{cc}$  es la resistencia de cortocircuito calculada como  $r_1 + r_2$  y  $p_0$  representa las pérdidas en vacío, de donde se deriva  $r_1 = r_{cc} - r_2$  y  $r_m = \frac{1}{p_0}$

En tercer lugar, se determina la reactancia de cortocircuito  $x_{cc}$ , que engloba las inductancias de dispersión de estátor y rotor. Este valor se obtiene a partir del par máximo  $m_{max}$ , en p.u. escalado al sistema de potencias elegido:

$$x_{cc} \approx \frac{1}{2 * m_{max}} - r_1$$

Finalmente, se calcula la reactancia de magnetización,  $x_M$  mediante el balance de potencia reactiva nominal,  $q_{eN}$ , derivado del factor de potencia de catálogo  $\cos\varphi_N$ :

$$q_{eN} = \sqrt{(1 - \cos\varphi_N^2)}$$

$$x_M \approx 1/(q_{eN} - m_n^2 * x_{cc})$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2:

| Motor                    | r1     | r2     | rm      | xm     | xcc    | H      |
|--------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 2 polos= 3000r/min 4Kw   | 0,0655 | 0,0460 | 59,9951 | 2,8341 | 0,0843 | 0,0336 |
| 2 polos= 3000r/min 5,5Kw | 0,0631 | 0,0256 | 47,9826 | 2,7835 | 0,1006 | 0,0303 |
| 4 polos= 1500r/min 4kW   | 0,0598 | 0,0339 | 44,8029 | 1,7150 | 0,1040 | 0,0132 |
| 4 polos= 1500r/min 5,5kW | 0,0529 | 0,0279 | 48,2391 | 1,9457 | 0,1236 | 0,0178 |

*Tabla 2: Modelo en L obtenido de los motores considerados en pu*

### Simulación I: Accionamiento con motor de 4 kW y 2 polos

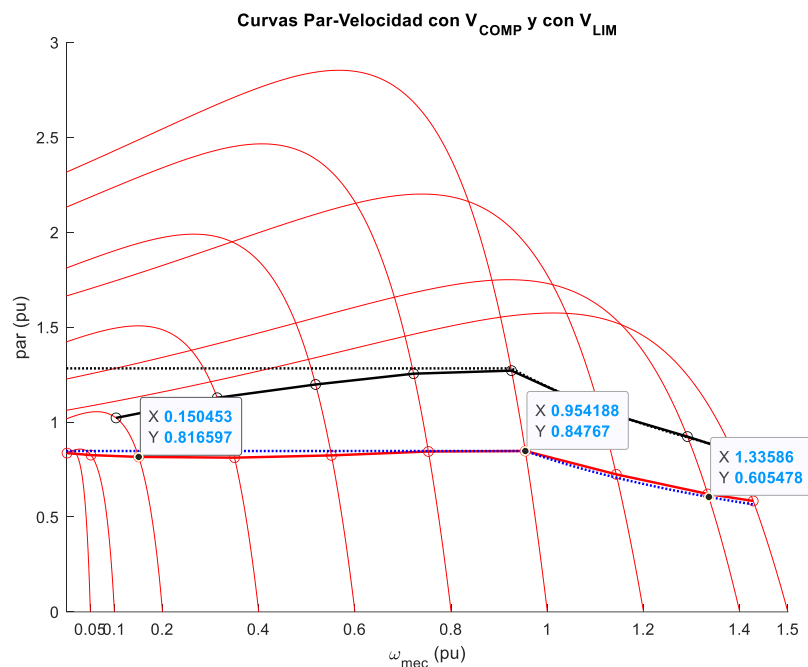


Figura 9: Curvas par-velocidad del accionamiento de 4 kW y 2 polos con compensación de tensión y límite de tensión

La Figura 9 muestra las curvas par-velocidad obtenidas para el motor de 4 kW y 2 polos, considerando el efecto de la compensación de tensión a baja velocidad y la limitación de tensión disponible en el variador. Se observa que, aunque el motor puede alcanzar velocidades elevadas, el par disponible se reduce de forma significativa al aumentar la velocidad mecánica.

En la zona de baja velocidad, la compensación de tensión permite mejorar el par de arranque y compensar parcialmente la caída de tensión en la resistencia del estator. Sin embargo, a medida que aumenta la frecuencia, el motor alcanza el límite de tensión impuesto por la alimentación de la planta, entrando prematuramente en debilitamiento de campo. Como consecuencia, el par disponible disminuye y el margen frente al par de carga resulta insuficiente en determinadas zonas de funcionamiento.

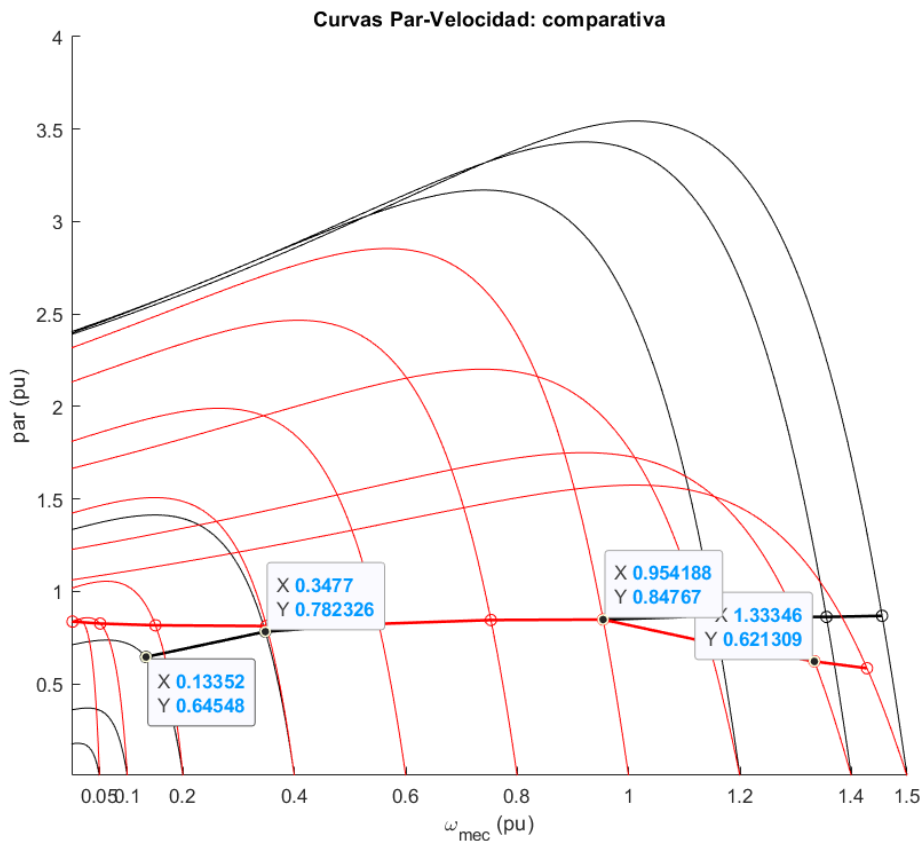


Figura 10: Comparativa par-velocidad del motor de 4 kW y 2 polos

La Figura 10 presenta la comparativa entre las curvas par-velocidad del motor de 4 kW y 2 polos y la demanda de par de la instalación. Esta representación permite evaluar de forma más clara si el accionamiento es capaz de cubrir el par requerido en todo el rango de operación.

Los resultados muestran que esta configuración no ofrece un margen de seguridad suficiente. La demanda de la instalación se sitúa en torno a 19 Nm, lo que representa una fracción elevada del par nominal del motor. Además, bajo la restricción de tensión disponible, el par dinámico se reduce considerablemente en la zona de mayor velocidad. Por tanto, aunque el motor podría funcionar en ciertos puntos, no garantiza una reserva de par adecuada ante variaciones de carga, arranques exigentes o posibles compactaciones del material.

Tras procesar los datos de la placa de características y ejecutar la simulación dinámica para la alternativa de 4 kW y 2 polos, los resultados obtenidos permiten concluir que esta configuración es insuficiente para los requisitos de la báscula Pyroclon. El análisis de las gráficas de par-velocidad bajo la restricción de 380 V (0,95 p.u.) revela una clara incapacidad para suministrar el par de carga requerido. La demanda de la instalación se sitúa en 19 Nm, lo que para este motor específico equivale a 1,239 p.u. de su par nominal. Al contrastar este valor con la curva de par (línea roja con compensación de tensión), se evidencia que el motor opera constantemente al límite de su capacidad térmica y mecánica, sin margen de maniobra. La compensación de tensión en baja frecuencia mejora el arranque, pero no logra estabilizar la carga de forma segura en el régimen permanente.

**Simulación II: Accionamiento con motor de 5,5 kW y 2 polos**

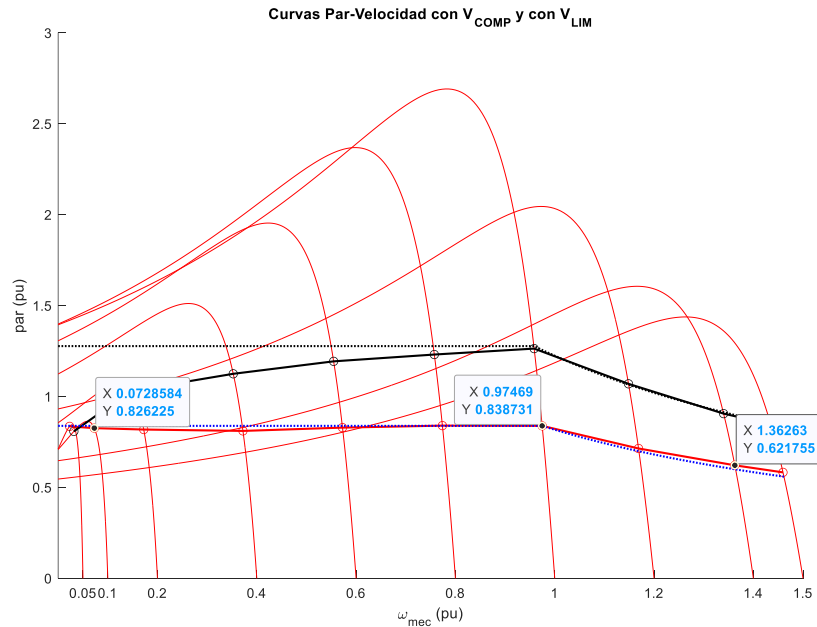


Figura 11: Curvas par-velocidad del accionamiento de 5,5 kW y 2 polos con compensación de tensión y límite de tensión

La Figura 11 muestra el comportamiento del motor de 5,5 kW y 2 polos bajo las mismas condiciones de simulación. Al aumentar la potencia del motor, el par disponible mejora respecto al caso anterior, especialmente en régimen permanente.

No obstante, al tratarse también de un motor de 2 polos, sigue presentando una velocidad nominal elevada y queda afectado por la limitación de tensión del variador a altas frecuencias. Esto provoca que, en la zona de sobrevelocidad, el motor entre en debilitamiento de campo y el par disponible disminuya. Aunque la situación mejora frente al motor de 4 kW y 2 polos, el margen dinámico continúa siendo limitado para una aplicación donde pueden aparecer sobrecargas puntuales.

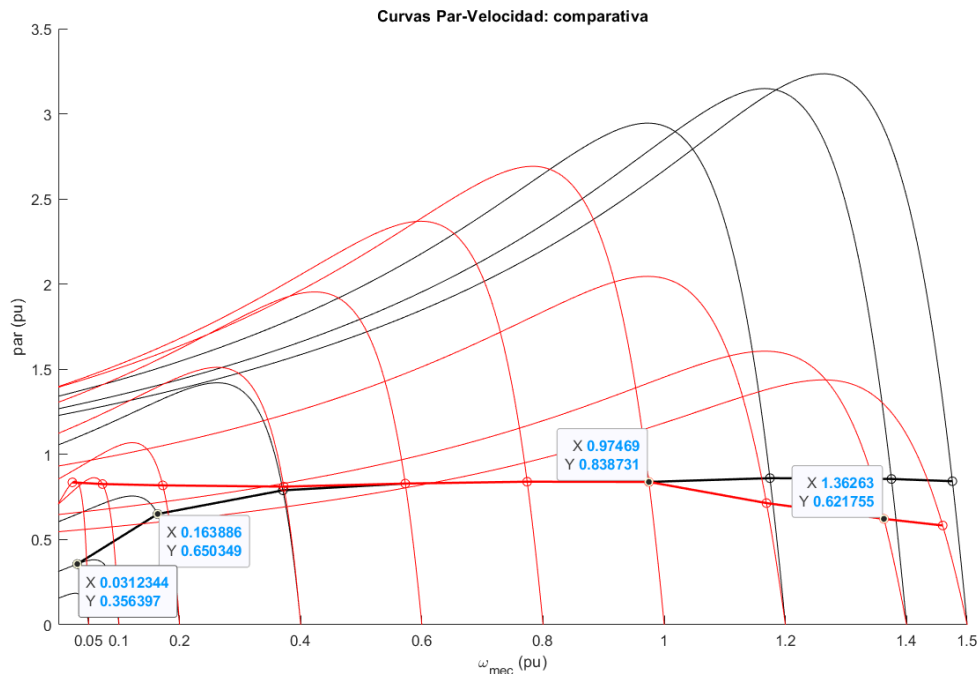


Figura 12: Comparativa par-velocidad del motor de 5,5 kW y 2 polos

La Figura 12 permite comparar la capacidad de par del motor de 5,5 kW y 2 polos con la demanda mecánica de la báscula dosificadora. La mayor potencia del motor incrementa el par disponible, pero no elimina completamente las limitaciones asociadas al funcionamiento a alta velocidad.

La gráfica muestra que el motor puede cubrir el par de carga en una parte importante del rango de trabajo. Sin embargo, el margen de reserva no es especialmente elevado en las zonas donde aparece la limitación de tensión. Esto implica que el accionamiento podría trabajar cerca de sus límites en condiciones desfavorables, reduciendo la robustez del sistema ante transitorios, atascos o variaciones en la densidad del material dosificado.

A pesar del incremento en la potencia de catálogo, el análisis dinámico revela que este motor tampoco es capaz de satisfacer los requisitos de la instalación de forma segura. La relación de par de carga respecto a la base del motor sigue siendo desfavorable. Para esta máquina, el par de 19 Nm requerido por la báscula se traduce en 0,9459 p.u. (frente al 1,239 p.u. del motor anterior). Aunque este valor es inferior a la unidad, la gráfica comparativa muestra que el par disponible bajo la restricción de 380 V y el límite de corriente estática apenas logra cubrir la demanda. Como se indica en las anotaciones de la simulación, el motor

tampoco es capaz de dar el par suficiente con garantías, ya que opera sin margen de reserva dinámico.

### Simulación III: Accionamiento con motor de 4 kW y 4 polos

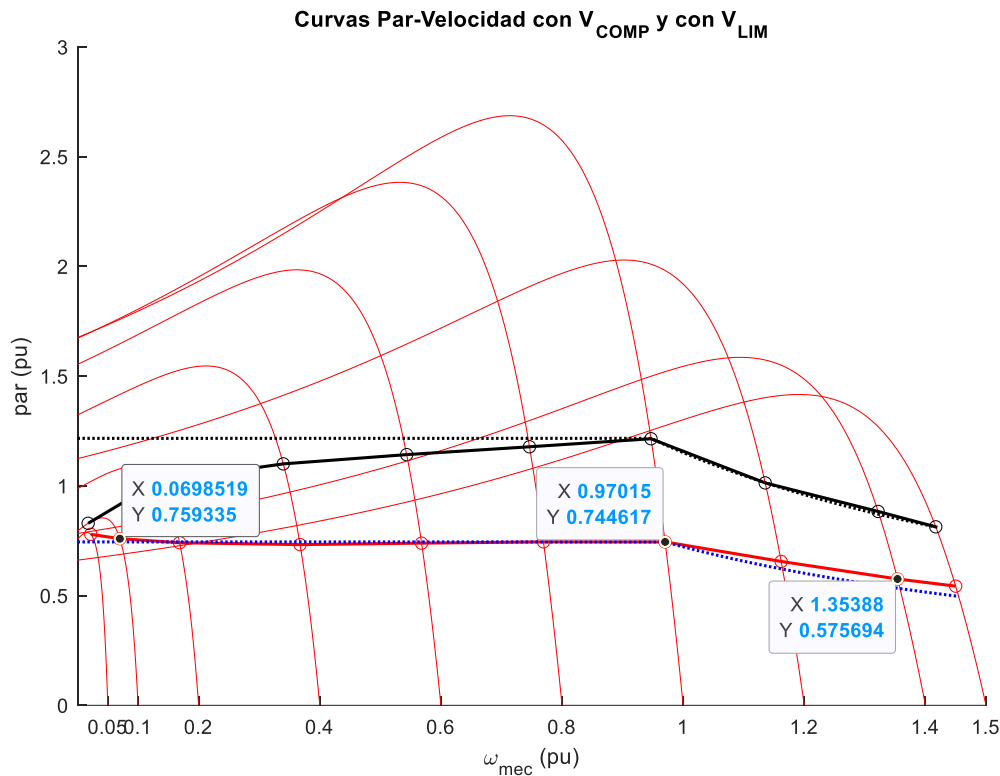


Figura 13: Curvas par-velocidad del accionamiento de 4 kW y 4 polos con compensación de tensión y límite de tensión

La Figura 13 representa el comportamiento del motor de 4 kW y 4 polos. A diferencia de las alternativas de 2 polos, esta configuración trabaja con una velocidad nominal inferior, lo que permite disponer de un mayor par para una misma potencia.

Los resultados muestran una característica par-velocidad más adecuada para la aplicación. El par disponible se mantiene por encima del par de carga en el rango operativo principal, incluso considerando la restricción de tensión de 380 V. Además, la compensación de tensión a baja velocidad permite mejorar el comportamiento durante el arranque, evitando una caída excesiva del par en esa zona.

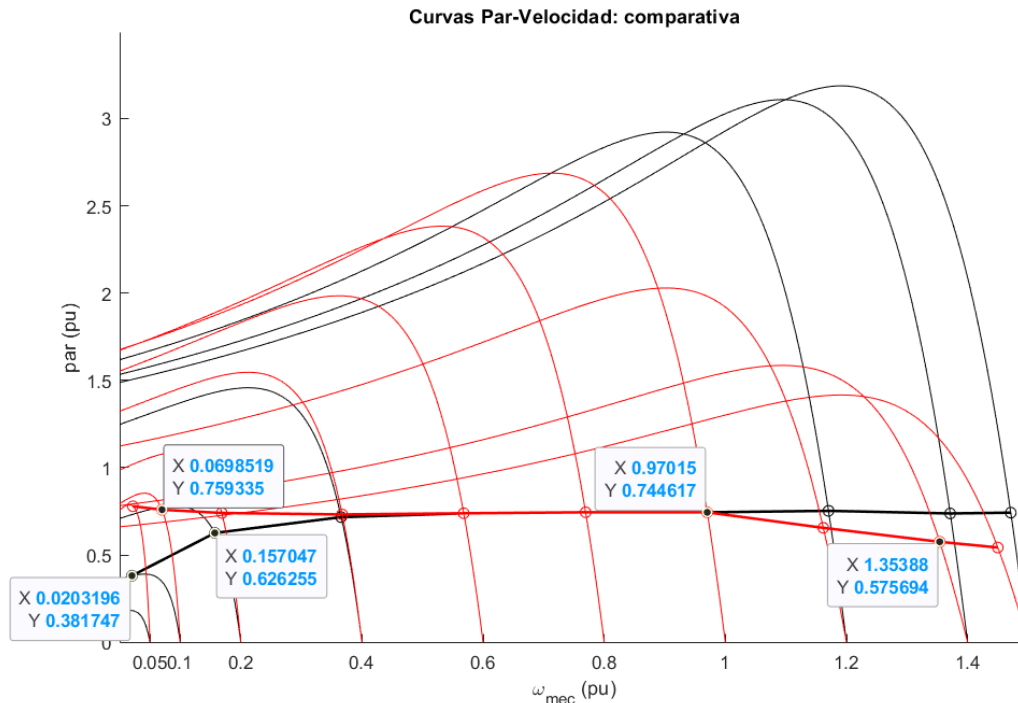


Figura 14: Comparativa par-velocidad del motor de 4 kW y 4 polos

La Figura 14 confirma que el motor de 4 kW y 4 polos presenta una mejor adaptación a las necesidades de la báscula dosificadora. En esta configuración, los 19 Nm requeridos por la instalación representan una fracción menor del par nominal del motor que en las alternativas de 2 polos.

La curva de par disponible se sitúa con margen suficiente por encima del par de carga, lo que permite trabajar en una zona más estable y segura. Esta reserva de par resulta importante para absorber variaciones del proceso, rozamientos adicionales o posibles compactaciones puntuales del coque en el rotor. Por ello, esta alternativa aparece como una solución equilibrada, ya que proporciona el par necesario sin recurrir a un sobredimensionamiento excesivo.

A diferencia de las alternativas de dos polos analizadas anteriormente, este motor presenta una característica par-velocidad mucho más robusta y adecuada para el rango operativo demandado, incluso bajo la restricción de tensión de red de 380 V (0,95 p.u.).

