

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Automatización, mejora y modelado de la molienda de combustible principal de una fábrica de cemento”



Curso 2019/2020

Alumno/a:

Francisco Javier
González Craviotto

Director/es:

José Luis Guzmán Sánchez
José Carlos Moreno Úbeda

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Automatización, mejora y modelado de la molienda
de combustible principal de una fábrica de cemento*

Alumno: Francisco Javier González Craviotto

Director: José Luis Guzmán Sánchez

Codirector: José Carlos Moreno Úbeda

Fecha: Diciembre de 2019

*Francisco Javier
González Craviotto*

José Luis Guzmán Sánchez

José Carlos Moreno Úbeda

Índice general

	Página
Agradecimientos	III
Dedicatoria	V
Resumen	VII
Abstract	IX
1 Introducción	11
2 Descripción del proceso	13
2.1 Grupo engrase del reductor	13
2.2 Grupo sistema hidráulico	19
2.3 Grupo circuito de gases	24
2.3.1 Captación de polvo en el silo de carbón molido	25
2.3.2 Filtro principal	28
2.3.3 Compuertas del filtro principal	33
2.3.4 Compuertas de entrada de gases	35
2.3.5 Compuerta de recirculación	37
2.3.6 Separador dinámico	38
2.4 Grupo molino y alimentación de material	40
3 Tipos de arrancadores	49
3.1 Arranque directo	49
3.2 Arranque a través de arrancador suave	50
3.3 Arranque a través de variador de frecuencia	51
4 Instrumentación de campo	53
4.1 Seccionador de campo	53
4.2 Medición de temperatura	55
4.3 Medición de presión para líquidos	56
4.4 Medición de flujo para líquidos	58
4.5 Nivel de boya para líquidos	58
4.6 Medición de presión para gases	59
4.7 Medición de nivel por peso	60
4.8 Medición de nivel por contacto	61
4.9 Sensores de proximidad inductivos	62
4.10 Sensores de posicionamiento inductivo	64
4.11 Medición de nivel de vibración	65

5	Señales utilizadas y comunicaciones	67
5.1	Motor normal	67
5.1.1	Orden de marcha	67
5.1.2	Respuesta de marcha	67
5.1.3	Protecciones	68
5.1.4	Marcha local	68
5.1.5	Paro local	68
5.1.6	Seccionador	69
5.2	Motor reversible	69
5.3	Motor accionado mediante arrancador suave	69
5.4	Motor de velocidad variable	69
5.4.1	Fallo de variador	69
5.4.2	Set point de velocidad	70
5.4.3	Respuesta de velocidad	70
5.4.4	Subir velocidad local	70
5.4.5	Bajar velocidad local	70
5.4.6	Intensidad	70
5.4.7	Otras señales	71
5.5	Comunicaciones	71
6	Cambio de accionamientos	73
6.1	Accionamiento principal L61-AP1	73
6.2	Ventilador filtro molino de carbón L61-VE1	75
6.3	Grupo sistema hidráulico	76
7	Modelos lineales para control	77
7.1	Lazo de control presión sistema hidráulico	77
7.2	Lazo de control temperatura salida molino	79
7.2.1	Ensayos de campo	80
7.2.2	Modelo de temperatura salida molino	82
7.3	Lazo de control presión diferencial	85
7.3.1	Ensayos de campo	85
7.3.2	Modelo presión diferencial	90
8	Redes de Petri	93
8.1	Identificación de señales	94
8.2	Red de Petri grupo engrase reductor	95
8.3	Red de Petri grupo sistema hidráulico	98
8.4	Red de Petri grupo circuito de gases	100
8.5	Red de Petri grupo molino y alimentación de material	104
8.6	Red de Petri global	106
9	Conclusiones y trabajos futuros	113

Referencias

Agradecimientos

*Al Director **Dr. José Luis Guzmán Sánchez** y Codirector **Dr. José Carlos Moreno Úbeda** por todo lo que me han enseñado y motivado.*

*A la **Escuela Superior de Ingeniería** de la **Universidad de Almería**, al grupo de **Automática, Robótica y Mecatrónica (ARM)** y a todo el profesorado que ha intervenido en mi formación.*

A todos ellos, gracias.

Dedicatoria

*Dedico el presente trabajo a mis compañeros y amigos
Miguel Ramón Urrutia, un fenómeno de la electrónica,
Antonio Francisco Giménez Segura, amigo desde la infancia,
Francisco García Mañas y José Atienza Piedra,
los dos grandes estudiantes.
Sin ellos no hubiera sido tan llevadero ni entretenido
haber realizado los estudios de máster.*

*A mis padres, hermanos, a mi pequeña Sofía y a Somaya, quien es la que
siempre me anima a seguir formándome y a quien más tiempo, de hecho,
siempre le he robado.*

Resumen

Dentro del grupo de industrias conocidas como electrointensivas se encuentran las fábricas de cemento. Este tipo de instalaciones consumen gran cantidad de energía eléctrica para llevar a cabo el proceso de transformación de la caliza en cemento. Además de energía eléctrica, también consumen combustibles fósiles que deben ser quemados en el horno de cemento, donde se produce la transformación de la caliza en *clinker*, el componente principal del cemento.

El combustible fósil, un derivado del petróleo, petroleum coke o más conocido por su abreviación *pet coke*, llega a las plantas con una granulometría y finura inadecuados, por lo que debe ser molturado con anterioridad a su uso. Este proceso de molturación se lleva a cabo en los denominados molinos de carbón, pudiendo ser estos de rodillos o de bolas.

Este tipo de instalaciones fueron implantadas en la mayoría de las fábricas de cemento a partir de los años 80, debido a la subida del precio del petróleo tras la crisis de los 70. Desde entonces hasta nuestros días la tecnología ligada al control automático, así como el avance en la electrónica de potencia ha hecho que la parte eléctrica de este tipo de instalaciones industriales se haya quedado obsoleta.

En el presente trabajo se llevará a cabo todo el proceso previo de ingeniería que es necesario acometer antes de iniciar un cambio de sistema de control, instrumentación de campo, así como de aparamenta eléctrica de un molino de carbón dentro de una fábrica de cemento.

Se trata de una instalación que alberga unos 40 motores, entre los que se encuentran aquellos que arrancan directamente, mediante arrancador suave o mediante variador de frecuencia. Dentro de los dispositivos de instrumentación de campo se encuentran medidores de temperatura, de presión, tanto para gases como para líquidos, de posición, de peso y de vibraciones. Todas las señales generadas, tanto en campo como dentro del centro de control de motores (CCM), deben ser enviadas al sistema de control que gobierne la instalación. Este sistema de control poseerá un SCADA desde el cual el operario de sala de control gobernará el molino. El avance de la tecnología en cuestión de comunicaciones ha hecho posible que grandes cantidades de información puedan ser transmitidas a través de un par de fibra óptica. Por este motivo, el sistema de control elegido está basado en el bus Profibus a través de fibra óptica. La implantación del sistema de control será distribuida, es decir, todas las señales que se generan en campo se irán concentrando en distintas cajas de campo, que se unirán a través de un anillo de fibra óptica junto con las señales generadas en el CCM para terminar en el puesto de control.

El trabajo previo del ingeniero comienza con el estudio pormenorizado de la instalación, tanto desde el punto de vista eléctrico como de proceso. En esta fase se obtendrá una imagen de cómo está la instalación antes y cómo se quiere que esté después del cambio. Será necesario listar cada una de las señales que intervienen, definir qué accionamientos quieren cambiarse y por qué tipo, realizar ensayos de proceso sobre la instalación para determinar el modelo que mejor defina los distintos lazos de control y desarrollar la red de Petri correspondiente para, a partir de ella, realizar la programación del sistema de control. Este trabajo puede ser extrapolado a cualquier instalación eléctrica que quiera ser modernizada y puede valer de guía a muchos otros ingenieros.

Abstract

Within the group of industries known as electrointensive are the cement factories. This type of facility consumes a large amount of electricity to carry out the process of transformation of the limestone into cement. In addition to electrical energy, they also consume fossil fuels that must be burned in the cement kiln, where the limestone is transformed into Clinker, the main component of the cement.

The fossil fuel, a derivative of petroleum, petroleum coke or more known by its abbreviation pet coke, arrives at the plants with an inadequate granulometry and fineness, reason why it must be milled before its use. This grinding process is carried out in the so-called coal mills, which can be roller or ball mills.

This type of installation was implemented in most cement factories since the 1980s, due to the rise in the price of oil after the crisis of the 70s. From then until today, the technology linked to automatic control, as well as the improvements in power electronics have made the electrical part of this type of industrial facilities obsolete.

In this master's thesis all the previous engineering processes necessary to undertake before initiating a change of control system will be carried out, field instrumentation, as well as electrical switchgear of a coal mill inside a cement factory.

It is an installation that houses about 40 motors, among which are those that start directly, by soft starter or by frequency inverter. Within field instrumentation devices are temperature and pressure gauges for gases and liquids, position switches, weight and vibration meters. All signals generated, both in the field and within the motor control center (CCM), must be sent to the control system that governs the installation. This control system will have a SCADA from which the control room operator will operate the mill. The advancement of technology in terms of communications has made it possible that a large amount of information can be transmitted through a pair of fiber optics. For this reason, the chosen control system is based on the Profibus protocol via optical fiber. The implementation of the control system will be distributed, that is, all the signals generated in the field will be concentrated in different field boxes, which will be joined through an optical fiber ring together with the signals generated in the CCM to finish at the control room.

The engineer's previous work begins with the detailed study of the installation, both from an electrical and process point of view. In this phase it is possible to get an image of how the installation is before and how it is desired to be after the change. It will be necessary to list each of the signals involved, define which drives are to be changed and by what type, perform process tests on the installation to determine the model that best defines the different control loops and develop the corresponding Petri network. Then, this Petri network is used to perform the programming of the control

system. This work can be extrapolated to any electrical installation to be modernized and can be a guide for many other engineers.

1

Introducción

Las fábricas de cemento se encuentran dentro del grupo de instalaciones industriales con mayor consumo energético. Por un lado, son grandes consumidores de energía eléctrica y por otro, necesitan de un consumo constante de combustibles fósiles para poder llevar a cabo su actividad. Estos combustibles fósiles son quemados dentro del horno del cemento, el cual necesita alcanzar temperaturas muy altas para poder convertir la caliza en lo que será el producto principal del cemento, el *clinker* [1].

Históricamente, el combustible fósil principal consumido en las fábricas de cemento fue el fueloil, combustible derivado del petróleo que puede ser vehiculado a partir de unos 40 °C y prende de forma instantánea en presencia de llama a partir de los 80 °C. A raíz de la crisis del petróleo de mediados de los 70, la industria cementera comenzó a utilizar nuevos tipos de combustible fósil más barato, en concreto el carbón mineral y la hulla. Sin embargo, el aumento en el precio de este combustible en los últimos 20 años ha provocado un nuevo cambio hacia productos más baratos. En concreto, en la actualidad, el combustible principal utilizado en las fábricas del cemento es el coque de petróleo (en inglés, *petroleum coke*, o *pet coke*), un derivado del petróleo de forma y color muy parecidos al carbón mineral [2].

Tanto el carbón mineral como el *pet coke* llegan a la instalación en forma sólida y con diferentes granulometrías. Estos combustibles deben ser tratados previamente antes de poder ser quemados en el horno de cemento. Deben ser sometidos a un proceso de molienda, para conseguir un tamaño y finura adecuados que permitan ser vehiculados por aire y puedan prender instantáneamente dentro del horno a cierta temperatura.

Dentro de una fábrica de cemento, la instalación donde se lleva a cabo el proceso de molienda del combustible fósil principal se conoce como el molino de carbón, aunque como se explicó anteriormente, en la actualidad el producto que se está moliendo en la mayoría de los países europeos es el *pet coke*. Esta instalación es la que será motivo de estudio en el presente trabajo desde un punto de vista de control y eléctrico. En concreto, la molienda de carbón de la Fábrica de Cemento de Gádor en Almería, perteneciente a una multinacional mejicana.

La Figura 1.1 muestra una fotografía de dicha instalación. A la izquierda de la imagen aparece la sección de cinta transportadora que alimenta con material no molido la tolva de almacenamiento, en color azul y situada en las plantas primera y segunda. De aquí se transporta el material hasta el molino en la cota cero. El material molido ascenderá hasta el filtro principal ubicado en la cuarta planta donde será capturado y posteriormente almacenado en el silo de material molido, situado en la segunda planta y a la derecha de la imagen.



Figura 1.1. Detalle de la instalación de la molienda de carbón en la Fábrica de Cemento de Gádor en Almería.

2

Descripción del proceso

La instalación de molienda del material combustible puede dividirse en varios grupos compuestos por una serie de accionamientos distintos. Cada uno de ellos será el encargado de realizar una tarea diferente dentro del proceso, para lo cual será necesario la monitorización de cierto número de señales, tanto digitales como analógicas. A continuación, se describirán los diferentes grupos, explicando cual es la función de cada uno y detallando el listado de señales que contiene.

2.1. Grupo engrase del reductor

El motor principal del molino es el encargado de mover la mesa giratoria donde será molturado el material. La transmisión del giro del motor hasta la mesa giratoria se realiza a través del reductor del molino, el cual es el encargado de disminuir las 1500 revoluciones por minuto del motor hasta las 43 revoluciones por minuto de la mesa giratoria, así como de cambiar un giro vertical en un giro horizontal. Los reductores de gran envergadura son máquinas muy costosas, por lo que su funcionamiento debe ser monitorizado en todo momento para evitar posibles averías. Dentro de los mismos se pueden llegar a alcanzar altas temperaturas debido al rozamiento continuo de los distintos trenes reductores. Para evitar alcanzar temperaturas críticas los reductores de grandes dimensiones están refrigerados continuamente mediante un circuito cerrado de lubricación. En el caso en estudio, este circuito cerrado de lubricación se denomina circuito de engrase del reductor.

En la Figura 2.1 se representa esquemáticamente el circuito de engrase del reductor del molino de carbón. Se trata de un circuito cerrado de lubricación. Un par de motobombas son las encargadas de hacer circular constantemente aceite a través del reductor L61-EN1. El aceite de la parte baja del reductor es aspirado por una de las dos bombas de recirculación L61-EL1.M1 y L61-EL2.M2. Se trata de dos bombas redundantes, si una de ellas fallara entraría en marcha automáticamente la otra. Este aceite aspirado es impulsado nuevamente hacia el reductor, entrando por la parte alta del mismo y lubricando todo el equipo. Los aceites empleados en este tipo de instalaciones consiguen alcanzar sus propiedades refrigerantes y lubricantes óptimas a temperaturas alrededor de los 40 °C. Para mantener esta temperatura durante los meses más fríos del año y durante los periodos en los que está la máquina parada, el sistema de engrase cuenta con dos resistencias eléctricas de caldeo L61-EL1.H1 y L61-EL1.H2. Una sonda de temperatura PT100 [3] monitorizará en todo momento la temperatura del aceite lubricante a la salida de estas resistencias. Cuando la temperatura caiga por debajo de un valor de 20 °C las resistencias eléctricas comenzarán a calentar el aceite hasta que alcance los 40 °C. Durante los meses de verano podrá ocurrir que la temperatura del

aceite alcance valores excesivamente altos. Una temperatura muy alta del aceite podría provocar la pérdida de propiedades del mismo, lo que supondría un riesgo para el mecanismo interno del reductor. Para evitar que esto suceda, la instalación cuenta con un refrigerador por aire L61-VX1 que entraría en marcha cuando la temperatura del aceite, medida por la misma PT100 anterior, superara los 50 °C y pararía cuando bajara hasta los 45 °C.

Como puede comprobarse esta instalación tiene un típico control todo - nada para mantener un nivel de la temperatura del aceite de lubricación en torno a los 40°C. Por un lado, es posible aumentar la temperatura mediante el uso de resistencias eléctricas de caldeo y por el otro es posible enfriarlo mediante el uso de un refrigerador por aire.

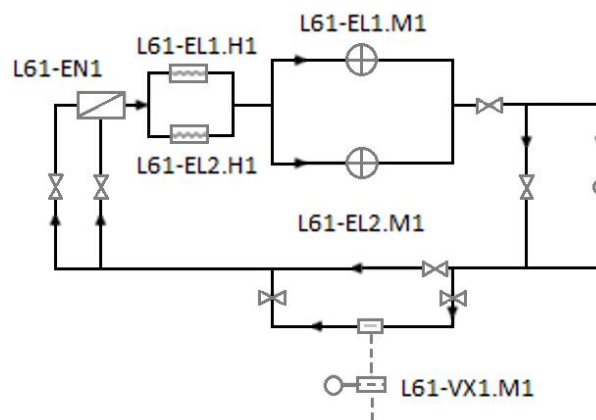


Figura 2.1. Circuito de engrase del reductor del molino de carbón.

La medida de la temperatura se lleva a cabo mediante una sonda de temperatura PT100 a dos hilos más uno de compensación. Podría darse el caso de que hubiera un problema a lo largo del circuito cerrado de lubricación y el aceite no llegara hasta el reductor, como la rotura de una tubería o el taponamiento de la misma. Si esto ocurriera la temperatura dentro del reductor aumentaría rápidamente y podría llegar a destruirse. Para evitar esta situación existe instalada otra sonda de temperatura PT100 que está midiendo la temperatura dentro del reductor. Si esta temperatura alcanzara un valor por encima de los 90 °C el sistema de control daría un aviso por temperatura. Si se llegaran a alcanzar los 100 °C el sistema de control pararía el motor principal del molino. Existen otros dos dispositivos más instalados que podrían parar la instalación. Por un lado, existe un presostato con nivel de mínimo y máximo a la salida de las bombas de recirculación de aceite. De esta forma si la presión fuera muy baja (mal funcionamiento de la bomba) o muy alta (atranque en el circuito) el sistema de control mandaría parar la instalación. Por otro, existe un flujostato también a la salida de las bombas. Si el nivel de flujo no es suficientemente alto, síntoma de un mal funcionamiento de la bomba o de una temperatura insuficiente del aceite, el sistema de control también pararía el motor principal del molino.

La Figura 2.2 muestra una fotografía de la instalación del engrase del reductor. La tubería que aparece en la esquina inferior derecha es la que llega desde la parte inferior del reductor situado a unos 8 metros de distancia. El aceite aspirado por una de las bombas pasará a través de las resistencias de caldeo y se calentará si no tiene la temperatura suficiente. Las resistencias de caldeo se encuentran dentro de la estructura vertical cilíndrica de color verde oscuro. A la salida de las resistencias de caldeo se encuentra situada la sonda de temperatura PT100 que medirá de forma analógica la temperatura del aceite en todo momento. De aquí el aceite será impulsado por una de las bombas. En azul y en la parte inferior de la fotografía aparece uno de los motores que accionan estas bombas. A continuación de las bombas se encuentran situados unos filtros para la captación de partículas de suciedad y posteriormente la instrumentación adicional que controlará tanto los valores límites de temperatura, presión y flujo de aceite enviado al reductor. Posteriormente se encontrará el refrigerador por aire encargado de enfriar el aceite si este estuviera por encima del valor máximo permitido, no aparece en la fotografía.



Figura 2.2. Detalle del circuito de lubricación del reductor del molino de carbón.

La Tabla 2.1 muestra las señales asociadas a la primera de las dos bombas de recirculación del aceite de engrase del reductor. De aquí en adelante se mostrarán tablas como esta asociadas a cada uno de los accionamientos que integran la instalación en estudio. En la primera columna "Señal" aparece la identificación de cada una de las señales vinculadas a la máquina en cuestión. En la segunda columna "Tipo" se especifica el tipo de señal que es. Puede tratarse de una entrada digital al sistema de control (ED),

de una salida digital desde el sistema de control (SD), de una entrada analógica al sistema de control (EA) o de una salida analógica desde el sistema de control (SA). En la tercera columna "OK" se especifica el valor que deberá tener cada una de las señales en el sistema de control para que este pueda liberar una orden de marcha sobre la máquina, considerándose que está lista para arrancar. Esta especificación de máquina lista para arrancar se utilizará en el capítulo 9 para diseñar las Redes de Petri de los distintos grupos que conforman la molinera. Las entradas y salidas digitales podrán tener un valor de 0 o 1 lógico, mientras que las entradas y salidas analógicas deberán tener un valor que esté entre 4 y 20 mA. Las mediciones de temperatura se harán directamente a través de sensores denominados PT100 al sistema de control y deberán estar dando una lectura acorde a su rango de medida (RTD). Para una explicación más en profundidad acerca de los distintos tipos de sensores utilizados se recomienda al lector que consulte el capítulo 4 Instrumentación de campo. Como su propio nombre indica, en la cuarta columna, "Descripción", aparece de forma muy breve una pequeña descripción de cada una de las señales.

Además de las señales típicas de un motor de arranque directo, a la bomba L61-EL1.M1 se le han asociado todos los límites de temperatura, presión y flujo dentro del circuito de refrigeración ya que toda esta instrumentación está instalada a una distancia muy cercana a la misma. El presostato instalado proporcionará una entrada digital de nivel mínimo de presión (L61-EL1.P1:N) y otra de nivel máximo (L61-EL1.P1:M). El termostato proporcionará, por su parte, una entrada digital de nivel mínimo de temperatura (L61-EL1.T1:N) y otra de nivel máximo (L61-EL1.T1:M). Por último, el flujostato proporcionará una entrada digital de nivel mínimo de flujo de aceite (L61-EL1.F1:N) y otra de nivel máximo (L61-EL1.F1:M).

Dentro de la estructura vertical donde se encuentran las resistencias de caldeo hay instalados otros dos termostatos que activarán sendas entradas digitales al sistema de control indicando que se ha llegado a la temperatura máxima dentro de la estructura. Estas señales, L61-EL1.T2:M y L61-EL1.T3:M, provocarán la desactivación inmediata de las resistencias de caldeo si estas estuvieran en marcha. Por último, la sonda de temperatura PT100 instalada a continuación de los grupos de resistencias de caldeo proporcionará una medida en todo momento de la temperatura a la que se encuentra el aceite de engrase (L61-EL1.T4:PV).

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-EL1.M1:K	ED	1	Protecciones bomba 1 engrase reductor molino de carbón
L61-EL1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha bomba 1 engrase reductor molino de carbón
L61-EL1.M1:D	SD	0	Orden de marcha bomba 1 engrase reductor molino carbón
L61-EL1.M1:G	ED	0	Marcha local bomba 1 engrase reductor molino carbón
L61-EL1.M1:S	ED	1	Paro local bomba 1 engrase reductor molino carbón
L61-EL1.M1:U	ED	1	Seccionador bomba 1 engrase reductor molino carbón
L61-EL1.P1:M	ED	1	Presión máxima aceite engrase reductor molino carbón antes del filtro
L61-EL1.P1:N	ED	1	Presión mínima aceite engrase reductor molino carbón antes del filtro
L61-EL1.T1:M	ED	1	Temperatura máxima aceite engrase reductor m. carbón después del filtro
L61-EL1.T1:N	ED	1	Temperatura mínima aceite engrase reductor m. carbón después del filtro
L61-EL1.F1:M	ED	1	Flujo máximo aceite engrase reductor m. carbón después del filtro
L61-EL1.F1:N	ED	1	Flujo mínimo aceite engrase reductor m. carbón después del filtro
L61-EL1.T2:M	ED	1	Temperatura máxima dentro del grupo 1 resistencias de caldeo aceite
L61-EL1.T3:M	ED	1	Temperatura máxima dentro del grupo 2 resistencias de caldeo aceite
L61-EL1.T4:PV	EA	RTD	Temperatura aceite reductor m. carbón a la salida del grupo de caldeo

Tabla 2.1. Señales pertenecientes al accionamiento L61-EL1.M1.
Motobomba 1 engrase reductor molino.

La Tabla 2.2 muestra las señales asociadas a la segunda de las bombas de recirculación del aceite de engrase del reductor del molino. Este accionamiento tiene asociadas las señales típicas de un motor de arranque directo.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-EL2.M1:K	ED	1	Protecciones bomba 2 engrase reductor molino de carbón
L61-EL2.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha bomba 2 engrase reductor molino de carbón
L61-EL2.M1:D	SD	0	Orden de marcha bomba 2 engrase reductor molino carbón
L61-EL2.M1:G	ED	0	Marcha local bomba 2 engrase reductor molino carbón
L61-EL2.M1:S	ED	1	Paro local bomba 2 engrase reductor molino carbón
L61-EL2.M1:U	ED	1	Seccionador bomba 2 engrase reductor molino carbón

Tabla 2.2. Señales pertenecientes al accionamiento L61-EL2.M1.
Motobomba 2 engrase reductor molino.

Las Tablas 2.3 y 2.4 muestran las señales pertenecientes a los dos grupos de resistencias de caldeo cuya función es calentar el aceite de engrase del reductor del molino. Se trata de dos grupos de resistencias eléctricas alimentadas a tensión trifásica de 380 Vac de 15 kW y 10 kW de potencia.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-EL1.H1:K	ED	1	Protecciones caldeo 1 engrase reductor molino de carbón
L61-EL1.H1:R	ED	0	Respuesta de marcha caldeo 1 engrase reductor molino de carbón
L61-EL1.H1:D	SD	0	Orden de marcha caldeo 1 engrase reductor molino carbón
L61-EL1.H1:G	ED	0	Marcha local caldeo 1 engrase reductor molino carbón
L61-EL1.H1:S	ED	1	Paro local caldeo 1 engrase reductor molino carbón
L61-EL1.H1:U	ED	1	Seccionador caldeo 1 engrase reductor molino carbón

Tabla 2.3. Señales pertenecientes al accionamiento L61-EL1.H1.
Grupo 1 resistencias de caldeo engrase reductor molino.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-EL2.H1:K	ED	1	Protecciones caldeo 2 engrase reductor molino de carbón
L61-EL2.H1:R	ED	0	Respuesta de marcha caldeo 2 engrase reductor molino de carbón
L61-EL2.H1:D	SD	0	Orden de marcha caldeo 2 engrase reductor molino carbón
L61-EL2.H1:G	ED	0	Marcha local caldeo 2 engrase reductor molino carbón
L61-EL2.H1:S	ED	1	Paro local caldeo 2 engrase reductor molino carbón
L61-EL2.H1:U	ED	1	Seccionador caldeo 2 engrase reductor molino carbón

Tabla 2.4. Señales pertenecientes al accionamiento L61-EL2.H1.
Grupo 2 resistencias de caldeo engrase reductor molino.

La Tabla 2.5 muestra las señales asociadas al ventilador de refrigeración del aceite de engrase del reductor del molino. Como se explicó anteriormente, este ventilador entrará en marcha si la temperatura del aceite en el propio refrigerador supera los 50 °C. Este control se llevará a cabo mediante la activación de un termostato instalado en el propio cuerpo del refrigerador lo que provocará la aparición de una señal de temperatura máxima en el sistema de control (L61-VX1.T1:M). Una vez que desaparezca esta alarma, aproximadamente a los 45 °C, se eliminará la orden de marcha del ventilador.

Se trata de un ventilador de tipo axial. El aceite de engrase pasará a través de un serpentín que será enfriado por el aire generado por el ventilador. Existe un juego de llaves manuales con el que es posible puentear físicamente el paso del aceite a través del serpentín. De este modo es posible realizar tareas de mantenimiento en el ventilador sin que sea necesario parar la instalación del molino.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-VX1.M1:K	ED	1	Protecciones refrigeración aceite reductor molino de carbón
L61-VX1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha refrigeración aceite reductor molino de carbón
L61-VX1.M1:D	SD	0	Orden de marcha refrigeración aceite reductor molino de carbón
L61-VX1.M1:G	ED	0	Marcha local refrigeración aceite reductor molino de carbón
L61-VX1.M1:S	ED	1	Paro local refrigeración aceite reductor molino de carbón
L61-VX1.M1:U	ED	1	Seccionador refrigeración aceite reductor molino de carbón
L61-VX1.T1:M	ED	1	Temp. máxima aceite reductor molino de carbón en refrigerador de aire

Tabla 2.5. Señales pertenecientes al accionamiento L61-VX1.M1.
Ventilador de refrigeración del aceite de engrase del reductor del molino.

2.2. Grupo sistema hidráulico

El funcionamiento de un molino vertical de rodillos se basa en ejercer una presión suficientemente elevada por parte de unos rodillos o ruedas contra una mesa giratoria [4]. En la Figura 2.3 se representa en detalle las partes principales de un molino vertical de rodillos. El motor principal del molino hace girar la mesa giratoria a través del reductor. Contra esta mesa giratoria se encuentran varios rodillos ejerciendo una presión. En el molino estudiado en cuestión existen cuatro rodillos giratorios. Al girar la mesa del molino, debido a la presión hidráulica que sobre los rodillos se está ejerciendo en dirección perpendicular a la mesa, estos comenzarán también a girar. El material grueso se introducirá dentro del molino justo sobre la mesa giratoria y serán los rodillos los encargados, mediante molturación, de molerlo contra la mesa giratoria. La Figura 2.4 muestra cómo el material grueso es molido por los rodillos giratorios cuando estos giran contra la mesa del molino. La presión que los rodillos ejercen contra la mesa del molino se consigue mediante la impulsión de un aceite hidráulico sobre los pistones que empujan a los rodillos. La instalación que controla la presión de empuje de los rodillos se conoce como el sistema hidráulico del molino.