El factor determinante que valida esta opción es la relación entre el par de carga y la capacidad nominal de la máquina. Para este motor, los 19 Nm exigidos por la instalación equivalen a 0,727 p.u. de su par nominal. Al observar la gráfica de la característica mecánica,

se comprueba que la curva de par dinámico (línea roja con compensación de tensión) se sitúa holgadamente por encima del par de carga. Esto garantiza que el motor trabaje en una zona de alta estabilidad y eficiencia, disponiendo de una reserva de par significativa para absorber transitorios sin riesgo de sobrecalentamiento.

En cuanto al comportamiento en la zona de sobrevelocidad, el motor debe alcanzar las 2000 rpm, lo que implica trabajar a una frecuencia de 66,6 Hz, equivalente a 1,33 p.u. respecto a su velocidad síncrona nominal. Según reflejan los cursores de la simulación (X: 1,3358, Y: 0,9023), el par disponible en este punto de funcionamiento se mantiene en el 90,23% del valor nominal. Al ser este valor muy superior al par de carga de 0,727 p.u., se confirma que existe un margen de seguridad del 17,5% aproximadamente en el punto de trabajo más desfavorable.

La comparativa entre las curvas estática y dinámica permite apreciar, además, que la implementación de la compensación de tensión en el variador (V\_comp) asegura un par de arranque y de aceleración muy potente, superando los 2,5 p.u. en bajas revoluciones. Esta reserva de par dinámico es fundamental para garantizar que la báscula pueda reaccionar ante incrementos súbitos en el caudal de carbón o ante posibles aumentos de rozamiento mecánico.

**Simulación IV: Accionamiento con motor de 5,5 kW y 4 polos**

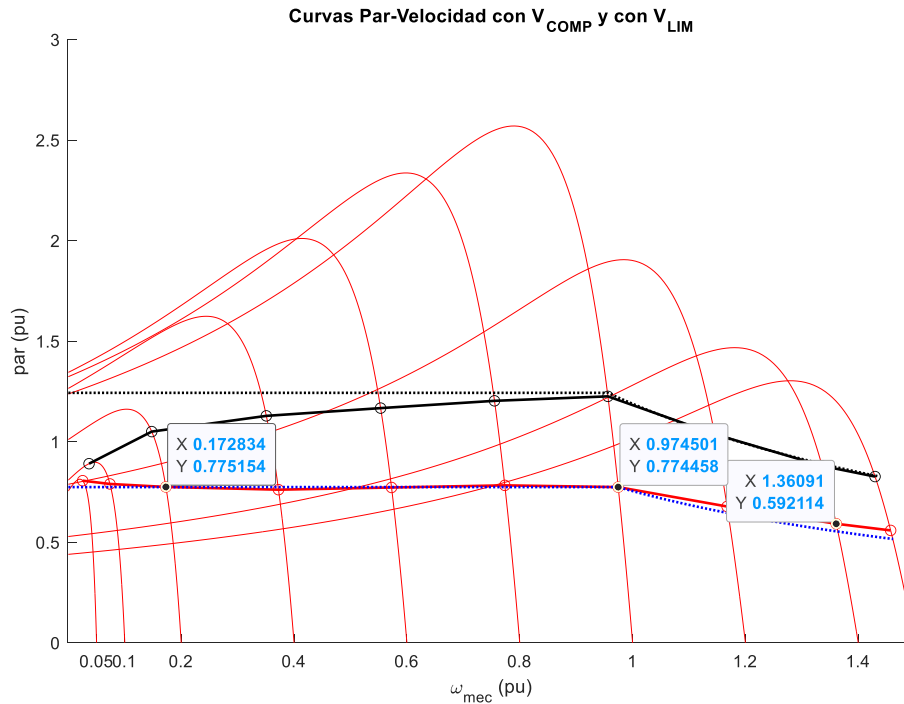


Figura 15: Curvas par-velocidad del accionamiento de 5,5 kW y 4 polos con compensación de tensión y límite de tensión

La Figura 15 muestra la simulación correspondiente al motor de 5,5 kW y 4 polos. Esta alternativa combina una potencia superior con una velocidad nominal moderada, por lo que ofrece un nivel de par disponible elevado en prácticamente todo el rango de funcionamiento.

La gráfica evidencia que el motor dispone de una reserva de par amplia frente a la demanda de la instalación. Además, al ser un motor de 4 polos, su comportamiento resulta más favorable que el de las opciones de 2 polos, especialmente en términos de par a baja y media velocidad. Sin embargo, esta mejora se consigue a costa de aumentar la potencia instalada, lo que puede suponer un sobredimensionamiento respecto a las necesidades reales del proceso.

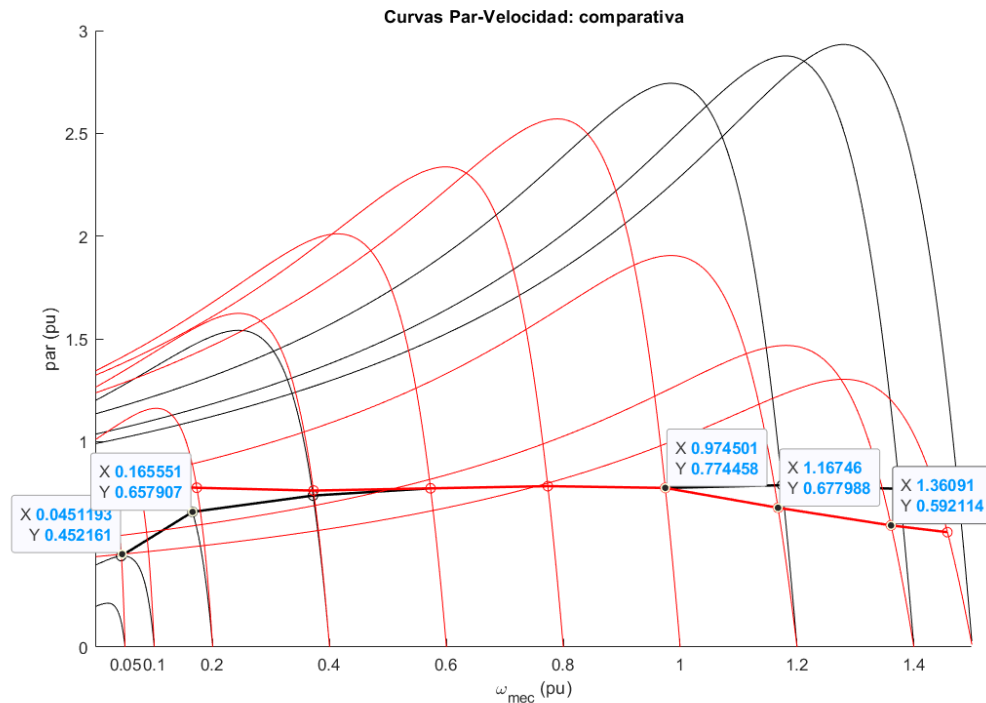


Figura 16: Comparativa par-velocidad del motor de 5,5 kW y 4 polos

La Figura 16 presenta la comparativa final para el motor de 5,5 kW y 4 polos. Los resultados muestran que esta configuración cumple ampliamente con los requisitos de par de la báscula dosificadora, incluso bajo la restricción de tensión disponible en planta.

No obstante, el margen de par obtenido es muy superior al estrictamente necesario. Esto indica que, aunque técnicamente la solución es válida, puede considerarse sobredimensionada frente a la alternativa de 4 kW y 4 polos. Desde el punto de vista de selección del accionamiento, esta opción proporciona una mayor reserva dinámica, pero implica un equipo de mayor potencia, coste y tamaño, sin que ello sea imprescindible para garantizar el funcionamiento correcto del sistema.

La última simulación del estudio comparativo analiza la opción de mayor potencia en configuración de cuatro polos. Aunque técnicamente es capaz de cumplir con los requisitos de la planta, los resultados sugieren que se trata de una solución sobredimensionada en comparación con la alternativa de 4 kW. Los puntos clave del análisis son:

En primer lugar, la relación de par de carga respecto a la base del motor es extremadamente baja. Para esta máquina de 5,5 kW, los 19 Nm requeridos equivalen a tan solo 0,415 p.u. de su capacidad nominal (frente al 0,727 p.u. del motor de 4 kW). Como se observa en la característica mecánica, el motor trabaja en una zona de carga muy ligera, lo que, si bien garantiza una reserva de par masiva, podría penalizar ligeramente la eficiencia energética al operar lejos de su punto de diseño óptimo.

En segundo lugar, el comportamiento en sobrevelocidad a 2000 rpm (1,33 p.u. de su sincronismo) es excepcionalmente robusto. Según los cursores de la simulación, el par disponible en este punto se sitúa en el 90,2%, lo que significa que el motor dispone casi del doble del par que necesita la báscula incluso en la zona de debilitamiento de campo. La gráfica comparativa muestra que las curvas de par máximo son muy amplias, ofreciendo una inmunidad total ante la caída de tensión de red a 380 V.

Sin embargo, a pesar de su solvencia técnica, esta opción presenta inconvenientes para el proyecto. Un motor de carcasa 132 es físicamente más grande y pesado que el de carcasa 112, lo que dificultaría las tareas de montaje en el soporte actual de la báscula. Además, entregar un par de ruptura tan elevado (superior a 140 Nm en picos dinámicos) supone un riesgo estructural para la correa de transmisión ante un posible bloqueo brusco, ya que el motor tiene fuerza suficiente para romper los dientes de la polea antes de detenerse.

### **4.3 SELECCIÓN DEL MOTOR**

Tras completar el estudio comparativo mediante el modelado dinámico de las cuatro alternativas motoras, se ha procedido a la selección del accionamiento que garantiza la máxima fiabilidad operativa para la báscula Pyroclon. Los resultados de las simulaciones permiten concluir que el motor ABB M3BP 112MB 4 (4 kW, 4 polos) es la solución técnica y económicamente más equilibrada para el proyecto.

Por un lado, se descartan de forma categórica las opciones de 2 polos (4 kW y 5,5 kW). El análisis dinámico ha demostrado que, aunque estas máquinas alcanzan la velocidad de 2000 rpm con una frecuencia de alimentación inferior, su par nominal es intrínsecamente bajo para esta aplicación. En ambos casos, el par de carga de 19 Nm representa un compromiso excesivo respecto a su base (llegando a ser de 1,239 p.u. en el modelo de 4 kW), lo que se traduce en una nula capacidad de respuesta ante sobrecargas y un riesgo inminente de calado al entrar en la zona de debilitamiento de campo bajo la restricción de tensión de 380 V de la planta.

Por otro lado, entre las opciones de 4 polos, el modelo de 4 kW destaca frente al de 5,5 kW por su idoneidad dimensional y mecánica. Mientras que el motor de 5,5 kW presenta un sobredimensionamiento excesivo, trabajando a solo un 0,53 p.u. de su capacidad y

generando un par de ruptura que podría comprometer la integridad estructural de la transmisión en caso de bloqueo, el motor de 4 kW opera en un régimen de carga del 0,727 p.u. Este valor es ideal en términos de eficiencia energética y ofrece una reserva de par dinámico del 17,5% en el punto de trabajo más desfavorable (2000 rpm), asegurando estabilidad frente a las fluctuaciones del caudal de carbón.

En conclusión, el análisis comparativo confirma que la alternativa más adecuada para la sustitución del accionamiento actual es el motor ABB M3BP 112MB 4 de 4 kW y 4 polos. Esta opción permite cubrir el par requerido por la báscula PyroClon con un margen suficiente, incluso en el punto de trabajo más desfavorable, sin incurrir en el sobredimensionamiento asociado al motor de 5,5 kW. Además, frente a las alternativas de 2 polos, ofrece una mejor capacidad de respuesta ante variaciones de carga y evita trabajar en condiciones próximas al límite de par disponible. Por tanto, se trata de una solución equilibrada desde el punto de vista técnico, energético y mecánico, ya que garantiza la fiabilidad del proceso de dosificación, mantiene una reserva dinámica adecuada y protege la integridad de la transmisión.

Tras el análisis individual de cada alternativa, en la Tabla 3 se resumen los principales resultados obtenidos en las simulaciones. Esta comparación permite valorar no solo si cada motor cumple con el par requerido por la instalación, sino también el grado de aprovechamiento del accionamiento, el margen dinámico disponible y el posible riesgo de sobredimensionamiento o falta de par.

| <b>Alternativa analizada</b> | <b>Carga respecto al par nominal</b> | <b>Comportamiento observado</b>  | <b>Valoración</b>              |
|------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------|
| Motor 4 kW, 2 polos          | 1,239 p.u.                           | El par requerido supera el par nominal del motor. Presenta escaso margen dinámico y elevada sensibilidad al debilitamiento de campo.   | No válida                      |
| Motor 5,5 kW, 2 polos        | Próxima al límite admisible          | Mejora respecto al caso anterior, pero sigue presentando poco margen de reserva ante sobrecargas o compactaciones del material.        | No recomendable                |
| Motor 4 kW, 4 polos          | 0,727 p.u.                           | Cubre el par requerido con margen suficiente. Presenta buena estabilidad, reserva dinámica adecuada y mejor adaptación mecánica.       | Opción seleccionada            |
| Motor 5,5 kW, 4 polos        | 0,53 p.u.                            | Cumple ampliamente los requisitos de par, pero trabaja muy por debajo de su capacidad nominal y puede sobredimensionar la transmisión. | Válida, pero sobredimensionada |

Tabla 3: Resumen de las alternativas y su valoración

#### **4.4 INTEGRACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA**

Tras la validación del motor de 4 kW y 4 polos como el elemento motriz óptimo, el diseño del sistema requiere la integración de un convertidor de frecuencia que actúe como interfaz de control entre la red de planta y el accionamiento. Esta elección es crítica, ya que no solo se trata de suministrar energía, sino de garantizar que la lógica de dosificación de la báscula Pyroclon sea precisa, estable y capaz de comunicarse con el sistema de control central. En este contexto, se plantea una comparativa técnica entre dos soluciones del fabricante ABB: la serie industrial estándar ACS580 y la serie de altas prestaciones ACS880, esta última propuesta inicialmente por el personal técnico de la fábrica [6].

Es fundamental aclarar que el análisis dinámico previo realizado mediante simulaciones con control escalar (V/f) ha servido como un ensayo de viabilidad de mínimos. Al demostrar que el motor es capaz de mover la carga y vencer la inercia a 2000 rpm bajo el control más básico y restrictivo posible (V/f), se garantiza que cualquier sistema de control superior, como el vectorial o el DTC, mejorará sustancialmente las prestaciones reales. Por tanto, la simulación no pierde validez, sino que actúa como una cimentación sólida sobre la cual se puede elevar el nivel tecnológico del control.

El debate entre el ACS580 y el ACS880 reside principalmente en su algoritmo de control interno y en la flexibilidad de su programación. El modelo ACS580 es un variador de propósito general, extremadamente fiable y con una excelente relación coste-beneficio. Su capacidad de control vectorial en lazo abierto sería, teóricamente, suficiente para mover el rotor de la báscula. Sin embargo, su precisión en la regulación del par ante cambios bruscos de carga es limitada comparada con la alternativa. Por otro lado, el ACS880, incorpora la tecnología Direct Torque Control (DTC) [2]. Este sistema procesa el estado magnético del motor cada 25 microsegundos, lo que permite una respuesta casi instantánea ante cualquier variación en el flujo de carbón pulverizado. Para una aplicación de pesaje dinámico, donde una fluctuación de velocidad de apenas un 1% puede derivar en un error de varias toneladas al final de la jornada, la precisión del DTC del ACS880 ofrece una garantía de proceso que el ACS580 difícilmente puede igualar [1], [2], [3], [4].

Otro aspecto fundamental para la toma de decisiones es la complejidad de la puesta en marcha y la integración en el ecosistema de la planta. El ACS880 posee un software de control mucho más avanzado y modular. Para el desarrollo de este proyecto, esto resulta crucial, ya que se requiere programar funciones específicas como límites de par adaptativos para proteger la transmisión, rampas de aceleración personalizadas que eviten el deslizamiento del carbón en la banda y la gestión avanzada de la zona de sobrevelocidad a 66,6 Hz. La flexibilidad del ACS880 facilita estas tareas de programación y ajuste fino, permitiendo que el variador "aprenda" las inercias reales del sistema una vez instalado. Además, su robustez ante armónicos y ruidos eléctricos gracias a su inductancia de choque

variable asegura que no se interfiera con las señales analógicas sensibles de las células de carga.

Desde una perspectiva operativa, la dirección de la fábrica acepta el coste del ACS880 por su estandarización en aplicaciones críticas y su larga vida útil. Aunque el ACS580 sería una opción válida para aplicaciones menos exigentes, en una báscula Pyroclon, donde el motor debe trabajar en la zona de debilitamiento de campo bajo una red de 380 V, el ACS880 ofrece un margen de seguridad eléctrica y térmica muy superior. El control DTC gestiona mucho mejor la corriente en esta zona de trabajo, optimizando el consumo y evitando calentamientos innecesarios en los devanados del motor.

Finalmente, considerando que la precisión en la dosificación es el objetivo último de la modernización de la línea de combustión del horno, se recomienda la instalación del convertidor de frecuencia ABB ACS880. La decisión se fundamenta en su superioridad técnica en el control de par, su facilidad para ser programado de forma avanzada y su capacidad para operar de forma estable en condiciones de tensión de red degradada. La mayor inversión inicial se traduce en una reducción drástica de errores de pesaje y paradas de mantenimiento, asegurando que la báscula funcione como un instrumento de precisión y no solo como una cinta transportadora.

### **Implementación: Guía de Parametrización del Variador ACS880**

Para garantizar que el motor ABB M3BP 112MB 4 funcione de acuerdo con las simulaciones dinámicas realizadas, es necesario realizar una puesta en marcha precisa del convertidor ACS880. A continuación, se detallan los grupos de parámetros críticos que deben configurarse para la báscula Pyroclon.

Antes de la puesta en servicio del accionamiento, será necesario configurar el grupo 99 del variador, correspondiente a los datos básicos del motor y del accionamiento. En este grupo se introducirán los valores nominales del motor seleccionado, de forma que el variador pueda adaptar su control, límites y protecciones a las características reales del equipo instalado [2]. En la Tabla 4 se recogen los principales parámetros de este grupo que deben introducirse para el motor seleccionado.

### Configuración de Datos Nominales del Motor (Grupo 99)

| Parámetro | Nombre                  | Valor           | Descripción  |
|-----------|-------------------------|-----------------|--|
| 99.04     | Motor control mode      | <b>DTC</b>      | Selecciona el control directo de par frente al escalar.    |
| 99.06     | Motor nominal current   | <b>8.2 A</b>    | Corriente nominal del motor a 400V (ajustar según placa).  |
| 99.07     | Motor nominal voltage   | <b>400 V</b>    | Tensión de diseño del motor.                               |
| 99.08     | Motor nominal frequency | <b>50.0 Hz</b>  | Frecuencia base antes del debilitamiento de campo.         |
| 99.09     | Motor nominal speed     | <b>1463 rpm</b> | Velocidad nominal de placa para el modelo de 4 polos.      |
| 99.10     | Motor nominal power     | <b>4.00 kW</b>  | Potencia nominal del motor seleccionado.                   |
| 99.13     | ID run requested        | <b>Normal</b>   | Ejecutar identificación con motor desacoplado de la carga. |

Tabla 4: Parámetros básicos del motor en el variador ABB. Grupo 99

### Límites de Operación y Seguridad (Grupo 30)

Además de los datos nominales del motor, es necesario definir los límites de operación y seguridad del accionamiento. Estos parámetros pertenecen al grupo 30 del variador y actúan como protecciones del sistema, limitando la velocidad, la corriente y el par máximo admisible [2]. En la Tabla 5 se recogen los valores propuestos para proteger la mecánica de la báscula y permitir el funcionamiento en sobrevelocidad de forma controlada.

*MODELO DESARROLLADO*

| <b>Parámetro</b> | <b>Nombre</b>   | <b>Valor</b>       | <b>Descripción</b>   |
|------------------|-----------------|--------------------|--|
| <b>30.11</b>     | Minimum speed   | <b>0,00 rpm</b>    | Velocidad mínima permitida del accionamiento.                                    |
| <b>30.12</b>     | Maximum speed   | <b>2100,00 rpm</b> | Permite alcanzar la consigna de 2000 rpm con un margen de seguridad.             |
| <b>30.17</b>     | Maximum current | <b>12,0 A</b>      | Limita la corriente al 150 % de la nominal para evitar picos térmicos excesivos. |
| <b>30.19</b>     | Minimum torque  | <b>-150 %</b>      | Límite de par negativo para protección durante el frenado.                       |
| <b>30.20</b>     | Maximum torque  | <b>110 %</b>       | Actúa como fusible electrónico.  |

Tabla 5: Límites de operación y seguridad del variador ABB. Grupo 30

Para evitar esfuerzos bruscos sobre la transmisión y asegurar una respuesta progresiva del sistema, se configuran las rampas de aceleración y deceleración del variador. Estos parámetros pertenecen a los grupos 23 y 28, relacionados con el control de velocidad y la generación de consignas de frecuencia [2]. En la Tabla 6 se recogen los valores propuestos para garantizar un arranque y una parada suaves de la báscula.

| <b>Parámetro</b> | <b>Nombre</b>          | <b>Valor</b>   | <b>Descripción</b>  |
|------------------|------------------------|----------------|---|
| <b>23.12</b>     | Acceleration time      | <b>5,000 s</b> | Tiempo de aceleración para un arranque progresivo del accionamiento.          |
| <b>23.13</b>     | Deceleration time      | <b>5,000 s</b> | Tiempo de deceleración para una parada controlada, evitando inercias bruscas. |
| <b>28.72</b>     | Freq acceleration time | <b>5,000 s</b> | Rampa de aceleración de frecuencia aplicada a la consigna del variador.       |

Tabla 6: Parámetros de rampas y control de velocidad del variador ABB. Grupos 23 y 28

Además de los datos nominales del motor y los límites de operación, es necesario configurar otros parámetros del variador para adaptar el accionamiento a las condiciones reales de la instalación. Estos ajustes permiten integrar el variador con el sistema de control de la báscula, adaptar su funcionamiento a la tensión disponible en planta y optimizar la respuesta dinámica del motor.

En primer lugar, se ajustan los parámetros de adaptación a la red eléctrica de la planta. Dado que la alimentación disponible es de 380 V en lugar de 400 V, se configura el grupo 95 del variador para evitar alarmas innecesarias de subtensión y mejorar el aprovechamiento del bus de continua [2]. Los valores propuestos se recogen en la Tabla 7.

| <b>Parámetro</b> | <b>Nombre</b>           | <b>Valor</b>  | <b>Descripción</b>  |
|------------------|-------------------------|---------------|---|
| <b>95.01</b>     | Supply voltage          | <b>380 V</b>  | Tensión real de alimentación disponible en la planta.                             |
| <b>95.02</b>     | Adaptive voltage limits | <b>Enable</b> | Permite adaptar los límites de tensión del variador a la tensión real de entrada. |

Tabla 7: Parámetros de adaptación a la red de planta del variador ABB. Grupo 95

A continuación, se configuran las entradas y salidas del variador, necesarias para su integración con el PLC y la electrónica de pesaje de la báscula. El variador debe recibir la consigna de velocidad mediante una señal analógica y, al mismo tiempo, devolver señales de monitorización y estado al sistema de control [2], [6]. Estos parámetros se resumen en la Tabla 8.

| <b>Parámetro</b> | <b>Nombre</b>      | <b>Valor</b>                  | <b>Descripción</b>   |
|------------------|--------------------|-------------------------------|--|
| <b>12.15</b>     | All unit selection | <b>Señal analógica 0–10 V</b> | Entrada analógica para la consigna de velocidad procedente del PLC.        |
| <b>13.12</b>     | AO1 source         | <b>Motor speed rpm</b>        | Salida analógica para la monitorización externa de la velocidad del motor. |
| <b>10.24</b>     | RO1 source         | <b>Ready run</b>              | Relé de confirmación de que el variador está listo para funcionar.         |

Tabla 8: Parámetros de configuración de entradas y salidas del variador ABB

Por último, se recomienda optimizar el lazo de control de velocidad mediante el autoajuste del variador. Esta operación debe realizarse con el motor instalado y acoplado a la báscula vacía, de forma que el variador pueda identificar la inercia real del conjunto mecánico [2]. El parámetro correspondiente se recoge en la Tabla 9.

| <b>Parámetro</b> | <b>Nombre</b> | <b>Valor</b>                      | <b>Descripción</b>   |
|------------------|---------------|-----------------------------------|--|
| <b>25.33</b>     | Autotune      | <b>Ejecutar con báscula vacía</b> | Permite identificar la inercia del sistema y optimizar los parámetros del lazo de velocidad. |

Tabla 9: Parámetro de optimización del lazo de control de velocidad del variador ABB.

Gracias al control DTC, el variador puede ajustar automáticamente la ganancia proporcional,  $K_p$ , y el tiempo de integración,  $T_i$ , del lazo de velocidad. Con ello se reducen posibles oscilaciones en el accionamiento y se mejora la estabilidad del pesaje durante el funcionamiento de la báscula dosificadora.

#### **4.5 IMPLEMENTACIÓN DE LA REALIMENTACIÓN DIGITAL**

Como parte de la modernización del sistema de medida de velocidad del rotor de la báscula dosificadora, se sustituye el convertidor analógico existente (Taco-Flex) por un transmisor digital de frecuencia PR electronics modelo 5225. Este equipo permite la conversión de señales de frecuencia procedentes de sensores industriales en señales analógicas normalizadas, mejorando significativamente la estabilidad y precisión de la realimentación.

Además de las limitaciones cualitativas descritas en los apartados anteriores, resulta conveniente realizar una estimación cuantitativa del efecto que puede tener la inestabilidad del convertidor de frecuencia actual sobre la señal de velocidad de la báscula.

Con el fin de comparar ambos equipos, en la Tabla 10 se muestra una estimación de la deriva térmica asociada a cada tecnología y su posible efecto sobre la señal de dosificación.

| <b>Equipo</b>              | <b>Tecnología</b> | <b>Deriva térmica estimada</b>             | <b>Variación considerada</b> | <b>Error estimado sobre la señal</b> |
|----------------------------|-------------------|--|------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Taco-Flex</b>           | <b>Analógica</b>  | $\pm 0,5 \% / 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  | 20 °C                        | $\pm 1,0\%$                          |
| <b>PR electronics 5225</b> | <b>Digital</b>    | $\pm 0,05 \% / 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 20 °C                        | $\pm 0,1\%$                          |

Tabla 10: Comparación estimada de estabilidad entre el convertidor Taco-Flex y el PR electronics 5225

A partir de esta comparación, se observa que una variación de temperatura ambiente de 20 °C podría provocar en el convertidor analógico un error aproximado del  $\pm 1\%$  sobre la señal, mientras que en el transmisor digital el error se reduciría hasta valores próximos al  $\pm 0,1\%$ . Aunque estos valores deben verificarse con la documentación técnica específica de cada equipo, permiten visualizar la diferencia de comportamiento entre una solución analógica antigua y una solución digital moderna [6].

Aplicando estos porcentajes a un caudal nominal de referencia de 15 t/h, el impacto sobre la dosificación sería el indicado en la Tabla 11.

| Equipo              | Caudal nominal | Error estimado | Desviación equivalente |
|---------------------|----------------|----------------|------------------------|
| Taco-Flex           | 15 t/h         | ±1,0 %         | ±0,150 t/h             |
| PR electronics 5225 | 15 t/h         | ±0,1 %         | ±0,015 t/h             |

Tabla 11: Estimación del error de dosificación asociado a la deriva de señal

Los resultados muestran que la deriva del convertidor analógico podría traducirse en una desviación aproximada de 150 kg/h, frente a los 15 kg/h estimados para el transmisor digital. Esta diferencia es relevante en una aplicación de dosificación gravimétrica, ya que pequeñas variaciones en la señal de velocidad pueden afectar directamente a la estabilidad del caudal de combustible alimentado al proceso [6], [8], [9].

De forma adicional, puede estimarse el impacto económico asociado a una desviación media de dosificación. Considerando un precio orientativo del coque de petróleo de 150 €/t, una operación anual de 6000 h y un error medio equivalente al 0,5 % del caudal nominal, se obtiene:

$$0,075 \text{ t/h} \cdot 6000 \text{ h/año} \cdot 150 \text{ €/t} = 67500 \text{ €/año}$$

Esta estimación se resume en la Tabla 12.

| Parámetro                    | Valor considerado |
|------------------------------|-------------------|
| Caudal nominal de referencia | 15 t/h            |
| Error medio considerado      | 0,5 %             |
| Desviación equivalente       | 0,075 t/h         |
| Horas de operación anuales   | 6000 h/año        |
| Precio estimado del coque    | 150 €/t           |
| Impacto económico estimado   | 67 500 €/año      |

Tabla 12: Estimación económica del impacto de un error medio de dosificación [6]

Este cálculo no debe interpretarse como una pérdida económica exacta, sino como una estimación del orden de magnitud del impacto que puede tener una medición inestable en un

proceso de dosificación continuo. En cualquier caso, permite justificar técnicamente la sustitución del convertidor analógico por un transmisor digital más estable, ya que la mejora en la precisión de la señal contribuye a reducir oscilaciones de caudal, mejorar el control del proceso y limitar desviaciones en el consumo de combustible.

Una vez cuantificado el efecto que puede tener la deriva de señal sobre la dosificación, se describe a continuación el funcionamiento del convertidor propuesto y la forma en que debe escalarse la señal de velocidad. El equipo seleccionado para sustituir al convertidor analógico existente es el PR electronics 5225, un convertidor programable  $f/I - f/f$  capaz de trabajar con distintos tipos de sensores, entre ellos NAMUR, tacho, NPN, PNP, TTL y S0. Además, admite un rango de frecuencia de entrada de 0 a 20 kHz y puede proporcionar una salida analógica en corriente o tensión, según la configuración establecida [8], [9].

En la aplicación estudiada, el sistema de detección de velocidad se basa en un sensor inductivo de tipo NAMUR asociado a una rueda dentada solidaria al eje del rotor. Esta rueda dispone de 60 dientes, por lo que el sensor genera un impulso por cada diente detectado, obteniéndose 60 pulsos por cada revolución completa del eje. Considerando el rango operativo del sistema, comprendido entre 0 y 2000 rpm, la señal de frecuencia de entrada al convertidor se determina mediante la expresión:

$$f = \frac{n \cdot N}{60}$$

donde:

- $n$  es la velocidad en rpm
- $N = 60$  pulsos por vuelta

De este modo, el rango de operación del convertidor queda definido entre 0 Hz (0 rpm) y 2000 Hz (2000 rpm).

La configuración del convertidor PR electronics 5225 se realiza mediante software PReset a través de la interfaz Loop Link, definiendo la relación entre la señal de frecuencia procedente del sensor NAMUR y la señal analógica de salida. El sistema de medida está basado en un sensor inductivo asociado a una rueda dentada de 60 dientes, lo que genera 60 impulsos por revolución del eje. Para un rango operativo de 0 a 2000 rpm, la señal de entrada al convertidor se encuentra comprendida entre 0 y 2000 Hz.

En primer lugar, se definen los parámetros generales del equipo, que permiten identificar el convertidor dentro de la instalación y establecer el modo de funcionamiento empleado. Estos valores se recogen en la Tabla 13.

| <b>Parámetro</b>               | <b>Valor configurado</b>                             | <b>Descripción</b>   |
|--------------------------------|--|--|
| <b>Modo de funcionamiento</b>  | <b>f/I</b>   | Conversión de frecuencia a corriente analógica.                          |
| <b>Función f/f concurrente</b> | <b>Deshabilitada</b>                                 | No se requiere generación ni tratamiento adicional de señales digitales. |
| <b>Identificación, Tag</b>     | <b>CV2_VELOCIDAD_PYROCLON</b>                        | Identificador del equipo dentro de la instalación.                       |
| <b>Descripción</b>             | <b>Sensor NAMUR 60 dientes – escalado 0–2000 rpm</b> | Define la aplicación y el rango de medida configurado.                   |

Tabla 13: Configuración general del convertidor PR electronics 5225 [8], [9].

Se selecciona el modo f/I porque la aplicación requiere convertir una señal de frecuencia en una señal analógica normalizada para su tratamiento por el PLC. La función f/f no es necesaria, ya que no se requiere generación ni tratamiento de señales digitales adicionales, simplificando así la configuración y evitando posibles interferencias.

A continuación, se configura la entrada del convertidor, correspondiente a la señal procedente del sensor NAMUR. Esta parametrización es fundamental para que el equipo interprete correctamente los impulsos generados por la rueda dentada. Los valores definidos se muestran en la Tabla 14.

| <b>Parámetro</b>                     | <b>Valor configurado</b>                           | <b>Descripción</b>  |
|--------------------------------------|--|---|
| <b>Tipo de entrada</b>               | <b>NAMUR</b>                                       | Compatible con el sensor inductivo instalado.                 |
| <b>Variable de entrada</b>           | <b>Frecuencia</b>                                  | La señal medida corresponde a impulsos por unidad de tiempo.  |
| <b>Frecuencia mínima, Input low</b>  | <b>0 Hz</b>  | Valor asociado a 0 rpm.                                       |
| <b>Frecuencia máxima, Input high</b> | <b>2000 Hz</b>                                     | Valor asociado a 2000 rpm con rueda dentada de 60 dientes.    |
| <b>Alimentación del sensor</b>       | <b>Interna NAMUR, <math>\approx 8,3</math> VDC</b> | Alimentación proporcionada por el propio convertidor.         |
| <b>Nivel de disparo</b>              | <b>Automático según NAMUR</b>                      | Umbral de detección propio del estándar NAMUR.                |
| <b>Filtro de red, 50 Hz</b>          | <b>Deshabilitado</b>                               | Evita distorsionar una señal limpia de frecuencia.            |
| <b>Inversión de señal</b>            | <b>No</b>  | No existe inversión física en el montaje.                     |
| <b>Detección de fallo de sensor</b>  | <b>Habilitada</b>                                  | Permite detectar circuito abierto o cortocircuito del sensor. |

Tabla 14: Configuración de entrada del convertidor PR electronics 5225 [8]

El tipo de entrada se configura como NAMUR porque el sensor instalado corresponde a este estándar, lo que permite utilizar la alimentación interna del equipo y asegurar compatibilidad eléctrica y robustez frente a ruido industrial.

El rango de frecuencia (0–2000 Hz) se obtiene directamente del sistema físico: 60 pulsos por vuelta y un máximo de 2000 rpm. Ajustar correctamente este rango es fundamental para maximizar la resolución de la señal analógica, ya que el convertidor distribuye los 16 bits de resolución sobre el rango definido.

No se activa el filtro de red porque está pensado para entradas por contacto mecánico y podría distorsionar una señal de frecuencia limpia procedente de un sensor NAMUR. La inversión de señal no es necesaria al no existir inversión física en el montaje.

Se habilita la detección de fallo de sensor para permitir la identificación de situaciones de circuito abierto o cortocircuito, aumentando la fiabilidad del sistema.

Una vez definida la entrada, se configura la salida analógica del convertidor. Esta señal será la que reciba el PLC para interpretar la velocidad de giro de la báscula. El escalado de la señal se resume en la Tabla 15.

| <b>Parámetro</b>                   | <b>Valor configurado</b> | <b>Descripción</b>                                       |
|------------------------------------|--------------------------|--|
| <b>Tipo de salida</b>              | <b>Corriente 4–20 mA</b> | Señal analógica normalizada para el PLC.                 |
| <b>Salida mínima</b>               | <b>4 mA</b>              | Valor asociado a 0 Hz, equivalente a 0 rpm.              |
| <b>Salida máxima</b>               | <b>20 mA</b>             | Valor asociado a 2000 Hz, equivalente a 2000 rpm.        |
| <b>Relación entrada/salida</b>     | <b>Lineal directa</b>    | La corriente aumenta proporcionalmente con la velocidad. |
| <b>Frecuencia asociada a 4 mA</b>  | <b>0 Hz</b>              | Inicio del rango de medida.                              |
| <b>Frecuencia asociada a 20 mA</b> | <b>2000 Hz</b>           | Final del rango de medida.                               |
| <b>Offset</b>                      | <b>0</b>                 | Sin desplazamiento adicional de la señal                 |
| <b>Tiempo de respuesta</b>         | <b>0,2 s</b>             | Compromiso entre estabilidad y rapidez de respuesta.     |
| <b>Limitación de salida</b>        | <b>Activada</b>          | Evita valores fuera del rango configurado.               |
| <b>Comportamiento en fallo</b>     | <b>Downscale</b>         | La salida baja por debajo de 4 mA en caso de fallo.      |
| <b>Corriente en fallo</b>          | <b>3,6 mA</b>            | Permite distinguir un fallo de una velocidad real baja.  |

Tabla 15: Configuración de salida analógica del convertidor PR electronics 5225 [8], [9].

Se selecciona salida 4–20 mA por ser el estándar industrial más robusto frente a interferencias electromagnéticas y compatible con el sistema de control existente.

El escalado 0–2000 Hz → 4–20 mA se define para aprovechar todo el rango de salida dentro del rango real de operación, maximizando la resolución y evitando pérdida de precisión.

Se utiliza relación lineal directa para mantener proporcionalidad entre velocidad y señal de salida, facilitando el tratamiento en el PLC.

El tiempo de respuesta de 0,2 s representa un compromiso entre filtrado y dinámica: permite eliminar pequeñas fluctuaciones sin introducir retardos significativos en el lazo de control.

El comportamiento en fallo se configura como “downscale” (3,6 mA) para distinguir claramente una condición de error de una condición de velocidad real baja, permitiendo su detección por el sistema de control.

Aunque el convertidor dispone de salidas digitales configurables, en esta aplicación no se utilizan, ya que la lógica de control y supervisión se realiza desde el PLC. La configuración correspondiente se recoge en la Tabla 16.

| <b>Parámetro</b>                 | <b>Valor configurado</b> | <b>Descripción</b>                               |
|----------------------------------|--------------------------|--|
| <b>Salida digital 1, NPN/PNP</b> | <b>Deshabilitada</b>     | No se utiliza en esta aplicación.                |
| <b>Salida digital 2</b>          | <b>Deshabilitada</b>     | No se utiliza en esta aplicación.                |
| <b>Salidas de relé</b>           | <b>No utilizadas</b>     | La lógica de control se realiza desde el PLC.    |
| <b>Retardo de activación</b>     | <b>0</b>                 | Sin retardo al estar las salidas deshabilitadas. |
| <b>Histéresis</b>                | <b>0</b>                 | No aplica al no emplearse comparadores.          |
| <b>Inversión de salida</b>       | <b>No</b>                | No se requiere inversión lógica.                 |

Tabla 16: Configuración de salidas digitales del convertidor PR electronics 5225 [8]

Por último, se recogen las condiciones de alimentación y montaje del convertidor. Estos datos son necesarios para verificar su compatibilidad con el armario eléctrico existente y con la alimentación auxiliar disponible en planta. La información se resume en la Tabla 17.

| <b>Parámetro</b>                | <b>Valor configurado</b> | <b>Descripción</b>   |
|---------------------------------|--------------------------|--|
| <b>Tensión de alimentación</b>  | <b>24 VDC</b>            | <b>Alimentación estándar del equipo.</b>                     |
| <b>Rango admisible</b>          | <b>19,2–28,8 VDC</b>     | <b>Margen de funcionamiento permitido.</b>                   |
| <b>Tiempo de estabilización</b> | <b>≈ 30 s</b>            | <b>Tiempo necesario para alcanzar condiciones estables.</b>  |
| <b>Montaje</b>                  | <b>Carril DIN</b>        | <b>Instalación en el interior del armario eléctrico.</b>     |
| <b>Grado de protección</b>      | <b>IP20</b>              | <b>Protección adecuada para montaje en cuadro eléctrico.</b> |

Tabla 17: Alimentación y condiciones de operación del convertidor PR electronics 5225 [8]

Con esta configuración, el convertidor PR electronics 5225 queda correctamente adaptado al sistema de medida de velocidad de la báscula PyroClon. La conversión de frecuencia a corriente permite obtener una señal estable, proporcional y fácilmente integrable en el PLC, mejorando la fiabilidad de la medición frente al convertidor analógico existente.

## **Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1 ESTUDIO ECONÓMICO Y ANÁLISIS DE RENTABILIDAD**

El presente capítulo tiene como objetivo evaluar la viabilidad económica de la modernización del sistema de accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon. El análisis se basa en la comparación entre la situación actual y la solución propuesta, considerando tanto los costes de inversión inicial como los beneficios económicos derivados de la mejora del sistema.

Dado que se trata de un proyecto de mejora en una instalación existente, la rentabilidad se fundamenta principalmente en la reducción de costes operativos, el aumento de la fiabilidad y la disminución del riesgo de paradas no planificadas [6]. Para ello, se emplean indicadores clásicos de evaluación de inversiones como el periodo de recuperación (Payback), el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la ratio beneficio/coste (B/C).

#### **5.1.1 INVERSIÓN INICIAL (CAPEX)**

La inversión necesaria para la implementación del nuevo sistema se sitúa en un rango estimado entre 7.500 € y 11.500 €, incluyendo:

- Variador de frecuencia ABB ACS880: 3.500 € [6].
- Motor asíncrono trifásico IE3: 2.000 € [6], [12], [13].
- Convertidor PR electronics 5225: 400 € [6], [11].
- Sensores, cableado y materiales auxiliares: 300 € [6].
- Ingeniería, instalación y puesta en marcha: 2.300 € [6].

Esta estimación se ha realizado a partir de precios de mercado de fabricantes industriales, catálogos técnicos y referencias en proyectos similares, lo que permite obtener un valor representativo dentro del contexto real de la industria.

#### **5.1.2 AHORROS DERIVADOS DEL PROYECTO (OPEX)**

La sustitución del motor de corriente continua elimina la necesidad de mantenimiento asociado a escobillas y colector, reduciendo significativamente las intervenciones periódicas. Se estima 2 intervenciones/año  $\times$  500 €  $\approx$  1.000 €/año de ahorro [6], [7].

La mejora en la fiabilidad del sistema reduce la probabilidad de fallos que puedan afectar al funcionamiento del horno. Considerando un escenario conservador, la evitación de una única parada anual representa un ahorro significativo. Se estima un ahorro anual aproximado de  $\approx 3.000 \text{ €/año}$  [6].

La sustitución del sistema actual por un accionamiento basado en variador de frecuencia permite optimizar el consumo eléctrico del motor, adaptándolo a la demanda real del proceso.