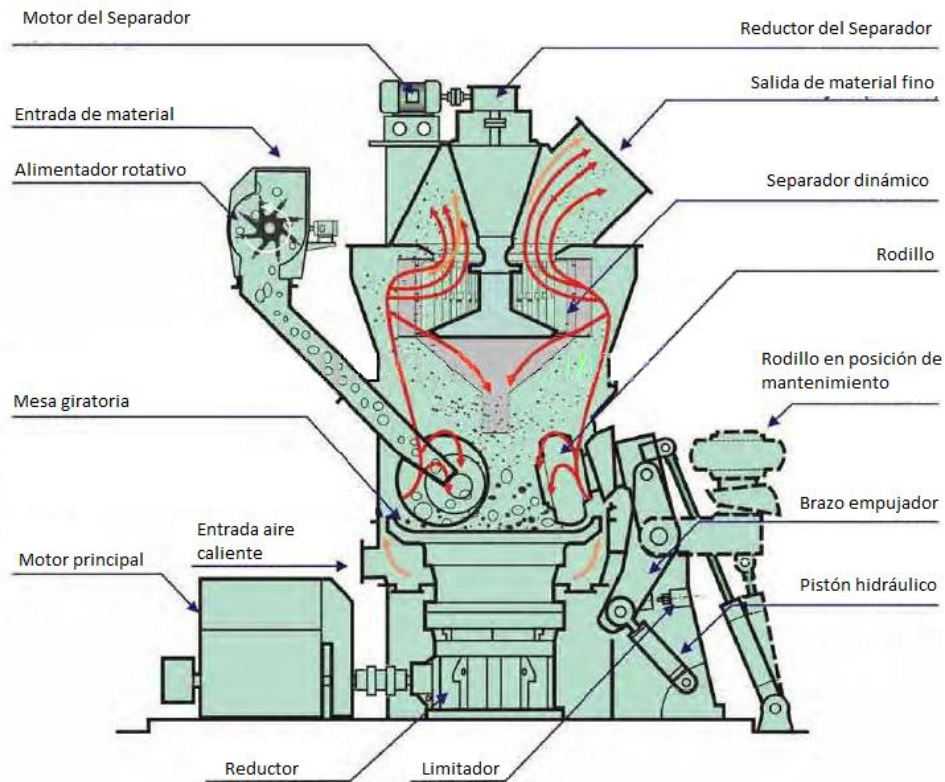


Figura 2.3. Partes principales de un molino vertical de rodillos.

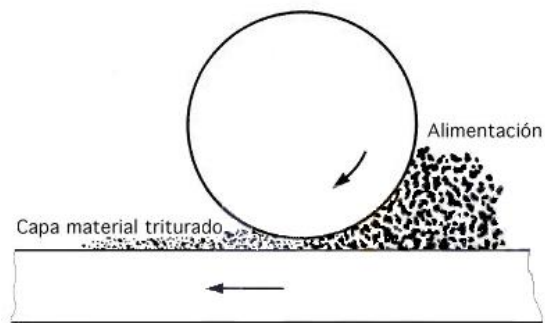


Figura 2.4. Trituración del material entre la mesa del molino y uno de los rodillos giratorios.

La presión de trabajo del sistema hidráulico puede variar de un molino a otro, aunque valores de presión normales pueden ser entre 140 y 160 bares. En la instalación de estudio, la presión de trabajo está fijada en 160 bares. Por encima de esta presión, se podría correr el riesgo de rotura de alguno de los latiguillos o tuberías que conducen el aceite hidráulico desde el depósito hasta los pistones empujadores.

El funcionamiento del sistema hidráulico implantado originalmente estaba basado en la actuación de tres válvulas que eran las encargadas de mantener la presión de trabajo prefijada. Estas válvulas eran difíciles de encontrar en el mercado y de coste muy elevado. Por otro lado, el control de la presión no era siempre todo lo fiable que se deseaba ya que, con el tiempo, estas válvulas perdían fiabilidad y terminaban fallando. El sistema original necesitaba de estas tres válvulas porque el arranque de la bomba que inyecta el aceite hidráulico era directo y en muy pocos segundos se alcanzaba la presión de trabajo prefijada. En la Figura 2.5 se representa el esquema original del sistema.

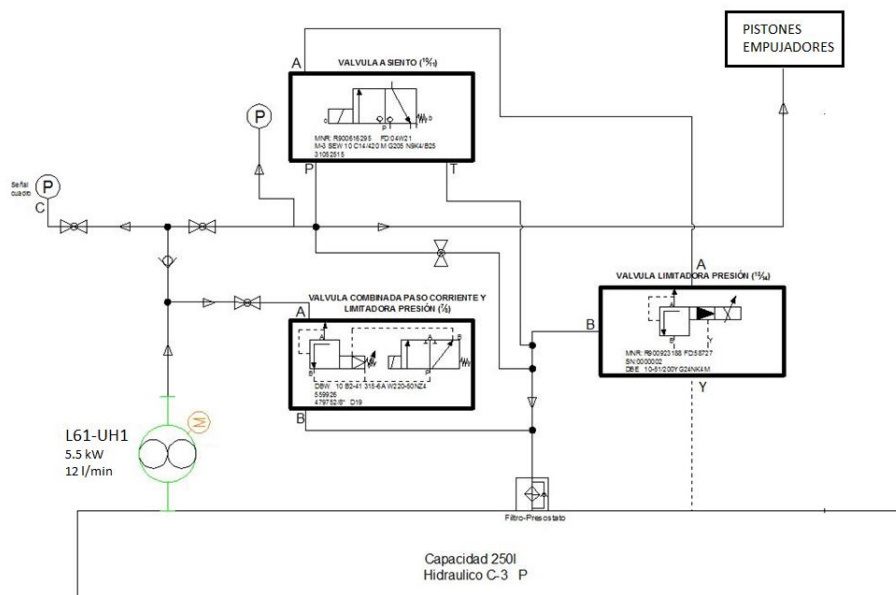


Figura 2.5. Sistema hidráulico original del molino de carbón.

Una solución a este problema se alcanzó implementando un variador de frecuencia que fuera el encargado de accionar la bomba de inyección de aceite hidráulico. En el apartado 6.3 se describe ampliamente cómo quedó el sistema tras el cambio descrito.

De este modo se podría bajar la velocidad de esta bomba lo suficiente y así conseguir un control mucho más fino de la presión de trabajo. Con la implementación del variador de frecuencia quedaron anuladas dos de las tres válvulas originales, quedando sólo en servicio la L61-VA1.V1. Esta válvula podrá actuarse desde el sistema de control para aliviar la presión del circuito cuando el molino no esté en marcha. También actuará como válvula de seguridad. Si, por cualquier motivo, la presión del circuito alcanzara los 170 bares esta válvula actuará mecánicamente aliviando la presión y retornando el aceite hidráulico a tanque.

En la Figura 2.6 se muestra en detalle el circuito que recorre el aceite hidráulico desde la bomba de inyección L61-UH1.M1 hasta los pistones empujadores. Como se observa,

el aceite parte de esta bomba directamente a los pistones que mueven los rodillos del molino. A más presión del aceite más empuje de los pistones, resultando en una presión más alta de los rodillos sobre la mesa giratoria. El aceite hidráulico de la otra cámara del pistón presionará contra un acumulador en el cual se alojará una vejiga plástica rellena con gas nitrógeno a cierta presión. Esta vejiga será la encargada de hacer de muelle a los continuos movimientos verticales a los que estará sometido el rodillo durante la molienda. Si esta vejiga sufriera alguna rotura y perdiera el gas, no se amortiguarían dichos movimientos verticales, lo cual derivaría en un aumento significativo en las vibraciones medidas en el molino. Si esta situación se mantuviera en el tiempo podría acarrear una avería importante en la pista del molino, situación nada deseable debido al coste de la misma.

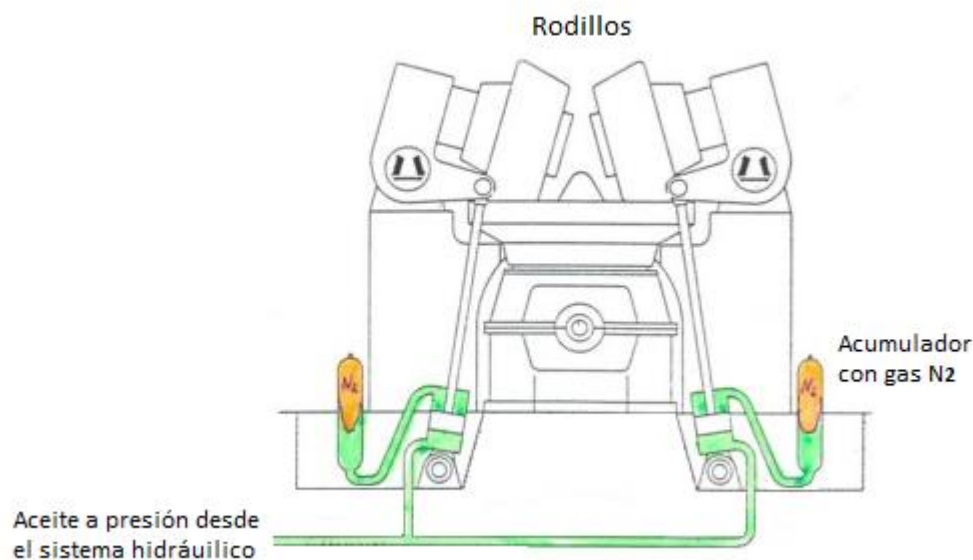


Figura 2.6. Detalle del circuito de aceite hidráulico en los pistones del molino.

La Tabla 2.6 muestra las señales asociadas a la bomba de inyección del aceite hidráulico. Al tratarse de un accionamiento gobernado por un variador de frecuencia, tendrá asociadas las señales típicas de cualquier accionamiento más las características de aquellos que pueden variar su velocidad de trabajo.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-UH1.M1:K	ED	1	Protecciones sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.M1:F	ED	1	Fallo de variador sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.M1:D	SD	0	Orden de marcha sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.M1:G	ED	0	Marcha local sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.M1:S	ED	1	Paro local sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.M1:U	ED	1	Seccionador sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.M1:DEC	ED	0	Bajar velocidad sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.M1:INC	ED	0	Subir velocidad sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.J1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Intensidad sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.S1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Respuesta de velocidad sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.S1:SP	SA	> 4 mA < 20mA	Set Point velocidad sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.L1:N	ED	1	Nivel mínimo tanque sistema hidráulico molino carbón
L61-UH1.P1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Presión de trabajo sistema hidráulico molino de carbón

Tabla 2.6. Señales pertenecientes al accionamiento L61-UH1.M1.
Bomba de impulsión del sistema hidráulico.

Por su parte, la Tabla 2.7 muestra las señales asociadas a la válvula de bajada de presión del sistema hidráulico. Este tipo de accionamientos no tendrán instalado seccionador en campo, sólo botonera con dos pulsadores de apertura y cierre local.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-VA1.V1:K	ED	1	Protecciones válvula bajada presión sistema hidráulico
L61-VA1.V1:R	ED	0	Respuesta de marcha válvula bajada presión sistema hidráulico
L61-VA1.V1:D	SD	0	Orden de marcha válvula bajada presión sistema hidráulico
L61-VA1.V1:GX	ED	0	Marcha local abrir válvula bajada presión sistema hidráulico
L61-VA1.V1:GY	SD	0	Marcha local cerrar válvula bajada presión sistema hidráulico

Tabla 2.7. Señales pertenecientes a la electroválvula L61-VA1.V1.
Válvula de bajada de presión del sistema hidráulico.

2.3. Grupo circuito de gases

El material bruto que llega a fábrica puede a veces contener un alto grado en humedad. Ya que en muchas ocasiones el material es almacenado al aire libre, está expuesto a las inclemencias del tiempo tales como la lluvia, el rocío o una elevada humedad relativa del aire. Es por esta razón por la que el material es necesario secarlo para poder ser transportado dentro del molino. Como se explicará más adelante, el material ya molido deberá estar lo suficientemente seco para poder ser capturado y almacenado. Una de las propiedades físicas del aire es que pesa menos cuando se calienta. Esta propiedad es aprovechada dentro del circuito de gases del molino. Al pesar menos, será menor el costo energético necesario para transportarlo. En la Figura 2.7 se muestra el diagrama de flujo o flowsheet de la instalación donde se detallan el circuito de gases en línea discontinua y el circuito de material en línea continua.

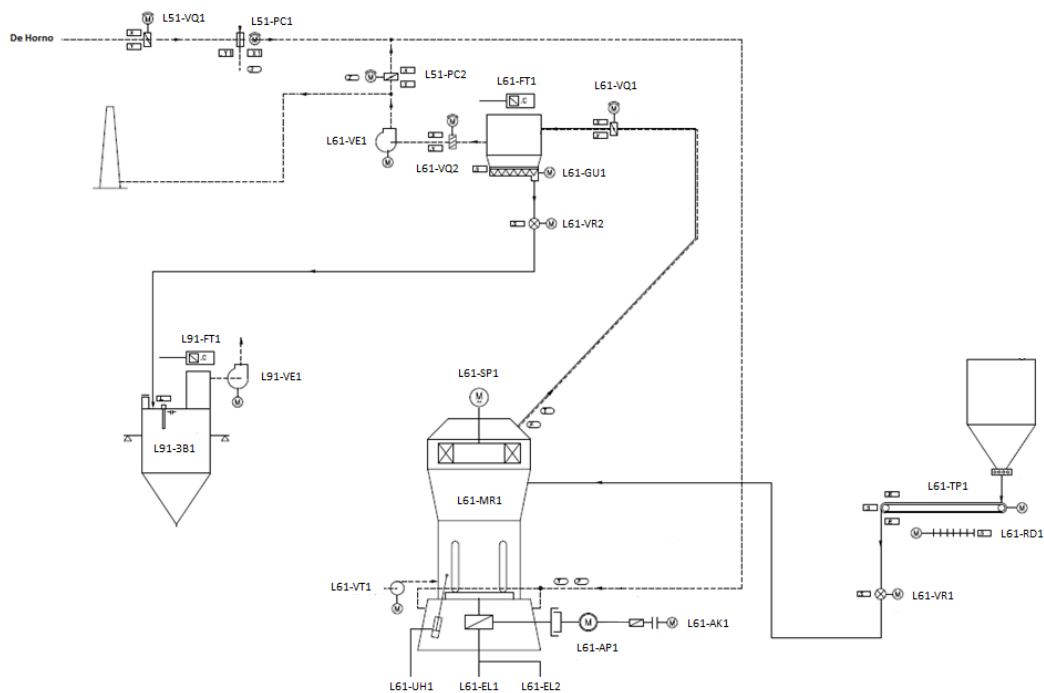


Figura 2.7. Diagrama donde se refleja tanto el circuito de gases (línea discontinua) como el circuito de material (línea continua) dentro del molino de carbón.

2.3.1. Captación de polvo en el silo de carbón molido

Durante las etapas de transporte y almacenamiento de material granulado o pulverulento, pueden existir puntos en los que la generación de polvo sea considerable. Dentro de las instalaciones industriales, los silos de almacenamiento se encuentran entre los puntos de mayor generación de polvo y, por lo general, la presencia de filtros de captación de polvo en estos silos es la norma común. En la instalación en estudio se encuentra instalado un filtro de captación de polvo sobre el silo de almacenamiento de carbón molido (L91-FT1.M1).

Por su parte, el filtro principal del molino de carbón L61-FT1.M1 tiene como cometido capturar el material molido proveniente de este último para posteriormente reconducirlo hacia el silo de carbón molido. El funcionamiento de los dos filtros es exactamente el mismo, lo único que cambia es la forma de reconducir el material capturado. En el caso del filtro instalado sobre el silo de carbón molido la descarga es directa hacia el silo. En cambio, en el filtro principal la descarga del mismo se produce a través de un tornillo sinfín (L61-GU1.M1) y de una válvula rotativa (L61-VR2.M1).

A continuación, se explicará con más detalle el funcionamiento de un filtro de mangas para la captación de polvo. Un filtro de mangas lo componen una serie de elementos, siendo el principal de ellos el conjunto de mangas filtrantes. Pueden estar fabricadas con distintos materiales (poliéster, polipropileno, nomex) según las características de la instalación, el tipo y tamaño del material a capturar y la máxima temperatura a la que pueden trabajar. Es en estas mangas donde el polvo se queda adherido y es posible recuperarlo. Para darles rigidez mecánica se les introducen unas estructuras metálicas conocidas como jaulas (ver Figura 2.8).



Figura 2.8. Detalle de dos jaulas de soportación con dos tipos de mangas filtrantes distintos.

La recuperación del polvo adherido en las mangas se realiza inyectando aire a presión dentro de la manga. Dependiendo del tipo de manga este aire a presión puede

estar limitado a una presión máxima por encima de la cual el tejido de la manga podría sufrir daños de forma prematura. Si la manga termina dañándose el filtro perderá efectividad y el polvo terminará saliendo al exterior.

El aire a presión de limpieza se inyectará de forma periódica sobre cada manga dependiendo del grado de suciedad del filtro. La medida de la suciedad será controlada por un programador electrónico que controla la presión diferencial entre la cámara sucia y la cámara limpia. El programador tendrá un número de salidas de relé, en consonancia con las dimensiones del filtro, cableadas hasta las distintas electroválvulas que inyectan el aire a presión. El tiempo de actuación de las electroválvulas es por lo general muy corto, menor a un segundo.

Deberá de existir un ventilador de aspiración que será el encargado de producir la depresión necesaria para transportar el polvo generado hasta el filtro de mangas. Por último, puede existir un elemento de descarga del polvo recuperado. Lo más común es encontrar un tornillo sinfín o una esclusa, también conocida como válvula rotativa. Estos elementos, además de reconducir el polvo recuperado hasta la próxima instalación, minimizan la entrada de aire falso por la zona inferior del filtro (ver Figura 2.9).

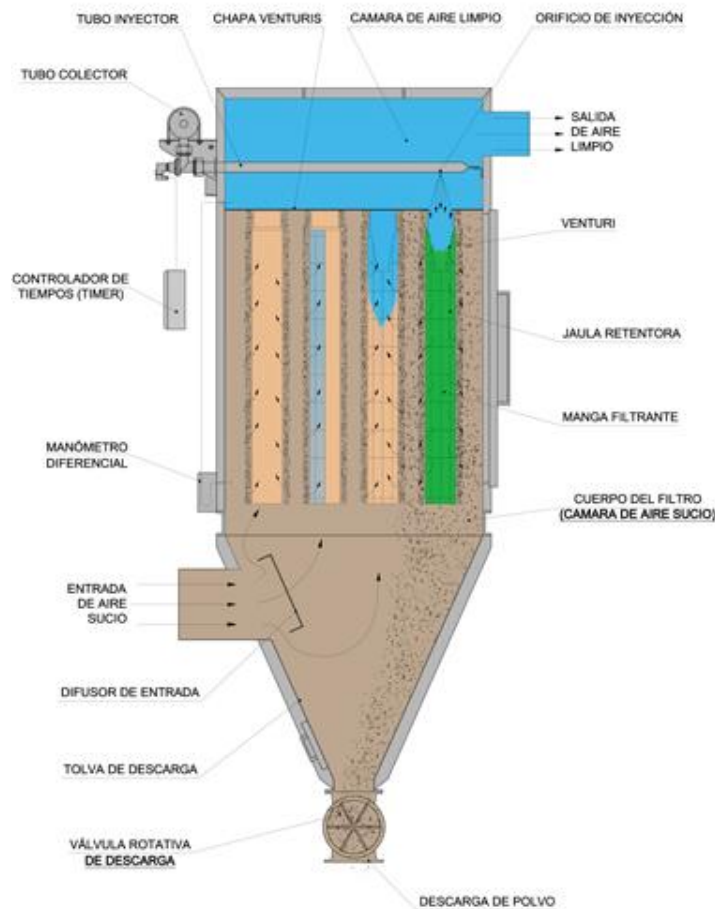


Figura 2.9. Detalle del interior de un filtro de mangas para la captación de polvo.
Cortesía de Fluidtecnic® [5].

Las primeras máquinas que deberán arrancar dentro de este grupo serán las pertenecientes al desempolvado del silo de carbón molido. Las secuencias de arranque de los distintos grupos serán tales que las primeras máquinas en arrancar sean a su vez las últimas en parar. De este modo se persigue dejar el circuito siempre limpio de material tras una sesión de molienda.

Como se explicará posteriormente, el material fino capturado en las mangas del filtro principal será recogido finalmente por el tornillo sinfín L61-GU1.M1 y conducido a través de la válvula rotativa L61-VR2.M1 directamente por gravedad hasta el silo de carbón molido. Dentro de este silo se genera una gran cantidad de polvo en suspensión debido a la entrada del material, por lo que se hace necesaria su captura y posterior liberación. Esta tarea se lleva a cabo con el filtro que hay situado encima del silo de carbón molido. Los accionamientos que componen este filtro son el ventilador L91-VE1.M1 y el programador electrónico encargado de realizar los disparos de las electroválvulas L91-FT1.C1. Como puede comprobarse en el flowsheet de la instalación (ver Figura 2.7), la descarga de este filtro es directa sobre el silo, no existe ningún elemento de recogida intermedio, ya sea tornillo sinfín o válvula rotativa, entre el filtro y el silo. La Tabla 2.8 muestra el listado de señales vinculadas al ventilador de este filtro.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L91-VE1.M1:K	ED	1	Protecciones ventilador filtro silo carbón molido
L91-VE1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha ventilador filtro silo carbón molido
L91-VE1.M1:D	SD	0	Orden de marcha ventilador filtro silo carbón molido
L91-VE1.M1:G	ED	0	Marcha local ventilador filtro silo carbón molido
L91-VE1.M1:S	ED	1	Paro local ventilador filtro silo carbón molido
L91-VE1.M1:U	ED	1	Seccionador ventilador filtro silo carbón molido

Tabla 2.8. Señales pertenecientes al accionamiento L91-VE1.M1.
Ventilador del filtro del silo de carbón molido.

Las señales pertenecientes al programador electrónico que controla el disparo de las electroválvulas de limpieza se muestran en la Tabla 2.9. En este accionamiento cabe destacar la existencia de un presostato ubicado junto al calderín del aire a presión de limpieza que cambiará el estado de un contacto eléctrico cuando la presión caiga por debajo de los 4.5 bares (L91-FT1.P1:N). En este momento aparecerá en el sistema de control un aviso que alertará al operador de que la presión ha caído por debajo del valor óptimo de trabajo. Si esta situación se mantuviera durante mucho tiempo, las mangas comenzarían a colmatarse de material reduciendo o incluso eliminando por completo la efectividad del filtro.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L91-FT1.C1:K	ED	1	Protecciones desempolvado filtro silo carbón molido
L91-FT1.C1:R	ED	0	Respuesta de marcha desempolvado filtro silo carbón molido
L91-FT1.C1:D	SD	0	Orden de marcha desempolvado filtro silo carbón molido
L91-FT1.C1:G	ED	0	Marcha local desempolvado filtro silo carbón molido
L91-FT1.C1:S	ED	1	Paro local desempolvado filtro silo carbón molido
L91-FT1.C1:U	ED	1	Seccionador desempolvado filtro silo carbón molido
L91-FT1.P1:N	ED	1	Presión mínima desempolvado filtro silo carbón molido

Tabla 2.9. Señales pertenecientes al accionamiento L91-FT1.C1. Desempolvado del filtro del silo de carbón molido.

El control del llenado de la tolva de carbón molido (L91-3B1) se lleva a cabo mediante dos dispositivos. Por un lado, existirá una medida analógica del nivel de llenado, cuya señal en el sistema de control será L91-3B1.W1:PV. Esta medida se consigue de manera indirecta midiendo el peso de toda la estructura que soporta el silo a través de unas células de carga. El rango de medida se ajustará de tal forma que 4 mA supondrán que el silo está completamente vacío y 20 mA completamente lleno. Este ajuste debe hacerse durante la puesta en marcha de la instalación o si cambia significativamente la densidad del tipo de material a almacenar. Por otro lado, existirá en el techo del silo de carbón molido un interruptor de paleta rotativa. El vástago tiene una longitud de aproximadamente un metro. Cuando el llenado del silo alcance la paleta y ejerza una resistencia lo suficientemente grande para detener el giro del motor, se activará una alarma en el sistema de control que detendrá inmediatamente la molienda (L91-3B1.L1:M). En la Tabla 2.10 se muestra el listado de señales vinculadas a la estructura del silo de carbón molido.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L91-3B1.L1:K	ED	1	Protecciones nivel máximo silo carbón molido
L91-3B1.L1:M	ED	0	Nivel máximo silo carbón molido
L91-3B1.W1:K	ED	1	Protecciones peso silo carbón molido
L91-3B1.W1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Peso silo carbón molido

Tabla 2.10. Señales asociadas a la estructura del silo de carbón molido L91-3B1.

2.3.2. Filtro principal

Dentro de un horno de cemento se generan gases que pueden llegar a estar por encima de los 1000°C dependiendo del punto de medida. Parte de estos gases son desviados hacia el molino de carbón con la finalidad de calentar todo el circuito y eliminar la humedad que tuviera el material bruto, así como mejorar las condiciones para la vehiculación del mismo. La primera de las máquinas que deberá ponerse en marcha

pertenecientes al filtro principal será el ventilador L61-VE1.M1. Este accionamiento será el encargado de generar la depresión necesaria para conducir el aire caliente desde el horno hasta el molino de carbón. Esta máquina está accionada por un motor de 160 kW de potencia, su transmisión se lleva a cabo mediante correas y el motor arrancaba mediante un arrancador tipo estrella triángulo. Como se verá posteriormente este tipo de arranque fue sustituido por un variador de frecuencia. Con este dispositivo es posible controlar en todo momento la velocidad del motor asegurando en todo momento que este podrá suministrar todo el par y se evitarán los altos picos de intensidad durante el arranque. Además, se podrá controlar de manera eficiente la cantidad de material que llegue hasta el filtro principal L61-FT1.C1 desde el molino. Por lo general, el parámetro de velocidad de este ventilador no se modifica y es controlado directamente por el operador de la instalación. Si por algún motivo el filtro principal comenzara a colmatarse, además de reducir la cantidad de material crudo con el que se alimenta el molino, se reduciría la velocidad del ventilador para ayudar a que se descargara el filtro rápidamente. En la Tabla 2.11 se muestra el listado de señales pertenecientes al ventilador del filtro principal de la instalación. Además de las señales comunes a cualquier accionamiento gobernado por un variador de frecuencia, aparece una señal de entrada analógica de temperatura a la salida del ventilador L61-VE1.T1:PV. Si esta temperatura alcanzara un valor superior a los 100 °C aparecería una alarma en el sistema de control y se provocaría el paro inmediato del ventilador. Temperaturas superiores a este valor supondría poner en riesgo las mangas filtrantes dentro del filtro principal, con la posibilidad incluso de llegar a su destrucción total por combustión.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-VE1.M1:K	ED	1	Protecciones ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.M1:F	SD	1	Fallo variador ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.M1:D	ED	0	Orden de marcha ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.M1:G	ED	0	Marcha local ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.M1:S	ED	1	Paro local ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.M1:U	ED	1	Seccionador ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.M1:S1	ED	0	Control de giro ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.M1:DEC	ED	0	Bajar velocidad ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.M1:INC	EA	0	Subir velocidad local ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.J1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Intensidad ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.S1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Respuesta velocidad ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.S1:SP	SA	> 4 mA < 20mA	Set Point velocidad ventilador filtro molino carbón
L61-VE1.T1:PV	EA	RTD	Temperatura salida ventilador filtro molino carbón

Tabla 2.11. Señales pertenecientes al accionamiento L61-VE1.M1.
Ventilador del filtro del molino de carbón.

La captación del material molido proveniente del molino de carbón se lleva a cabo en el filtro principal de la instalación (L61-FT1.C1). El principio de funcionamiento de este filtro es el descrito en la sección Captación de Polvo. Se trata, por tanto, de un filtro de mangas con secuenciador electrónico para el control de los disparos de las electroválvulas. Dependiendo del valor de la presión diferencial existente entre la cámara sucia y la limpia, el tiempo entre disparos se modificará automáticamente para intentar mantener una presión diferencial constante.

En el caso de este filtro, la presión diferencial óptima de trabajo se establece en torno a los 17 mbar. Presiones diferenciales por debajo de este valor se traducen en una excesiva limpieza de las mangas, situación no deseable ya que se puede acortar rápidamente la vida útil de las mismas. Por otro lado, presiones diferenciales por encima de los 17 mbar se traducen en una colmatación excesiva de las mangas, lo que repercutiría en una merma de la capacidad filtrante del sistema. El control de esta variable se lleva a cabo internamente en el secuenciador electrónico. La medición de presión diferencial, además de ser administrada por el secuenciador, es visualizada en el sistema de control a través de la señal L61-FT1.P2:PV. Si la medida de la depresión alcanzara niveles por encima de los 19 mbar se activaría un aviso en el sistema de control que advertiría al operador de dicha eventualidad. Ante esta situación la acción a tomar es reducir la alimentación de carbón bruto al molino.