Considerando una mejora de eficiencia del 5–10 % en un equipo de funcionamiento continuo, se obtiene un ahorro estimado de  $\approx 200 - 500 \text{ €/año}$  [1], [3], [6]:

- Motor: 6 kW
- Horas operación: 6.000 h/año
- Energía consumida:

$$E = 6 \cdot 6.000 = 36.000 \text{ kWh/año}$$

Precio electricidad industrial:

$$0,10 \text{ €/kWh}$$

Coste anual:

$$36.000 \cdot 0,10 = 3.600 \text{ €}$$

Mejora eficiencia estimada: 8%

$$\text{Ahorro} = 3.600 \cdot 0,08 = 288 \text{ €} \approx 300\text{€}$$

El ahorro total estimado del proyecto se sitúa en torno a  $\approx 4.000 - 4.500 \text{ €/año}$   
Análisis de rentabilidad del proyecto:

Una vez estimados los costes de inversión inicial y los ahorros anuales derivados de la implementación de la solución propuesta, se procede a la evaluación económica del proyecto mediante indicadores financieros clásicos. Estos indicadores permiten cuantificar la viabilidad de la inversión y compararla con criterios habituales en el ámbito industrial.

### 5.1.3 PERIODO DE RECUPERACIÓN (PAYBACK)

El periodo de recuperación o *payback* representa el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a partir de los flujos de caja positivos generados por el proyecto. Se trata de un indicador sencillo, ampliamente utilizado en la industria como primer criterio de decisión.

El cálculo se realiza como:

$$\text{Payback} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{8.500}{4.300} = 1,98 \text{ años}$$

Por tanto, el periodo de recuperación es aproximadamente de 2 años.

Este resultado indica que la inversión se recupera en un plazo muy reducido, significativamente inferior a la vida útil del sistema. En aplicaciones industriales, periodos de recuperación inferiores a 4–5 años suelen considerarse altamente favorables, por lo que el proyecto presenta un nivel de riesgo económico bajo.

### 5.1.4 VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) permite evaluar la rentabilidad del proyecto considerando el valor temporal del dinero. Este indicador consiste en actualizar los flujos de caja futuros a valor presente mediante una tasa de descuento.

La expresión utilizada es:

$$VAN = \sum_{t=1}^{10} \frac{4.300}{(1+0,08)^t} - 8.500$$

Para simplificar el cálculo, se emplea el factor de actualización de una anualidad:

$$\frac{1 - (1 + 0,08)^{-10}}{0,08} = 6,71$$

Sustituyendo:

$$VAN = 4.300 \cdot 6,71 - 8.500 = 28.853 - 8.500 = 20.353 \text{ €}$$

El VAN obtenido es claramente positivo, lo que indica que el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que genera un valor adicional significativo a lo largo de su vida útil.

Desde un punto de vista económico, un VAN positivo implica que el proyecto es rentable y que su ejecución incrementa el valor de la instalación.

### **5.1.5 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)**

La Tasa Interna de Retorno (TIR) representa la rentabilidad intrínseca del proyecto, definida como la tasa de descuento para la cual el VAN es igual a cero.

Matemáticamente, se obtiene resolviendo:

$$0 = -8.500 + 4.300 \cdot \frac{1 - (1 + TIR)^{-10}}{TIR}$$

Resolviendo esta expresión de forma aproximada, se obtiene:

$$TIR \approx 45\%$$

Este valor es considerablemente superior a la tasa de descuento adoptada (8%), lo que indica que el proyecto presenta una rentabilidad muy elevada.

En términos prácticos, una TIR elevada implica que la inversión es altamente atractiva y robusta frente a variaciones en las condiciones económicas.

### **5.1.6 RATIO BENEFICIO / COSTE (B/C)**

La ratio beneficio/coste permite evaluar la relación entre los beneficios actualizados y la inversión inicial.

Se calcula como:

$$B/C = \frac{\text{Valor actualizado de beneficios}}{\text{Inversión inicial}}$$
$$B/C = \frac{28.853}{8.500} = 3,39$$

Este resultado indica que por cada euro invertido se generan aproximadamente 3,39 euros de valor económico.

Un valor superior a la unidad implica que el proyecto es viable; en este caso, el valor obtenido refleja una inversión especialmente sólida desde el punto de vista financiero.

Además de los beneficios económicos cuantificables, el proyecto presenta ventajas adicionales como el incremento de la fiabilidad del sistema, reducción del riesgo operativo, mejora de la seguridad industrial, mayor integración con sistemas digitales y reducción de la variabilidad del proceso

Estos factores, aunque difíciles de cuantificar económicamente, tienen un impacto significativo en la operación global de la planta. Por lo que el análisis económico realizado demuestra que la modernización del sistema de accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon es una inversión rentable, con un periodo de recuperación reducido y unos indicadores financieros favorables.

La combinación de reducción de costes, mejora de la fiabilidad y optimización del proceso convierte esta actuación en una solución no solo viable, sino altamente recomendable desde el punto de vista técnico y económico.

## **Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS**

### **FUTUROS**

El presente Trabajo de Fin de Grado ha tenido como objetivo principal analizar y modernizar el sistema de accionamiento y control de la báscula dosificadora Pfister PyroClon, empleada en la alimentación de coque pulverizado dentro de un entorno industrial cementero. Para ello, se ha estudiado el sistema existente, se han identificado sus principales limitaciones y se ha desarrollado una propuesta de mejora basada en tecnologías actuales de accionamiento eléctrico, medida de velocidad y control industrial.

A lo largo del proyecto se ha comprobado que el sistema original, basado en un motor de corriente continua y un convertidor analógico Taco-Flex para el tratamiento de la señal de velocidad, presenta limitaciones importantes desde el punto de vista del mantenimiento, la estabilidad de la medida y la integración con sistemas de control modernos. Estas limitaciones justifican la sustitución del accionamiento por una solución basada en un motor asíncrono trifásico, variador de frecuencia ABB y convertidor digital PR electronics 5225. De este modo, se ha desarrollado una propuesta realista y aplicable a la instalación existente, sin necesidad de modificar de forma significativa la infraestructura de la planta.

#### **6.1 CONCLUSIONES TÉCNICAS**

Desde el punto de vista técnico, el análisis realizado ha permitido seleccionar como alternativa más adecuada el motor ABB M3BP 112MB 4, de 4 kW y 4 polos. Esta elección no se ha realizado por equivalencia directa con el motor de corriente continua existente, sino a partir del estudio del par requerido por la báscula y de las condiciones reales de funcionamiento de la instalación.

El motor seleccionado permite alcanzar el régimen máximo de trabajo de 2000 rpm, manteniendo la limitación de velocidad establecida para proteger la transmisión por correa. En el punto de funcionamiento más exigente, el motor trabaja aproximadamente al 72,7 % de su par nominal, lo que supone un aprovechamiento adecuado del accionamiento. Además, incluso considerando la tensión real disponible en planta, de 380 V, el sistema mantiene una reserva dinámica de par del 17,5 % a 2000 rpm, suficiente para absorber variaciones de carga, rozamientos adicionales o compactaciones puntuales del coque en el rotor.

El estudio comparativo también ha permitido descartar las alternativas de 2 polos, tanto de 4 kW como de 5,5 kW, debido a su menor par disponible y a su menor margen frente a sobrecargas. Aunque estas opciones permiten alcanzar velocidades elevadas con menor

frecuencia de alimentación, su comportamiento resulta menos favorable cuando se considera la limitación de tensión de la planta y la entrada en zona de debilitamiento de campo. Por otro lado, el motor de 5,5 kW y 4 polos cumple ampliamente los requisitos de par, pero supone un sobredimensionamiento respecto a las necesidades reales del proceso.

En cuanto al sistema de medida de velocidad, la sustitución del convertidor analógico Taco-Flex por el PR electronics 5225 constituye una mejora relevante. El nuevo convertidor permite transformar la señal de frecuencia procedente del sensor NAMUR en una señal analógica 4–20 mA estable, lineal y fácilmente integrable en el PLC. Además, al trabajar con una resolución de 16 bits, frente a los aproximadamente 8 bits efectivos del sistema analógico anterior, se multiplica por 256 la resolución de la señal de realimentación. Esta mejora contribuye a reducir oscilaciones en la medida de velocidad y, por tanto, a mejorar la estabilidad del caudal dosificado.

También se ha tenido en cuenta la integración del nuevo sistema en el entorno industrial existente. Para ello, se han definido los parámetros principales del variador, incluyendo los datos nominales del motor, los límites de velocidad, corriente y par, las rampas de aceleración y deceleración, la adaptación a la tensión de red de 380 V, las señales de entrada y salida, y el autoajuste del lazo de control. Esta parametrización permite adaptar el nuevo accionamiento a las condiciones reales de la planta, manteniendo la compatibilidad con el PLC y con la electrónica de pesaje de la báscula.

## 6.2 CONCLUSIONES ECONÓMICAS

Desde el punto de vista económico, el análisis realizado demuestra que la propuesta de modernización es rentable. La inversión inicial queda compensada por la reducción de tareas de mantenimiento, la eliminación de componentes sujetos a desgaste, la mejora de la disponibilidad del sistema y la reducción del riesgo de paradas no planificadas.

Los principales indicadores obtenidos en el estudio económico se presentan en la tabla 18:

| <b>Indicador</b>              | <b>Resultado</b> |
|-------------------------------|------------------|
| Valor Actual Neto, VAN        | 20.353 €         |
| Tasa Interna de Retorno, TIR  | 45 %             |
| Periodo de retorno, Payback   | 1,98 años        |
| Relación beneficio/coste, B/C | 3,39             |

Tabla 18: Resumen de resultados económicos

El VAN positivo confirma que el proyecto genera valor económico durante el horizonte de análisis considerado. La TIR del 45 % indica que la rentabilidad esperada es superior a la tasa de descuento empleada, mientras que el periodo de retorno de 1,98 años muestra que la

inversión se recupera en un plazo reducido. Por último, la relación beneficio/coste de 3,39 refleja que los beneficios estimados superan ampliamente el coste inicial del proyecto.

Por tanto, la modernización propuesta no solo responde a una necesidad técnica, sino que también presenta una justificación económica sólida. La mejora de la fiabilidad del sistema, la reducción del mantenimiento y la mayor estabilidad del proceso permiten considerar la inversión como una actuación favorable para la operación de la planta.

### **6.3 APORTACIONES DEL TRABAJO**

Las principales aportaciones de este Trabajo de Fin de Grado se resumen en el análisis técnico del sistema existente, la identificación de sus limitaciones, el diseño de una solución de modernización basada en tecnologías industriales actuales y la selección justificada del nuevo accionamiento.

Además, el trabajo incorpora la parametrización detallada de equipos reales, como el variador de frecuencia y el convertidor PR electronics 5225, lo que proporciona al proyecto un carácter aplicado y orientado a una posible implantación en planta. También se ha desarrollado una evaluación económica completa, incluyendo indicadores de rentabilidad que permiten valorar la viabilidad de la inversión.

En conjunto, el proyecto aporta una solución técnica completa para mejorar la fiabilidad, reducir los costes de mantenimiento, optimizar el consumo energético y aumentar la estabilidad del control de dosificación. Estas aportaciones permiten considerar que los objetivos planteados al inicio del trabajo han sido alcanzados satisfactoriamente.

### **6.4 LIMITACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

A pesar de los resultados obtenidos, es necesario señalar que parte del estudio se basa en modelos de simulación, datos técnicos disponibles e hipótesis razonables de operación. Por este motivo, la validación definitiva de la solución debe realizarse mediante pruebas experimentales en planta, una vez instalado el nuevo accionamiento.

Como primera línea de trabajo futuro, se propone llevar a cabo la implementación real del sistema y registrar variables como velocidad, corriente, par estimado, señal de realimentación y caudal dosificado. Esta fase permitiría ajustar con mayor precisión los parámetros del variador y comprobar el comportamiento del sistema en condiciones reales de funcionamiento.

En segundo lugar, podría estudiarse el desarrollo de un sistema de control más avanzado, por ejemplo mediante control vectorial cerrado con encoder. Esta solución permitiría mejorar la precisión de la regulación de velocidad, especialmente a bajas velocidades o ante variaciones bruscas de carga.

Otra línea de mejora sería la integración del nuevo accionamiento con el sistema SCADA de planta mediante protocolos industriales como Profibus o Modbus TCP. Esta integración

facilitaría la supervisión del estado del variador, el registro histórico de alarmas y variables de proceso, y la aplicación de estrategias de mantenimiento predictivo.

Finalmente, desde el punto de vista económico, sería conveniente ampliar el análisis mediante estudios de sensibilidad y diferentes escenarios de operación. Esto permitiría evaluar cómo varía la rentabilidad del proyecto ante cambios en el coste energético, el precio del combustible, las horas de funcionamiento o las condiciones de producción.

Como conclusión, la modernización del sistema de accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon representa una mejora significativa para la instalación. La solución propuesta permite sustituir un sistema basado en tecnología de corriente continua y medida analógica por una arquitectura más robusta, eficiente y compatible con los estándares actuales de automatización industrial. En este sentido, el trabajo desarrollado constituye una base sólida para una futura implantación real en planta, aportando valor tanto desde el punto de vista académico como industrial.

## **Bibliografía**

- [1] ABB. ACS880-01 drives hardware manual. ABB Oy, Finland.
- [2] ABB. ACS880 primary control program firmware manual. ABB Oy, Finland.
- [3] ABB. ACS880 Industrial Drives – Technical Catalogue. ABB Oy, Finland.
- [4] ABB. ACS880-01-09A4-3 product details. ABB.
- [5] Advanced Systems Baltic. ABB ACS880-01-09A4-3 frequency inverter, ficha comercial de producto.
- [6] CEMEX España Operaciones, S.L.U. Documentación interna de procesos industriales, planos eléctricos, manual de la báscula dosificadora, datos de operación, precios estimados de suministro y estimaciones económicas de planta. Documento no publicado.
- [7] Fernández Bernal, F. Apuntes y documentación docente de la asignatura Máquinas Eléctricas. Universidad Pontificia Comillas, ICAI. Documento docente no publicado.
- [8] PR electronics. 5225 Programmable f/I – f/f Converter Manual. PR electronics A/S.
- [9] PR electronics. 5225A Programmable f/I – f/f Converter, ficha técnica de producto.
- [10] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. Directiva 2014/34/UE sobre aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- [11] RS Components España. PR Electronics 5225A1, acondicionador de señal / convertidor de frecuencia, ficha comercial y precio orientativo.
- [12] Siemens AG. Electric Motors – SIMOTICS General Purpose Motors Catalogue.
- [13] WEG. Low Voltage Motors – Technical Data and Selection Guide.

# **ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR VELOCIDAD**

Programa:

%% DATOS

% Parámetros motor inducción en pu

Rs\_pu = 0.05978; % Pérdidas en estator con  $i_1=1$  pu

Rr\_pu = 0.0339; % Pérdidas en rotor con  $i_2=1$  pu

Rm\_pu = 44.802; % Pérdidas en el hierro.

Lm\_pu = 1.715; % Corriente de vacío

L\_dis\_pu = 0.10397/2; %  $X_1 = X_2$ . Corriente de arranque

% Datos de placa

V\_nom = 400; % (V). Tensión eficaz de línea.

I\_nom = 8.2; % (A). I nominal del motor.

f\_nom = 50; % (HZ). Frecuencia eléctrica nominal.

P = 2; % pares de polos: 1500 rpm wsinc ( $wsinc = 3000/P$ )

V\_red = 380; % (V). Tensión eficaz de línea de la red.

f\_red = 50; % (HZ). Frecuencia eléctrica de la red.

% Carga en pu

J\_pu = 0.01325; % Inercia en s. Inercia del motor y la carga

B\_pu = 0; % Rozamiento viscoso en pu.

w\_inicial\_pu = 0;

*ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR VELOCIDAD*

---

```

%% PROGRAMA

w_red = 2*pi*f_red; % pulsación eléctrica de alimentación en rd/s

n_rpm = 60/(2*pi); % Constante de conversión de rd/s a rpm: w (rpm) = n_rpm*w(rd/s)

% Bases para las simulaciones en reales

U_base = V_nom;

I_base = I_nom;

S_base = sqrt(3)*U_base*I_base;

Z_base = U_base^2/S_base;

w_base_ele = 2*pi*f_nom;

w_base_mec = w_base_ele/P;

M_base = S_base/w_base_mec;

L_base = Z_base/w_base_ele

J_base = S_base/w_base_mec^2;

V_red_pu = V_red/ U_base;

w_red_pu = w_red / w_base_ele;

% Parámetros del motor en reales (se usará para el modelo dinámico)

Lm_real = Lm_pu*L_base;

Ls_real = (Lm_pu +L_dis_pu)*L_base; % El modelo dinámico del MI usa este valor de
inductancia en vez de L_dis.

Lr_real = Ls_real; % El modelo dinámico del MI usa este valor de inductancia en vez de
L_dis.

Rs_real = Rs_pu *Z_base;

Rr_real = Rr_pu *Z_base;

R2ad_pu = Rr_pu; % Si la relación de transformación es 1

R2ad_real = R2ad_pu;

```

*ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR VELOCIDAD*

---

```

R2ad_real = R2ad_pu * Z_base;

%R2ad_real(:,2) = R2ad_pu(:,2)*Z_base; % Relación transf. estator/rotor = 1

% Parámetros de la carga en reales

J_real = J_pu * J_base;

B_real = B_pu * M_base / w_base_mec;

w_inicial_real = w_inicial_pu*w_base_mec % en rd/s

%% DATOS

% Valores ensayo

w_lim_pu = 2000/1500; % Valor de la velocidad/frecuencia máxima en pu

f_test_pu = [0.05,0.1,(0.2:0.2:1),1.2,1.4,w_lim_pu]; % Frecuencias a las que se hace
el análisis.

V_comp_pu = 0; % tensión de compensación en pu a w = 0

% V_comp_pu = Rs_pu % r1, compensación a bajas velocidades <0.3pu

%%PROGRAMA

% Comprueba que al menos está we = 1 pu

aux_we = find(f_test_pu == 1);

if (isempty(aux_we))

    disp('Error: se debe añadir la frecuencia nominal we = 1 pu en el vector de frecuencias
f_test_pu')

    return

end

% Inicializa variables y gráficas

wmax = []; % velocidad en la que i1 = 1 pu sin compensación

mmax = []; % par en la que i1 = 1 pu sin compensación

mmax_din = []; % par en la que i1 = imax pu con compensación

```

*ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR VELOCIDAD*

---

```
wm_mmax_din = []; % velocidad en la que i1 = imax pu con compensación
```

```
wmax_boost = []; % velocidad en la que i1 = 1 pu con compensación
```

```
mmax_boost = []; % par en la que i1 = 1 pu con compensación
```

```
figure(1) % En la Fig.1 se representarán las distintas m-w sin comp.
```

```
clf
```

```
hold on
```

```
xlabel('\omega_{mec} (pu)')
```

```
ylabel('par (pu)')
```

```
title('Curvas Par-Velocidad sin V_{COMP} y sin V_{LIM}')
```

```
figure(2) % En la Fig.2 se representarán las distintas m-w con comp.
```

```
clf
```

```
hold on
```

```
xlabel('\omega_{mec} (pu)')
```

```
ylabel('par (pu)')
```

```
title('Curvas Par-Velocidad con V_{COMP} y con V_{LIM}')
```

```
figure(3) % En la Fig.3 se representarán todas para compararlas
```

```
clf
```

```
hold on
```

```
xlabel('\omega_{mec} (pu)')
```

```
ylabel('par (pu)')
```

```
title('Curvas Par-Velocidad: comparativa')
```

```
%% Simulación V/f totalmente lineal
```

```
V_comp = 0; % sin compensación
```

*ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR VELOCIDAD*

---

```
Vlim = 0.95; % sin limitación de tensión

for we_pu = f_test_pu

% sim('MI_T_arranque_VFcte_vi2n');

sim('MI_T_arranque_VFcte');

figure(1)

plot(wm,par,'k') % Curva m-wm sin compensación

figure(3)

plot(wm,par,'k') % Curva m-wm sin compensación

aux = find(abs(Is) > 1);

if (we_pu == 1)

mn = par(aux(end));

sn = 1-wm(aux(end));

end

if (~isempty(aux))

figure(1)

plot(wm(aux(end)),par(aux(end)),'ko')

figure(3)

plot(wm(aux(end)),par(aux(end)),'ko')

wmax = [wmax,wm(aux(end))];

mmax = [mmax,par(aux(end))];

end

end

figure(1)

plot(wmax,mmax,'k','Linewidth',1.5)
```

*ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR VELOCIDAD*

---

```

set(gca,'XTick',f_test_pu)

figure(3)

plot(wmax,mmax,'k','Linewidth',1.5)

%% Simulación con compensación y limitación de tensión

V_comp = V_comp_pu;    % con compensación

Vlim = 0.95;    % con limitación de tensión

for we_pu = f_test_pu

%  sim('MI_T_arranque_VFcte_vi2n');

    sim('MI_T_arranque_VFcte');

    figure(2)

    plot(wm,par,'r') % Curva m-wm con compensación

    figure(3)

    plot(wm,par,'r') % Curva m-wm con compensación

    aux = find(abs(Is) > 1); % localiza Is > 1 pu

    aux3 = find(abs(Is) > imax); % localiza Is > imax

    if (~isempty(aux))

        figure(2)

        plot(wm(aux(end)),par(aux(end)),'ro')

        figure(3)

        plot(wm(aux(end)),par(aux(end)),'ro')

        wmax_boost = [wmax_boost,wm(aux(end))]

        mmax_boost = [mmax_boost,par(aux(end))]

    end

    if (~isempty(aux3))

```

*ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR VELOCIDAD*

---

```

figure(2)

plot(wm(aux3(end)),par(aux3(end)),'ko')

wm_mmax_din = [wm_mmax_din,wm(aux3(end))];

mmax_din = [mmax_din,par(aux3(end))];

end

end

figure(2)

plot(wmax_boost,mmax_boost,'r','Linewidth',1.5)
plot(wm_mmax_din,mmax_din,'k','Linewidth',1.5)
set(gca,'XTick',f_test_pu)

figure(3)

plot(wmax_boost,mmax_boost,'r','Linewidth',1.5)
set(gca,'XTick',f_test_pu)

%% Simulación con compensación y limitación de tensión

if (1==0)

    V_comp = V_comp_pu; % con compensación

    Vlim = 0.95; % con limitación de tensión

    wmax_boost09 = []

    mmax_boost09 = []

    wm_mmax_din09 = []

    mmax_din09 = []

    for we_pu = f_test_pu

        % sim('MI_T_arranque_VFcte_vi2n');

```

*ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR VELOCIDAD*

---

```

sim('MI_T_arranque_VFcte');

figure(4)

plot(wm,par,'b') % Curva m-wm con compensación

figure(3)

plot(wm,par,'b') % Curva m-wm con compensación

aux = find(abs(Is) > 1); % localiza Is > 1 pu
aux3 = find(abs(Is) > imax); % localiza Is > imax

if (~isempty(aux))

    figure(4)

    plot(wm(aux(end)),par(aux(end)),'ro')

    figure(3)

    plot(wm(aux(end)),par(aux(end)),'ro')

    wmax_boost09 = [wmax_boost09,wm(aux(end))]
    mmax_boost09 = [mmax_boost09,par(aux(end))]

end

if (~isempty(aux3))

    figure(2)

    plot(wm(aux3(end)),par(aux3(end)),'ko')

    wm_mmax_din09 = [wm_mmax_din09,wm(aux3(end))];
    mmax_din09 = [mmax_din09,par(aux3(end))];

end

end

figure(4)

plot(wmax_boost09,mmax_boost09,'b','Linewidth',1.5)

```

*ANEXO I CÓDIGO DE MATLAB PARA LA SIMULACIÓN DE CURVAS PAR VELOCIDAD*

---

```

plot(wm_mmax_din09,mmax_din09,'k','Linewidth',1.5)

set(gca,'XTick',f_test_pu)

figure(3)

plot(wmax_boost09,mmax_boost09,'b','Linewidth',1.5)

set(gca,'XTick',f_test_pu)

end

%% Curvas teóricas de par máximo con  $i_l = 1$ ,  $i_l = i_{max}$ 

aux_we = Vlim:0.01:w_lim_pu;

mn_i2n = mn*Vlim./aux_we; % Par teórico de rég. permanente

m_din_n = (1-imax*(Rs_pu*0.9+L_dis_pu*0.5)).*sqrt(imax^2-(1/Lm_pu)^2); % mdin
nominal

m_din = m_din_n*Vlim./aux_we; % Límite por imax con fórmula i2 corregida

figure(2)

plot([0,aux_we*(1-sn)],[mn_i2n(1),mn_i2n],':b','Linewidth',1.5)

aux = find(wm_mmax_din<1);

plot([0,aux_we*(wm_mmax_din(aux(end-1)))],[m_din(1),m_din],':g','Linewidth',1.5)

%%

```



# **ANEXO III: REFLEXIÓN SOBRE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible constituyen una referencia fundamental para orientar el desarrollo tecnológico, industrial y económico hacia un modelo más responsable, eficiente y sostenible. En el ámbito de la ingeniería, estos objetivos adquieren una importancia especial, ya que muchas decisiones técnicas tienen consecuencias directas sobre el consumo de recursos, la eficiencia energética, la fiabilidad de los procesos productivos y la sostenibilidad de las instalaciones industriales.

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en la modernización del sistema de accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon, situada en la fábrica de cemento de Cemex España en Morata de Jalón. Este equipo forma parte del sistema de alimentación de combustible sólido al horno, por lo que su correcto funcionamiento resulta esencial para garantizar la estabilidad del proceso productivo. La sustitución de un accionamiento antiguo por una solución más actual, basada en tecnologías industriales modernas, permite relacionar el proyecto con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente aquellos vinculados a la industria, la innovación, la eficiencia energética y el uso responsable de los recursos.

El objetivo más directamente relacionado con este trabajo es el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. Este objetivo promueve el desarrollo de infraestructuras resilientes, la modernización industrial y la incorporación de soluciones tecnológicas que permitan mejorar la eficiencia y fiabilidad de los procesos. En este sentido, el proyecto contribuye a la modernización de una instalación industrial existente, analizando las limitaciones del sistema actual y proponiendo una alternativa técnicamente viable y económicamente justificada. La sustitución del accionamiento no se plantea únicamente como un cambio de equipo, sino como una mejora integral del sistema, considerando el motor, el variador de frecuencia, la realimentación, la integración con el control existente y la documentación necesaria para su futura implantación y mantenimiento.

---

***ANEXO III: REFLEXIÓN SOBRE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE***

---

Asimismo, el trabajo se relaciona con el ODS 12: Producción y consumo responsables, ya que una planta industrial más eficiente y fiable permite utilizar mejor los recursos disponibles. La dosificación de combustible en un horno de cemento debe realizarse de forma precisa, porque cualquier desviación puede afectar a la estabilidad térmica del proceso y provocar ineficiencias operativas. La propuesta desarrollada en este TFG busca mejorar el control del accionamiento y reducir problemas asociados a equipos obsoletos, mantenimiento correctivo o falta de repuestos. Aunque el proyecto se centra en un equipo concreto, su impacto se enmarca dentro de una lógica de mejora continua, en la que pequeñas actuaciones técnicas pueden contribuir a un funcionamiento más estable, eficiente y responsable de la planta.

También puede establecerse una relación con el ODS 7: Energía asequible y no contaminante, especialmente desde la perspectiva de la eficiencia energética. La incorporación de un variador de frecuencia permite adaptar mejor el funcionamiento del motor a las necesidades reales del proceso, evitando modos de operación menos eficientes y permitiendo un control más adecuado de la velocidad. En el análisis económico del proyecto se ha considerado, además, una mejora estimada de eficiencia energética, lo que demuestra que la modernización propuesta no solo tiene interés desde el punto de vista técnico, sino también desde el punto de vista del consumo eléctrico. En entornos industriales, donde los equipos pueden operar durante muchas horas al año, incluso mejoras aparentemente pequeñas pueden tener un efecto acumulado relevante.

De forma indirecta, el proyecto también se vincula con el ODS 13: Acción por el clima. La industria del cemento es un sector intensivo en energía, por lo que cualquier actuación orientada a mejorar la eficiencia, reducir consumos innecesarios o evitar paradas no planificadas puede contribuir a disminuir el impacto ambiental asociado al proceso productivo. Aunque este TFG no tiene como objetivo principal cuantificar la reducción de emisiones, sí se alinea con una visión de la ingeniería en la que la modernización tecnológica y la eficiencia operativa son herramientas necesarias para avanzar hacia procesos industriales más sostenibles.

Desde una perspectiva personal, este trabajo me ha permitido entender que la sostenibilidad en ingeniería no siempre consiste en diseñar soluciones completamente nuevas o alejadas de la realidad industrial, sino también en mejorar instalaciones existentes para hacerlas más fiables, eficientes y mantenibles. Al inicio del proyecto, el problema podía parecer limitado a la sustitución de un accionamiento eléctrico; sin embargo, durante su desarrollo he comprendido que detrás de una decisión técnica hay muchos factores relacionados: continuidad de producción, seguridad de operación, consumo energético, disponibilidad de repuestos, costes de mantenimiento y facilidad de intervención futura.

---

***ANEXO III: REFLEXIÓN SOBRE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE***

---

Además, el proyecto me ha ayudado a valorar la importancia de diseñar soluciones realistas. En una planta industrial, una propuesta no debe ser únicamente correcta desde el punto de vista teórico, sino que también debe poder instalarse, mantenerse, documentarse y justificarse económicamente. Por ello, uno de los aspectos más relevantes del trabajo ha sido buscar una solución equilibrada, evitando sobredimensionamientos innecesarios y seleccionando equipos adecuados a las necesidades reales del proceso. Esta forma de trabajar está muy relacionada con los principios de sostenibilidad, ya que implica utilizar los recursos de manera proporcionada y responsable.

También considero que este TFG refleja el papel que puede tener la ingeniería industrial en la transición hacia modelos productivos más eficientes. La modernización de sistemas eléctricos, la incorporación de electrónica de potencia, la mejora del control y la integración con sistemas de supervisión son actuaciones que permiten alargar la vida útil de las instalaciones y mejorar su rendimiento sin necesidad de sustituir completamente procesos existentes. Esta idea es especialmente importante en sectores industriales tradicionales, donde la sostenibilidad debe avanzar de forma compatible con la continuidad operativa y la viabilidad económica.

En conclusión, este Trabajo de Fin de Grado se relaciona con los Objetivos de Desarrollo Sostenible al proponer una mejora tecnológica aplicada a un entorno industrial real. La modernización del accionamiento de la báscula dosificadora PyroClon contribuye principalmente al ODS 9, por su relación con la innovación y la modernización industrial; al ODS 12, por su aportación a una producción más responsable; al ODS 7, por la mejora de la eficiencia energética; y al ODS 13, por su contribución indirecta a la reducción del impacto ambiental asociado a los procesos industriales. Personalmente, el desarrollo de este proyecto me ha permitido comprender que la ingeniería tiene una responsabilidad clara en la construcción de una industria más eficiente, segura y sostenible, y que incluso las mejoras aplicadas a equipos concretos pueden formar parte de un cambio más amplio hacia una producción industrial más responsable.

# INFORME TÉCNICO DE PLANOS · REV. A

Modernización del accionamiento del dosificador PyroClon (Pfister)

Instalación CEMEX · Morata de Jalón (Zaragoza) · Proyecto CEMEX-017

## 1. Objeto

Este documento recoge el juego de planos de la instalación tras la modernización del accionamiento del rotor dosificador. Parte del juego de Laura Robles (TFG, 21/05/2026), que ya incorpora anotaciones parciales "rev. A", y completa/corriges las hojas afectadas conforme a la memoria del proyecto y a las anotaciones del juego original de IDEAM (2016-17).

## 2. Alcance de la modernización

- Motor: se sustituye el motor de c.c. de 6,1 kW por motor asíncrono trifásico ABB M3BP 112MB 4 (4 kW, 4 polos, 400 V, 8,2 A, ~1485 rpm).
- Accionamiento: se sustituye el antiguo regulador de c.c. (Taco-Flex / avantecnia) por variador ABB ACS880 (control DTC), alimentación trifásica 400 V.
- Medida de velocidad: la realimentación deja de tomarse de la dinamo-taco y pasa a sensor inductivo NAMUR sobre rueda dentada (Z=60) + convertidor PR electronics 5225 (f/I, 0-2000 Hz -> 4-20 mA).
- Consigna de velocidad: salida analógica del PLC (SA0, 4-20 mA) hacia la entrada analógica del ACS880.
- Lazo de dosificación: el caudal se sigue calculando como peso (célula de carga / transmisor PR2261) por velocidad de cinta, ahora tomada de la nueva cadena de medida.

## 3. Hojas afectadas

CCM/2 Protección / alimentación del accionamiento (revisar magnetotérmico para el ACS880).

CCM/7 Entradas analógicas PLC -AI1204 (EA2/I2 "VELOCIDAD MOTOR": concretar origen PR5225/NAMUR).

CCM/8 Salidas analógicas PLC -A91 (SA0 "CONSIGNA VELOCIDAD VARIADOR" -> entrada analógica ACS880).

CCM/12 Accionamiento del rotor: hoja principal. Corregir marca de variador (G120C -> ABB ACS880) y el símbolo de motor (sigue como c.c. "M=", debe ser "M 3~" asíncrono).

CCM/16 Transductor de pesaje (PR2261): sin cambios; se documenta el cierre del lazo de caudal.

Se añaden además dos hojas redibujadas: CCM/12-R (accionamiento ABB ACS880) y la hoja de medida de velocidad/caudal (NAMUR + PR5225).

### NOTA DE INGENIERÍA — alcance del redibujo

Las hojas afectadas se entregan con marcas de revisión en rojo (redline) sobre el plano de Laura Robles, conforme a la práctica habitual de modificación. Las dos hojas redibujadas en limpio (CCM/12-R y medida de velocidad) son una propuesta de detalle constructivo: al no disponer del fichero CAD/EPLAN nativo, deben validarse contra el esquema original de IDEAM y las hojas de características de ACS880, PR5225 y M3BP.

## Tabla de modificaciones · REV. A

| Hoja   | Elemento           | Antes (c.c.)  | Después (REV. A)   |
|--------|--------------------|---|--|
| CCM/12 | Motor -M1          | Motor c.c. 6,1 kW (origen IDEAM)                        | Motor asíncrono 3~ ABB M3BP 112MB 4 (4 kW, 400 V, 8,2 A)             |
| CCM/12 | Variador U2        | SIEMENS SINAMICS G120C                                  | ABB ACS880 (control DTC), 3~ 400 V (según memoria TFG)               |
| CCM/12 | Símbolo motor      | Dibujado todavía como c.c. "M="                         | Debe representarse como "M 3~" (máquina asíncrona)                   |
| CCM/8  | Salida SA0         | Consigna 4-20 mA a regulador c.c. (borna 1/2, ref 12.7) | Misma salida -> entrada analógica AI del ACS880 (consigna velocidad) |
| CCM/7  | Entrada EA2/I2     | "VELOCIDAD MOTOR" desde dinamo-taco del motor c.c.      | Desde PR5225 (f/I) alimentado por sensor NAMUR / rueda Z=60          |
| CCM/2  | Protección         | Magnetotérmico dimensionado para accionamiento c.c.     | Revisar / ajustar al consumo del ACS880 (~4 kW, 400 V)               |
| CCM/16 | Transmisor peso    | PR electronics PR2261 (célula de carga)                 | Sin cambios; cierra el lazo de caudal con la nueva velocidad         |
| Nueva  | Medida vel./caudal | (no existía como hoja independiente)                    | NAMUR Z=60 -> PR5225 0-2000 Hz/4-20 mA -> PLC -AI1204 EA2/I2         |

TFG  
PYROCLON  
2026

Laura Robles  
Trabajo Fin de Grado  
ICAI - Universidad Pontificia Comillas  
Modernización de accionamiento  
eléctrico

Empresa/cliente

CEMEX Morata de Jalón

Descripción de proyecto

modernización del accionamiento eléctrico  
bascula dosificadora PyroClon

Número de diseño

TFG-PYROCLON-2026

Nombre de proyecto

TFG - Actualización accionamiento PyroClon

Producto

TFG - Actualización accionamiento PyroClon

Tipo

Accionamiento eléctrico

Lugar de instalación

Morata de Jalón (Zaragoza)

Responsable del proyecto

Laura Robles

Creado

21/05/2026

Laura Robles

Camb

Fecha

Nombre

Fecha Resp

Probado

Original

Laura Robles

Sustitución por

# Indice de páginas

F06\_001

| Página    | Descripción de página                | Campo adicional de página | Fecha      | Responsable   | X |
|-----------|--------------------------------------|---------------------------|------------|---------------|---|
| +CCM/0    | Hoja de título / portada             |                           | 21/05/2026 | Administrador |   |
| +CCM/1    | Índice de páginas : +CCM/0 - +CCM/32 |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/2    | ALIMENTACION                         |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/3    | Alimentaciones PLC                   |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/4    | Entradas digitales                   |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/5    | Entradas digitales                   |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/6    | Salidas digitales                    |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/7    | Entradas analógicas                  |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/8    | Salidas analógicas                   |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/10   | Maniobra a 24Vdc                     |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/11   | Maniobra a 24Vdc                     |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/12   | ACCIONAMIENTO ROTOR DRW              |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/13   | Maniobra 48Vdc                       |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/14   | Maniobra 48Vdc                       |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/15   | Maniobra 48Vdc                       |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/16   | Transductor célula de carga          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/17   | Distribución armario                 |                           | 21/05/2026 | Administrador |   |
| +CCM/18   | Plano de bornes +CCM-A41-X5          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/19   | Plano de bornes +CCM-A42-X5          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/20   | Plano de bornes +CCM-A44-X5          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/21   | Plano de bornes +CCM-A45-X5          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/22   | Plano de bornes +CCM-A90-X2          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/23   | Plano de bornes +CCM-M1-1B1          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/24   | Plano de bornes +CCM-M1-2B2          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/25   | Plano de bornes +CCM-PBPN44          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/26   | Plano de bornes +CCM-PBPN45          |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/27   | Plano de bornes +CCM-X3              |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/27.a | Plano de bornes +CCM-X3              |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/28   | Plano de bornes +CCM-X5              |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/29   | Plano de bornes +CCM-X6              |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/30   | Plano de bornes +CCM-X10             |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/31   | Plano de bornes +CCM-X12             |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |
| +CCM/32   | Plano de bornes +CCM-X220            |                           | 21/05/2026 | Laura Robles  |   |