Junto al calderín de aire a presión de este filtro está instalado un presostato que generará una alarma de presión mínima (L61-FT1.P1:N) en el sistema de control. Ante la activación de esta alarma se producirá un paro inmediato de la secuencia del grupo circuito de gases del molino.

La Tabla 2.12 muestra el listado de señales pertenecientes al filtro principal de la instalación.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-FT1.C1:K	ED	1	Protecciones desempolvado filtro molino de carbón
L61-FT1.C1:R	ED	0	Respuesta de marcha desempolvado filtro molino de carbón
L61-FT1.C1:D	SD	0	Orden de marcha desempolvado filtro molino de carbón
L61-FT1.C1:G	ED	0	Marcha local desempolvado filtro molino de carbón
L61-FT1.C1:S	ED	1	Paro local desempolvado filtro molino de carbón
L61-FT1.C1:U	ED	1	Seccionador desempolvado filtro molino de carbón
L61-FT1.P1:N	ED	1	Presión mínima desempolvado filtro molino de carbón
L61-FT1.P2:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Presión diferencial filtro molino de carbón
L61-FT1.T1:PV	EA	RTD	Temperatura gases entrada filtro molino de carbón
L61-FT1.T2:PV	EA	RTD	Temperatura gases salida filtro molino de carbón

Tabla 12. Señales pertenecientes al accionamiento L61-FT1.C1. Desempolvado del filtro del molino de carbón.

La recogida del material fino captado por el filtro principal se lleva a cabo mediante el tornillo sinfín L61-GU1.M1. La Figura 2.10 muestra el detalle de un tornillo sinfín como el de la instalación, con recogida de material longitudinal por la parte superior y evacuación por un extremo inferior. Existen otro tipo de tornillos sinfines con recogida en un extremo superior y evacuación en el extremo opuesto inferior. También es posible encontrar tornillos sinfines con evacuación central. Otra de las funciones para las que se pueden utilizar es para elevar el material de una cota inferior a otra superior.

Estas máquinas tendrán colocado un sensor de proximidad inductivo en el extremo opuesto al accionamiento que detecte el movimiento del tornillo sinfín. Si hubiera un atranque por material dentro del tornillo y la velocidad del mismo se redujera o incluso si se partiera el tornillo sinfín, el sensor de proximidad activaría una alarma en el sistema de control que detendría inmediatamente el motor. Con esta señal se evita que, ante un atranque mecánico, se caliente el motor y se dispare su protección térmica.



Figura 2.10. Tornillo sinfín de carga longitudinal superior y evacuación en un extremo inferior.

La Tabla 2.13 muestra el listado de señales pertenecientes al tornillo sinfín de recogida de material del filtro principal.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-GU1.M1:K	ED	1	Protecciones sinfín evacuación filtro molino de carbón
L61-GU1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha sinfín evacuación filtro molino de carbón
L61-GU1.M1:D	SD	0	Orden de marcha sinfín evacuación filtro molino de carbón
L61-GU1.M1:G	ED	0	Marcha local sinfín evacuación filtro molino de carbón
L61-GU1.M1:S	ED	1	Paro local sinfín evacuación filtro molino de carbón
L61-GU1.M1:U	ED	1	Seccionador sinfín evacuación filtro molino de carbón
L61-GU1.M1:PLS	ED	0/1	Control de giro sinfín evacuación filtro molino de carbón
L61-GU1.T1:PV	EA	RTD	Temperatura material en sinfín evacuación filtro molino de carbón

Tabla 2.13. Señales pertenecientes al accionamiento L61-GU1.M1.
Tornillo sinfín del filtro del molino de carbón.

La válvula rotativa L61-VR2.M1 es la encargada de suministrar el material recogido por el tornillo sinfín L61-GU1.M1 al silo de carbón molido. Estas máquinas pueden utilizarse para suministrar material de forma controlada si el motor es accionado con un variador de frecuencia. En este caso el motor que acciona la máquina gira a velocidad nominal, siendo su cometido principal hacer de barrera física entre la instalación del filtro principal y el silo de almacenamiento. Encima del silo de carbón molido se encuentra el filtro L91-FT1.C1 y este a su vez necesita del ventilador L91-VE1.M1 para generar la depresión necesaria. Por su parte, el filtro principal necesita del ventilador L61-VE1.M1 para transportar el material fino desde el molino hasta el filtro principal. Si no se intercalara una válvula rotativa entre el tornillo sinfín y el silo de almacenamiento, la depresión generada por el ventilador L91-VE1.M1 no sería suficiente para ayudar al material a llegar al silo de almacenamiento ya que la depresión ejercida por el ventilador principal, mucho mayor, lo retendría. La Tabla 2.14 muestra el listado de señales pertenecientes a la válvula rotativa de evacuación del filtro principal. La Figura 2.11, por su parte, muestra el detalle de funcionamiento de una válvula rotativa para el suministro de material granulado o en polvo.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-VR2.M1:K	ED	1	Protecciones válvula rotativa evacuación filtro MK
L61-VR2.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha válvula rotativa evacuación filtro MK
L61-VR2.M1:D	SD	0	Orden de marcha válvula rotativa evacuación filtro MK
L61-VR2.M1:G	ED	0	Marcha local válvula rotativa evacuación filtro MK
L61-VR2.M1:S	ED	1	Paro local válvula rotativa evacuación filtro MK
L61-VR2.M1:U	ED	1	Seccionador válvula rotativa evacuación filtro MK
L61-VR2.M1:PLS	ED	0/1	Control de giro válvula rotativa evacuación filtro MK

Tabla 2.14. Señales pertenecientes al accionamiento L61-VR2.M1.
Válvula rotativa de evacuación del filtro principal.

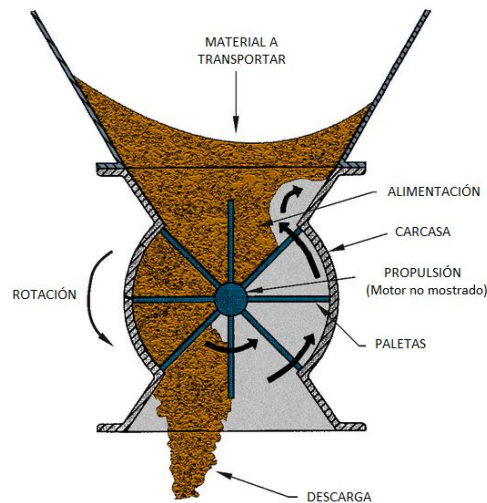


Figura 2.11. Detalle del funcionamiento de una válvula rotativa para el suministro de material sólido.

2.3.3. Compuertas del filtro principal

El filtro principal de captación del material molido procedente del molino contiene 450 mangas filtrantes capaces de soportar temperaturas en torno a los 100°C. Temperaturas superiores a los 110°C podrían dañar el tejido con el que están fabricadas las mangas y se correría el riesgo de provocar la destrucción total de las mismas si el conjunto se incendiara. Es por esta razón por la que se debe controlar en todo momento la temperatura de salida de los gases del molino en dirección hacia el filtro principal y es también por esta razón por la que existen las compuertas L61-VQ1.M1 y L61-VQ2.M1 que lo aíslan.

Como el ventilador del filtro principal L61-VE1.M1 está gobernado por un variador de frecuencia, el arranque del mismo se hace de manera muy suave para evitar el pico de consumo en amperios inicial. Es por esta razón por la cual las compuertas L61-VQ1.M1 y L61-VQ2.M1 pueden estar en todo momento abiertas. Cuando el arranque del ventilador principal era del tipo estrella triángulo, estas dos compuertas debían estar cerradas con anterioridad a dicho arranque, ya que si no el consumo en amperios inicial por parte del ventilador sería excesivamente alto y provocaría un disparo por intensidad.

Sólo en el caso de un incremento repentino en la temperatura de gases de salida del molino superior a los 110°C, estas compuertas se cerrarían automáticamente aislándolo por completo. Por otro lado, en el hipotético caso de que se activara el sistema contra incendios de la instalación, éste activaría una entrada al sistema de control (L61-VQ2.M1:FI) que provocaría un paro inmediato del ventilador del filtro principal L61-

VE1.M1 así como del motor principal L61-AP1.M1, además se cerrarían automáticamente las compuertas de entrada de gases al molino, las compuertas del filtro principal y la compuerta de recirculación.

La compuerta de entrada de gases al filtro principal L61-VQ1.M1 es del tipo todo - nada con la particularidad de que esta compuerta se mantendrá “sujeta” a través de un electroimán que estará constantemente energizado. Se tratará, por tanto, de una compuerta de seguridad que en caso de falla en la alimentación eléctrica de la instalación se cerrará automáticamente. De este modo se asegura el corte efectivo de entrada de gas caliente al filtro de mangas aún en ausencia de energía eléctrica. Constará así mismo con el sensor de proximidad (L61-VQ1.Y2:Y) que indique que el electroimán “ha sujetado” la compuerta cuando esta está completamente cerrada y será una condición imprescindible para poder abrirla.

Por su parte, la compuerta de salida de gases del filtro principal L61-VQ2.M1 también es del tipo todo - nada, pero no es de seguridad, no contendrá ningún electroimán que la sujete. Estará, por tanto, accionada mediante un motor reversible y contará con dos sensores de proximidad inductivos que informarán al sistema de control de sus posiciones extremas. Las Tablas 2.15 y 2.16 muestran respectivamente el listado de señales pertenecientes a las compuertas de entrada y salida de gases del filtro principal.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-VQ1.M1:K	ED	1	Protecciones compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.M1:K1	ED	1	Protecciones bobina cierre rápido compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.M1:RX	ED	0	Respuesta de marcha abrir compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.M1:RY	ED	0	Respuesta de marcha cerrar compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.M1:DX	ED	0	Orden de marcha abrir compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.M1:DY	SD	0	Orden de marcha cerrar compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.M1:GX	SD	0	Marcha local abrir compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.M1:GY	ED	0	Marcha local cerrar compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.M1:S	ED	1	Paro local compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.M1:U	ED	1	Seccionador compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.X1:X	ED	1	Posición abierta compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.Y1:Y	ED	0	Posición cerrada compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón
L61-VQ1.Y2:Y	ED	0	Final carrera seguridad compuerta todo - nada entrada filtro molino carbón

Tabla 2.15. Señales pertenecientes al accionamiento L61-VQ1.M1.
Compuerta todo - nada de entrada de gases al filtro principal del molino de carbón.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-VQ2.M1:K	ED	1	Protecciones compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.M1:RX	ED	0	Respuesta de marcha abrir compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.M1:RY	ED	0	Respuesta de marcha cerrar compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.M1:DX	SD	0	Orden de marcha abrir compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.M1:DY	SD	0	Orden de marcha cerrar compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.M1:GX	ED	0	Marcha local abrir compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.M1:GY	ED	0	Marcha local cerrar compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.M1:S	ED	1	Paro local compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.M1:U	ED	1	Seccionador compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.X1:X	ED	1	Posición abierta compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.Y1:Y	ED	0	Posición cerrada compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón
L61-VQ2.M1:FI	ED	0	Alarma contraincendios en filtro molino de carbón activada

Tabla 2.16. Señales pertenecientes al accionamiento L61-VQ2.M1. Compuerta todo - nada de salida de gases del filtro principal del molino de carbón.

2.3.4. Compuertas de entrada de gases

Como se explicó anteriormente, la molienda del material en el interior del molino de carbón debe realizarse a una cierta temperatura. Dependiendo de la fecha del año, el material a moler podría llegar muy húmedo a la instalación, lo cual podría provocar pegaduras dentro de la estructura del molino y dentro del filtro principal, llegando a provocar incluso su colapso. Es por esta razón que a la hora de moler el material se utilizan gases calientes provenientes de la torre del intercambiador del horno, con el fin de eliminar la humedad que pueda contener y facilitar su transporte por toda la instalación. Una vez que ya está arrancado el filtro principal del molino y las compuertas que lo aíslan están abiertas, el sistema de control mandará abrir las compuertas de entrada de gases calientes.

El control de la entrada de gases calientes a la instalación se lleva a cabo a través de las compuertas L51-VQ1.M1 y L51-PC1.M1. El aire caliente procedente de la torre del intercambiador puede llegar a alcanzar temperaturas por encima de los 250°C por lo que el control de la cantidad de aire aportado al molino es fundamental.

La primera de las compuertas se trata de una del tipo todo - nada, es decir, sólo existe control de sus posiciones extremas. Se tratará, por tanto, de una compuerta accionada por un arrancador reversible con sensores de proximidad inductivos instalados en los extremos de su recorrido. Este arrancador moverá un eje en cuyo extremo estará situado un electroimán que a su vez será el encargado de "sujetar" la compuerta en sí. El

electroimán situado en el extremo del eje funcionará como sistema de emergencia que se activará si por cualquier motivo se produce un fallo en la alimentación general de la instalación. De este modo se asegura que la instalación deja de recibir aire caliente ante la eventualidad de un corte en el suministro eléctrico. Si se produjera esta situación, la alimentación de 24 Vac que se suministra al electroimán para sujetar la compuerta desaparecería, lo que provocaría que la compuerta se cerrara de forma instantánea por gravedad. Además de los sensores de proximidad que indicarán las posiciones extremas de la compuerta, existirá un tercer sensor L51-VQ1.Y2:Y que informará al sistema de control de que el electroimán “ha sujetado” la compuerta. Este final de carrera de seguridad funcionará de forma que cuando esté activo proporcione un cero lógico al sistema de control y será condición imprescindible para que la compuerta comience a abrir. Las Tabla 2.17 muestra el listado de señales pertenecientes a la compuerta todo - nada de entrada al molino de carbón.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L51-VQ1.M1:K	ED	1	Protecciones compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.M1:K1	ED	1	Protecciones bobina cierre rápido compuerta todo - nada entrada MK
L51-VQ1.M1:RX	ED	0	Respuesta de marcha abrir compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.M1:RY	ED	0	Respuesta de marcha cerrar compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.M1:DX	SD	0	Orden de marcha abrir compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.M1:DY	SD	0	Orden de marcha cerrar compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.M1:GX	ED	0	Marcha local abrir compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.M1:GY	ED	0	Marcha local cerrar compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.M1:S	ED	1	Paro local compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.M1:U	ED	1	Seccionador compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.X1:X	ED	1	Posición abierta compuerta todo - nada entrada molino carbón
L51-VQ1.Y1:Y	ED	0	Posición cerrada compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-VQ1.Y2:Y	ED	0	Final carrera seguridad compuerta todo - nada entrada molino carbón

Tabla 2.17. Señales pertenecientes al accionamiento L51-VQ1.M1. Compuerta todo - nada de entrada de gases al molino de carbón.

Por su parte, la compuerta L51-PC1.M1 se trata de una del tipo proporcional, también accionada a través de un arrancador reversible. Solidario al eje habrá instalado un sensor de posicionamiento inductivo con el fin de controlar en todo momento el tanto por ciento de apertura de la compuerta. La Tabla 2.18 muestra el listado de señales pertenecientes a esta máquina.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L51-PC1.M1:K	ED	1	Protecciones compuerta proporcional entrada MK
L51-PC1.M1:RX	ED	0	Respuesta de marcha abrir compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-PC1.M1:RY	ED	0	Respuesta de marcha cerrar compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-PC1.M1:DX	SD	0	Orden de marcha abrir compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-PC1.M1:DY	SD	0	Orden de marcha cerrar compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-PC1.M1:GX	ED	0	Marcha local abrir compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-PC1.M1:GY	ED	0	Marcha local cerrar compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-PC1.M1:S	ED	1	Paro local compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-PC1.M1:U	ED	1	Seccionador compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-PC1.X1:X	ED	1	Posición abierta compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-PC1.Y1:Y	ED	0	Posición cerrada compuerta proporcional entrada molino carbón
L51-VQ1.Z1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	% apertura compuerta proporcional entrada molino carbón

Tabla 2.18. Señales pertenecientes al accionamiento L51-PC1.M1. Compuerta proporcional de entrada de gases al molino de carbón.

2.3.5. Compuerta de recirculación

El circuito de gases dentro de la instalación del molino de carbón está diseñado de forma que no todo el gas caliente aspirado por el ventilador principal L61-VE1.M1 es expulsado al exterior, sino que parte del mismo es reintroducido al circuito. De este modo se consigue recuperar parte del aire limpio tras haber pasado por el filtro principal y aun conservando cierta temperatura, en torno a los 80°C.

Tras la apertura de las compuertas de entrada de gases calientes, le llega el turno a la compuerta de recirculación (L51-PC2.M1), que es la encargada de reintroducir parte del aire limpio expulsado por el ventilador del filtro principal de nuevo al circuito de entrada de gases (ver Figura 2.7). Se trata de una compuerta proporcional accionada por un motor reversible que tendrá instalado, además de los sensores inductivos que indiquen sus posiciones extremas, un sensor de posicionamiento que informará al sistema de control del tanto por ciento de apertura de la misma. La posición de trabajo normal de esta compuerta se establece entre un 50% y un 60% de apertura y no es cambiada, por lo general, durante todo el ciclo de molienda. La Tabla 2.19 muestra el listado de señales pertenecientes a la compuerta proporcional de recirculación del molino de carbón.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L51-PC2.M1:K	ED	1	Protecciones compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.M1:RX	ED	0	Respuesta de marcha abrir compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.M1:RY	ED	0	Respuesta de marcha cerrar compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.M1:DX	ED	0	Orden de marcha abrir compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.M1:DY	SD	0	Orden de marcha cerrar compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.M1:GX	SD	0	Marcha local abrir compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.M1:GY	ED	0	Marcha local cerrar compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.M1:S	ED	1	Paro local compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.M1:U	ED	1	Seccionador compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.X1:X	ED	0	Posición abierta compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.Y1:Y	ED	1	Posición cerrada compuerta proporcional recirculación molino carbón
L51-PC2.Z1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	% apertura compuerta proporcional recirculación molino carbón

Tabla 2.19. Señales pertenecientes al accionamiento L51-PC2.M1. Compuerta proporcional de recirculación del molino de carbón.

2.3.6. Separador dinámico

La separación del material fino del grueso, dentro de la estructura del molino de carbón, es la función que desarrolla el separador dinámico de alta eficiencia L61-SP1.M1. Esta será la última de las máquinas que arrancará una vez iniciada la secuencia de arranque del grupo circuito de gases.

Se trata de una estructura metálica en forma circular (rotor) a la cual se le fijan una serie de álabes o paletas que pueden estar fijas o pueden ser dispuestas formando un ángulo determinado con respecto al rotor (ver Figura 2.12). El material molido asciende por la estructura debido a la depresión generada por el ventilador principal del filtro. Dependiendo del ángulo fijado entre los álabes y el rotor podrá pasar más o menos material fino desde el exterior hasta el interior del rotor, también conocido como jaula. El rotor será accionado a través de un motor que es gobernado a su vez por un variador de frecuencia. De este modo podrá controlarse la velocidad del giro de toda la estructura. Si se fija un ángulo determinado de las paletas con respecto al rotor, cuanto mayor sea la velocidad de giro de la jaula, mayor cantidad de material será rechazado. Del material que haya podido entrar dentro de la jaula sólo aquel que sea lo suficientemente ligero podrá abandonar la estructura y se dirigirá hacia el filtro principal. El material lo suficientemente pesado para no ser transportado por la depresión de aire volverá a caer

por gravedad en dirección a la mesa del molino para ser nuevamente molido. Por lo tanto, ante un ángulo fijado de los álabes con respecto al rotor, la única variable que modificaría la finura del material molido sería la velocidad de giro del separador. Este parámetro será modificado directamente por el operador de sala de control dependiendo de los resultados de finura obtenidos en las muestras periódicas que se realizan del producto final.

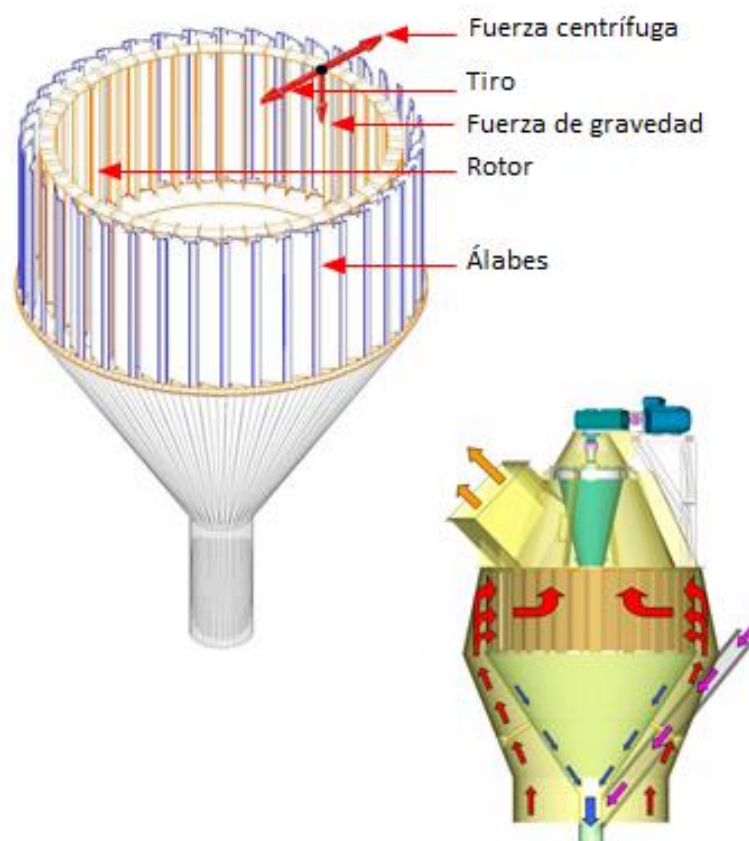


Figura 2.12. Detalle de la estructura en jaula de un separador dinámico de alta eficiencia (dibujo superior). Recorrido del material a través del mismo (dibujo inferior).
Cortesía de Loesche® [6].

La Tabla 2.20 muestra el listado de señales pertenecientes al separador dinámico de alta eficiencia del molino de carbón. Además de las señales típicas de cualquier accionamiento, se incluyen las específicas de aquellos gobernados mediante variador de frecuencia.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-SP1.M1:K	ED	1	Protecciones separador molino carbón
L61-SP1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha separador molino carbón
L61-SP1.M1:F	ED	1	Fallo variador separador molino carbón
L61-SP1.M1:D	SD	0	Orden de marcha separador molino carbón
L61-SP1.M1:G	ED	0	Marcha local separador molino carbón
L61-SP1.M1:S	ED	1	Paro local separador molino carbón
L61-SP1.M1:U	ED	1	Seccionador separador molino carbón
L61-SP1.M1:DEC	ED	0	Bajar velocidad local separador molino carbón
L61-SP1.M1:INC	ED	0	Subir velocidad local separador molino carbón
L61-SP1.J1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Intensidad separador molino carbón
L61-SP1.S1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Respuesta velocidad separador molino carbón
L61-SP1.S1:SP	SA	> 4 mA < 20mA	Set Point velocidad separador molino carbón

Tabla 2.20. Señales pertenecientes al accionamiento L61-SP1.M1.
Separador dinámico del molino de carbón.

2.4. Grupo molino y alimentación de material

Una vez puestos en marcha los tres grupos anteriormente estudiados, se deberían tener las condiciones adecuadas en el sistema para proceder al arranque del último de los grupos, el grupo del molino y de la alimentación de material. Con el arranque del grupo *engrase reductor* se asegura la lubricación del mismo a una temperatura adecuada del aceite. Tras arrancar el grupo *sistema hidráulico* se asegura una presión mínima de trabajo en los rodillos del molino. Esta presión inicial antes de arrancar el motor principal del molino deberá estar comprendida entre los 65 y 75 bares. Por último, tras el arranque del grupo *circuito de gases* se asegura una temperatura suficientemente alta dentro del molino para eliminar la humedad que contenga el material bruto y así ayudar a la molienda del mismo. La temperatura óptima de trabajo a la salida del molino deberá estar en torno a los 85°C.

La primera de las máquinas de este grupo en arrancar tras la orden de marcha de la secuencia será el ventilador de obturación de los rodillos L61-VT1.M1. La función de este ventilador es la de suministrar un aporte de aire extra directamente sobre la zona de molienda del molino. Este aire facilitará el movimiento del material a moler entre la pista y los rodillos. De este modo se evitarán pegaduras de material en aquellos puntos donde tienda a acumularse. Como se explicó anteriormente, será la depresión generada por el ventilador del filtro principal L61-VE1.M1 la encargada de vehicular el material fino hacia el exterior de la estructura del molino. La Tabla 2.21 muestra el conjunto de señales asociadas a este ventilador.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-VT1.M1:K	ED	1	Protecciones ventilador obturación rodillos molino de carbón
L61-VT1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha ventilador obturación rodillos molino carbón
L61-VT1.M1:D	SD	0	Orden de marcha ventilador obturación rodillos molino carbón
L61-VT1.M1:G	ED	0	Marcha local ventilador obturación rodillos molino carbón
L61-VT1.M1:S	ED	1	Paro local ventilador obturación rodillos molino carbón
L61-VT1.M1:U	ED	1	Seccionador ventilador obturación rodillos molino carbón

Tabla 2.21. Señales pertenecientes al accionamiento L61-VT1.M1.
Ventilador de obturación del molino de carbón.

Una vez arrancado el ventilador de obturación se arrancará el motor principal del molino L61-AP1.M1. Se trata de un motor de jaula de ardilla de 200 kW de potencia y una intensidad nominal de 365 A a 380 Vac de alimentación. Al tratarse de un accionamiento de cierta envergadura el consumo en amperios que puede llegar a demandar, si se hiciera un arranque directo, podría hacer disparar las protecciones del armario de distribución eléctrica, así como ser origen de daños futuros en la instalación. Para evitar esta eventualidad el motor de rotor bobinado y arranque mediante resistencias rotóricas fue cambiado por uno de jaula de ardilla con arrancador suave. Este dispositivo realizará un arranque progresivo de la máquina, limitando la corriente suministrada al motor durante los primeros segundos después de la orden de marcha. De esta forma se evitará el pico de intensidad consumida por el accionamiento durante los primeros instantes tras el arranque si el motor arrancara de forma directa.

En el momento del arranque del molino, la presión de trabajo del sistema hidráulico, y por ende de los rodillos sobre la pista, no podrá superar los 70 bares. De otro modo, el consumo del motor durante el arranque sería demasiado elevado durante un tiempo demasiado alto llegando a poder producirse un disparo del arrancador progresivo por sobreintensidad. También podría darse esta circunstancia si tras un paro intempestivo de la instalación a pleno rendimiento se volviera a arrancar el molino. En este caso la cantidad de material dentro del molino sería tal que el consumo en amperios durante los instantes iniciales tras el arranque superaría los límites de tiempo establecido en el arrancador electrónico y dispararía por sobreintensidad.

La manera correcta de proceder sería eliminando la presión que ejercen los rodillos sobre la pista, acoplar el motor auxiliar al eje del reductor y con el grupo *circuito de gases* en marcha arrancar el motor auxiliar del molino L61-AK1.M1 durante unos minutos. De este modo el material fino almacenado dentro del molino saldrá en dirección hacia el filtro principal. Pasados unos minutos se podrá desacoplar el motor auxiliar y arrancar el principal. El motor auxiliar tendrá asociado un detector de proximidad inductivo que informará al sistema de control de cuando está acoplado al eje del reductor (L61-AK1.X1:X). Mientras esta señal esté activada no podrá arrancar el motor principal del

molino ya que podría ocasionar una avería grave en el acoplamiento entre el eje del reductor y el motor auxiliar.

Como ya se explicó en el apartado *grupo sistema hidráulico*, el motor principal del molino es el encargado de hacer girar la pista sobre la cual ejercerán presión los rodillos. Será entre la pista y los rodillos donde se produzca la molturación del material. La potencia del motor principal del molino deberá ser lo suficientemente alta para poder mover la pista cuando el molino se encuentre a pleno rendimiento. Una vez arrancado el motor principal del molino, la presión de trabajo del sistema hidráulico se aumentará desde los 60 o 70 bares hasta los 160 bares. Una vez que el molino alcance el régimen de funcionamiento normal podrá estar moliendo entre 9 y 10 Tm/h de material llegando a consumir el motor principal unos 360 amperios. En la Tabla 2.22 se muestran las señales pertenecientes al motor principal del molino de carbón. Al estar gobernado por un arrancador electrónico tendrá, además de las señales típicas de cualquier arrancador normal, las señales asociadas a este dispositivo.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-AP1.M1:K	ED	1	Protecciones accionamiento principal molino carbón
L61-AP1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha accionamiento principal molino carbón
L61-AP1.M1:F	ED	1	Fallo arrancador suave accionamiento principal molino carbón
L61-AP1.M1:D	SD	0	Orden de marcha accionamiento principal molino carbón
L61-AP1.M1:G	ED	0	Marcha local accionamiento principal molino carbón
L61-AP1.M1:S	ED	1	Paro local accionamiento principal molino carbón
L61-AP1.M1:U	ED	1	Seccionador accionamiento principal molino carbón
L61-AP1.J1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Intensidad accionamiento principal molino carbón

Tabla 2.22. Señales pertenecientes al accionamiento L61-AP1.M1.
Accionamiento principal del molino de carbón.