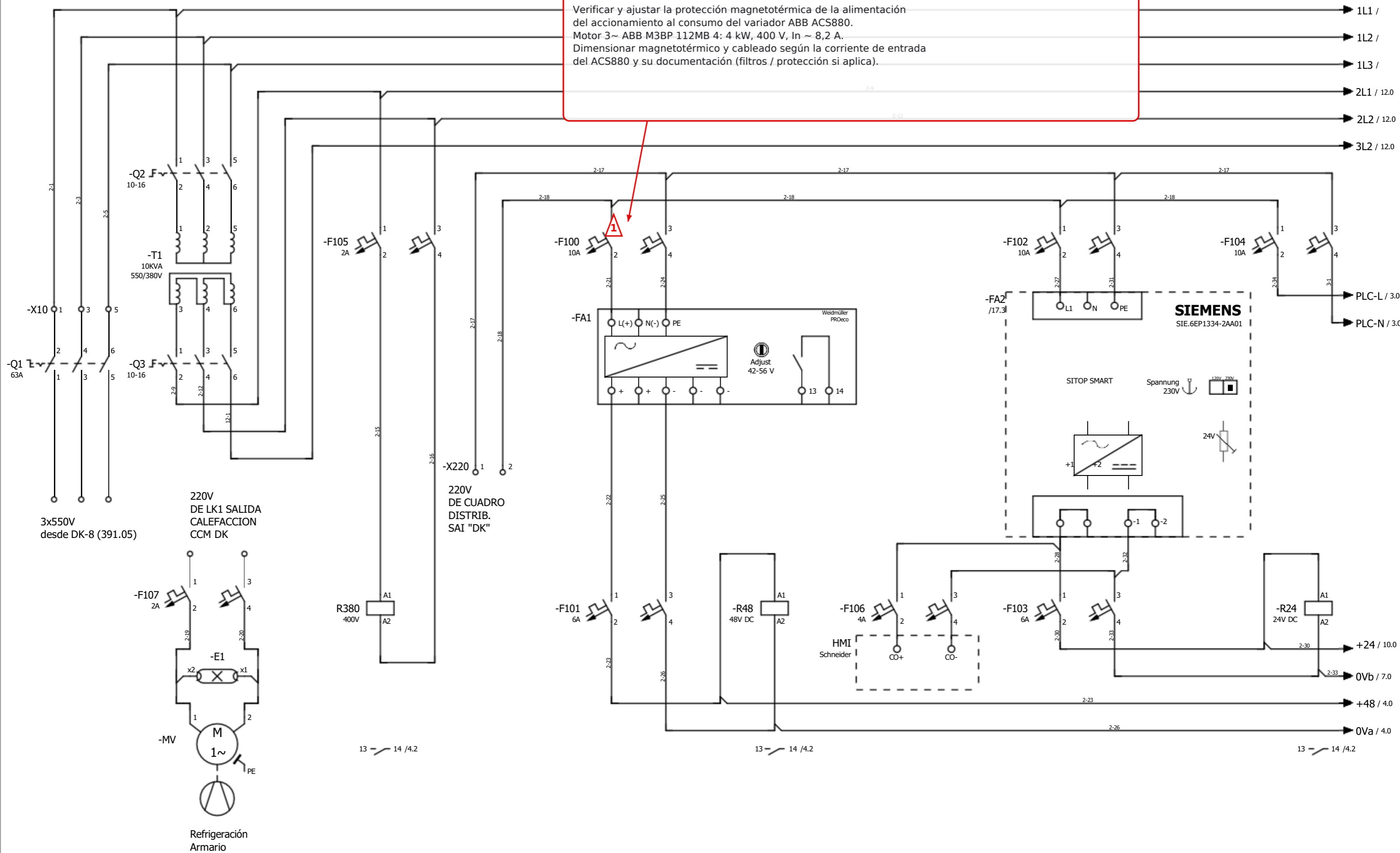
0

2

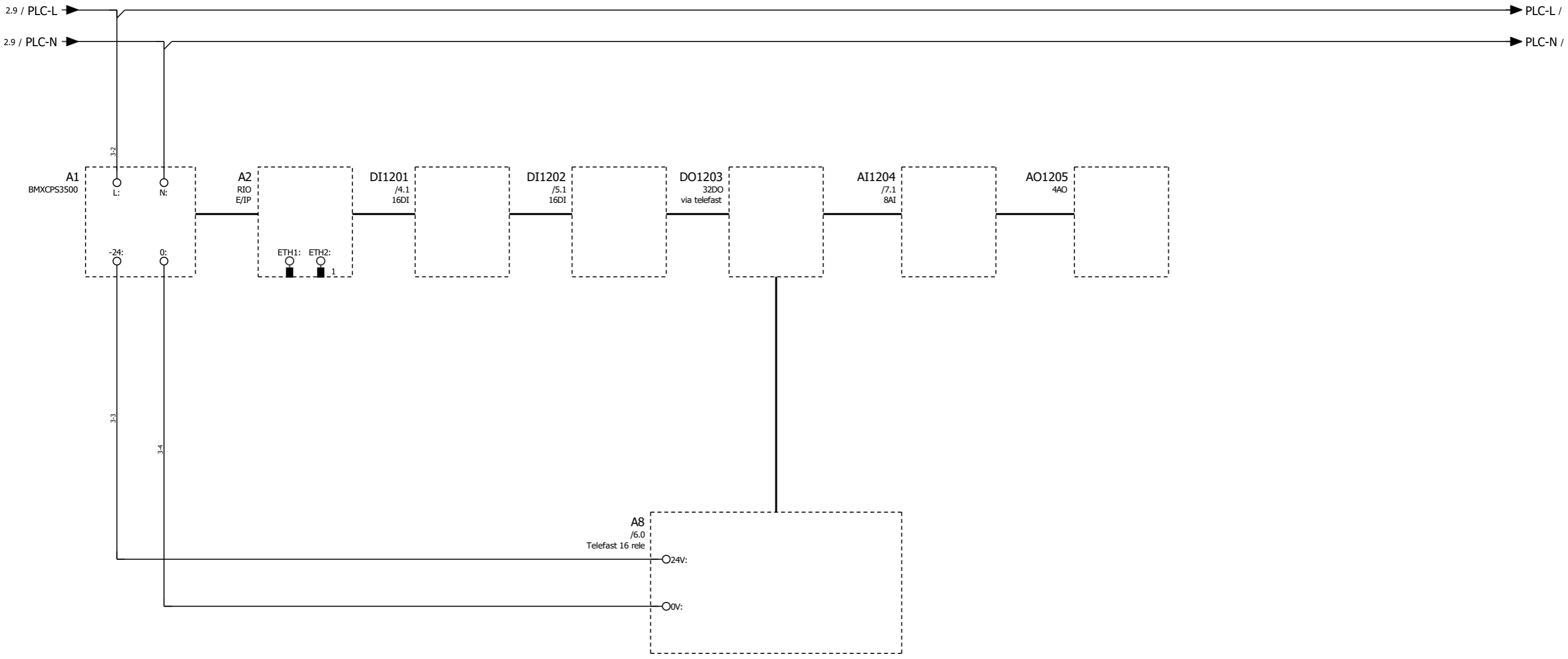
|        |       |        |          |                 |                |                     |                                      |       |        |
|--------|-------|--------|----------|-----------------|----------------|---------------------|--------------------------------------|-------|--------|
|        |       |        | Fecha    |                 | Laura Robles   | TFG<br>Laura Robles | Índice de páginas : +CCM/0 - +CCM/32 | + CCM | Hoja 1 |
|        |       |        | Resp     |                 |                |                     |                                      |       |        |
|        |       |        | Probado  |                 |                |                     |                                      |       |        |
| Cambio | Fecha | Nombre | Original | Sustitución por | Sustituido por |                     |                                      |       | Hj. 33 |

**REV. A · CCM/2 Alimentación / protección del accionamiento**

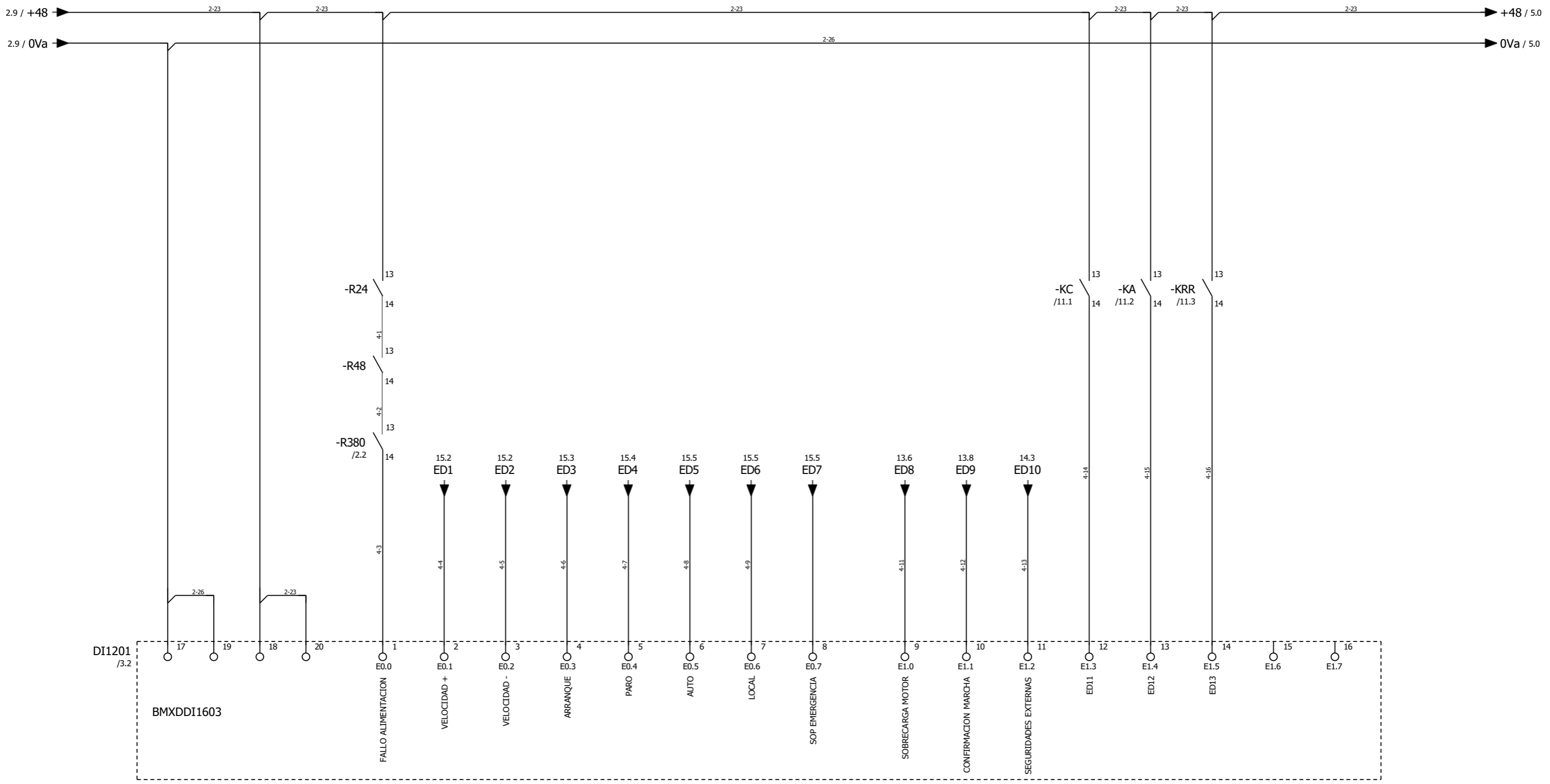
Verificar y ajustar la protección magnetotérmica de la alimentación del accionamiento al consumo del variador ABB ACS880.  
 Motor 3~ ABB M3BP 112MB 4: 4 kW, 400 V, In ~ 8,2 A.  
 Dimensionar magnetotérmico y cableado según la corriente de entrada del ACS880 y su documentación (filtros / protección si aplica).



|         |       |         |          |                 |                |  |        |
|---------|-------|---------|----------|-----------------|----------------|--|--------|
| 1       |       |         |          | 3               |                |  |        |
| Fecha   |       | Fecha   |          | TFG             | ALIMENTACION   |  |        |
| Resp    |       | Resp    |          | Laura Robles    |                |  | + CCM  |
| Probado |       | Probado |          |                 |                |  |        |
| Cambio  | Fecha | Nombre  | Original | Sustitución por | Sustituido por |  | Hoja 2 |
|         |       |         |          |                 |                |  | Hj. 33 |



|        |       |        |          |                 |  |                     |                    |  |  |       |      |   |  |
|--------|-------|--------|----------|-----------------|--|---------------------|--------------------|--|--|-------|------|---|--|
|        |       |        | Fecha    | Laura Robles    |  | TFG<br>Laura Robles | Alimentaciones PLC |  |  |       |      |   |  |
|        |       |        | Resp     |                 |  |                     |                    |  |  | + CCM |      |   |  |
|        |       |        | Probado  |                 |  |                     |                    |  |  |       |      |   |  |
| Cambio | Fecha | Nombre | Original | Sustitución por |  | Sustituido por      |                    |  |  |       | Hoja | 3 |  |
|        |       |        |          |                 |  |                     |                    |  |  | Hj.   | 33   |   |  |



|        |       |        |          |                 |                |
|--------|-------|--------|----------|-----------------|----------------|
|        |       |        | Fecha    |                 | Laura Robles   |
|        |       |        | Resp     |                 |                |
|        |       |        | Probado  |                 |                |
| Cambio | Fecha | Nombre | Original | Sustitución por | Sustituido por |

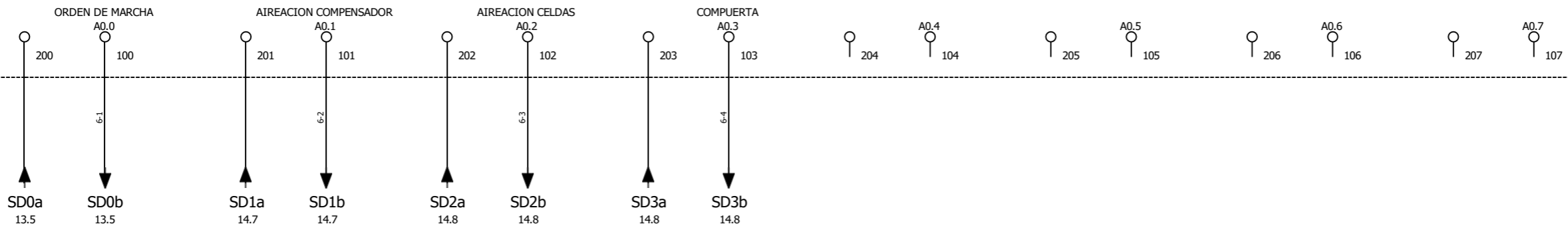
TFG  
Laura Robles

Entradas digitales

|  |  |       |        |
|--|--|-------|--------|
|  |  | + CCM |        |
|  |  |       | Hoja 4 |
|  |  |       | Hj. 33 |



-A8 ABE7R16S210  
/3.4



|        |       |        |          |                 |                |
|--------|-------|--------|----------|-----------------|----------------|
|        |       |        | Fecha    |                 | Laura Robles   |
|        |       |        | Resp     |                 |                |
|        |       |        | Probado  |                 |                |
| Cambio | Fecha | Nombre | Original | Sustitución por | Sustituido por |

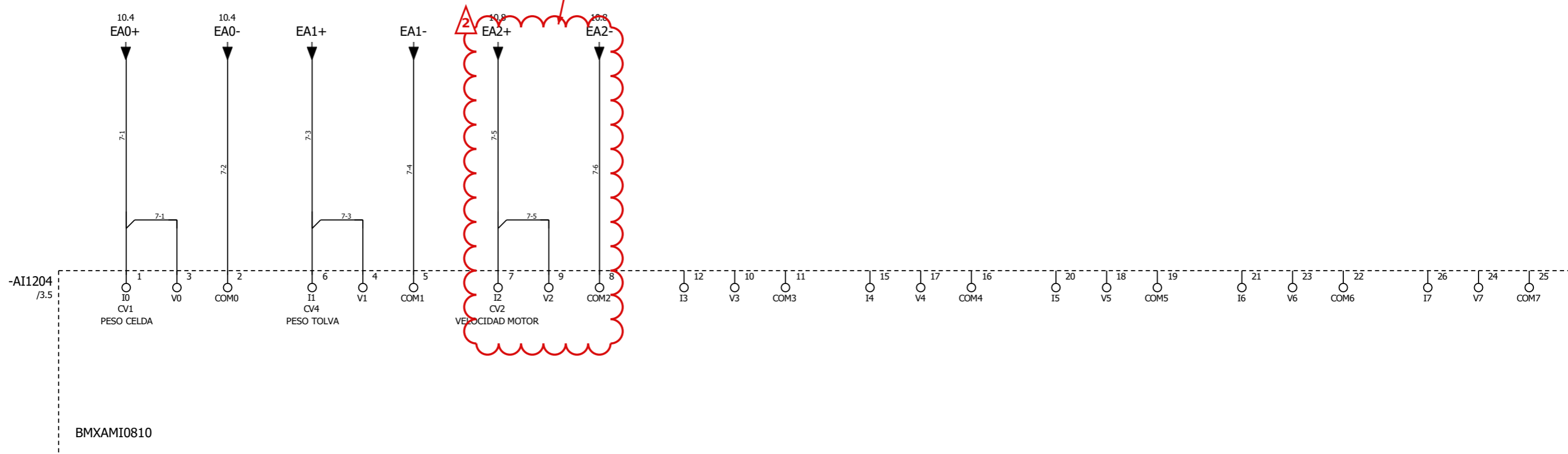
TFG  
Laura Robles

Salidas digitales

|  |  |        |
|--|--|--------|
|  |  | + CCM  |
|  |  | Hoja 6 |
|  |  | Hj. 33 |

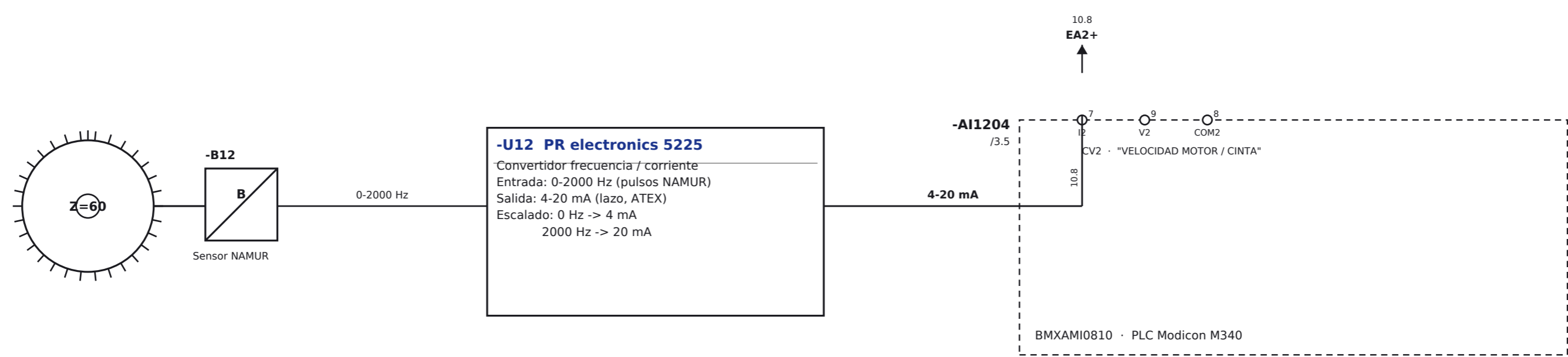
**REV. A · CCM/7 Entrada analógica EA2 / I2 "VELOCIDAD MOTOR"**

ANTES: realimentación de la dinamo-taco del motor de c.c.  
 AHORA: convertidor PR electronics 5225 (f/l), alimentado por un sensor inductivo NAMUR sobre rueda dentada (Z=60).  
 Cadena de medida: NAMUR (0-2000 Hz) -> PR5225 -> 4-20 mA -> -AI1204 (BMXAMI0810) EA2 / canal I2, bornes 7/9 (ref. 10.8). Lazo NAMUR / apto zona ATEX.  
 Detalle en la hoja "MEDIDA DE VELOCIDAD Y CAUDAL (REV. A)".



Nota rev. A: entrada de velocidad adaptada a realimentacion del nuevo accionamiento.

|        |       |        |          |                 |                |                     |                     |  |  |  |  |      |    |
|--------|-------|--------|----------|-----------------|----------------|---------------------|---------------------|--|--|--|--|------|----|
|        |       |        | Fecha    | Laura Robles    |                | TFG<br>Laura Robles | Entradas analógicas |  |  |  |  |      |    |
|        |       |        | Resp     |                 |                |                     |                     |  |  |  |  | Hoja | 7  |
|        |       |        | Probado  |                 |                |                     |                     |  |  |  |  | Hj.  | 33 |
| Cambio | Fecha | Nombre | Original | Sustitución por | Sustituido por |                     |                     |  |  |  |  |      |    |



**Cálculo de caudal en el PLC (lazo de dosificación)**

CAUDAL = PESO (célula / transmisor PR2261, CCM/16) x VELOCIDAD DE CINTA (esta hoja).  
La velocidad procede ahora de la cadena NAMUR + PR5225; el peso, del PR2261 existente.  
El PLC M340 integra ambas señales analógicas para el control de dosificación:  
consigna de caudal del proceso -> consigna de velocidad del ACS880 (SA0, CCM/8).  
PR5225 (velocidad) y PR2261 (peso) son del mismo fabricante (PR electronics).

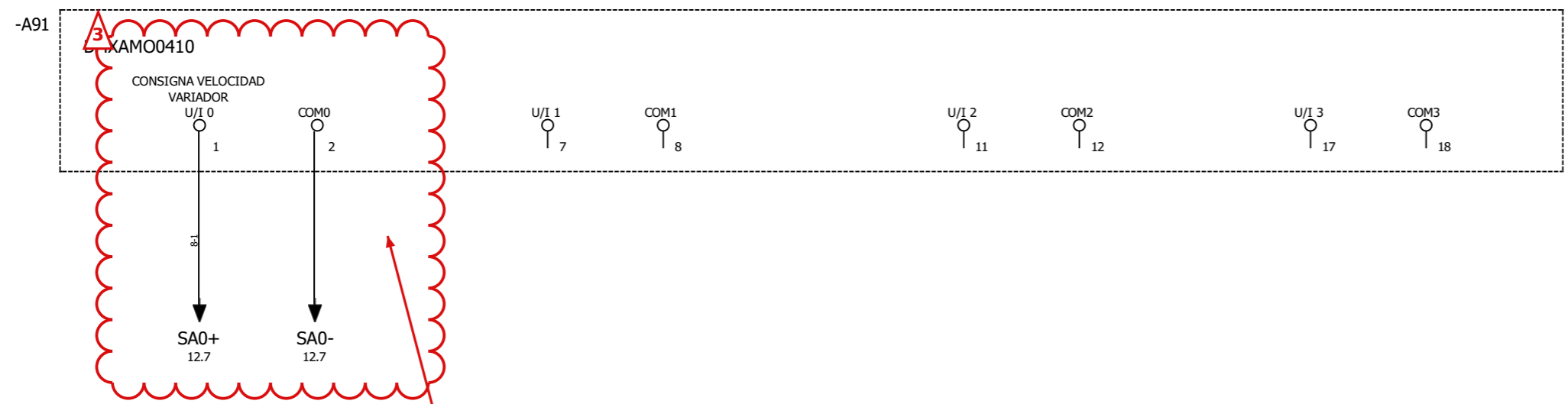
**ATEX**

Zona clasificada.  
Sensor NAMUR y lazo de medida aptos ATEX.  
Verificar marcado y certificación Ex.