Por su parte, la Tabla 2.23 muestra las señales asociadas al accionamiento auxiliar del molino.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-AK1.M1:K	ED	1	Protecciones accionamiento auxiliar molino carbón
L61-AK1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha accionamiento auxiliar a molino carbón
L61-AK1.M1:D	SD	0	Orden de marcha accionamiento auxiliar molino carbón
L61-AK1.M1:G	ED	0	Marcha local accionamiento auxiliar molino carbón
L61-AK1.M1:S	ED	1	Paro local accionamiento auxiliar molino carbón
L61-AK1.M1:U	ED	1	Seccionador accionamiento auxiliar molino carbón
L61-AK1.X1:X	ED	1	Posición acoplamiento accionamiento auxiliar molino carbón

Tabla 2.23. Señales pertenecientes al accionamiento L61-AK1.M1.

Además de las señales asociadas al motor principal del molino, existe otro conjunto de señales que están vinculadas a la estructura que conforma la zona de molienda. Esta estructura tiene como código de identificación L61-MR1 y comprende todos los elementos mecánicos y eléctricos que existen dentro de ella.

El molino en estudio posee cuatro rodillos de molturación, estos rodillos giran sobre un eje que los soporta y sobre el cual se ejerce la presión del sistema hidráulico. El giro del rodillo sobre su eje se realiza a través de un rodamiento. Podría darse el caso de que el rodamiento se gripara y el rodillo dejara de rodar. Esta situación podría conducir a averías graves sobre la pista del molino, situación totalmente indeseable debido al coste de reparación de la misma. Para evitar esta situación, cada uno de los rodillos lleva instalado un sensor de temperatura PT100 en su interior que controla la temperatura de la zona del rodamiento. Si el rodamiento comienza a deteriorarse la temperatura que lo monitoriza aumentará por encima de un valor de alarma, en torno a los 100 °C, provocando un paro del accionamiento principal. Las temperaturas de los cuatro rodamientos tienen como código de identificación L61-MR1.T1:PV, L61-MR1.T2:PV, L61-MR1.T3:PV y L61-MR1.T4:PV.

Como se explicó en el apartado *grupo engrase reductor*, la temperatura del aceite de engrase del reductor debe estar siempre en torno a los 40 °C para proteger de manera eficiente el reductor del molino. Se trata de un equipo muy complejo y muy caro, por lo que se hace obligatorio en todo momento el control del estado del mismo. Además de todas las señales de alarma que indican al sistema de control un mal funcionamiento dentro del grupo de engrase, existe una medida más de temperatura (L61-MR1.T5:PV) instalada directamente sobre el reductor del molino. En el hipotético caso de que fallaran todos los instrumentos de medida instalados en el grupo de engrase del reductor y no se engrasara este de manera eficiente, la temperatura dentro del mismo aumentaría rápidamente. En este caso, el sensor de temperatura instalado en el reductor activaría una alarma cuando la temperatura superara los 100 °C provocando un paro del motor principal.

Existen dos sondas más de temperatura PT100 instaladas en el conjunto de elementos que conforman el molino. Una se encuentra en el conducto de entrada de gases calientes (L61-MR1.T6:PV) y otra en el conducto de salida de gases hacia el filtro principal (L61-MR1.T7:PV). Ambas temperaturas deberán estar por encima de los 80 °C para poder arrancar el accionamiento principal. La temperatura de salida jugará un papel fundamental en el control de la instalación ya que uno de los dos lazos de control del molino será el encargado de mantener esta temperatura entre 80 °C y 90 °C.

Al igual que se mide la temperatura en los conductos de entrada y salida de gases del molino, también se medirá la presión diferencial en milibares en ambos puntos. Sus códigos de identificación correspondientes serán L61-MR1.P1:PV y L61-MR1.P2:PV respectivamente. En este caso, será la presión diferencial a la salida del molino la medida que juegue un papel decisivo en el control del llenado de material del mismo. Empíricamente se ha demostrado que el rango de presiones óptimo en el cual deberá estar trabajando el molino está comprendido entre los 40 y 50 mbar.

Por último, y como se explicó en el apartado grupo engrase reductor, existirá una medición del nivel de vibraciones (L61-MR1.N1:PV) colocado sobre el reductor del molino. Esta medida provocará una alarma en el sistema de control cuando el nivel de vibraciones supere un umbral de aceleración de 8 mm/s durante más de 10 segundos continuados, provocando el paro del motor principal. Esta circunstancia podría darse si el molino se quedara vacío de material a moler. En este caso los rodillos golpearían directamente sobre la pista y el nivel de vibraciones del conjunto aumentaría rápidamente, pudiendo además provocar daños importantes sobre la misma. También podría darse el caso de que, como se explicó anteriormente, alguno de los acumuladores sufriera la rotura de su vejiga con nitrógeno, provocando un aumento repentino en el nivel de vibraciones, aunque posiblemente no lo suficiente como para provocar un paro del mismo. El efecto inmediato ante esta situación sería la pérdida de producción en el molino, ya que la efectividad del rodillo correspondiente caería drásticamente.

En la Tabla 2.24 se muestra el listado de señales del sistema de control anteriormente descritas y que están vinculadas a esta estructura del conjunto molino de carbón L61-MR1.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-MR1.T1:PV	EA	RTD	Temperatura rodillo exterior 1 molino carbón
L61-MR1.T2:PV	EA	RTD	Temperatura rodillo interior 1 molino carbón
L61-MR1.T3:PV	EA	RTD	Temperatura rodillo exterior 2 molino carbón
L61-MR1.T4:PV	EA	RTD	Temperatura rodillo interior 2 molino carbón
L61-MR1.T5:PV	EA	RTD	Temperatura dentro del reductor del molino carbón
L61-MR1.T6:PV	EA	RTD	Temperatura gases de entrada molino carbón
L61-MR1.T7:PV	EA	RTD	Temperatura gases de salida molino carbón
L61-MR1.P1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Presión diferencial gases de entrada a molino carbón
L61-MR1.P2:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Presión diferencial gases de salida a molino carbón
L61-MR1.N1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Vibraciones en reductor molino carbón

Tabla 2.24. Señales asociadas a la estructura del molino de carbón L61-MR1.

La Figura 2.13 muestra una fotografía de la estructura principal de la molienda de carbón. En primer término y en color azul se encuentra situado el motor auxiliar del accionamiento principal. Este motor se acoplará al eje del reductor del molino y se accionará sólo durante tareas de mantenimiento o limpieza del mismo. Como se explicó anteriormente, también será utilizado para la descarga de material del molino en el caso de un paro intempestivo de la instalación. Ante esta situación podría darse la eventualidad de que al intentar arrancar nuevamente el accionamiento principal del molino dispararan las protecciones del arrancador electrónico por sobreintensidad.



Figura 2.13. Detalle de la estructura principal del molino de carbón.

En segundo plano, detrás del motor auxiliar del accionamiento principal, se encuentra el motor principal del molino y detrás de este está situado el reductor que será el encargado de mover la mesa giratoria. El conducto inclinado que aparece desde la parte derecha de la imagen y conecta con la parte inferior de la estructura es el que conduce los gases calientes desde la torre del intercambiador del horno. La estructura con forma de tolva en la zona central de la imagen muestra el cuerpo principal del molino. En su interior están situados los rodillos, la mesa giratoria y el separador. El conducto que conecta con el cuerpo principal del molino por la parte izquierda de la imagen es por el que se alimenta con material bruto, no molido, al molino y el conducto vertical situado encima del cuerpo principal es por donde sale el material fino, ya molido, hacia el filtro principal donde será capturado y posteriormente enviado hasta el silo de almacenaje.

Inmediatamente después de arrancado el motor principal será necesario dar alimentación de producto al molino para evitar tener un tiempo excesivo trabajando los rodillos directamente contra la pista. Para ello arrancarán la válvula rotativa L61-VR1.M1 y el transportador de placas L61-TP1.M1. La función principal de la válvula rotativa es la de hacer de barrera física entre el interior y el exterior del molino. De este modo se elimina la posibilidad de entrada de aire frío al sistema a través del canal de alimentación de material. La válvula rotativa tendrá asociada una señal de control de giro L61-VR1.M1:PLS que se activará ante un atranque del cuerpo de la esclusa, parando dicha máquina antes de que dispare por protecciones. La Tabla 2.25 muestra el listado de señales asociadas a este accionamiento.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-VR1.M1:K	ED	1	Protecciones válvula rotativa alimentación molino carbón
L61-VR1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha válvula rotativa alimentación molino carbón
L61-VR1.M1:D	SD	0	Orden de marcha válvula rotativa alimentación molino carbón
L61-VR1.M1:G	ED	0	Marcha local válvula rotativa alimentación molino carbón
L61-VR1.M1:S	ED	1	Paro local válvula rotativa alimentación molino carbón
L61-VR1.M1:U	ED	1	Seccionador válvula rotativa alimentación molino carbón
L61-VR1.M1:PLS	ED	0/1	Control de giro válvula rotativa alimentación molino carbón

Tabla 2.25. Señales pertenecientes al accionamiento L61-VR1.M1.
Válvula rotativa de alimentación al molino de carbón.

El transportador de placas de alimentación al molino L61-TP1.M1 estará gobernado mediante un variador de frecuencia y será el encargado de aumentar o disminuir la cantidad de material que se introduce al molino. Esta máquina contará con las señales propias de un accionamiento gobernado mediante variador de frecuencia y tendrá instalado además un sensor de proximidad inductivo en el eje opuesto al accionamiento que hará las veces de control de giro. Esta señal de control de giro L61-TP1.M1:PLS actuará en el hipotético caso de un atranque en la estructura de las placas o una rotura en las mismas. En la Tabla 2.26 se muestran las señales vinculadas a esta máquina.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-TP1.M1:K	ED	1	Protecciones transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.M1:F	ED	1	Fallo variador transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.M1:D	SD	0	Orden de marcha transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.M1:G	ED	0	Marcha local transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.M1:S	ED	1	Paro local transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.M1:U	ED	1	Seccionador separador molino carbón
L61-TP1.M1:DEC	ED	0	Bajar velocidad local transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.M1:INC	ED	0	Subir velocidad local transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.M1:PLS	ED	0/1	Control de giro transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.J1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Intensidad transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.S1:PV	EA	> 4 mA < 20mA	Respuesta velocidad transportador de placas bajo silo de carbón bruto
L61-TP1.S1:SP	SA	> 4 mA < 20mA	Set Point velocidad transportador de placas bajo silo de carbón bruto

Tabla 2.26. Señales pertenecientes al accionamiento L61-TP1.M1.
Transportador de placas bajo el silo de carbón bruto.

La última de las máquinas en arrancar de toda la instalación será el rascador de material L61-RD1.M1. Esta máquina se encontrará situada justo debajo del transportador de placas y su función será la de recuperar el posible material derramado por el transportador e introducirlo en el molino. Su arranque será de forma discontinua siguiendo una cadencia entre tiempos de marcha de 5 minutos y tiempos de paro de 15 minutos. Estos tiempos han sido lo suficientemente ajustados de manera empírica para que se pueda evacuar el material derramado por el transportador de placas con el mínimo tiempo de funcionamiento del rascador. Como en el caso del transportador de placas, el rascador de material también tendrá asociada una señal de control de giro L61-RD1.S1:PLS que actuará en el hipotético caso de un atasco o rotura en la cadena del rascador. En la Tabla 2.27 se muestran las señales vinculadas a esta última máquina.

Señal	Tipo	OK	Descripción
L61-RD1.M1:K	ED	1	Protecciones rascador de cadena alimentación molino carbón
L61-RD1.M1:R	ED	0	Respuesta de marcha rascador de cadena alimentación molino carbón
L61-RD1.M1:D	SD	0	Orden de marcha rascador de cadena alimentación molino carbón
L61-RD1.M1:G	ED	0	Marcha local rascador de cadena alimentación molino carbón
L61-RD1.M1:S	ED	1	Paro local rascador de cadena alimentación molino carbón
L61-RD1.M1:U	ED	1	Seccionador rascador de cadena alimentación molino carbón
L61-RD1.M1:PLS	ED	0/1	Control de giro rascador de cadena alimentación molino carbón

Tabla 2.27. Señales pertenecientes al accionamiento L61-RD1.M1.
Rascador de cadena bajo el alimentador de placas del molino de carbón.

3

Tipos de arrancadores

La gran mayoría de los motores utilizados en la industria pesada son del tipo de jaula de ardilla. En este tipo de motores el flujo rotatorio creado por el estator atraviesa las barras del rotor e induce un voltaje en ellas.

La construcción del rotor se realiza de forma que los anillos extremos ponen en cortocircuito las barras del mismo. Esto provoca que el voltaje inducido haga fluir una gran corriente que puede llegar a ser de cientos de amperios dependiendo de la potencia de la máquina.

Los conductores que transportan corriente se encuentran en la trayectoria del flujo creado por el estator, así que todos experimentan una fuerte fuerza mecánica. Estas fuerzas producen un par o momento de torsión que tienden a arrastrar el rotor en la misma dirección del campo rotatorio [7].

En la instalación del molino de carbón en estudio se comprueba que todos y cada uno de los motores implicados son de este tipo.

El método de arranque de los motores podrá variar mucho de un accionamiento a otro. Como ya se explicó en la sección anterior descripción del proceso, se podrán encontrar arranques directos, reversibles, arrancadores suaves y variadores de frecuencia.

3.1. Arranque directo

El tipo de protección que debe de elegirse para proteger los motores es muy importante. Una buena protección y sobre todo un buen ajuste de la misma pueden evitar averías graves en las máquinas, así como daños a las personas.

Los motores de potencia inferior a 50 kW son arrancados de forma directa, es decir, la orden de marcha que da el sistema de control actúa directamente sobre la bobina del contactor que lo alimenta. El contactor elegido debe ser tal que pueda soportar el paso de corriente demandada por el motor que debe actuar. Por otro lado, las protecciones, tanto térmica como de cortocircuito, deben ajustarse de acuerdo con las características específicas de cada máquina. La instalación eléctrica de potencia debe haber sido diseñada de tal forma que el arranque directo de estos motores no suponga una caída en la tensión de red que pudiera afectar a otras máquinas más sensibles. Este tipo de arranque es simple y barato. La principal desventaja es la alta corriente que se demanda

en los primeros instantes del arranque, la cual es de 5 a 6 veces la corriente nominal a plena carga.

3.2. Arranque a través de arrancador suave

El accionamiento principal del molino se trata de un motor de 200 kW de potencia. Al tratarse de un equipo de cierta envergadura la forma de arrancarlo no podrá ser en directo, ya que el pico de intensidad que se produciría durante los primeros instantes después del arranque sería tal que haría disparar las protecciones eléctricas de la máquina. Como la velocidad del motor principal del molino se mantendrá fija durante su funcionamiento, no se hace necesaria la instalación de un variador de frecuencia, dispositivo que se explicará más adelante. Por el contrario, un arrancador electrónico también conocido como arrancador suave, será el dispositivo utilizado para arrancar esta máquina. Se trata de un dispositivo electrónico que es capaz de ir aumentando de manera progresiva la tensión que se suministra al motor durante los primeros instantes tras la orden de marcha desde el sistema de control (ver Figura 3.1). De este modo se consigue un arranque de la máquina sin los temibles picos de intensidad iniciales.

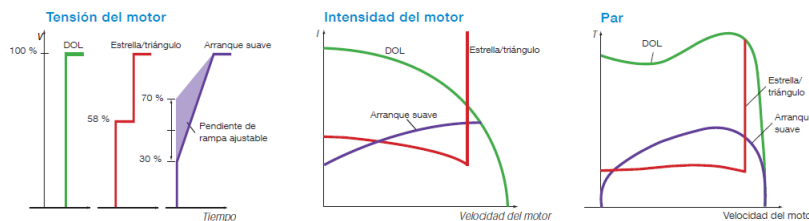


Figura 3.1. Gráficas que muestran las diferencias básicas entre el arranque directo a línea (DOL, por sus siglas en inglés), el arranque en estrella-triángulo y el arranque suave, atendiendo a las variables tensión del motor (V), intensidad del motor (I) y par del motor (T).
Cortesía de ABB® [8].

Actualmente en el mercado se pueden encontrar arrancadores suaves de las principales marcas de productos industriales con capacidad para acelerar motores de entre 1kW y 800kW. En concreto la gama PSTB® de la marca ABB® incorpora un contactor interno de cortocircuito de las fases. Durante el tiempo de arranque programado el arrancador suave irá proporcionando gradualmente más tensión al motor. Una vez terminado el tiempo de arranque, un contactor de potencia interno se cerrará dejando el motor alimentado directamente desde línea. La Figura 3.2 muestra el esquema interno de este arrancador.

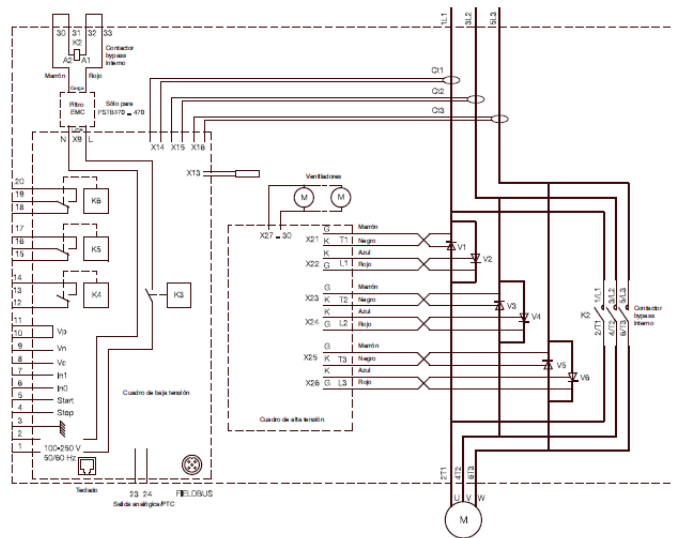


Figura 3.2. Esquema interno de un arrancador suave ABB® de la gama PSTB®. La gran ventaja que presentan es la incorporación de un contactor de potencia interno que actúa una vez superado el tiempo de aceleración. Cortesía de ABB®.

3.3. Arranque a través de variador de frecuencia

En los procesos industriales es frecuente encontrar máquinas que trabajan a distintas velocidades dependiendo de un gran número de factores distintos, como las condiciones del proceso o las características del producto entre otros. En la industria cementera es habitual el uso de variadores de frecuencia para acometer esta tarea. Se trata de dispositivos electrónicos capaces de variar la frecuencia de la tensión a su salida entre 0 Hz y la tensión de entrada, 50 Hz. En la actualidad es posible encontrar en el mercado variadores de frecuencia que pueden dar una tensión de salida con frecuencias de hasta 200 Hz. Las potencias que soportan van del rango de los vatios hasta los miles de kilovatios, existiendo variadores para baja y media tensión.

La Figura 3.3 muestra un variador de frecuencia ABB® de la gama ACS 800® de 200 kW de potencia para alimentar motores trifásicos de corriente alterna a 400 V con posibilidad de variar la frecuencia entre 0 y 200 Hz. Dispone de entradas y salidas analógicas y digitales que pueden ser programadas para desempeñar distintas tareas.



Figura 3.3. Variador de frecuencia para el control de velocidad del ventilador del filtro principal del molino de carbón.

La instalación cuenta con cuatro máquinas que necesitan ser controladas en velocidad. Por un lado, se encuentra la bomba de inyección del sistema hidráulico L61-UH1.M1. Aquí la función principal del variador de frecuencia es la de, además de asegurar un arranque muy lento del motor, mantener una velocidad del motor a un cuarto de la nominal. De esta manera se conseguirá un control muy estable, aunque algo lento, de la presión de los rodillos sobre la mesa giratoria. Por otro lado, el motor del transportador de placas de alimentación al molino L61-TP1.M1 estará también gobernado por un variador de frecuencia. Así se podrá variar la cantidad de material bruto que se introduce en el molino en todo momento. El tercer accionamiento será el ventilador del filtro principal L61-VE1.M1. De este modo se tendrá un control muy fiable de la depresión de aire dentro del sistema y se podrá regular la cantidad de gases circulantes. Finalmente, el separador dinámico L61 -SP1.M1 será la última máquina gobernada por este tipo de arrancador. Modificando su velocidad se obtendrán granulometrías del material molido distintas.

El control de la velocidad de estos accionamientos se lleva a cabo mediante cuatro variadores de frecuencia ACS 800®. Es siempre preferible que los variadores superen la potencia de los motores que deben controlar. La razón es que ante una demanda puntual en amperios por parte del motor, aquel pueda soportarla sin producir un disparo por sobrecarga. Es por esto que el variador instalado que gobierna el ventilador principal del molino es de una potencia 40 kW superior al motor. Es necesario, no obstante, programar muy bien los límites de velocidad e intensidad máximos en el variador para evitar averías en el motor.

4

Instrumentación de campo

En las instalaciones industriales el uso de instrumentación de campo está muy extendido. Dependiendo del proceso a controlar será necesaria la implantación de distintos elementos de medición y señalización. Entre los más usuales que se pueden encontrar en la industria cementera se encuentran los medidores de presión, incluyendo presión diferencial y depresión, los medidores de temperatura, PT100 y termopares, los medidores de nivel analógicos y digitales y los medidores de vibraciones. La instalación en estudio necesita de la implantación de algunos elementos de instrumentación de campo necesarios para el óptimo control del proceso. Algunos de estos elementos son además necesarios y obligatorios desde el punto de vista de seguridad para las personas. Se detallarán a continuación.

4.1. Seccionador de campo

El principal elemento de seguridad implantado en una instalación industrial es el seccionador de campo. La principal función de este dispositivo es la apertura física de la alimentación eléctrica al accionamiento. Además, debe ser posible enclavar mecánicamente esta apertura, lo normal es hacerlo mediante un candado. Siempre que un operario vaya a trabajar en una máquina deberá pedir permiso a sala de control antes de abrir el seccionador y colocar su candado.

La Figura 4.1 muestra el modelo de seccionador de campo instalado en el conjunto de máquinas que conforman la instalación del molino de carbón. La principal ventaja de este modelo de la marca CEFEM® [9] es la posibilidad de comprobar la apertura de las tres fases de alimentación de manera visual a través de una ventana de inspección. Otra gran ventaja es su robustez, con caja de acero y cierre hermético, impide la entrada de polvo en el interior y ofrece una mayor protección contra golpes.



Figura 4.1. Seccionador de campo de la marca CEFEM®.

Al seccionador de campo siempre se le añaden al menos dos pulsadores. Uno de paro (color rojo) y otro de marcha (color verde). El pulsador rojo estará siempre habilitado, es decir, en cualquier momento alguien puede pulsarlo y si la máquina está en funcionamiento la detendrá. El contacto de esta señal es un normalmente cerrado. De esta forma ante una rotura en el cable de esta señal el sistema de control actuará como si se hubiera pulsado. De otro modo, si fuera un contacto normalmente abierto y se rompiera el cable, el sistema de control no respondería cuando alguien actuara sobre el pulsador. Por el contrario, el pulsador verde de marcha estará siempre deshabilitado, será necesario ponerse en contacto con sala de control para que desde allí lo habiliten. El panelista habilitará el modo local de la máquina y en ese momento será posible arrancarla desde campo. Este modo local es el utilizado durante las labores de mantenimiento de la instalación. Los otros dos pulsadores que nos encontramos sólo son instalados cuando la máquina en cuestión es variable en velocidad. Estarán sólo habilitados en modo local y desde ellos podrá subirse o bajarse la velocidad del accionamiento una vez arrancado.

El seccionador de campo debe estar construido de forma que pueda soportar una apertura en carga. Aunque la forma correcta de proceder ante una emergencia sería actuar sobre el pulsador de paro, no cabe duda de que el operador que se encuentre más cercano detendrá la máquina de forma instintiva maniobrando directamente la palanca de apertura. Por eso es muy importante elegir bien el modelo de seccionador dependiendo de la potencia del motor que alimente. Esta palanca actúa a su vez sobre un juego de contactos. Un contacto normalmente cerrado es utilizado como señalización al sistema de control de la posición del seccionador. Si el contacto pasara al estado de abierto el sistema de control daría orden de paro sobre el motor.

4.2. Medición de temperatura

Como se ha explicado anteriormente, la medición de temperatura en distintos puntos de la instalación es un requisito fundamental para el control del proceso. En algunos puntos se hace necesario un registro continuo de la temperatura en el sistema de control y en otros es suficiente con la activación de una señal que indique que se ha superado un umbral establecido. La medición en continuo de temperatura se lleva a cabo mediante un dispositivo analógico conocido comúnmente como PT100. Se trata de un detector de temperatura resistivo, resistance temperature detector (RTD) de sus siglas en inglés. Este elemento es capaz de variar su valor de resistencia óhmica, de forma muy lineal, dependiendo de la temperatura a la que se encuentre. Este tipo de instrumentación es muy usado en la industria cementera, ya que existen modelos con rangos de medida hasta los 600 °C. El tipo de PT100 más utilizado es el de 2 hilos más uno de compensación para reducir los efectos del cable desde la sonda hasta el punto de medida. La Figura 4.2 muestra el detalle de la sonda de temperatura PT100 instalada en el circuito de lubricación del reductor. Otra sonda de este tipo está colocada en el interior del propio reductor del molino y monitoriza constantemente la temperatura dentro del mismo.



Figura 4.2. Medidor de temperatura resistivo comúnmente conocido como PT100, ya que su valor de resistencia es de aproximadamente 100 ohmios cuando se encuentra midiendo temperaturas alrededor de 0°C.

Con una medición en continuo de la temperatura en un punto es más que suficiente para definir valores de alarma mínimos y máximos de temperatura, pero en el caso del engrase del reductor, debido al coste de la máquina a proteger, existe otro instrumento adicional de medida de temperatura instalado. Se trata de un termómetro que mide la temperatura del aceite de engrase y que posee además dos contactos eléctricos regulables localmente, uno de mínima temperatura y otro de máxima. Estos contactos se activarán si la temperatura del aceite alcanza alguno de los valores prefijados. La Figura 4.3 muestra el detalle del termómetro instalado. Las agujas de color rojo pueden fijarse como niveles extremos de temperatura y activarán un contacto cuando la temperatura de la sonda (aguja de color negro) alcance los valores fijados.



Figura 4.3. Termómetro bimetálico de la marca *Wika*® [10].

4.3. Medición de presión para líquidos

En el caso del circuito de engrase del reductor del molino de carbón, además de la medición de la temperatura del aceite de engrase, también se controla la medición de la presión del aceite a la salida de las bombas L61-EL1.M1 y L61-EL2.M1. Podría darse el caso de que, aún funcionando eléctricamente, la bomba seleccionada sufriera algún tipo de anomalía en el cuerpo de la misma y provocara una caída en la presión. También podría darse la eventualidad de una rotura en el circuito y la consiguiente pérdida de aceite. En ambos casos la cantidad de aceite circulante a través del reductor, y por ende la presión en el circuito, se reduciría a valores peligrosos. Por el contrario, un valor de presión de aceite demasiado alto podría ser consecuencia de un taponamiento en el circuito o de un grado de suciedad muy elevado en los filtros instalados, lo cual significaría nuevamente un aporte de aceite al reductor reducido. Para alertar de estas dos eventualidades existe instalado un medidor de presión a la salida de las bombas. Este medidor de presión, como en el caso del medidor de temperatura, dispone de dos niveles ajustables de alarma. En la instalación en estudio los niveles extremos están ajustados en valores de 2,5 bares y 5 bares de presión. La Figura 4.4 muestra el detalle de un medidor de presión con ajuste manual de los valores mínimo y máximo.



Figura 4.4. Medidor de presión con contactos regulables de valor mínimo y máximo.

Otra medición de presión para líquidos muy importante se lleva a cabo dentro del sistema hidráulico del molino de carbón. Como se explicó anteriormente, es el encargado de mantener una presión constante de los rodillos del molino contra la mesa giratoria. Se trata de un circuito cerrado en el cual una bomba inyectora inyecta aceite hidráulico desde un depósito hasta los rodillos o ruedas de molturación. La presión del aceite hidráulico debe estar monitorizada en todo momento. Para llevar a cabo esta tarea se utiliza un medidor de presión analógico. En concreto, la firma Endress + Hauser® [11] posee, entre su amplio catálogo de equipos de instrumentación, un medidor de presión (ver Figura 4.5) para líquidos con un rango de trabajo de hasta 700 bares de presión y con lazo de corriente a dos hilos.



Figura 4.5. Medidor de presión para líquidos Endress + Hauser®.

4.4. Medición de flujo para líquidos

En el apartado anterior se ha explicado cómo podría darse el caso de un aporte insuficiente de aceite de engrase en el reductor. Con la medición de presión de aceite a la salida de las bombas se está realizando una medida indirecta de la cantidad de aceite suministrado. Para tener una medida directa es necesario medir la cantidad de flujo de material circulante. Esta medida se lleva a cabo mediante un nivel de flujo para líquidos. Este instrumento está instalado a la salida de las bombas y aporta una medida visual de la cantidad de aceite en litros/hora que circulan por el circuito. Dispone además de dos contactos ajustables en todo el rango de medida para delimitar los niveles mínimos y máximos de caudal. Una activación del nivel mínimo de caudal podría ser consecuencia de un fallo en la bomba de impulsión, mientras que una activación del nivel máximo podría ser consecuencia de una rotura en el circuito de circulación de aceite o de una viscosidad demasiado baja del aceite, con la consiguiente pérdida en sus propiedades. La Figura 4.6 muestra el detalle del medidor de flujo instalado de la marca *Eletta*® [12] con contactos eléctricos ajustables.