**REV. A**

|               |                 |                |                 |  |                    |
|---------------|-----------------|----------------|-----------------|--|--------------------|
|               | Fecha           | 31.05.2026     |                 | CEMEX-017 · PyroClon Pfister · Morata de Jalón (Zaragoza)        |                    |
|               | Resp            | Laura Robles   | TFG             |  | + CCM              |
| <b>Rev. A</b> | <b>31.05.26</b> | <b>Modern.</b> | Sustitución por | <b>MEDIDA DE VELOCIDAD DE CINTA Y CÁLCULO DE CAUDAL (REV. A)</b> | Hoja <b>12-R.2</b> |
| Cambio        | Fecha           | Nombre         | Original        | Sustituido por   | Hj. <b>33</b>      |

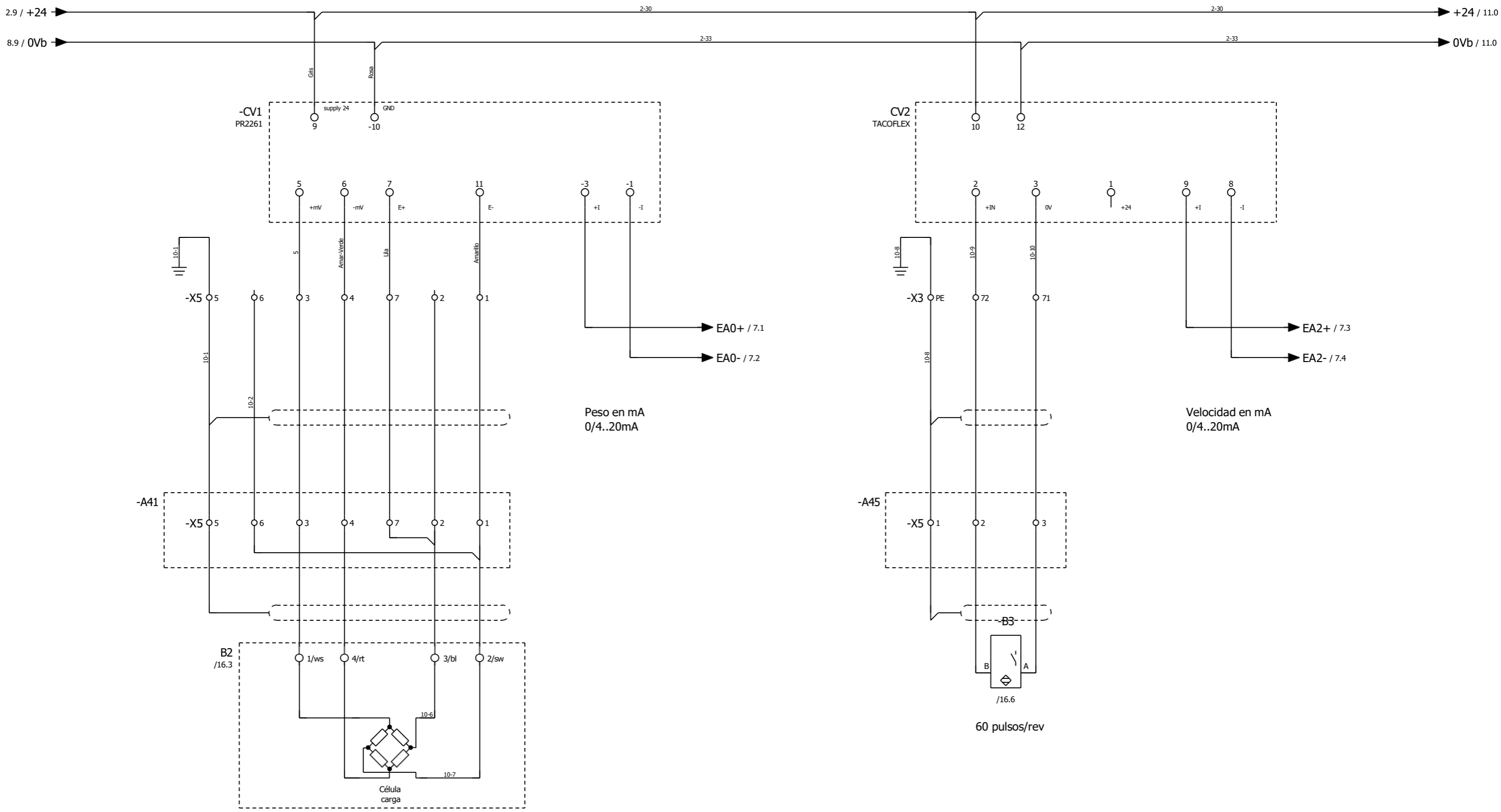
7.9 / 0Vb → → 0Vb / 10.0



**REV. A · CCM/8 Salida analógica SA0 "CONSIGNA VELOCIDAD VARIADOR"**

La salida SA0 del PLC -A91 (BMXAMO0410), 4-20 mA, bornes 1/2 (ref. 12.7), gobierna la CONSIGNA de velocidad del variador.

AHORA: -> entrada analógica AI del ABB ACS880 (referencia de velocidad).  
 Configurar la AI del ACS880 como 4-20 mA y su escalado (0-100 % vel.).  
 La etiqueta de Laura "CONSIGNA VELOCIDAD VARIADOR" es correcta.  
 Ver hoja redibujada "CCM/12-R ACCIONAMIENTO ROTOR (ACS880)".



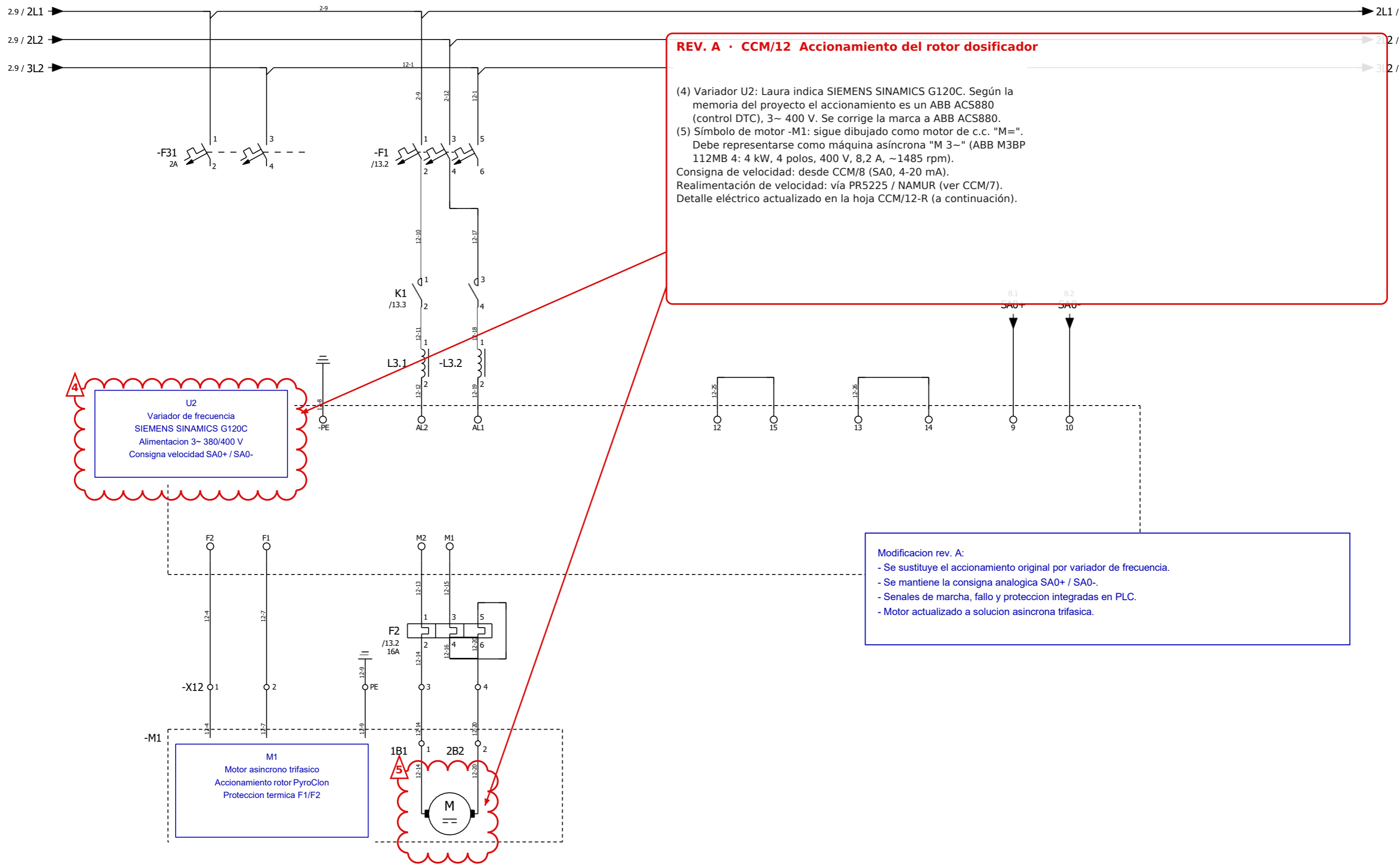
|        |       |        |          |                 |
|--------|-------|--------|----------|-----------------|
|        |       |        | Fecha    | Laura Robles    |
|        |       |        | Resp     |                 |
|        |       |        | Probado  |                 |
| Cambio | Fecha | Nombre | Original | Sustitución por |
|        |       |        |          | Sustituido por  |

TFG  
Laura Robles

Maniobra a 24Vdc

|  |  |       |         |
|--|--|-------|---------|
|  |  | + CCM |         |
|  |  |       | Hoja 10 |
|  |  |       | Hj. 33  |





**REV. A · CCM/12 Accionamiento del rotor dosificador**

(4) Variador U2: Laura indica SIEMENS SINAMICS G120C. Según la memoria del proyecto el accionamiento es un ABB ACS880 (control DTC), 3~ 400 V. Se corrige la marca a ABB ACS880.

(5) Símbolo de motor -M1: sigue dibujado como motor de c.c. "M=". Debe representarse como máquina asíncrona "M 3~" (ABB M3BP 112MB 4: 4 kW, 4 polos, 400 V, 8,2 A, ~1485 rpm).  
 Consigna de velocidad: desde CCM/8 (SA0, 4-20 mA).  
 Realimentación de velocidad: vía PR5225 / NAMUR (ver CCM/7).  
 Detalle eléctrico actualizado en la hoja CCM/12-R (a continuación).

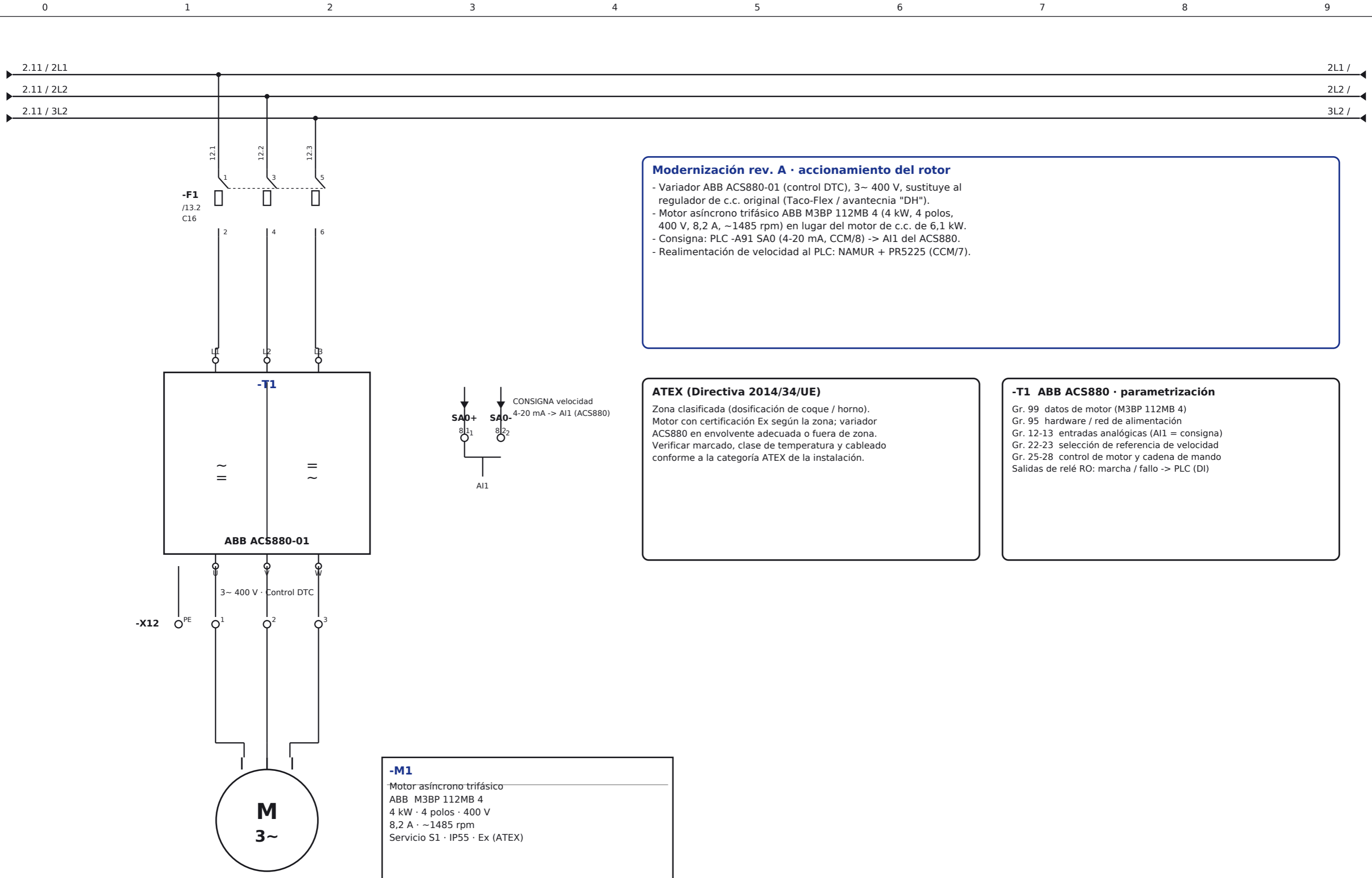
**U2**  
 Variador de frecuencia  
 SIEMENS SINAMICS G120C  
 Alimentación 3~ 380/400 V  
 Consigna velocidad SA0+ / SA0-

**M1**  
 Motor asincrono trifasico  
 Accionamiento rotor PyroClon  
 Proteccion termica F1/F2

**M**

**Modificacion rev. A:**

- Se sustituye el accionamiento original por variador de frecuencia.
- Se mantiene la consigna analogica SA0+ / SA0-.
- Senales de marcha, fallo y proteccion integradas en PLC.
- Motor actualizado a solucion asincrona trifasica.



**Modernización rev. A · accionamiento del rotor**

- Variador ABB ACS880-01 (control DTC), 3~ 400 V, sustituye al regulador de c.c. original (Taco-Flex / avantecnia "DH").
- Motor asíncrono trifásico ABB M3BP 112MB 4 (4 kW, 4 polos, 400 V, 8,2 A, ~1485 rpm) en lugar del motor de c.c. de 6,1 kW.
- Consigna: PLC -A91 SA0 (4-20 mA, CCM/8) -> AI1 del ACS880.
- Realimentación de velocidad al PLC: NAMUR + PR5225 (CCM/7).

**ATEX (Directiva 2014/34/UE)**

Zona clasificada (dosificación de coque / horno).  
 Motor con certificación Ex según la zona; variador ACS880 en envoltorio adecuada o fuera de zona.  
 Verificar marcado, clase de temperatura y cableado conforme a la categoría ATEX de la instalación.

**-T1 ABB ACS880 · parametrización**

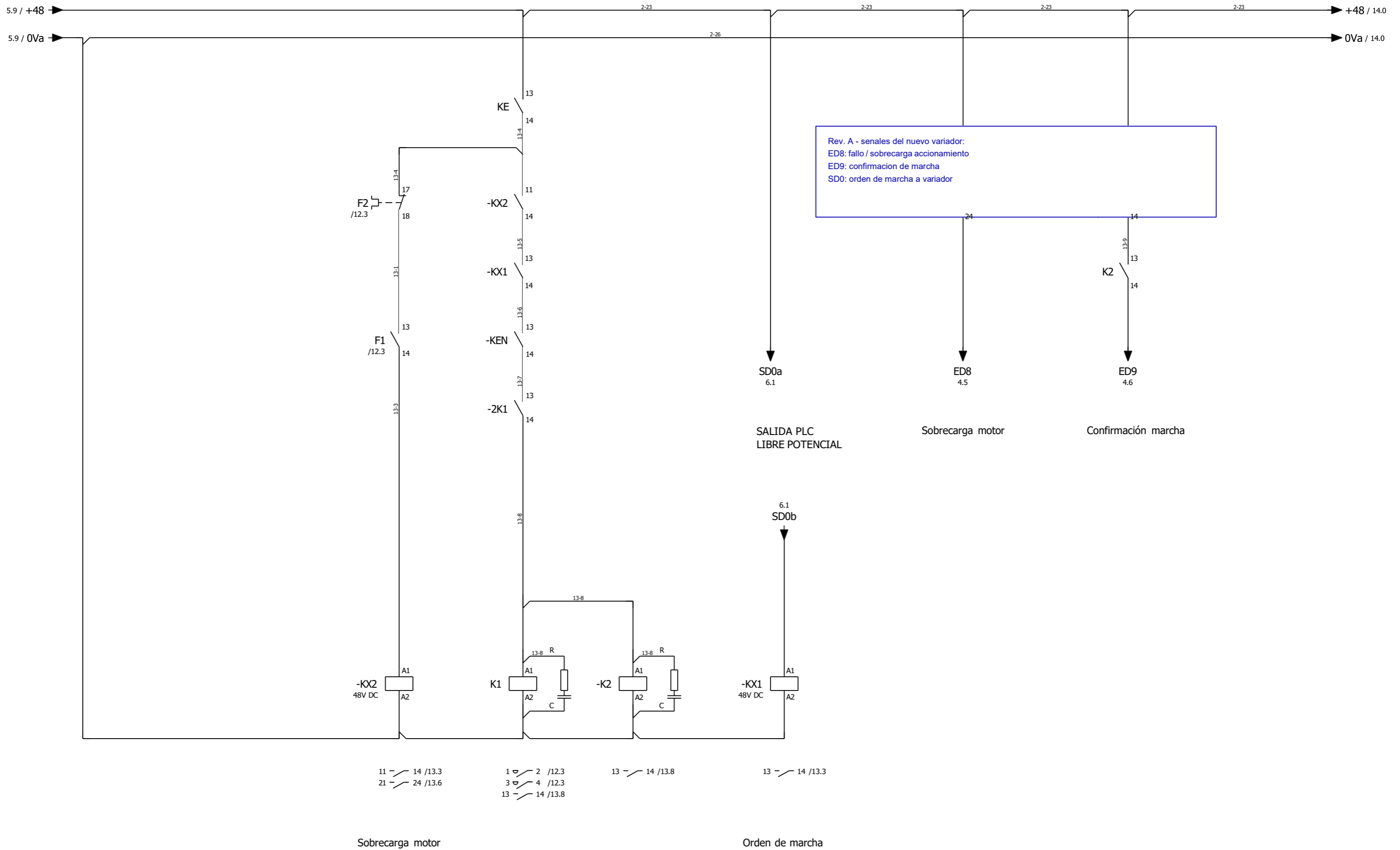
Gr. 99 datos de motor (M3BP 112MB 4)  
 Gr. 95 hardware / red de alimentación  
 Gr. 12-13 entradas analógicas (AI1 = consigna)  
 Gr. 22-23 selección de referencia de velocidad  
 Gr. 25-28 control de motor y cadena de mando  
 Salidas de relé RO: marcha / fallo -> PLC (DI)

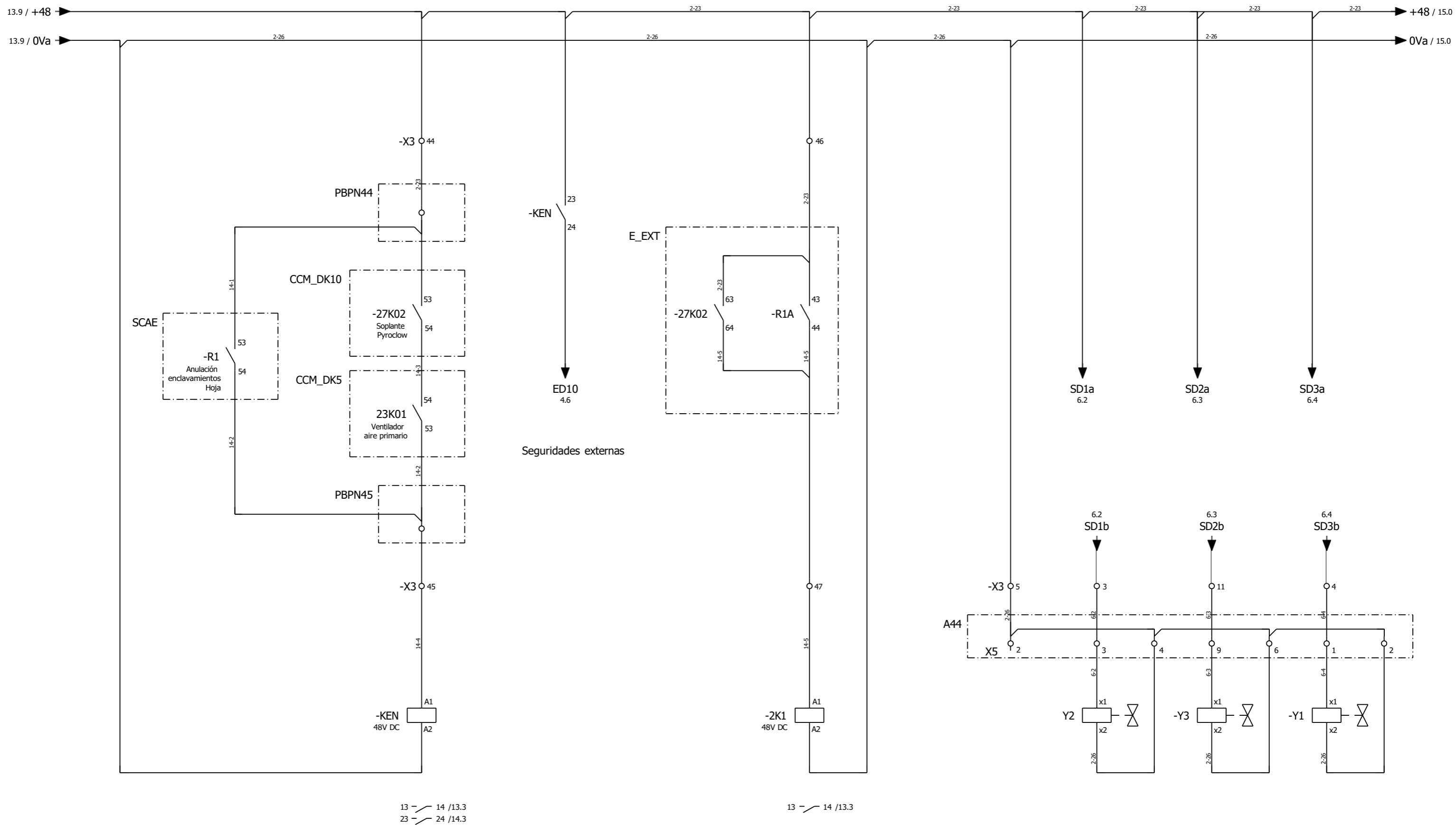
**-M1**

Motor asíncrono trifásico  
 ABB M3BP 112MB 4  
 4 kW · 4 polos · 400 V  
 8,2 A · ~1485 rpm  
 Servicio S1 · IP55 · Ex (ATEX)

**REV. A**

|               |                 |                |              |                     |   |   |             |     |           |
|---------------|-----------------|----------------|--------------|---------------------|---|---|-------------|-----|-----------|
|               |                 | Fecha          | 31.05.2026   | TFG<br>Laura Robles | CEMEX-017 · PyroClon Pfister · Morata de Jalón (Zaragoza) |   |             |     |           |
|               |                 | Resp           | Laura Robles |                     |   |   |             |     |           |
| <b>Rev. A</b> | <b>31.05.26</b> | <b>Modern.</b> | Probado      |                     |   | Sustitución por   |             |     |           |
| Cambio        | Fecha           | Nombre         | Original     | Sustituido por      |   |   | + CCM       |     |           |
|               |                 |                |              |                     |   | <b>ACCIONAMIENTO ROTOR DOSIFICADOR · VARIADOR ABB ACS880 (REV. A)</b> |             |     |           |
|               |                 |                |              |                     |   | Hoja  | <b>12-R</b> | Hj. | <b>33</b> |





13 - 14 /13.3  
23 - 24 /14.3

13 - 14 /13.3

Rele de seguridades externas

Rev. A: las seguridades externas se conservan. La orden de marcha queda condicionada por enclavamientos y proteccion del variador.