Figura 4.6. Medidor de flujo para líquidos con contactos de máximo y mínimo. Ajustable entre 1,5 y 30 l/min. Cortesía de *Eletta*®.

4.5. Nivel de boya para líquidos

El sistema hidráulico del molino posee un tanque de almacenamiento del aceite hidráulico desde el cual es impulsado hasta los rodillos. La cantidad de aceite hidráulico dentro de este depósito deberá estar siempre por encima de un nivel mínimo. Si hubiera una rotura en alguna de las tuberías del circuito, la bomba de impulsión del aceite hidráulico continuaría inyectando aceite hacia los rodillos y si no existiera un nivel dentro del depósito que diera una alarma al sistema de control, todo el aceite del depósito terminaría perdiéndose. Un simple nivel de boya provocará un cambio en el estado de un contacto eléctrico cuando la cantidad del líquido en el que está sumergido baje de un cierto valor. Ante esta eventualidad, el sistema de control mostrará una alarma y provocará un paro de la bomba de impulsión del aceite hidráulico. La Figura 4.7 muestra el detalle de un nivel de boya.



Figura 4.7. Medidor de nivel de boya para líquidos.

4.6. Medición de presión para gases

Los filtros de mangas se utilizan en la industria para la eliminación del polvo generado durante el proceso. En la instalación de estudio, el polvo generado dentro del silo de carbón molino y el material triturado por el molino de carbón son capturados por sendos filtros de mangas.

La presión del aire de limpieza debe ser monitorizada por el sistema de control. Si esta presión cayera por debajo de un cierto valor, el polvo no sería eliminado de manera eficiente de las mangas, lo que al cabo de un tiempo provocaría el colapso del filtro. Para evitar esta situación se utiliza un presostato para indicar un valor mínimo de presión de aire (ver Figura 4.8). Su ubicación física estará siempre junto al calderín de aire comprimido del propio filtro. Cuando esta presión, medida en bares, caiga por debajo de un cierto valor, el sistema de control generará una señal de aviso alertando al operador de sala de control. Será este quien decida cómo actuar a partir de ese momento.

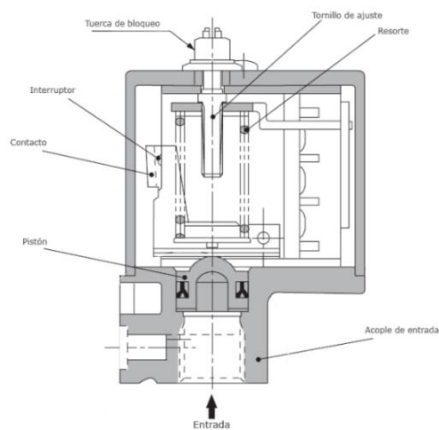


Figura 4.8. Diagrama interno de un presostato.

Un presostato no es más que un sistema mecánico regulable mediante un tornillo. Este tornillo está sujeto mediante un muelle que es el que presiona sobre la entrada del aire a presión. Cuando la presión del aire esté por encima de la presión ejercida por el muelle se actuará un elemento mecánico que hará a su vez cambiar de posición un contacto eléctrico. Este contacto eléctrico se cableará en posición de normalmente cerrado.

Dentro del conjunto que conforma la estructura de molienda hay instalados dos medidores de presión diferencial, uno a la entrada del molino y otro a la salida del mismo. Con la primera medida se puede saber de manera indirecta la cantidad de gases calientes que desde la torre están entrando al molino. Por su parte, la medida de presión diferencial a la salida del molino juega un papel fundamental a la hora de controlar el proceso de molienda. Mediante este registro se controla el grado de llenado de material dentro de la estructura de molienda.

La medición de estos valores se lleva a cabo mediante dispositivos electrónicos específicamente diseñados para ello. La firma *Endress + Hauser*® posee dentro de su extenso catálogo el modelo de medidor de presión diferencial *Deltabar*® PMD75. Este modelo es programable en su rango de medida y su funcionamiento es mediante lazo cerrado de corriente de 4 a 20 mA. En la Figura 4.9 se muestra el detalle de este dispositivo.



Figura 4.9. Medidor de presión diferencial modelo *Deltabar*® PMD75.
Cortesía de *Endress+Hauser*®.

4.7. Medición de nivel por peso

La medición de nivel en silos y tolvas ha sido un auténtico quebradero de cabeza durante muchos años en las instalaciones industriales. Fue durante los primeros años de la década pasada cuando empezaron a aparecer los primeros medidores de nivel sin contacto eficientes y de coste moderado. En la actualidad se pueden encontrar

dispositivos de medición para silos de más de 40 metros de altura y almacenaje de cualquier tipo de material a un precio realmente bajo y con un grado de fiabilidad muy alto.

Una solución efectiva para medir el grado de llenado en tolvas y silos con estructuras metálicas de apoyo es la medición del peso de toda la estructura. A través de esta medida se puede deducir el grado de llenado siempre y cuando no cambie sustancialmente el tipo de material a almacenar. Para obtener esta medida se instalan células de carga en los pilares que soportan la estructura. En la Figura 4.10 se muestra el detalle de una de estas células de la firma Schenck Process® [13]. El funcionamiento de estos dispositivos está basado en la conversión de una fuerza que deforma una galga extensiométrica en una señal eléctrica, proporcionada en milivoltios por la propia galga. Cuantos más pilares sean pesados mayor será el grado de fiabilidad de la medida. Si existe más de una célula instalada deberá instalarse un dispositivo sumador y finalmente un conversor de señal para transmitir el peso al sistema de control en miliamperios. Este conversor podrá ser ajustado para que suministre una salida de 4 mA cuando la instalación esté totalmente vacía y 20 mA cuando esté totalmente llena de material. Este es el sistema que se ha utilizado para medir de forma indirecta el grado de llenado del silo de carbón molido. Se tratará de una señal de entrada analógica al sistema de control que proporcionará 4 mA cuando el silo esté totalmente vacío y 20 mA cuando esté totalmente lleno.



Figura 4.10. Detalle de una célula de peso. Con ellas es posible medir el peso de estructuras soportadas mediante vigas metálicas. Cortesía de Schenck Process®.

4.8. Medición de nivel por contacto

El llenado máximo de las tolvas y los silos debe ser controlado en todo momento por el sistema de control. Si no se tuviera esta medida podría ocurrir un derrame de material al exterior de la instalación o un colapso del transporte inmediatamente anterior, lo que podría ocasionar daños a la instalación e incluso a las personas. Para evitar estas situaciones de riesgo se instalan sensores que se activen cuando entren en contacto con el material que se está almacenando. Estos dispositivos, por lo general, pueden ser

regulados en sensibilidad para evitar falsos positivos. Existen multitud de modelos y marcas diferentes en el mercado que cumplen con esta función, pero es muy importante elegir el que más se ajuste a las características del material que debe detectar. Dentro de la amplísima gama existente en el mercado lo más usuales son los capacitivos que pueden detectar cualquier tipo de material y los inductivos, que únicamente pueden detectar materiales magnéticos.

Utilizar cualquiera de estos dos tipos para medir el máximo llenado del silo de carbón molido sería un error, ya que siempre estarían detectando material. Tan solo el grado de polvo en suspensión dentro del silo sería suficiente para activar el dispositivo. Por esta razón, el mejor modelo a utilizar es de tipo mecánico como el mostrado en la Figura 4.11. Se trata de un sistema que lleva incorporado un pequeño motor que hace girar un vástago, de longitud modificable, al que van unidas una o varias paletas. Cuando el material llega a la altura de las paletas la resistencia que se ejerce en contra del movimiento del motor hará que este se frene y deje de girar. Esto provocará, a su vez, el cambio de estado de un contacto eléctrico que será cableado como alarma de nivel de llenado máximo del silo al sistema de control.



Figura 4.11. Interruptor de nivel de paleta rotativa *Endress + Hauser®*.

4.9. Sensores de proximidad inductivos

Los sensores de proximidad inductivos pueden utilizarse para indicar las posiciones extremas de máquinas que se desplazan. Estos dispositivos generan un campo magnético que al ser interferido por la presencia de un metal provoca un cambio en su estado. La ausencia de mecanismos mecánicos reduce significativamente la probabilidad de fallo además de mostrar un comportamiento inmune al polvo y a la grasa. Algunos dispositivos como el mostrado en la Figura 4.12 son programables, es decir, pueden activarse en presencia o en ausencia de metal y funcionan solamente a dos hilos en

corriente alterna o continua. Su cabezal inductor es rotatorio lo que le confiere mayor versatilidad a la hora de su montaje. En concreto, en la instalación del molino de carbón, estos sensores se utilizan para indicar al sistema de control las posiciones extremas de las compuertas L51-PC1.M1, L51-VQ1.M1, L51-VQ2.M1, L61-PL1.M1 y L61-VQ1.M1.



Figura 4.12. Sensor de proximidad inductivo *Schneider Electric*®.

Otra de las funciones que se les puede dar a los sensores de proximidad inductivos es la de utilizarlos para detectar un posible fallo en el giro de una máquina. De este modo el sistema de control tendrá información de que la máquina que está accionando el motor se encuentra efectivamente en movimiento.

Un controlador de giro debe actuar antes de que el accionamiento quede totalmente bloqueado. Por ejemplo, en el caso del transportador de placas, del tornillo sinfín, del rascador de finos o de las esclusas rotativas, puede darse el caso de que, debido a un atranque, la velocidad de giro del accionamiento baje repentinamente. Ante esta situación el control de giro debe activarse y dará una alarma al sistema de control y este mandará parar la máquina. De este modo se evitará un disparo de las protecciones de la misma. Los controles de giro colocados en los accionamientos movidos por correas advierten además de la rotura de las mismas. Si este dispositivo no se instalara podría darse el caso de que se partieran las correas y nadie se percataría del problema pudiendo provocar daños mayores en la instalación.

Si la velocidad de giro de la máquina es relativamente lenta, el sistema de control podrá detectar los pulsos recibidos en cada giro. En este caso la utilización de cualquier detector inductivo sería factible. Es recomendable utilizar detectores alimentados a 24 Vdc y a dos hilos. El modelo XS630B4MAL2 de la firma *Schneider Electric*® [14] cumple de sobra con este cometido. Funciona tanto con corriente alterna 220 Vac como con corriente continua 24 Vdc, está construido en acero, tiene conexión a 2 hilos y detectan metal a una distancia de hasta 17 mm. En la instalación en estudio este tipo de sensor es usado como control de giro de válvulas rotativas, tornillos sinfín, transportadores de placas y rascadores de finos.

En cambio, si la velocidad de giro de la máquina es muy elevada, el sistema de control no podrá detectar todos los pulsos recibidos y es posible que en algunos casos provoque falsos positivos, es decir, se active la alarma de control de giro. Para evitar esta situación se instalan sensores de proximidad inductivos regulables. Estos dispositivos tienen la particularidad de ser ajustables dependiendo del número de pulsos por minuto que tengan que detectar. Se alimentan a 24 Vdc y tienen conexión a 3 hilos, dos de alimentación y un tercero de retorno al sistema de control que se activará cuando se haya regulado al número de pulsos que debe detectar. El modelo XSAV02373 de *Schneider Electric*® (ver Figura 4.13) es capaz de detectar hasta 3000 cambios de estado por minuto y es el utilizado para detectar el giro del ventilador del filtro L61-VE1.M1.



Figura 4.13. Sensor de proximidad inductivo modelo XSAV02373 de la marca *Schneider Electric*® utilizado como control de giro. Rango de frecuencia ajustable entre 120 y 3000 r.p.m.

4.10. Sensores de posicionamiento inductivos

En algunas de las máquinas implementadas en instalaciones industriales es necesario conocer en todo momento la posición en la que se encuentran. En el caso del molino de carbón, las compuertas L51-VQ1.M1, L51-VQ2.M1 y L61-VQ1.M1 necesitan ser accionadas de manera que en todo momento se conozca el grado de apertura de las mismas. Para ello, además de contar con sensores de proximidad inductivos para informar de las posiciones extremas, cuentan con un sensor de posicionamiento inductivo solidario al eje de la máquina. Este dispositivo, en concreto el modelo PMI360D-F130-R2-V15 de la marca *Pepperl+Fuchs*® [15], es capaz de suministrar una señal de 4 a 20 mA regulable para posiciones angulares de 0 a 360° (ver Figura 4.14).



Figura 4.14. Sensor de posicionamiento inductivo modelo PMI360D-F130-R2-V15 de la marca *Pepperl+Fuchs*®. Alimentación a 24 Vdc y salida de 4 a 20 mA regulables entre 0 y 360°.

4.11. Medición de nivel de vibración

Las máquinas de cierta envergadura están sometidas a grandes tensiones y esfuerzos mecánicos. Es por ello que el control de la vibración se hace imprescindible como elemento de seguridad con el fin de evitar daños importantes a la instalación y a las personas. En ventiladores y molinos de cientos e incluso miles de kilovatios de potencia, como los utilizados en la industria del cemento, la medición de la vibración puede evitar averías importantes y de alto coste de reparación.

En la instalación en estudio, el reductor del molino de carbón tiene instalado un sensor que mide el grado de vibración en mm/s. Esta medida podrá evitar averías importantes en la pista del molino, ya que el grado de vibración en el reductor aumentará cuando la cantidad de material dentro del molino sea muy baja o cuando exista algún problema en alguno de los rodillos.



Figura 4.15. Sensor de vibraciones de la marca *Prüftechnik*®. Características: comunicación a 2 hilos 4-20mA, 10 mm/s, 10 Hz - 1 kHz.

El sensor que se utiliza es de la marca *Prüftechnik*® [16] (ver Figura 4.15). Este tipo de sensor ha evolucionado mucho en los últimos años. A diferencia de los antiguos y caros sistemas de captación de vibración que necesitaban de una central de recogida de datos alimentada externamente, los nuevos sensores pueden dar señal de proceso directamente al sistema de control. En concreto el modelo *Vibrotector*® está basado en el protocolo de comunicación HART a dos hilos, por lo que su instalación es tan sencilla como colocarlo en el lugar a medir y llevar los dos hilos de señal a una entrada analógica activa del sistema de control.

5

Señales utilizadas y comunicaciones

Los sistemas de control de instalaciones industriales de cierta envergadura deben diseñarse de tal manera que el operador de sala de control tenga la mayor cantidad de información posible a la hora de manejarlo. Cuanto mayor sea la información que proporcione el sistema de control, mayor será la eficiencia a la hora de operar la planta, el tiempo en la resolución de averías disminuirá y la producción, por ende, aumentará.

Dependiendo de la máquina a monitorizar, el sistema necesitará distintas señales de control, siendo muchas de ellas comunes a todos los accionamientos que intervienen. A continuación, se expondrán estas señales agrupadas según tipo de motor.

5.1. Motor normal

Se define un motor normal como aquel que se arranca de forma directa mediante la acción de un contactor. Este tipo de arranque es el más utilizado en aquellos accionamientos que funcionarán a su velocidad nominal y en un sólo sentido de rotación.

5.1.1. Orden de marcha

Como su propio nombre indica, es la orden que libera el sistema de control para poner en marcha una máquina del proceso. Se trata de una salida digital que proporciona una tensión de 24 Vdc y que es utilizada para activar la bobina de un relé de mando. Este relé de mando cerrará un contacto que será el que suministre una tensión de 220 Vac a la bobina del contactor que alimenta al motor, poniéndose este en marcha.

5.1.2. Respuesta de marcha

Cuando el contactor que alimenta el motor ha sido accionado tras llegarle tensión a su bobina, además de cerrar los tres contactos de potencia, cerrará además un contacto auxiliar. Este contacto auxiliar devolverá una señal de 24 Vdc al sistema de control. Por tanto, se trata de una entrada digital que informa al sistema de que efectivamente la máquina ha comenzado a girar después de recibir la orden de marcha. Si tras darse la orden de marcha el sistema de control no recibiera esta señal al cabo de unos breves instantes, se generaría una alarma de "fallo de respuesta" y se desactivaría la orden de marcha. Este tipo de fallo puede originarse cuando exista un problema en el contactor.

5.1.3. Protecciones

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, los motores deben estar protegidos contra posibles sobrecargas y sobreintensidades. Estas protecciones estarán vigilando continuamente el consumo del motor que protegen y actuarán en caso de darse una de las dos contingencias anteriores. Si las protecciones de un motor se disparasen, aparte de abrirse el circuito de alimentación al motor, se mandaría una señal al sistema de control advirtiéndole de esta eventualidad. Ante esta situación el sistema de control generaría una alarma y desactivaría la orden de marcha del motor. Se trata por tanto de una entrada digital a 24 Vdc al sistema de control. Los contactos de los relés térmicos y de sobreintensidad se cablearán en serie y utilizando los del tipo normalmente abiertos. Esto quiere decir que en condiciones de uso estarán cerrados, dando un uno lógico al sistema de control hasta que alguno de los elementos se dispare.

Las tres señales comentadas anteriormente son las que intervienen directamente en el centro de control de motores (CCM). A continuación, se explicarán cuáles son las señales de campo que intervienen en un motor de tipo normal.

5.1.4. Marcha local

En el apartado 4.1., dedicado a la instrumentación de campo, se explicaron cuáles eran los motivos principales para la colocación de los seccionadores de campo. Estos dispositivos llevan adosados una serie de pulsadores para poder accionar el motor en modo local. La marcha local se trata de una señal digital a 24 Vdc cableada a través de un contacto normalmente abierto. Cuando el operador de sala de control habilite el modo local en el sistema de control, este liberará una orden de marcha al motor cuando reciba un uno lógico por esta entrada.

5.1.5. Paro local

Esta entrada digital a 24 Vdc se cableará a través de un contacto normalmente cerrado. Es decir, el sistema de control estará siempre monitorizando un uno lógico en esta posición. Si en algún momento perdiera este uno lógico, debido al accionamiento del pulsador de paro, el sistema de control generaría una alarma de “paro local sin permiso” y desactivaría la orden de marcha de la máquina.

5.1.6. Seccionador

La palanca mecánica que abre las cuchillas de potencia del seccionador lleva acoplados una serie de contactos. Uno de ellos del tipo normalmente abierto se cableará al sistema de control como entrada digital a 24 Vdc. Esta entrada en condiciones de

trabajo estará dando un uno lógico al sistema de control. Si por cualquier motivo esta entrada pasara al estado de cero lógico el sistema de control generaría una alarma de “seccionador abierto” y deshabilitaría la orden de marcha del motor en cuestión.

5.2. Motor reversible

La única diferencia entre un motor normal y un motor reversible, desde el punto de vista del sistema de control, es que contará con dos órdenes de marcha, izquierda (X) y derecha (Y), y por lo tanto también con dos respuestas de marcha. También deberá de tener dos marchas locales, tanto izquierda como derecha, ya que deberá ser posible accionar el motor en modo local en ambos sentidos.

5.3. Motor accionado mediante arrancador suave

Los accionamientos movidos a través de un arrancador suave diferirán de un motor normal en que la señal de fallo de arrancador deberá de cablearse como una entrada digital al sistema de control. Esta señal estará normalmente a uno lógico siempre que el dispositivo electrónico está listo para arrancar. Algunos arrancadores recientes también tienen la posibilidad de cablear una salida analógica para la medición de intensidad de consumo.

5.4. Motor de velocidad variable

Este tipo de accionamiento está controlado mediante un variador de frecuencia. Las señales que intervienen son, aparte de las correspondientes a un motor normal, todas aquellas que tengan relación con el variador en sí.

5.4.1. Fallo de variador

Se trata de una señal digital a 24 Vdc de entrada al sistema de control. Esta señal se cableará a través de uno de los relés de salida del variador, cuyo contacto se mantendrá cerrado siempre y cuando el variador se encuentre listo para arrancar. Si se produjera cualquier fallo en el variador el relé cambiaría de estado activándose una alarma en el sistema de control denunciando este evento. Al mismo tiempo el sistema de control eliminaría la orden de marcha de la máquina.

5.4.2. Set point velocidad

Mediante esta señal se podrá indicar al variador de frecuencia la velocidad que se quiere conseguir en el motor en cada momento. Se trata, por tanto, de una salida analógica de 4 a 20 mA del sistema de control cableada directamente a la entrada del variador de velocidad que se haya programado como referencia de velocidad.

5.4.3. Respuesta de velocidad

Al igual que ocurre con las órdenes de marcha y respuestas de marcha, que en este caso se cablearán directamente a una entrada y salida digital del variador de frecuencia, la respuesta de velocidad será una salida analógica de 4 a 20 mA cableada desde el variador de frecuencia hasta una entrada analógica del sistema de control. Esta señal deberá ser programada en el variador de frecuencia de forma que 4 mA correspondan a una velocidad de 0 rpm y 20 mA correspondan con la velocidad nominal del motor.

5.4.4. Subir velocidad local

La actuación en modo local de las máquinas accionadas mediante variador de frecuencia deberá permitir, además del arranque y paro de las mismas, la posibilidad de variar su velocidad. Esta es la razón por la que junto a los pulsadores de marcha y paro se instalarán dos pulsadores más, cableados a través de un contacto normalmente abierto, para el incremento y decremento de la velocidad. La señal de subir velocidad se tratará, por tanto, de una entrada digital a 24 Vdc al sistema de control. Cuando la máquina haya sido habilitada en modo local, el sistema de control incrementará el valor de la consigna de velocidad al variador de frecuencia de manera continua durante todo el tiempo que la señal de entrada subir velocidad esté a uno lógico.

5.4.5. Bajar velocidad local

Esta entrada digital a 24 Vdc hará exactamente lo contrario que la anterior.

5.4.6. Intensidad

Entre las muchas variables que puede monitorizar y medir un variador de frecuencia está el consumo instantáneo en amperios del motor. Esta señal será por tanto una entrada analógica de 4 a 20 mA al sistema de control, cableada directamente desde una salida analógica del variador de frecuencia.

5.4.7. Otras señales

En este apartado se engloban todas aquellas señales que pueden estar vinculadas a un accionamiento dependiendo del cual sea el tipo de máquina a mover. Estas señales, por lo general, dan información adicional al sistema de control del estado de la máquina en cuestión. En otras ocasiones se trata de señales de proceso que ayudan al panelista a operar la instalación de forma adecuada.

Entre estas señales se pueden encontrar aquellas que se actuarán cuando se supere el umbral de una cierta variable. Se tratará por tanto de entradas digitales al sistema de control y podrán definir límites máximos o mínimos. Mediante termostatos se obtendrán valores límite de temperatura, mediante presostatos se obtendrán valores límite de presión, mediante flujostatos se obtendrán valores límite de flujo y mediante niveles por contacto se podrán obtener valores límite de llenado. Dentro de este grupo también se encuentran las entradas digitales que indican al sistema de control las posiciones finales (finales de carrera) de aquellas máquinas que tienen un recorrido finito entre dos extremos y si la máquina está realmente girando (control de giro) una vez que se le ha dado orden de marcha desde el sistema de control.

Existirán, por otra parte, entradas de tipo analógico al sistema que informarán del valor exacto de una variable a lo largo del tiempo. Entre estas señales las más comunes son la medición de temperatura mediante PT100 y la medición de presión a través de dispositivos electrónicos específicos. Mediante sensores especiales también será posible medir el nivel de llenado de un silo o el nivel de vibraciones al cual estará sometido un accionamiento.

5.5. Comunicaciones

En las grandes instalaciones industriales las distancias entre los distintos puntos a controlar pueden ser considerables. En una instalación de la envergadura como la que se está tratando se hace primordial el uso de sistemas de comunicación fiables.

El molino de carbón se encuentra a unos 200 metros de la sala de control. Esta instalación estará controlada por un PLC que gobernará a su vez otras instalaciones de la fábrica. Como estas instalaciones se encuentran separadas unas de otras, es necesario unir las todas ellas a través de una misma red de comunicaciones. Para conformar esta red se ha utilizado el protocolo de comunicaciones Profibus DP, utilizando fibra óptica para salvar grandes distancias. Las comunicaciones mediante fibra óptica tienen la gran ventaja con respecto a otro tipo de cableado utilizado en que, aparte del gran ancho de banda y altas velocidades de transmisión que son capaces de soportar, son totalmente inmunes a las posibles inducciones que se generan al pasar junto a otros cableados de potencia.

La estructura utilizada ha sido en anillo redundante. La gran ventaja que tiene esta estructura con respecto a otras como puede ser en estrella o árbol, es que si se partiera la fibra óptica en algún punto, al estar todos los nodos comunicados por dos sitios distintos, se mantendría el sistema en funcionamiento, dando un aviso anunciando tal eventualidad, pero sin parar la instalación [17].

La distribución de las distintas señales de entrada y salida del sistema de control se dividirán en dos grandes grupos diferenciados. Por un lado, se tendrán las señales pertenecientes al centro de control de motores o CCM (orden de marcha, respuesta de marcha, fallo de protecciones, etc.) y por otro se tendrán las señales pertenecientes al campo (pulsador de marcha, pulsador de paro, seccionador, etc.).

El otro gran grupo de señales que debe controlar el sistema son todas aquellas generadas en el campo. Como las distancias son grandes entre unos puntos y otros de la instalación, la solución propuesta es la colocación de una serie de cajas de campo repartidas en diferentes puntos donde se recogerán estas variables. El objetivo es evitar que, en la medida de lo posible, existan más de 50 metros de distancia entre el dispositivo físico y la caja de campo más cercana. La gran ventaja desde el punto de vista económico y de mantenimiento de este tipo de arquitectura distribuida radica en la eliminación de kilómetros de manguera de cobre con respecto a una distribución centralizada típica. Por otro lado, aunque en un principio el operador de mantenimiento eléctrico pueda sentirse un poco confundido por la nueva distribución de las señales, con el tiempo comprueba que la nueva configuración es mucho más funcional, ya que las entradas y salidas al sistema de control están siempre mucho más cerca del dispositivo en cuestión que con una arquitectura centralizada.

6

Cambio de accionamientos

El cambio del sistema de control de la instalación llevó consigo también el cambio en la aparamenta eléctrica dentro del CCM. Se cambiaron los contactores y se sustituyeron los fusibles por disyuntores, minimizando de esta forma el riesgo de contacto eléctrico para los operarios de mantenimiento. Se decidió, además, sustituir el tipo de arrancador de tres máquinas críticas de la instalación, el accionamiento principal del molino, el del ventilador del filtro principal y el accionamiento de la bomba del sistema hidráulico. El cambio de estos tres accionamientos supuso una mejora considerable a la hora de gobernar toda la instalación como se explicará más adelante.

6.1. Accionamiento principal L61-AP1

Como se explicó anteriormente, el accionamiento principal de la instalación es un motor de 200 kW que mueve, a través de un reductor, la mesa sobre la que descansan los rodillos que muelen el material. Debido a la potencia del motor, un arranque directo era inviable, por lo que la forma de arrancarlo era escalonada, mediante un arrancador resistivo. Se trata, sencillamente, de una serie de resistencias enseriadas con cada una de las fases del rotor del motor. En la Figura 6.1 se muestra el esquema eléctrico de este tipo de arrancador.

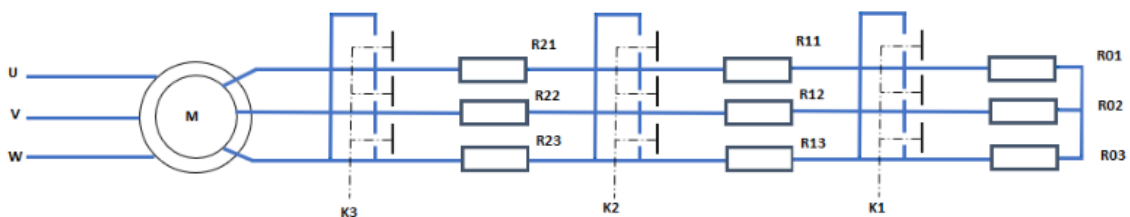


Figura 6.1. Esquema eléctrico de un arrancador resistivo.

Cuando se le manda orden de marcha al accionamiento, la resistencia rotórica está a su mayor valor posible, según la figura anterior, ninguno de los contactores K1, K2 o K3 estará energizado. De esta forma se evitará el pico de intensidad inicial que se produciría si el motor arrancara directamente con el rotor cortocircuitado, lo que provocaría un disparo en sus protecciones. El motor comenzará a girar, pero a una velocidad muy por debajo de la nominal y consumirá una intensidad también inferior a la nominal. Tras un breve periodo de tiempo, en torno a los 10 segundos, se energizará el primer contactor

K1. De este modo la resistencia rotórica entre fases disminuirá, ya que se han puenteado las resistencias R01, R02 y R03. El motor se acelerará y aumentará el consumo en amperios, pero aún lejos de la nominal. El mismo proceso se repetirá con los contactores K2 y K3. Cuando se energice este último, el rotor ya se habrá cortocircuitado y el motor se comportará como un típico “jaula de ardilla”, alcanzando su velocidad nominal, y si las condiciones son normales, consumiendo un valor de corriente cercano al nominal.

En la Figura 6.2 se muestra el detalle del arrancador. La parte superior es la que contiene físicamente las resistencias, compuestas por una serie de láminas de metal, mientras que la parte inferior alberga la aparatada necesaria para ir cortocircuitando los distintos escalones de resistencias.



Figura 6.2. Arrancador rotórico resistivo.

Este tipo de arrancadores, aunque efectivos, están ya totalmente desfasados, siendo imposible encontrar en la actualidad repuestos para los mismos. Se decidió, por tanto, sustituirlo por un arrancador suave, como el descrito anteriormente en el apartado 3.2. Este tipo de arrancadores están concebidos para funcionar con motores normales tipo jaula de ardilla. Como el motor original era de rotor bobinado mediante escobillas, existían dos opciones, eliminar los aros colectores y cortocircuitar las tres fases del rotor

o cambiar el tipo de motor. En este caso, al tratarse de un motor antiguo que no cumplía con la normativa ATEX, se decidió sustituir el motor.

Los arrancadores suaves actuales tienen múltiples opciones de programación, conteniendo además señales de salida analógicas y digitales que monitorizan en todo momento el estado de funcionamiento del motor.

6.2. Ventilador filtro molino de carbón L61-VE1

El motor que acciona este accionamiento es un tipo jaula de ardilla de 160 kW. El tipo de arrancador que tenía era el clásico estrella – triángulo para evitar el pico de intensidad inicial y conseguir, de esta manera, un arranque escalonado. Para disminuir aún más la intensidad en el arranque, una compuerta instalada a la entrada del oído del ventilador se mantenía cerrada durante todo el tiempo que duraba el arranque del motor, comenzando a abrirse escalonadamente una vez alcanzada la velocidad nominal del ventilador.

Aun teniendo en cuenta la sencillez y bajo coste del arrancador estrella – triángulo, actualmente existen alternativas como son los arrancadores suaves. Sin embargo, la decisión que se tomó fue la de instalar un variador de frecuencia para accionar este motor. De este modo, no es necesaria la compuerta a la entrada del oído del ventilador, ya que el variador de velocidad puede limitar la corriente inyectada al motor durante el arranque hasta que alcanza su velocidad nominal. Si se hubiera decidido utilizar un arrancador suave, la compuerta debería haberse mantenido, ya que este dispositivo no tiene la capacidad anterior descrita y no se podría haber eliminado la compuerta.

La otra gran ventaja del variador de frecuencia es que, al poder variar la velocidad de giro del motor, se puede tener un control mucho más preciso del valor de la presión diferencial del filtro principal. Este parámetro da una indicación del grado de llenado del mismo. Si el ciclo de limpieza de las mangas no funciona correctamente, se puede intentar compensar actuando sobre la velocidad de tiro del ventilador, aunque esta sería una última opción.

Por último, cabe destacar el considerable ahorro de energía que supone este tipo de accionamientos en comparación con un arranque directo, ya que si la velocidad de trabajo, como en este caso, puede ser inferior a la nominal del motor, el consumo en amperios también se menor.

El variador elegido fue el modelo ACS800® de la marca ABB® descrito anteriormente en el apartado 3.3.

6.3. Grupo sistema hidráulico

El funcionamiento del sistema hidráulico implantado originalmente se describió en el apartado 2.2. Estaba basado en la actuación de tres válvulas que eran las encargadas de mantener la presión de trabajo prefijada. El control de la presión no era siempre todo lo fiable que se deseaba ya que, con el tiempo, estas válvulas perdían fiabilidad y terminaban fallando.

Una solución a este problema se alcanzó implementando un variador de frecuencia que fuera el encargado de accionar la bomba de inyección de aceite hidráulico. De este modo se podría bajar la velocidad de la bomba lo suficiente y así conseguir un control mucho más fino de la presión de trabajo. Con la implementación del variador de frecuencia quedaron anuladas dos de las tres válvulas originales, quedando sólo en servicio la L61-VA1.V1. Esta válvula podrá actuarse desde el sistema de control para aliviar la presión del circuito cuando el molino no esté en marcha. También actuará como válvula de seguridad.

Con esta nueva configuración, el control de la presión del circuito hidráulico recae íntegramente en la forma de dirigir el variador de frecuencia que mueve la bomba L61-UH1.M1. Al tratarse de una instalación con presiones de trabajo muy altas, la forma en la que se accione la bomba debe ser tal que se asegure en todo momento la no aparición de los tan temidos golpes de ariete dentro del circuito.

La Figura 6.3 muestra el diagrama del sistema hidráulico una vez llevados a cabo los cambios mencionados anteriormente.

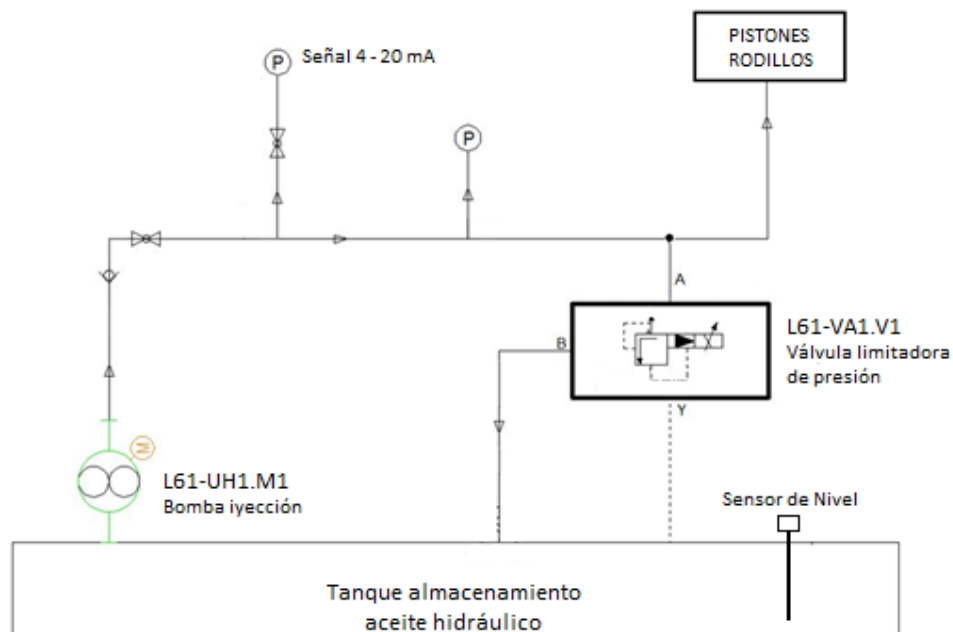


Figura 6.3. Sistema hidráulico del molino de carbón actual.

Modelos lineales para control

Para poder alcanza el máximo rendimiento de la instalación es necesario mantener ciertos parámetros de control dentro de unos determinados valores, como se ha ido comentando a lo largo del presente trabajo. De entre todos ellos, existen tres parámetros que son críticos, la presión del sistema hidráulico, la temperatura de los gases a la salida del molino y la presión diferencial dentro del molino.

La presión del sistema hidráulico dependerá del funcionamiento de la bomba que inyecta el aceite hidráulico hacia los pistones empujadores, la temperatura de gases a la salida del molino dependerá del tanto por ciento de apertura de la compuerta de entrada de gases. Por último, la presión diferencial del molino dependerá de la velocidad del transportador de placas de alimentación de material al molino.

Por tanto, se dispone de tres parámetros cuyo valor está ligado directamente al comportamiento de tres máquinas distintas. Estas máquinas son actuadas desde el sistema de control, por lo que podría automatizarse su funcionamiento mediante lazos de control [18, 19] con el objetivo de alcanzar el máximo rendimiento de la instalación.

En el caso del lazo de control de la presión del sistema hidráulico se realizó un cambio en la instalación para reducir su complejidad. Finalmente, la solución más sencilla fue implementar un lazo de control todo – nada en la actuación de la bomba. Con el lazo de control de la temperatura de gases a la salida del molino, así como con el lazo de la presión diferencial, se hicieron ensayos en la instalación para conseguir la función de transferencia que modelaba ambos lazos y a partir de ahí poder introducir mejoras para aumentar el rendimiento del sistema.

En este capítulo se presentará una primera toma de contacto al problema de control y se procederá a obtener una versión preliminar de los modelos. Estos modelos se obtendrán a partir de los resultados obtenidos en una serie de ensayos sobre la instalación en funcionamiento antes de acometer el cambio del sistema de control.

7.1. Lazo de control presión sistema hidráulico

El sistema propuesto para simplificar el funcionamiento de la instalación y mejorar, en la medida de lo posible, el control de la presión de trabajo se muestra en la Figura 6.3. Como ya se comentó, dos de las tres electroválvulas fueron eliminadas, en concreto las dos de control grueso y fino de la presión del circuito. En su lugar, lo que se ha instalado ha sido un variador de frecuencia para accionar la bomba. La válvula que ha quedado utilizada (L61-VA1) es la limitadora de presión.

Para evitar los golpes de ariete en el circuito, será necesario programar un lazo de control muy sobreamortiguado con una constante de tiempo τ muy grande. En este lazo

de control lo que prima es la estabilidad y la seguridad sobre la instalación y sobre las personas. Es preferible que el sistema sea más lento y necesite más tiempo en alcanzar la referencia a que sea muy rápido y oscilatorio, con las posibles consecuencias que podría acarrear este comportamiento sobre una instalación trabajando a altas presiones.

Durante el funcionamiento normal de la instalación la bomba se encontrará parada. Si no existe ninguna pérdida en el circuito hidráulico o no hay ningún cambio en la consigna de presión de trabajo no deberá entrar en marcha la bomba. Si, desde sala de control, se decide incrementar la presión de trabajo, es decir, hay un cambio en escalón positivo en la referencia, la bomba deberá arrancar a mínima velocidad e ir incrementándola muy lentamente hasta que se llegue al límite máximo de velocidad prefijado en r.p.m. o se alcance la nueva consigna de presión, momento en el cual volverá a parar hasta que exista o un nuevo cambio en la referencia o una perturbación externa (pérdida de presión en el circuito) que la obligue a arrancar. Para hacer el sistema aún más lento a la hora de incrementar la presión, todo en aras de evitar los golpes de ariete y minimizar los riesgos en la instalación y sobre las personas, se limitará la velocidad máxima a la cual pueda girar la bomba. Esta limitación se hará a un cuarto de la velocidad nominal de la misma, es decir a 375 r.p.m. Este límite máximo de velocidad, junto con un control muy sobreamortiguado del sistema, asegurarán un funcionamiento robusto y fiable de la instalación. En este lazo de control lo que prima es la estabilidad y la seguridad. No es tan necesaria que la respuesta sea muy rápida y, por supuesto, es totalmente indeseable un control subamortiguado.

Si se decidiera bajar drásticamente la presión, el sistema de control actuaría sobre la válvula limitadora de presión L61-VA1, descargando el aceite hidráulico a tanque. Esta válvula se mantendrá activada hasta que la presión del circuito alcance el valor prefijado. Una vez cerrada la válvula, la presión del circuito posiblemente se haya quedado por debajo de la presión de referencia (control todo - nada). Es por tanto muy posible que la bomba L61-UH1 deba entrar en funcionamiento para corregir el desvío, ahora ya negativo, entre la presión de referencia y la real del sistema hidráulico. Para asegurar que el sistema no entra en una espiral de inestabilidad o tiende a un comportamiento oscilatorio, es necesario asegurar desde control que la marcha de la bomba y la apertura de la válvula limitadora de presión no pueden darse en un mismo instante, ya que se trata de acciones opuestas.

Tras varias pruebas realizadas durante la puesta en marcha de la instalación, se comprobó que un control todo - nada era más que suficiente, ya que al arrancar la bomba a muy baja velocidad y con un tiempo de aceleración muy alto, en torno a los 60 segundos, se mantenía la presión prefijada en todo momento con un error de ± 3 bar. Debido a las pérdidas internas de aceite hidráulico con retorno a tanque, la bomba llegaba a funcionar unos 30 segundos cada media hora, manteniéndose siempre el margen de error anteriormente citado.

7.2. Lazo de control temperatura salida molino

Como se explicó anteriormente, el material bruto (pet coke o hulla) debe ser calentado y secado durante el proceso de molienda. La temperatura dentro del molino debe mantenerse lo más estable posible para evitar pegaduras del material dentro de la estructura. Por un lado, debe ser lo suficientemente caliente para eliminar la humedad que traiga consigo el material y, por otro, no debe ser demasiado alta para evitar dañar las mangas filtrantes que se encuentran dentro del filtro principal L61-FT1.

Un filtro de mangas es una estructura cerrada en la que se albergan en su interior una serie de elementos en forma de tubo, cerrados por el extremo inferior y hechos con un tejido especial que puede soportar en algunos casos temperaturas de hasta 200 °C. Estos elementos se conocen como mangas. El aire que sale del molino pasa a través de estas mangas quedándose el material fino ya molido pegado a las mismas. Mediante la repetición de un ciclo de disparos de un grupo de electroválvulas, se va inyectando aire a presión dentro de las mangas, provocando que el material fino pegado a ellas caiga por gravedad hasta el fondo del filtro donde es recogido a través de un tornillo sinfín o una esclusa celular.

En la instalación en estudio el tejido de las mangas del filtro principal tiene una temperatura de trabajo máxima de 140°C. Por encima de esta temperatura las mangas podrían comenzar a quemarse. El polvo de pet coke o la hulla también podría entrar espontáneamente en combustión si es almacenado durante mucho tiempo en el silo de producto terminado (L91-3B1) y éste se encuentra a más de 120°C. Estas son las razones por las cuales se prefija una temperatura de trabajo a la salida del molino de carbón de 85°C. Temperatura suficientemente alta para secar el material y lo suficientemente baja para proteger las mangas del filtro principal, así como evitar la autocombustión del producto molido dentro del silo de producto terminado.

El control de esta temperatura a la salida del molino se realiza mediante la actuación de la compuerta motorizada L51-PC1. Esta compuerta reversible tiene instalados dos finales de carrera que informan al sistema de control de cuando está completamente cerrada y cuando completamente abierta. Además, tiene instalado un transductor de posición mediante el cual se informa al sistema de control del tanto por ciento de apertura de la misma. Si desde sala de control se aumenta la consigna de temperatura a la salida del molino, la compuerta abrirá paulatinamente hasta que se alcance la nueva consigna. La forma de actuar de dicha compuerta no puede ser muy rápida ni puede estar actuándose constantemente para evitar daños mecánicos en la misma. Es necesario llegar a una solución de compromiso entre seguimiento de la consigna y protección de la máquina. Hay que tener en cuenta, además, que el sistema tendrá un cierto retardo desde que se cambie la referencia hasta que en la planta se consiga el nuevo valor prefijado.

7.2.1. Ensayos de campo

Para poder sacar el máximo rendimiento de la instalación, será necesario obtener un modelo lo más aproximado posible que identifique el comportamiento del lazo de control. Para ello se procederá a la realización de una serie de ensayos durante el funcionamiento normal de la instalación para ver cómo reacciona el sistema ante cambios de consigna escalonados. En concreto, se procederá a cambiar escalonadamente el tanto por ciento de apertura de la compuerta de entrada de gases y comprobar cómo esta acción repercute en la temperatura de salida del molino.

El primer ensayo que se llevará a cabo será incrementar la apertura de la compuerta del 33% al 36%. Los resultados obtenidos de temperatura se muestran en la Figura 7.1. En el eje de abscisas se muestra el número de registro, obteniéndose cada uno de ellos en intervalos de 2 segundos.

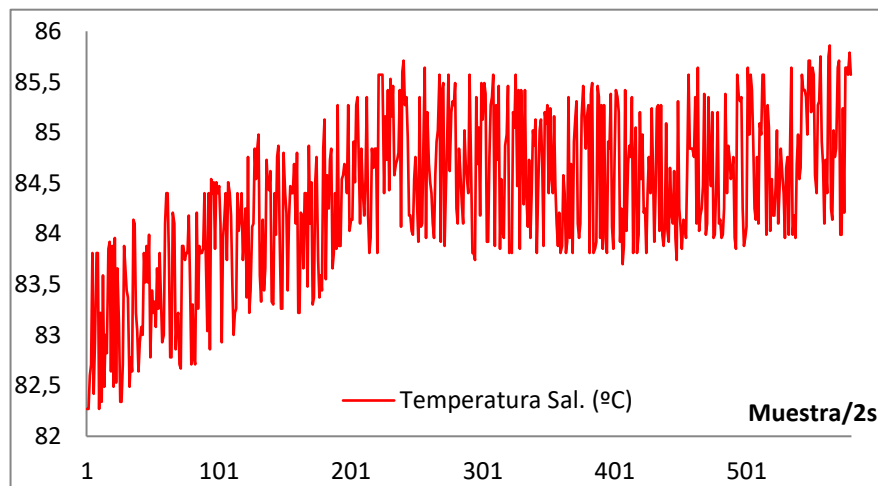


Figura 7.1. Primer escalón. Cambio de un 33% a un 36% de apertura en la compuerta.

Si los datos obtenidos directamente del sistema de control se filtran a través de Matlab, puede utilizarse la herramienta *ident* [20] para obtener la función de transferencia, siendo en este caso claramente de primer orden. En la Figura 7.2 se representa la señal original sin filtrar en azul, en verde los valores de señal filtrados y en rojo la respuesta que se obtiene en segundos con la función de transferencia obtenida.

Los valores de los parámetros del sistema serán $K = 0,52 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$, $\tau = 205 \text{ s}$ y $T_d = 100 \text{ s}$, siendo este último valor, el tiempo de retardo, fijado manualmente. Por tanto, la función de transferencia del sistema será:

$$G1(s) = \frac{0.52}{205s + 1} e^{-100s}$$

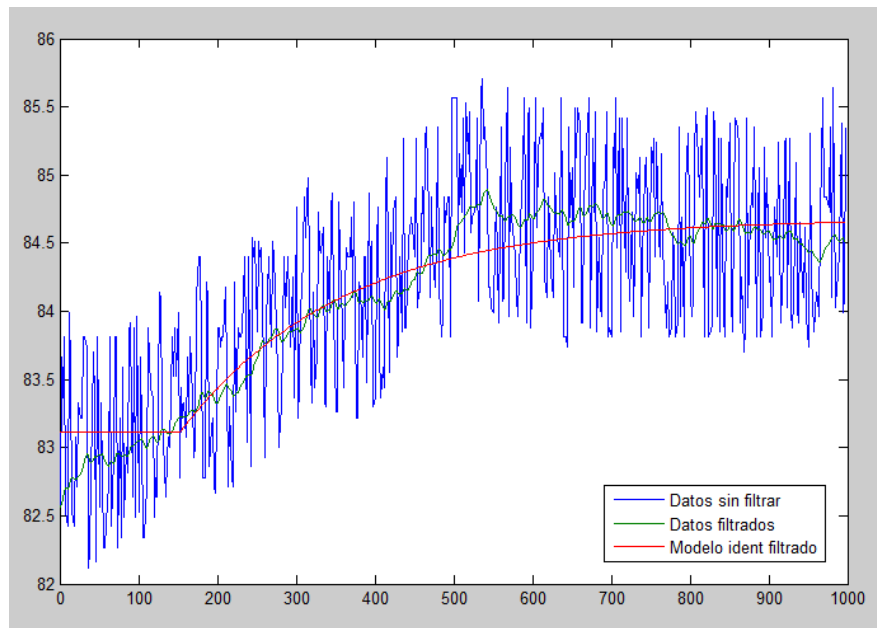


Figura 7.2. Resultado obtenido con la herramienta *ident* (línea roja) del modelo filtrado.

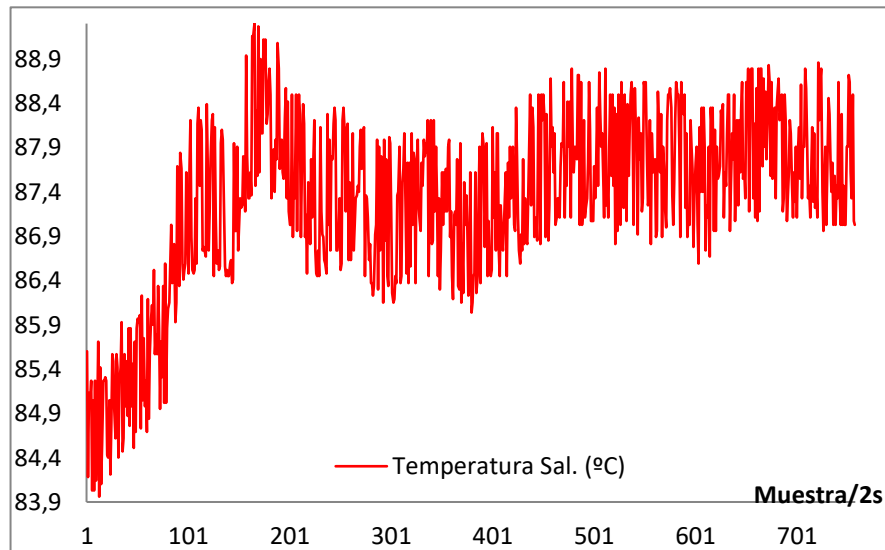


Figura 7.3. Segundo escalón. Cambio de un 36% a un 39% de apertura en la compuerta.

En el segundo ensayo llevado a cabo se abrirá la compuerta de entrada de gases del 36% al 39%. Los valores de temperatura obtenidos son los presentados en la Figura 7.3.

Siguiendo el mismo proceso que anteriormente, se obtendrá la función de transferencia del modelo para este intervalo de apertura de la compuerta. En la Figura 7.4 se muestran los resultados obtenidos.

En este caso la función de transferencia obtenida es la mostrada a continuación. El valor del tiempo de retardo también se ha establecido manualmente.

$$G2(s) = \frac{0.85}{117s + 1} e^{-100s}$$

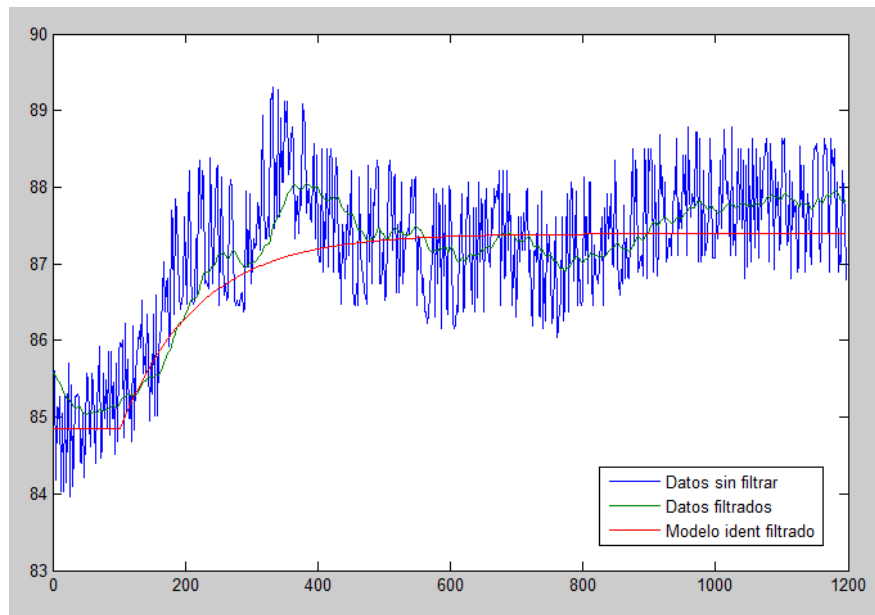


Figura 7.4. Resultados obtenidos con la herramienta *ident* de Matlab para el segundo ensayo.

7.2.2. Modelo temperatura salida molino

Los valores que se muestran en la Tabla 7.1 reflejan los distintos parámetros del modelo de primer orden obtenidos con la herramienta *ident* una vez filtrados los datos. Los resultados se presentan para el intervalo de trabajo comprendido entre el 33% y el 39% de la apertura de la compuerta de entrada de gases. Dentro de este rango de trabajo se obtiene una temperatura a la salida del molino que varía entre los 83°C y los 88°C. La tercera línea de la tabla muestra la media aritmética de los valores del modelo obtenidos en los dos ensayos.

Modelo aproximado	K (°C/%)	τ (s)	Td (s)
Escalón 33% - 36%	0.52	205	100
Escalón 36% - 39%	0.85	117	100
Media aritmética	0.685	160	100

Tabla 7.1. Valores del modelo que relaciona la apertura de la compuerta de entrada de gases y la temperatura a la salida del molino.

De los resultados anteriores se puede definir el modelo de comportamiento global para el rango de trabajo del molino, es decir, para una temperatura de salida del mismo comprendida aproximadamente entre 80°C y 90°C.

$$Gg_t(s) = \frac{0.685}{160s + 1} e^{-100s}$$

En las Figuras 7.5 y 7.6 se muestra en rojo el comportamiento de la función de transferencia global en comparación con los valores reales de temperatura del proceso (curva azul) y los valores filtrados, curva de color verde.

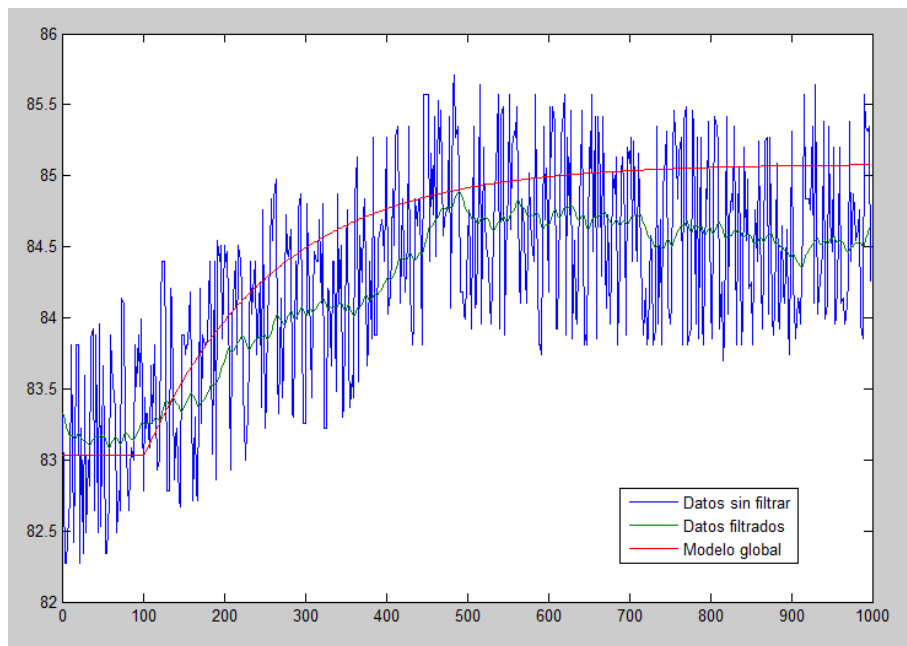


Figura 7.5. Resultado obtenido con el modelo global (curva roja) para el primer escalón (33% - 36%).

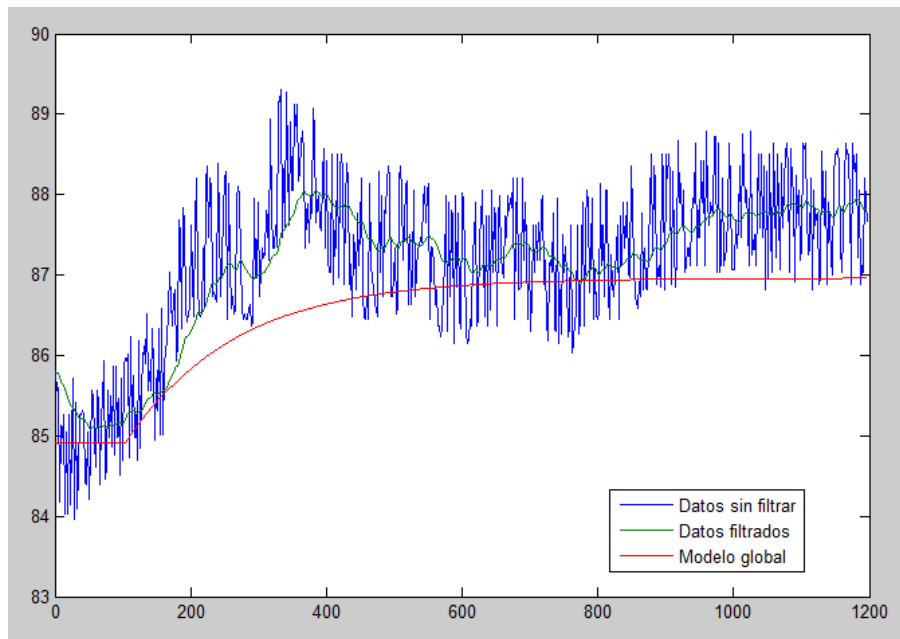


Figura 7.6. Resultado obtenido con el modelo global (curva roja) para el segundo escalón (36% - 39%).

El modelo global obtenido (G_{gt}) se ajusta, dentro de unos márgenes, a la respuesta real del sistema. En ninguno de los dos casos se sobrepasa una diferencia mayor a un grado en el valor final obtenido tras el cambio de consigna.