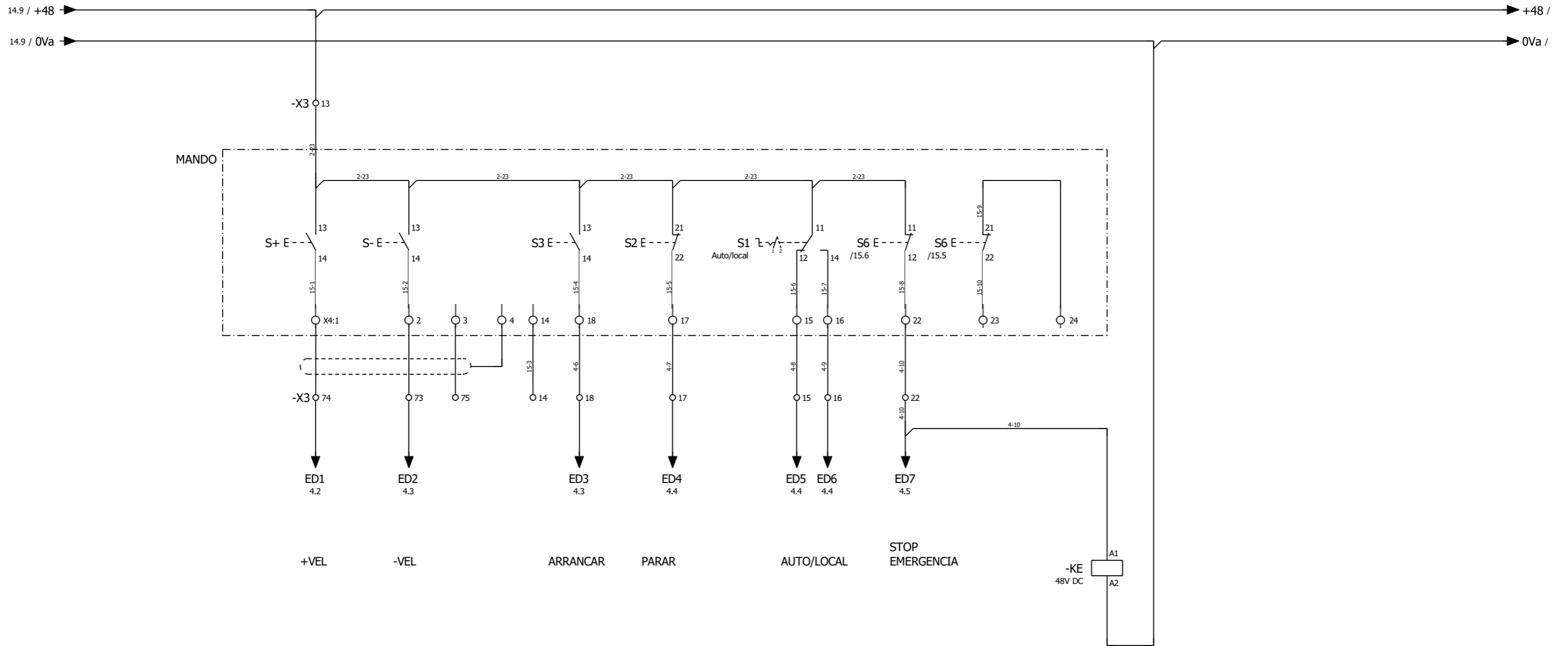
AIREACION DEL COMPENSADOR      AIREACION DEL CELDAS CENTRAL      COMPUERTA

|          |                 |                |
|----------|-----------------|----------------|
| Fecha    |                 | Laura Robles   |
| Resp     |                 |                |
| Probado  |                 |                |
| Cambio   | Fecha           | Nombre         |
| Original | Sustitución por | Sustituido por |

TFG  
Laura Robles

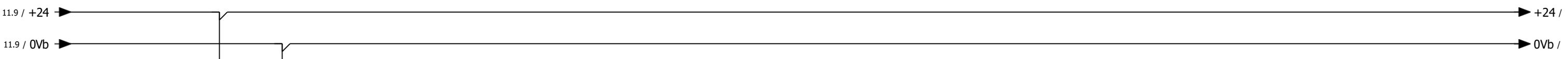
Maniobra 48Vdc

|      |    |       |
|------|----|-------|
|      |    | + CCM |
| Hoja | 14 |       |
| Hj.  | 33 |       |



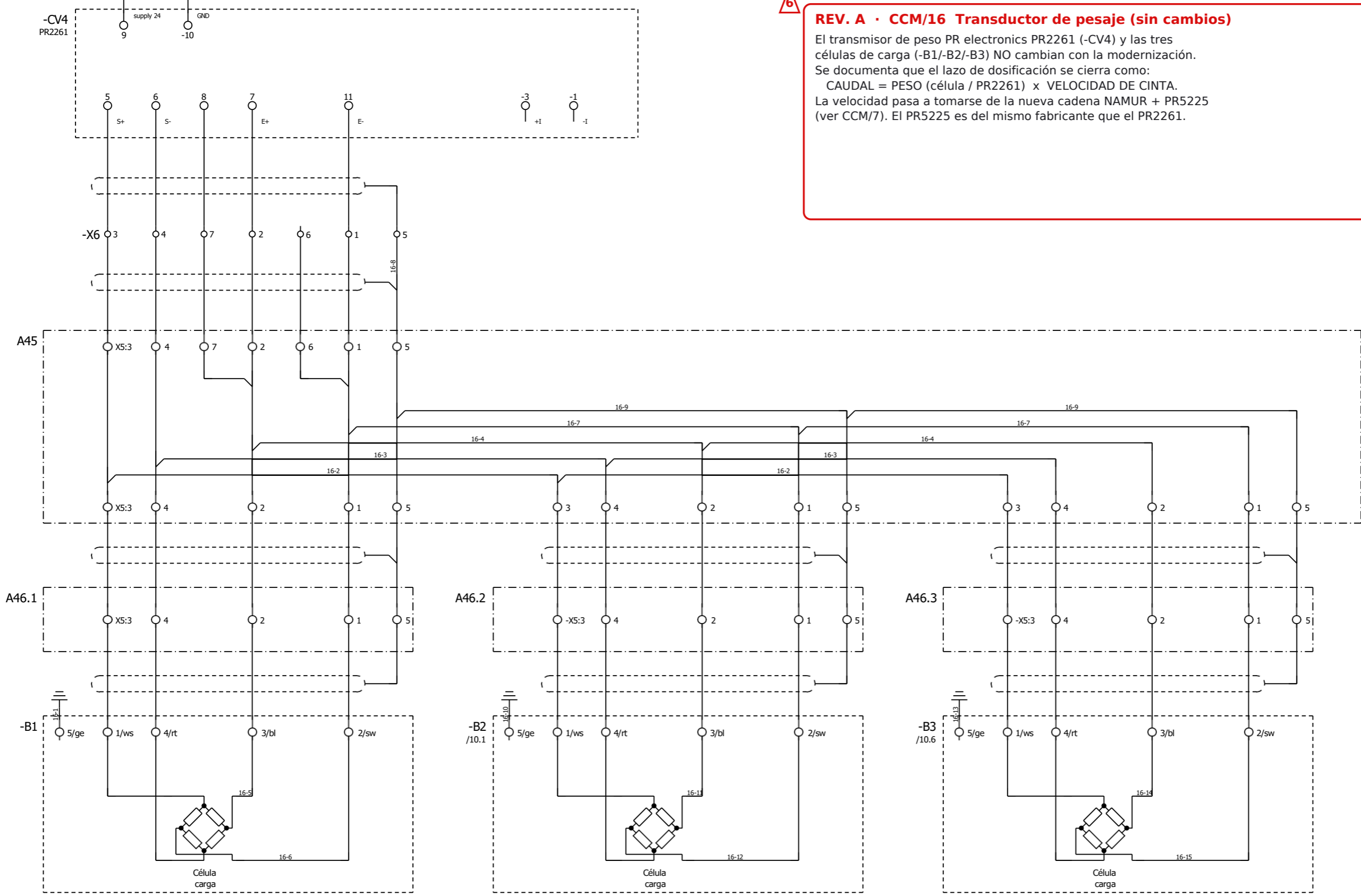
13 - 14 /13.3

|        |       |        |          |                 |                |                     |                |  |  |         |       |  |
|--------|-------|--------|----------|-----------------|----------------|---------------------|----------------|--|--|---------|-------|--|
|        |       |        | Fecha    | Laura Robles    |                | TFG<br>Laura Robles | Maniobra 48Vdc |  |  |         | + CCM |  |
|        |       |        | Resp     |                 |                |                     |                |  |  |         |       |  |
|        |       |        | Probado  |                 |                |                     |                |  |  |         |       |  |
| Cambio | Fecha | Nombre | Original | Sustitución por | Sustituido por |                     |                |  |  | Hoja 15 |       |  |
|        |       |        |          |                 |                |                     |                |  |  | Hj. 33  |       |  |

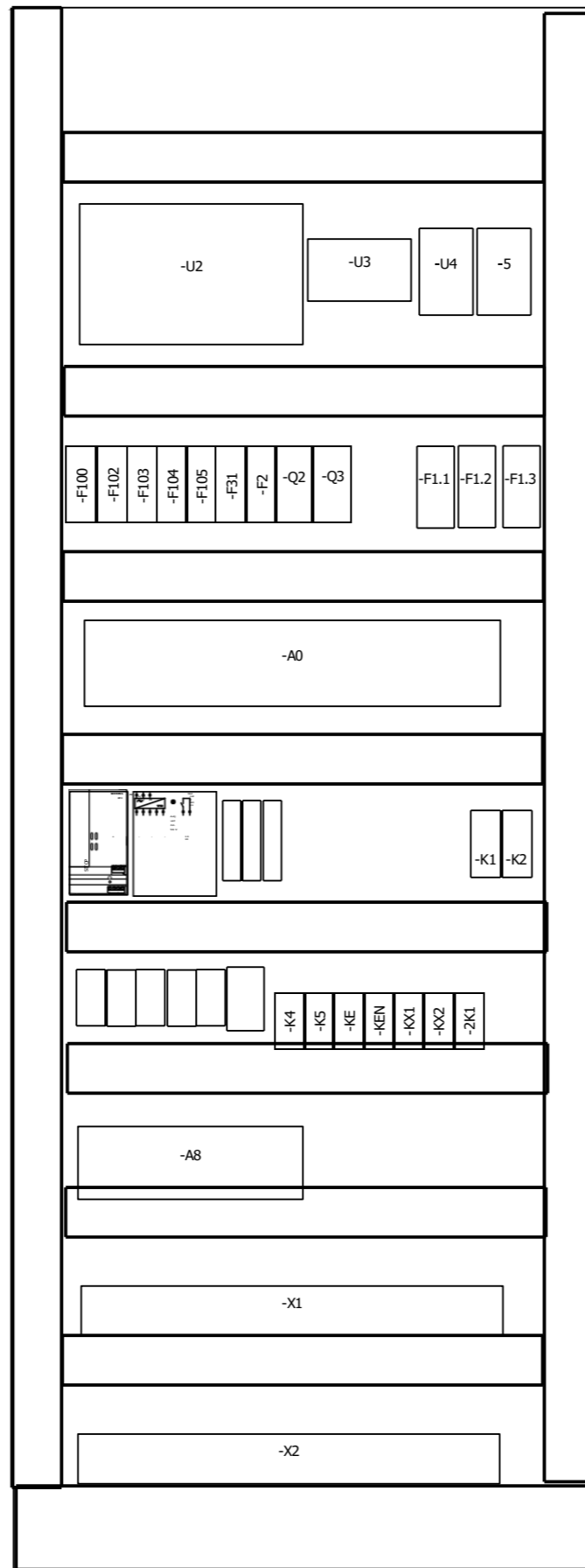


**REV. A · CCM/16 Transductor de pesaje (sin cambios)**

El transmisor de peso PR electronics PR2261 (-CV4) y las tres células de carga (-B1/-B2/-B3) NO cambian con la modernización. Se documenta que el lazo de dosificación se cierra como:  
 CAUDAL = PESO (célula / PR2261) x VELOCIDAD DE CINTA.  
 La velocidad pasa a tomarse de la nueva cadena NAMUR + PR5225 (ver CCM/7). El PR5225 es del mismo fabricante que el PR2261.



|        |       |        |          |                 |                |                     |                             |       |    |
|--------|-------|--------|----------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------------------|-------|----|
|        |       |        | Fecha    | Laura Robles    |                | TFG<br>Laura Robles | Transductor célula de carga |       |    |
|        |       |        | Resp     |                 |                |                     |                             |       |    |
|        |       |        | Probado  |                 |                |                     |                             |       |    |
| Cambio | Fecha | Nombre | Original | Sustitución por | Sustituido por |                     |                             | + CCM |    |
|        |       |        |          |                 |                |                     |                             | Hoja  | 16 |
|        |       |        |          |                 |                |                     |                             | Hj.   | 33 |



U2 - VFD actualizado

Rev. A - distribucion armario  
 U2: variador de frecuencia SIEMENS SINAMICS G120C  
 M1: motor asincrono trifasico  
 Mantener ventilacion y protecciones existentes segun dimensionamiento.

|    |        |  |       |        |            |              |                 |
|----|--------|--|-------|--------|------------|--------------|-----------------|
| 16 |        |  | Fecha | Nombre | Fecha Resp | Laura Robles | Sustitucion por |
|    | Cambio |  |       |        | Probado    |              |                 |
|    |        |  |       |        | Original   |              |                 |



# Plano de bornes

F13\_001

| Texto de función | Nombre de cable | Tipo de cable | Regleta<br>+CCM-A42-X5 |                   |       |        |                        | Nombre de cable | Tipo de cable | Página / columna |
|------------------|-----------------|---------------|------------------------|-------------------|-------|--------|------------------------|-----------------|---------------|------------------|
|                  |                 |               | Designación de destino | Punto de conexión | Borne | Puente | Designación de destino |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -S1-1                  |                   | 1     | .      | -X3                    | 6               | /11.1         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | .      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -S3-1                  |                   | 3     | .      |                        |                 | /11.3         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | .      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -S1-2                  |                   | 4     | .      | -X3                    | 8               | /11.1         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | .      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -S2-1                  |                   | 4     | .      |                        |                 | /11.2         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | .      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -S2-3                  |                   | 4     | .      |                        |                 | /11.2         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | .      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -S2-2                  |                   | 4     | .      | -X3                    | 9               | /11.2         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | .      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -S3-2                  |                   | 6     | .      | -X3                    | 10              | /11.3         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | .      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -S1-3                  |                   | 7     | .      | -X3                    | 7               | /11.1         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | .      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -S3-3                  |                   | 9     | .      |                        |                 | /11.3         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | .      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        |                        |                 |               |                  |

|        |       |        |          |                 |                |                     |                             |       |  |  |      |    |     |    |
|--------|-------|--------|----------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------------------|-------|--|--|------|----|-----|----|
|        |       |        | Fecha    |                 | Laura Robles   | TFG<br>Laura Robles | Plano de bornes +CCM-A42-X5 | + CCM |  |  | Hoja | 19 |     |    |
|        |       |        | Resp     |                 |                |                     |                             |       |  |  |      |    | Hj. | 33 |
| Cambio | Fecha | Nombre | Original | Sustitución por | Sustituido por |                     |                             |       |  |  |      |    |     |    |















# Plano de bornes

F13\_001

| Texto de función | Nombre de cable | Tipo de cable | Regleta<br>+CCM-X3     |                   |       |        |                        | Nombre de cable | Tipo de cable | Página / columna |
|------------------|-----------------|---------------|------------------------|-------------------|-------|--------|------------------------|-----------------|---------------|------------------|
|                  |                 |               | Designación de destino | Punto de conexión | Borne | Puente | Designación de destino |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -A42-X5                | 1:1               | 6     |        | -CV2-10                |                 | /11.1         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        | -X3                    | +24:1           |               |                  |
|                  |                 |               | -A44-X5                | 2                 | 5     | •      | -2K1                   | A2              | /14.6         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       |        | -KE                    | A2              |               |                  |
|                  |                 |               | -MANDO-S+              | 13                | 13    | •      | -A8                    | 203             | /15.2         |                  |
|                  |                 |               | -K4                    | A1                | 19    | •      |                        |                 | /11.6         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   | 21    | •      | -A90-X2                | 107             | /11.6         |                  |
|                  |                 |               | -K5                    | A1                | 25    | •      | -K3                    | 14              | /11.8         |                  |
|                  |                 |               | -KEN                   | A1                | 45    | •      | -PBPN45                |                 | /14.2         |                  |
|                  |                 |               | -A45-X5                | 1:1               | PE    | •      |                        |                 | /10.6         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | •      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -A45-X5                | 3:1               | 71    | •      | -CV2-3                 |                 | /10.6         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | •      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -A45-X5                | 2:1               | 72    | •      | -CV2-2                 |                 | /10.6         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | •      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -K4                    | 13                | 20    | •      |                        |                 | /11.6         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | •      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -K3                    | 13                | 22    | •      |                        |                 | /11.8         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | •      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               |                        |                   | 23    | •      | -A90-X2                | 103             | /11.8         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | •      |                        |                 |               |                  |
|                  |                 |               | -A44-X5                | 3                 | 3     | •      | -A8                    | 101             | /14.7         |                  |
|                  |                 |               | -A44-X5                | 9                 | 11    | •      | -A8                    | 102             | /14.8         |                  |
|                  |                 |               | -A44-X5                | 1                 | 4     | •      | -A8                    | 103             | /14.8         |                  |
|                  |                 |               | -DI1201                | 3                 | 73    | •      | -MANDO-X4              |                 | /15.2         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   | 75    | •      | -MANDO-X4              |                 | /15.2         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   | 14    | •      | -MANDO-X4              |                 | /15.3         |                  |
|                  |                 |               | -DI1201                | 4                 | 18    | •      | -MANDO-X4              |                 | /15.3         |                  |
|                  |                 |               | -DI1201                | 5                 | 17    | •      | -MANDO-X4              |                 | /15.4         |                  |
|                  |                 |               | -DI1201                | 6                 | 15    | •      | -MANDO-X4              |                 | /15.5         |                  |
|                  |                 |               | -DI1201                | 7                 | 16    | •      | -MANDO-X4              |                 | /15.5         |                  |
|                  |                 |               | -DI1201                | 8                 | 22    | •      | -MANDO-X4              |                 | /15.5         |                  |
|                  |                 |               | -E_EXT-R1A             | 43                | 46    | •      | -KEN                   | 23              | /14.5         |                  |
|                  |                 |               |                        |                   |       | •      | -A8                    | 201             |               |                  |
|                  |                 |               | -2K1                   | A1                | 47    | •      | -E_EXT-R1A             | 44              | /14.5         |                  |

|         |          |                 |
|---------|----------|-----------------|
| Fecha   |          | Laura Robles    |
| Resp    |          |                 |
| Probado |          |                 |
| Cambio  | Fecha    | Nombre          |
|         | Original | Sustitución por |
|         |          | Sustituido por  |

TFG  
Laura Robles

Plano de bornes +CCM-X3

|      |    |       |
|------|----|-------|
|      |    | + CCM |
| Hoja | 27 |       |
| Hj.  | 33 |       |