Sin embargo, en ensayos llevados a cabo con decrementos de la apertura de la compuerta, el comportamiento del sistema no es el mismo y la ecuación obtenida no se ajusta a la realidad. Queda claro, por tanto, que la dinámica del sistema no es la misma ante incrementos en la apertura de la compuerta de gases que ante decrementos, siendo un sistema fuertemente no lineal.

Aumentar la temperatura de todo el sistema, abriendo la compuerta de entrada de gases, es un proceso relativamente rápido y los incrementos en el tanto por ciento de apertura pueden ser relativamente pequeños. En cambio, enfriar toda la masa del molino una vez calentado, necesita de decrementos sustanciales en la apertura de la compuerta. En ensayos llevados a cabo, se observa cómo decrementos en tres puntos porcentuales en la apertura de la compuerta de entrada de gases, prácticamente no implican ningún cambio en la temperatura de salida del molino. Es necesario volver a provocar un nuevo escalón negativo de otros tres puntos porcentuales para conseguir que la temperatura a la salida del molino cambie y se desplace hasta los valores en los que se inició la prueba.

7.3. Lazo de control presión diferencial

Dependiendo de las características del material, dureza, granulometría, humedad, etc. podrá variar el caudal de alimentación al molino. El objetivo será siempre moler el máximo de toneladas hora a una determinada finura y manteniendo los estándares de seguridad para la instalación y para las personas. Para conseguir el máximo de producción, existe un lazo de control que gobierna la velocidad con la cual se mueve el transportador de placas L61-TP1 en relación con la presión diferencial del molino. Este valor es un indicador del grado de llenado de material del interior del molino. Los rodillos que giran sobre la pista alcanzan su valor óptimo de trabajo con un cierto nivel de llenado. Si el molino se carga demasiado, los rodillos no podrán moler de forma correcta y toda la instalación empezará a vibrar. Podría darse el caso de que la vibración se mantuviera durante cierto tiempo en niveles por encima de lo normal o que alcanzase el límite superior, ambas situaciones serían motivo para que el sistema de control mandara parar el motor principal. Con la intención de evitar esta eventualidad, el lazo de control mandará aumentar o disminuir la velocidad del transportador de placas L61-TP1 para mantener constante el valor de la presión diferencial entre la entrada y la salida del molino.

Para mantener el grado de finura del material molido lo más estable posible, los valores de velocidad, tanto del ventilador principal del molino L61-VE1 como del separador L61-SP1, deberán ser prefijados a un valor fijo. Por otro lado, esta forma de trabajo hará disminuir el número de variables que podrían afectar al control de la presión diferencial, siendo la única representativa el grado de llenado del material dentro del molino. Si la instalación está muy cargada de material, la presión diferencial entre la entrada y la salida subiría, con el consiguiente riesgo de llegar a pararla por un incremento en el valor de las vibraciones. Por otro lado, si la instalación estuviera funcionando con una cantidad de material insuficiente, se estaría bajando el rendimiento de la misma, lo cual repercutiría directamente en un aumento del coste eléctrico específico. Se hace, por lo tanto, necesario alcanzar un compromiso entre rendimiento y protección de la instalación. Tras más de 25 años de funcionamiento, la experiencia adquirida por los trabajadores de la planta recomienda que el valor óptimo de trabajo de la presión diferencial del molino sea de 40 mbar de columna de agua.

7.3.1. Ensayos de campo

Como en el caso del lazo de control de la temperatura de salida, si se quiere obtener el mejor rendimiento del sistema, será necesario aplicar una serie de ensayos sobre la instalación. De este modo se podrá obtener un modelo aproximado de la relación entre la velocidad del alimentador de placas y la presión diferencial del molino.

Los ensayos llevados a cabo fueron dos decrementos y dos incrementos, todos ellos

de forma consecutiva espaciados en el tiempo. En concreto se hicieron dos decrementos, del 50% al 47% y del 47% al 44% y dos incrementos, del 44% al 47% y del 47% al 50%. Los resultados finales se muestran en las Figuras 7.7, 7.8, 7.9 y 7.10. Se puede observar que el comportamiento de la señal sigue al de una función de transferencia de primer orden. Sin embargo, se aprecia una serie de saltos aleatorios con picos muy elevados de presión diferencial puntuales. Estos valores tan altos son debidos a una perturbación introducida al sistema. Coinciden con los disparos de los cañones de aire comprimido de la torre del intercambiador del horno. El aire caliente que llega hasta el molino procede de esta instalación y cuando se producen los disparos provocan un cambio brusco, pero de muy corta duración, en las condiciones de llegada.

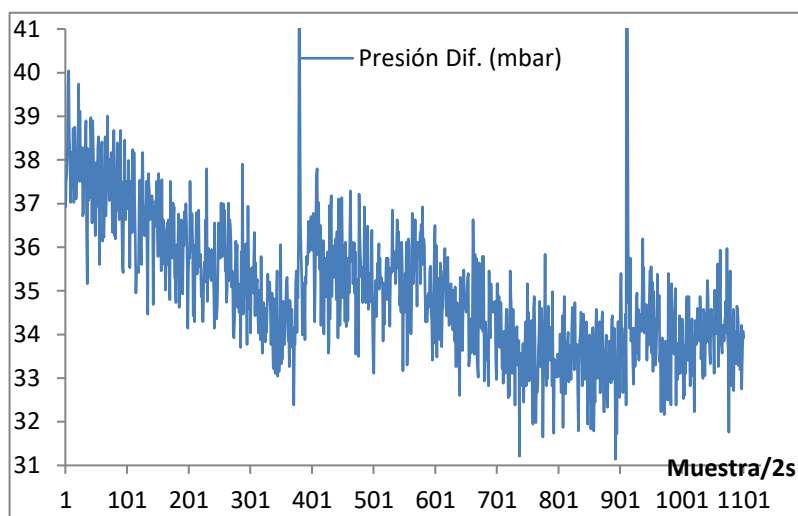


Figura 7.7. Primer escalón. Cambio de un 50% a un 47% en la velocidad del transportador de placas.

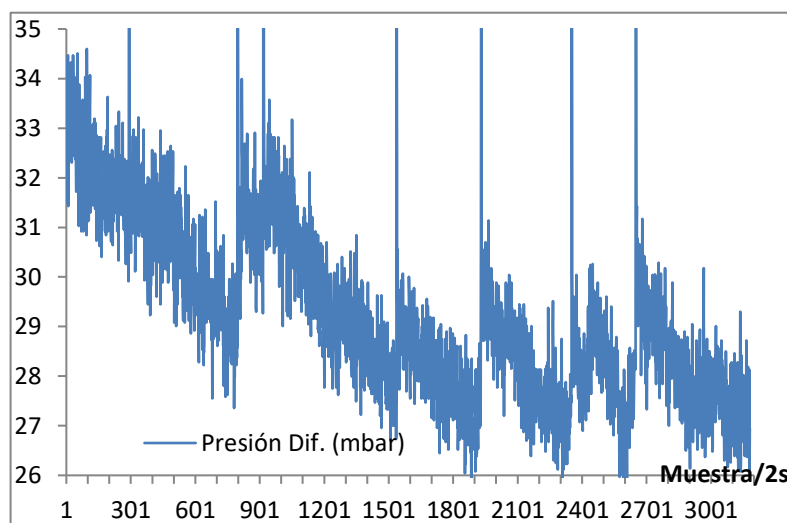


Figura 7.8. Segundo escalón. Cambio de un 47% a un 44% en la velocidad del transportador de placas.

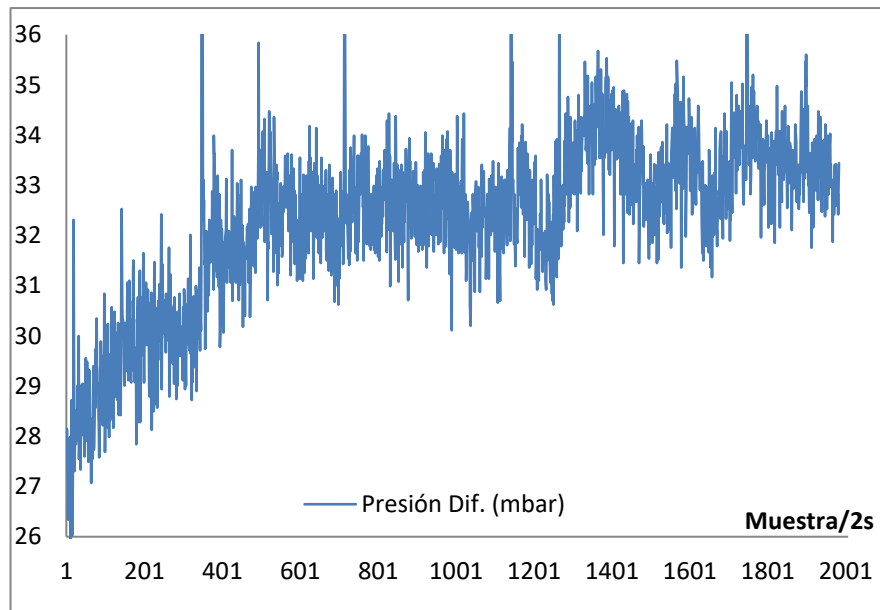


Figura 7.9. Tercer escalón. Cambio de un 44% a un 47% en la velocidad del transportador de placas.

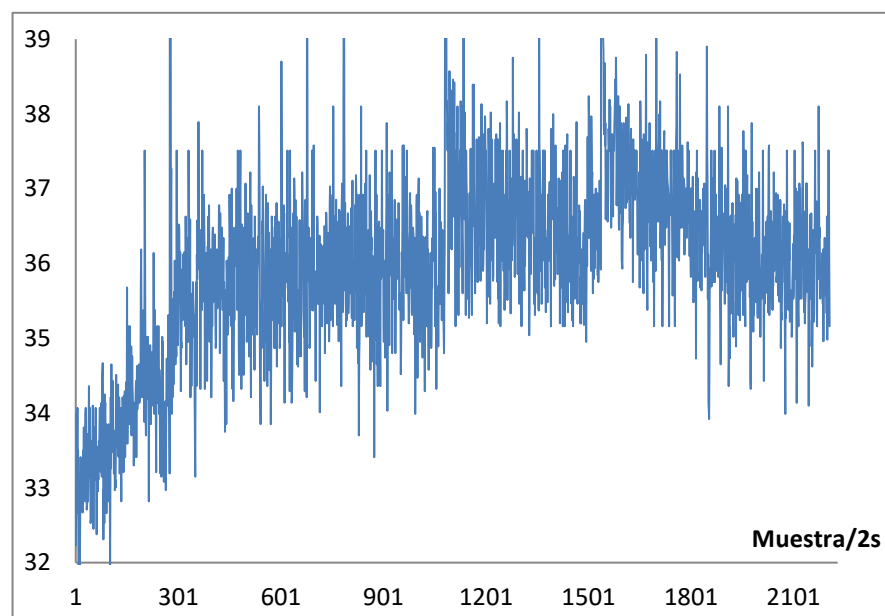


Figura 7.10. Cuarto escalón. Cambio de un 47% a un 50% en la velocidad del transportador de placas.

Filtrando los datos obtenidos del sistema de control a través de Matlab y utilizando la herramienta *ident* se obtendrá, para cada ensayo, una función de transferencia. Las Figuras 7.11, 7.12, 7.13 y 7.14 muestran la señal original sin filtrar en azul, en verde los valores de señal filtrados y en rojo la respuesta de presión diferencial en el tiempo con la función de transferencia calculada, mostrada junto a cada una de las gráficas.

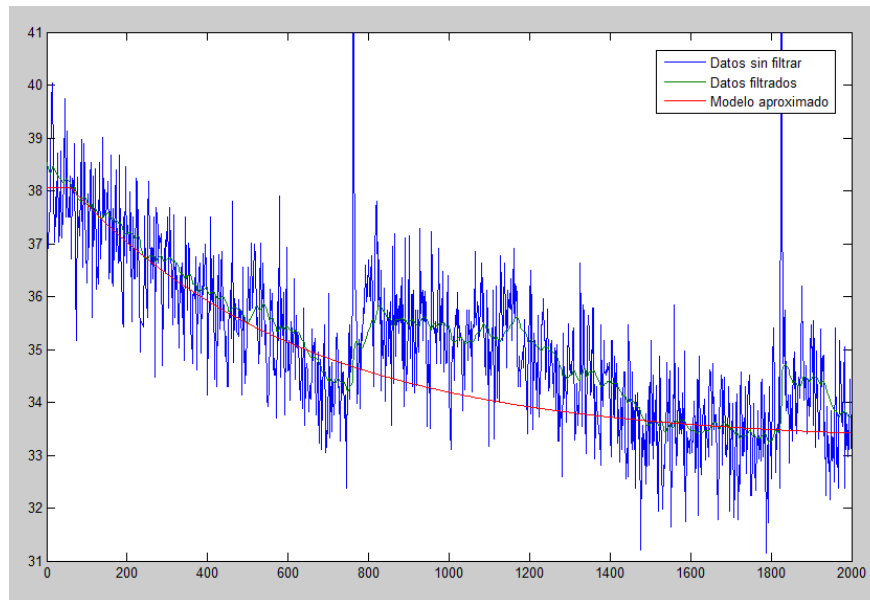


Figura 7.11. Resultado obtenido tras el ajuste del modelo filtrado (curva roja).
Escalón del 50% al 47% en la velocidad del transportador de placas.

$$G1'(s) = \frac{1.55}{375s + 1} e^{-60s}$$

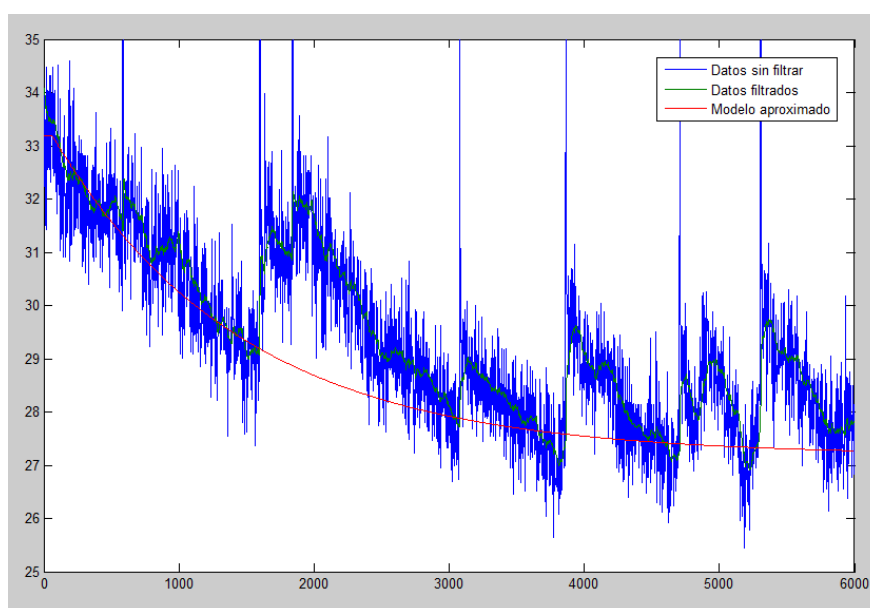


Figura 7.12. Escalón del 47% al 44% en la velocidad del transportador de placas.

$$G2'(s) = \frac{2}{1000s + 1} e^{-60s}$$

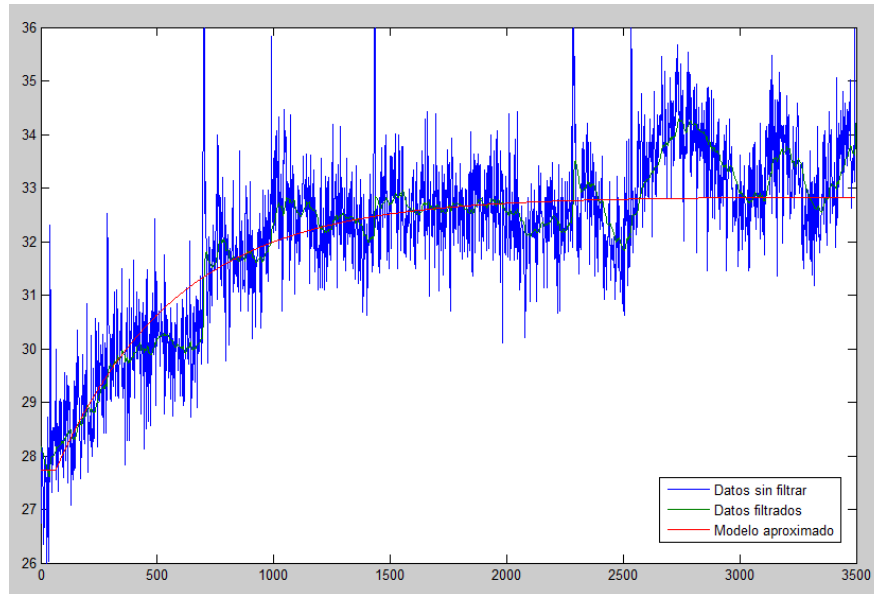


Figura 7.13. Escalón del 44% al 47% en la velocidad del transportador de placas.

$$G3'(s) = \frac{1.8}{519s + 1} e^{-52s}$$

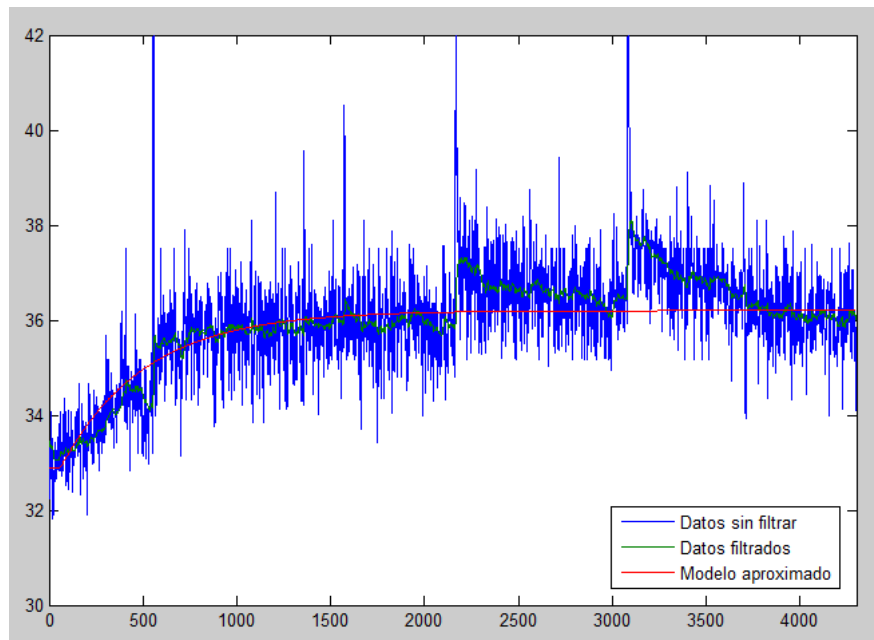


Figura 7.14. Escalón del 47% al 50% en la velocidad del transportador de placas.

$$G4'(s) = \frac{1}{449s + 1} e^{-60s}$$

7.3.2. Modelo presión diferencial

Los valores que se muestran en la Tabla 7.2 reflejan los distintos parámetros del modelo de primer orden que más se aproxima a las curvas obtenidas tras los ensayos una vez filtrados los datos. Los resultados se presentan para el intervalo de trabajo comprendido entre el 44% y el 50% de la velocidad del alimentador de placas. Dentro de este rango de trabajo se obtiene una presión diferencial en el molino que varía entre los 32 mbar y los 39 mbar. La cuarta línea de la tabla muestra la media aritmética de los valores del modelo obtenidos en los cuatro ensayos.

Modelo aproximado	K (mbar/%)	τ (s)	Td (s)
Escalón 50% - 47%	1.7	650	60
Escalón 47% - 44%	2	1400	60
Escalón 44% - 47%	1.7	520	60
Escalón 47% - 50%	1.1	450	60
Media aritmética	1.625	755	60

Tabla 7.2. Valores del modelo que relaciona la velocidad del transportador de placas (44% - 50%) y la presión diferencial del molino.

De los resultados anteriores se puede definir el modelo de comportamiento global para el rango de trabajo del molino entre los 27.5 mbar y 39 mbar de presión diferencial.

$$Gg_{p1}(s) = \frac{1.625}{755s + 1} e^{-60s}$$

Las Figuras 7.15 y 7.16 muestran los resultados obtenidos en la presión diferencial del molino (curva azul) tras el decremento en la velocidad del alimentador de placas. La curva de color verde muestra los valores de presión diferencial una vez filtrados y la curva de color rojo muestra la respuesta del modelo global (Gg_{p1}). Por su parte, las Figuras 7.17 y 7.18 muestran los resultados obtenidos en la presión diferencial del molino tras el incremento en la velocidad del alimentador de placas.

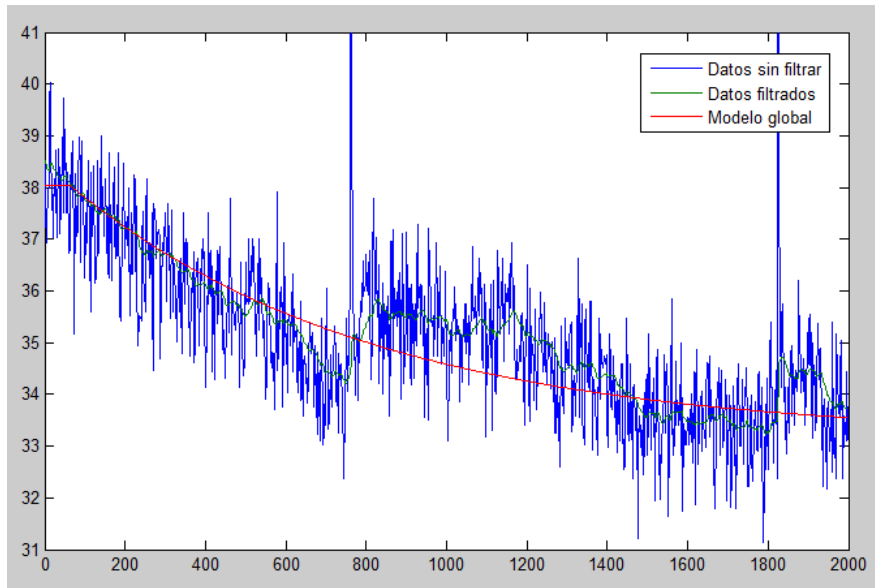


Figura 7.15. Resultado obtenido con el modelo global $G_{g,p1}$ (curva roja) para el primer escalón (50% - 47%).

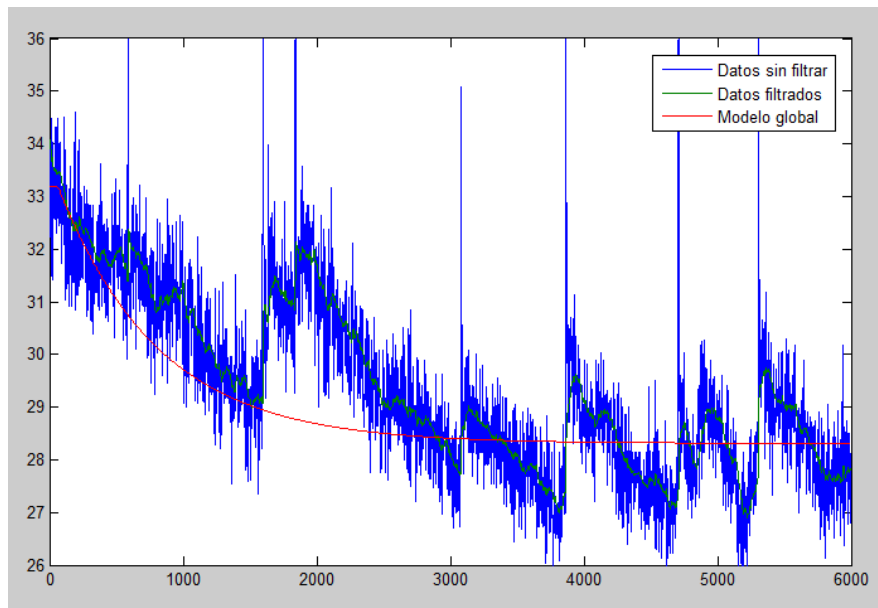


Figura 7.16. Resultado obtenido con el modelo global $G_{g,p1}$ (curva roja) para el segundo escalón (47% - 44%).

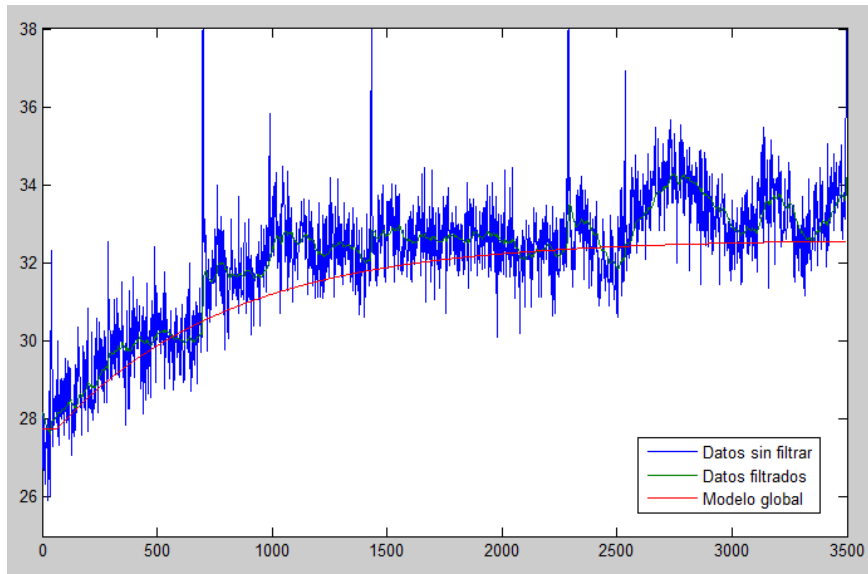


Figura 7.17. Resultado obtenido con el modelo global $G_{g_{p1}}$ (curva roja) para el tercer escalón (44% - 47%).

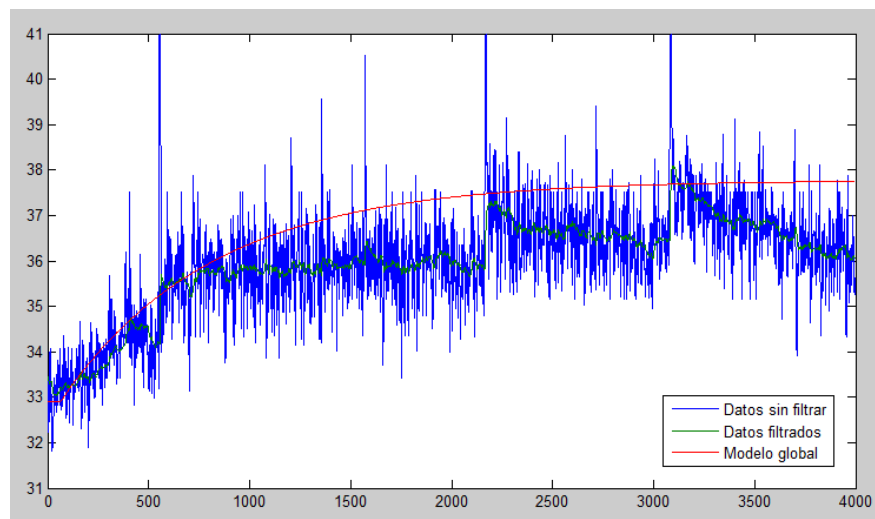


Figura 7.18. Resultado obtenido con el modelo global $G_{g_{p1}}$ (curva roja) para el cuarto escalón (47% - 50%).

El modelo global obtenido ($G_{g_{p1}}$) se ajusta, dentro de unos márgenes, a la respuesta real del sistema. En ninguno de los cuatro casos se sobrepasa una diferencia mayor a 1.5 mbar en el valor final obtenido tras el cambio de consigna.

Sin embargo, el problema se presenta cuando se intenta implementar este modelo global en ensayos realizados que van del 44% al 41% y del 41% al 44% en la velocidad del transportador. En estos ensayos se refleja una dinámica del sistema distinta. Queda claro, por tanto, que la dinámica del sistema no es la misma en todo el rango de velocidades del transportador de placas.

8

Redes de Petri

Una vez explicado todo el proceso que se lleva a cabo en la instalación en estudio, se puede abordar la tarea de definir la red de Petri [21, 22] que define al sistema. Como se ha explicado anteriormente, la instalación se puede dividir en cuatro grupos diferenciados de máquinas, el grupo engrase reductor, el grupo sistema hidráulico, el grupo circuito de gases y el grupo molino y alimentación de material.

Cada grupo tendrá una orden de marcha distinta desde el sistema de control, por lo que se podrá tener en marcha el conjunto del molino con sólo cuatro “clics” de ratón si todas las máquinas se encuentran listas para arrancar. Hay que tener en cuenta que el arranque de los distintos grupos debe ser en el orden establecido, ya que el primer grupo enclavará al segundo y así sucesivamente. También existe la posibilidad de arrancar toda la instalación con una sola pulsación de ratón. Para que esto ocurra deberá establecerse en el sistema de control el modo *bypass* entre grupos. De esta forma, cuando el primero de los grupos esté completamente en marcha y se cumplan los enclavamientos necesarios para arrancar el segundo, el sistema de control automáticamente llevará a cabo esta tarea. Del mismo modo ocurrirá con los grupos tercero y cuarto.

Debido a la división entre estos cuatro grupos y la posibilidad de arrancar toda la instalación con un solo golpe de ratón, la red de Petri global puede definirse como el conjunto de las cuatro subredes que definen cada uno de los grupos enlazadas mediante una serie de enclavamientos. Por tanto, la tarea de desarrollar la red de Petri global de la instalación pasará por definir anteriormente las cuatro subredes y posteriormente unir las entre sí cuando se cumplan una serie de condiciones.

Para poder explicar de manera más resumida las redes de Petri que definen la instalación, se supondrá que todas las máquinas se encuentran en modo automático y no en local y que todas las máquinas están listas para su arranque, es decir, las señales relacionadas con cada máquina estarán en el estado lógico adecuado. También se dará por supuesto que la señal de paro de secuencia y paro inmediato de la instalación no están activadas. Anteriormente se han mostrado las distintas tablas correspondientes a cada accionamiento en donde se define en la columna “OK” el estado en el que deben encontrarse cada una de las señales.

En los siguientes apartados se mostrarán las tablas donde aparecerán por un lado el listado de lugares pertenecientes a cada red de Petri y por otro el listado de transiciones. Cada una de estas tablas contendrá una columna denominada *señales involucradas* y en ella aparecerán cada una de las señales del sistema de control que intervendrán en cada

lugar y cada transición. Los lugares corresponderán con la activación o desactivación de al menos una orden de marcha de un accionamiento, mientras que las transiciones corresponderán con el cambio de al menos una señal en el sistema. La situación de *máquina lista para arrancar* se resumirá como "xxx OK" donde xxx será el nombre de la máquina. En estas circunstancias se supondrá que todas las señales comunes a una máquina están en el estado lógico apropiado para arrancar. El resto de señales no comunes actuarán como enclavamientos. Es posible que una de estas señales no esté en el estado lógico apropiado, pero no enclave a la máquina a la cual pertenece. Por ejemplo, una presión mínima en el filtro de carbón molido generará una alarma en el sistema de control, pero no provocará el paro de la máquina a la cual pertenece.

Una condición y se representará con el símbolo " \wedge ", mientras que una condición o se representará con el símbolo " \vee ". Una condición de no existencia se representará mediante el símbolo " \neg ". Por último, los retardos se identificarán con la simbología "*Re xx s*", donde xx representa un valor medido en segundos.

8.1. Identificación de señales

Las señales utilizadas en el sistema de control poseen un nombre identificativo propio, ya que será este el que se utilice para definir las en la programación del autómata. La definición de las señales establecida corresponde a una norma interna de la empresa en la cual cada zona viene definida por un número de tres cifras.

En el caso de estudio, todos los motores que están vinculados directamente a la molienda de combustible se identifican por el conjunto de caracteres L61. Aquellas máquinas que están situadas a partir del silo de carbón molido se definirán como L91 y las que tienen que ver con la conducción de los gases calientes desde la torre del intercambiador del horno se identifican mediante el juego de caracteres L51. A continuación se añadirá un guion y una identificación de 3 caracteres que pueden ser numéricos o alfanuméricos dependiendo del tipo de accionamiento. El tercer carácter define el número de máquina de un cierto tipo que hay en la instalación. Por ejemplo, como existen más de una válvula rotativa dentro del grupo L61, se identificará cada una de ellas por un tercer número distinto, VR1, VR2, etc.

Se explicará a continuación la nomenclatura que define cada tipo de motor: AK identifica un "Accionamiento Auxiliar", AP identifica un "Accionamiento Principal" y normalmente coincide con el motor más importante de la instalación, EL identifica un "Engrase o Lubricación" y se tratará por lo general de una bomba de inyección de aceite, FT identifica un "Filtro", GU identifica un "Gusano" o sinfín, MR identifica el cuerpo principal de un "Molino de Rodillos", PC identifica una "Compuerta Proporcional", RD identifica un "Rascador de Cadena", TP identifica un "Transportador de Placas", UH identifica una "Unidad Hidráulica" y en este caso coincide con la bomba de inyección de aceite hidráulico a los rodillos, VE identifica un "Ventilador", VQ identifica una "Compuerta Todo - Nada", VR identifica una "Válvula Rotativa", VT identifica un

“Ventilador Tangencial”, VX identifica un “Ventilador Axial” y 3B identifica un “Silo”. Otras identificaciones que aparecen constan de dos números y un carácter alfanumérico (2W). Esta nomenclatura define las señales de arranque en las distintas plantas de la instalación.

Por último, es necesario identificar cada señal correspondiente a cada accionamiento con un nombre identificativo. Para ello se utilizará el nombre de siete caracteres que identifica la máquina. Por ejemplo, L61-AP1 seguido de un nuevo juego de caracteres que será específico al tipo de señal.

A continuación, se explica la nomenclatura que define las señales más comunes que pueden encontrarse en una máquina.

:D identifica una “Orden de Marcha”, :R identifica una “Respuesta de Marcha” y :G identifica el pulsador de “Marcha Local”. Estas señales estarán dobladas en aquellos accionamientos que sean reversibles y estarán identificadas con una terminación en X (apertura) o en Y (cierre).

:K identifica las “Protecciones Eléctricas”, :U identifica la señal del “Seccionador”, :S identifica el pulsador de “Paro Local”, :PLS identifica un “Control de Giro” de tipo pulsante mientras que :S1 identifica un “Control de Giro” de tipo fijo, :X identifica un “Final de Carrera de Abierto”, :Y identifica un “Final de Carrera de Cerrado”, :M identifica un límite “Máximo”, :N identifica un límite “Mínimo” y :PV identifica un “Valor de Proceso”.

Los motores gobernados mediante variador de frecuencia contarán además con las señales :F que identifica un “Fallo de Variador”, esta señal también puede encontrarse en motores accionados mediante arrancador electrónico, :INC que identifica el pulsador de “Incrementar Velocidad”, :DEC que identifica el pulsador de “Decrementar Velocidad” .J1:PV que identifica el valor de “Intensidad” consumida, .S1:PV que identifica un valor de “Velocidad” de giro y .S1:SP que identifica el “Set Point” de velocidad demandada.

8.2. Red de Petri grupo engrase reductor

El inicio de esta secuencia empezará con la activación por parte del panelista, desde sala de control, de la orden de marcha del grupo de engrase del reductor del molino de carbón. Esta orden de marcha será una marca interna del programa que se definirá como OM-GER. El sistema, inicialmente en estado de reposo (M1), cambiará a un siguiente estado mediante la activación de una primera transición (T1).

La Tabla 8.1 muestra el listado de lugares pertenecientes a la red de Petri que define el grupo. Cada lugar corresponderá con la activación o desactivación de al menos una salida digital por parte del PLC. Por otra parte, la Tabla 8.2 muestra el listado de

transiciones que deberán ir disparándose para que el sistema cambie de un lugar a otro. Cada transición se disparará cuando se cumplan todos los requisitos definidos en la columna *señales involucradas*. Algunas transiciones podrán dispararse cuando se cumplan distintos conjuntos de enclavamientos o se activen distintos grupos de señales, haciendo derivar el sistema a situaciones distintas. En estos casos los distintos conjuntos se definirán entre paréntesis estando ligadas las posibles alternativas mediante una condición o. Por ejemplo, “(1) ∨ (2)” definirá dos posibles activaciones en una transición. Podrá activarse cuando se cumpla el conjunto de enclavamientos 1 o cuando se cumpla el conjunto de enclavamientos 2, derivando el sistema a dos lugares distintos. Por último, la Figura 8.1 muestra la red de Petri completa correspondiente al grupo engrase del reductor del molino de carbón.

Lugar	Actividad	Señales involucradas
L1	Orden de marcha bomba 1 engrase reductor.	L61-EL1.M1:D
L2	Orden de marcha caldeo 1 aceite reductor y orden de marcha caldeo 2 aceite reductor.	L61-EL1.H1:D ∧ L61-EL2.H1:D
L3	No orden de marcha caldeo 1 aceite reductor y no orden de marcha caldeo 2 aceite reductor.	¬ L61-EL1.H1:D ∧ ¬ L61-EL2.H1:D
L4	Orden de marcha bomba 2 engrase reductor.	L61-EL2.M1:D
L5	Orden de marcha refrigerador aceite reductor.	L61-VX1.M1:D
L6	No orden de marcha refrigerador aceite reductor.	¬ L61-VX1.M1:D

Tabla 8.1. Listado de lugares perteneciente a la red de Petri del grupo de engrase del reductor del molino de carbón.

Transición	Actividad	Señales involucradas
T1	(Selección bomba 1 engrase reductor y orden de marcha grupo engrase reductor y bomba 1 engrase reductor lista para arrancar) o (Selección bomba 2 engrase reductor y orden de marcha grupo engrase reductor y bomba 2 engrase reductor lista para arrancar).	(Sel. L61-EL1.M1 ^ OM-GER ^ L61-EL1.M1 OK) ∨ (Sel. L61-EL2.M1 ^ OM-GER ^ L61-EL2.M1 OK)
T2	((Temperatura aceite reductor < 20 °C o temperatura mínima aceite reductor activada) y respuesta de marcha bomba 1 engrase reductor y caldeo 1 aceite reductor listo para arrancar y caldeo 2 aceite reductor listo para arrancar y no temperatura máxima grupo 1 resistencias caldeo aceite reductor y no temperatura máxima grupo 2 resistencias caldeo aceite reductor) o (temperatura aceite reductor > 50 °C o temperatura máxima aceite en refrigerador de aire y refrigeración aceite reductor listo para arrancar) o (orden de marcha bomba 1 engrase reductor y no respuesta de marcha bomba 1 engrase reductor y bomba 2 engrase reductor lista para arrancar).	((L61-EL1.T4:PV < 20 °C ∨ L61-EL1.T1:N) ^ L61-EL1.M1:R ^ L61-EL1.H1 OK ^ L61-EL2.H1 OK ^ ¬ L61-EL1.T2.M ^ ¬ L61-EL1.T3.M) ∨ (L61-EL1.T4:PV > 50 °C ∨ L61-VX1.T1:M ^ L61-VX1.M1 OK) ∨ (L61-EL1.M1:D ^ ¬ L61-EL1.M1:R ^ L61-EL2.M1 OK)
T3	Respuesta de marcha caldeo 1 aceite reductor y respuesta de marcha caldeo 2 aceite reductor y (temperatura aceite reductor > 30 °C o temperatura máxima aceite reductor activada).	L61-EL1.H1:R ^ L61-EL2.H1:R ^ (L61-EL1.T4:PV > 30 °C ∨ L61-EL1.T1:M)
T4	No respuesta de marcha caldeo 1 aceite reductor y no respuesta de marcha caldeo 2 aceite reductor y (respuesta de marcha bomba 1 engrase reductor o respuesta de marcha bomba 2 engrase reductor) y (temperatura aceite reductor < 20 °C o temperatura mínima aceite reductor activada) y caldeo 1 aceite reductor listo para arrancar y caldeo 2 aceite reductor listo para arrancar y no temperatura máxima grupo 1 resistencias caldeo aceite reductor y no temperatura máxima grupo 2 resistencias caldeo aceite reductor.	¬ L61-EL1.H1:R ^ ¬ L61-EL2.H1:R ^ (L61-EL1.M1:R ∨ L61-EL2.M1:R) ^ (L61-EL1.T4:PV < 20 °C ∨ L61-EL1.T1:N) ^ L61-EL1.H1 OK ^ L61-EL2.H1 OK ^ ¬ L61-EL1.T2.M ^ ¬ L61-EL1.T3.M
T5	(Orden de marcha bomba 2 engrase reductor y no respuesta de marcha bomba 2 engrase reductor y bomba 1 engrase reductor lista para arrancar) o ((temperatura aceite reductor < 20 °C o temperatura mínima aceite reductor activada) y respuesta de marcha bomba 2 engrase reductor y caldeo 1 aceite reductor listo para arrancar y caldeo 2 aceite reductor listo para arrancar y no temperatura máxima grupo 1 resistencias caldeo aceite reductor y no temperatura máxima grupo 2 resistencias caldeo aceite reductor)) o (temperatura aceite reductor > 50 °C o temperatura máxima aceite en refrigerador de aire y refrigeración aceite reductor listo para arrancar).	(L61-EL2.M1:D ^ ¬ L61-EL2.M1:R ^ L61-EL1.M1 OK) ∨ (L61-EL1.T4:PV < 20 °C ∨ L61-EL1.T1:N) ^ L61-EL2.M1:R ^ L61-EL1.H1 OK ^ L61-EL2.H1 OK ^ ¬ L61-EL1.T2.M ^ ¬ L61-EL1.T3.M) ∨ (L61-EL1.T4:PV > 50 °C ∨ L61-VX1.T1:M ^ L61-VX1.M1 OK)
T6	Respuesta de marcha refrigeración aceite reductor y temperatura aceite reductor < 45 °C.	L61-VX1.M1:R ^ L61-EL1.T4:PV < 45 °C
T7	No respuesta de marcha refrigeración aceite reductor y temperatura aceite reductor > 50 °C o temperatura máxima aceite en refrigerador de aire y refrigeración aceite reductor listo para arrancar.	¬ L61-VX1.M1:R ^ L61-EL1.T4:PV > 50 °C ∨ L61-VX1.T1:M ^ L61-VX1.M1 OK

Tabla 8.2. Listado de transiciones perteneciente a la red de Petri del grupo de engrase del reductor del molino de carbón.

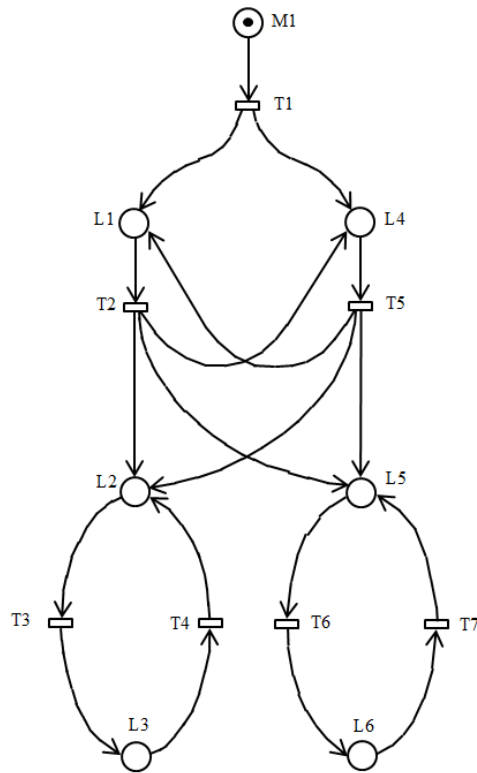


Figura 8.1. Diagrama de la red de Petri que representa el grupo de engrase del reductor del molino de carbón.

8.3. Red de Petri grupo sistema hidráulico

Como en el caso del grupo anterior, el inicio de la secuencia del sistema hidráulico empezará con la activación de la orden de marcha del grupo. Se da por descontado que el arranque de este grupo sólo podrá hacerse cuando el anterior ya esté completamente en marcha. Esta orden de marcha será una marca interna del programa que se definirá como OM-GSH. El sistema, inicialmente en estado de reposo (M1), cambiará a un siguiente estado mediante la activación de una primera transición (T1).

La Tabla 8.3 muestra el listado de lugares pertenecientes a la red de Petri que define el sistema hidráulico del molino. Cada lugar corresponderá con la activación o desactivación de al menos una salida digital por parte del PLC.

Lugar	Actividad	Señales involucradas
L1	Orden de marcha bomba sistema hidráulico.	L61-UH1.M1:D
L2	No orden de marcha bomba sistema hidráulico.	\neg L61-UH1.M1:D
L3	Orden de marcha válvula bajada de presión sistema hidráulico.	L61-VA1.M1:D
L4	No orden de marcha válvula bajada de presión sistema hidráulico.	\neg L61-VA1.M1:D

Tabla 8.3. Listado de lugares perteneciente a la red de Petri del grupo sistema hidráulico del molino de carbón.

La Tabla 8.4 muestra, por su parte, el listado de transiciones pertenecientes a este grupo.

Transición	Actividad	Señales involucradas
T1	Orden de marcha secuencia sistema hidráulico y no nivel mínimo tanque sistema hidráulico y bomba sistema hidráulico lista para arrancar.	OM-GSH \wedge \neg L61-UH1.L1:N \wedge L61-UH1.M1 OK
T2	(Respuesta de marcha bomba sistema hidráulico y presión sistema hidráulico 5 bares mayor que consigna) o (nivel mínimo tanque sistema hidráulico).	(L61-UH1.M1:R \wedge L61-UH1.P1:PV > consigna + 5 bares) \vee (L61-UH1.L1:N)
T3	(Presión sistema hidráulico mayor que 170 bares) o (presión sistema hidráulico 10 bares menor que consigna y no nivel mínimo tanque sistema hidráulico)	(L61-UH1.P1:PV > 170 bar) \vee (L61-UH1.P1:PV < consigna - 10 bar \wedge \neg L61-UH1.L1:N)
T4	Respuesta de marcha válvula bajada de presión sistema hidráulico \wedge presión sistema hidráulico 5 bares mayor que consigna.	L61-VA1.M1:R \wedge L61-UH1.P1:PV < consigna + 5 bares

Tabla 8.4. Listado de transiciones perteneciente a la red de Petri del grupo sistema hidráulico del molino de carbón.

Para finalizar, la Figura 8.2 muestra la red de Petri correspondiente al sistema hidráulico del molino de carbón.

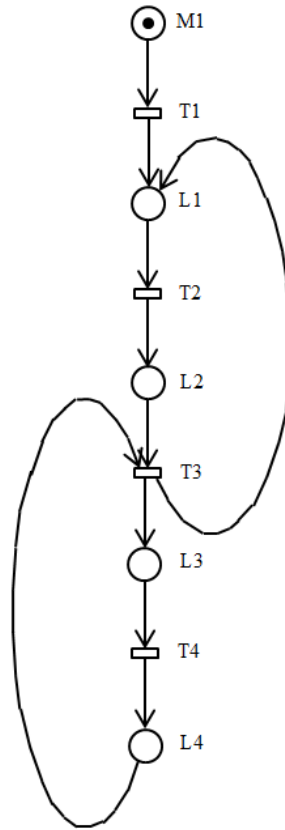


Figura 8.2. Diagrama de la red de Petri que representa el grupo del sistema hidráulico del molino de carbón.

8.4. Red de Petri grupo circuito de gases

Una vez en marcha los grupos engrase del reductor y sistema hidráulico, se podrá dar orden de marcha al grupo circuito de gases a través de la marca interna en el programa que la define, OM-GCG. El grupo, inicialmente en estado de reposo (M1), cambiará a un siguiente estado mediante la activación de una primera transición (T1).

La Tabla 8.5 muestra el listado de lugares pertenecientes a la red de Petri que define el grupo circuito de gases. Cada lugar corresponderá con la activación o desactivación de al menos una salida digital por parte del PLC.

Lugar	Actividad	Señales involucradas
L1	Orden de marcha sirena y luz de aviso tercera planta molino de carbón.	L91-2W1.G1:D ^ L91-2W1.G2:D
L2	Orden de marcha ventilador filtro silo de carbón molido.	L91-VE1:D
L3	Orden de marcha desempolvado filtro silo de carbón molido.	L91-FT1.C1:D
L4	Orden de marcha válvula rotativa evacuación filtro molino de carbón.	L61-VR2.M1:D
L5	Orden de marcha sinfín evacuación filtro molino de carbón.	L61-GU1.M1:D
L6	Orden de marcha desempolvado filtro molino de carbón.	L61-FT1.C1:D
L7	Orden de marcha separador molino de carbón.	L61-SP1.M1:D
L8	Orden de marcha ventilador filtro molino de carbón.	L61-VE1.M1:D
L9	Orden de marcha compuerta todo - nada entrada molino de carbón.	L51-VQ1.M1:DX
L10	Orden de marcha compuerta proporcional entrada molino de carbón.	L51-PC1.M1:DX
L11	Orden de marcha compuerta todo - nada entrada filtro molino de carbón.	L61-VQ1.M1:DX
L12	Orden de marcha compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón .	L61-VQ2.M1:DX
L13	Orden de marcha compuerta proporcional recirculación molino de carbón.	L51-PC2.M1:DX

Tabla 8.5. Listado de lugares perteneciente a la red de Petri del grupo circuito de gases.

La Tabla 8.6 muestra, por su parte, el listado de transiciones pertenecientes a este grupo.

Transición	Actividad	Señales involucradas
T1	Orden de marcha secuencia transporte al silo de carbón molino y sirena - luz de aviso tercera planta molino de carbón listo para arrancar.	OM-GCG \wedge L91-2W1.G1 \wedge L91-2W1.G2 <i>OK</i>
T2	Orden de marcha sirena - luz de aviso tercera planta molino de carbón y ventilador filtro silo de carbón molido listo para arrancar y no nivel máximo silo de carbón molino y no peso máximo silo de carbón molido.	L91-2W1.G1:D \wedge L91-2W1.G2:D \wedge L91-VE1 <i>OK</i> \wedge \neg L91-3B1.L1:M \wedge \neg L91-3B1.W1:PV max
T3	Respuesta de marcha ventilador filtro silo de carbón molido y desempolvado filtro silo de carbón molido listo para arrancar.	L91-VE1:R \wedge L91-FT1.C1 <i>OK</i>
T4	Respuesta de marcha desempolvado filtro silo de carbón molido y válvula rotativa evacuación filtro molino de carbón lista para arrancar y retardo de 5 segundos.	L91-FT1.C1:R \wedge L61-VR2.M1 <i>OK</i> \wedge <i>Re</i> 5 s
T5	Respuesta de marcha válvula rotativa evacuación filtro molino de carbón y sinfín evacuación filtro molino de carbón listo para arrancar y no temperatura material en sinfín evacuación filtro molino de carbón máxima.	L61-VR2.M1:R \wedge L61-GU1.M1 <i>OK</i> \wedge \neg L61-GU1.T1:PV max
T6	Respuesta de marcha sinfín evacuación filtro molino de carbón y desempolvado filtro molino de carbón listo para arrancar y no presión mínima desempolvado filtro molino de carbón y no temperatura entrada gases filtro molino de carbón máxima y no temperatura salida gases filtro molino de carbón máxima.	L61-GU1.M1:R \wedge L61-FT1.C1 <i>OK</i> \wedge \neg L61-FT1.P1:N \wedge \neg L61-FT1.T1:PV max \wedge \neg L61-FT1.T2:PV max
T7	Respuesta de marcha desempolvado filtro molino de carbón y separador molino de carbón listo para arrancar y retardo de 10 segundos.	L61-FT1.C1:R \wedge L61-SP1.M1 <i>OK</i> \wedge <i>Re</i> 10 s
T8	Respuesta de marcha separador molino de carbón y ventilador filtro molino de carbón listo para arrancar y no alarma contraincendios en filtro molino carbón activada y no temperatura salida ventilador filtro molino de carbón máxima y retardo de 10 segundos.	L61-SP1.M1:R \wedge L61-VE1.M1 <i>OK</i> \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI \wedge \neg L61-VE1.T1:PV max \wedge <i>Re</i> 10 s
T9	Respuesta de marcha ventilador filtro molino de carbón y compuerta todo - nada entrada molino de carbón lista para arrancar y no alarma contraincendios en filtro molino carbón activada y retardo de 30 segundos.	L61-VE1.M1:R \wedge L51-VQ1.M1 <i>OK</i> \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI \wedge <i>Re</i> 30 s
T10	Respuesta de marcha abrir compuerta todo - nada entrada molino de carbón y retardo 20 s hasta compuerta todo - nada entrada molino de carbón abierta y no cerrada y final de carrera de seguridad no activado y compuerta proporcional entrada molino de carbón lista para arrancar y no alarma contraincendios en filtro molino carbón activada.	L51-VQ1.M1:RX \wedge <i>Re</i> 20 s \rightarrow \neg L51-VQ1.X1:X \wedge L51-VQ1.Y1:Y \wedge L51-VQ1.Y2:Y \wedge L51-PC1.M1 <i>OK</i> \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI
T11	Respuesta de marcha abrir compuerta proporcional entrada molino de carbón y compuerta todo - nada entrada filtro molino de carbón lista para arrancar y no alarma contraincendios en filtro molino carbón activada y retardo de 5 segundos.	L51-PC1.M1:RX \wedge L61-VQ1.M1 <i>OK</i> \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI \wedge <i>Re</i> 5 s
T12	Respuesta de marcha abrir compuerta todo - nada entrada filtro molino de carbón más retardo 20 s hasta compuerta todo - nada entrada filtro molino de carbón abierta y no cerrada y final de carrera de seguridad no activado y compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón lista para arrancar y no alarma contraincendios en filtro molino carbón activada.	L61-VQ1.M1:RX \wedge <i>Re</i> 20 s \rightarrow \neg L61-VQ1.M1:X1:X \wedge L61-VQ1.Y1:Y \wedge L61-VQ1.Y2:Y \wedge L61-VQ2.M1 <i>OK</i> \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI
T13	Respuesta de marcha abrir compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón más retardo 20 s hasta compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón abierta y no cerrada y compuerta proporcional recirculación molino de carbón lista para arrancar y no alarma contraincendios en filtro molino carbón activada.	L61-VQ2.M1:RX \wedge <i>Re</i> 20 s \rightarrow \neg L61-VQ2.M1:X1:X \wedge L61-VQ2.Y1:Y \wedge L51-PC2.M1 <i>OK</i> \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI
T14	Respuesta de marcha abrir compuerta proporcional recirculación molino de carbón hasta alcanzar consigna.	L51-PC2.M1:RX

Tabla 8.6. Listado de transiciones perteneciente a la red de Petri del grupo circuito de gases.

Finalmente, la Figura 8.3 muestra la red de Petri perteneciente al grupo circuito de gases.

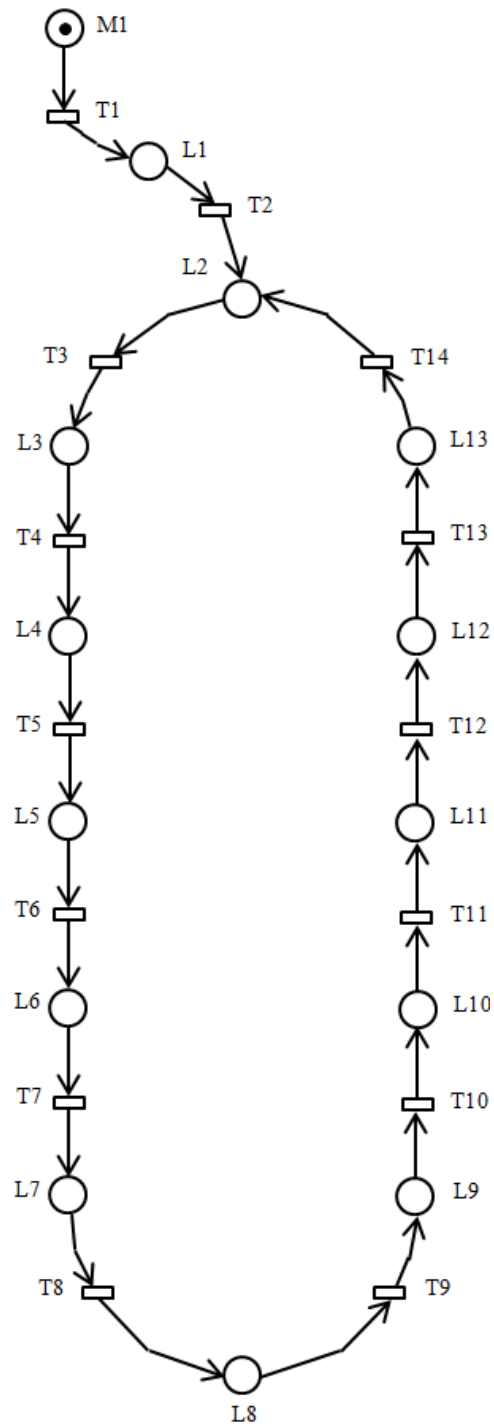


Figura 8.3. Diagrama de la red de Petri que representa el grupo circuito de gases.

8.5. Red de Petri grupo molino y alimentación de material

Este será el último grupo que se pondrá en marcha de toda la instalación. Como en el resto de grupos, la orden de marcha se realizará mediante la pulsación de un botón por parte del panelista en el Scada perteneciente al molino de carbón. Este botón estará vinculado a una marca interna en el programa, OM-GMA, que hará que comience el arranque en secuencia de las máquinas del grupo si todos los enclavamientos se cumplen. El grupo, inicialmente en estado de reposo (M1), cambiará a un siguiente estado mediante la activación de una primera transición (T1).

La Tabla 8.7 muestra el listado de lugares pertenecientes a la red de Petri que define el grupo circuito molino y alimentación de material. Cada lugar corresponderá con la activación o desactivación de al menos una salida digital por parte del PLC.

Lugar	Actividad	Señales involucradas
L1	Orden de marcha sirena y luz de aviso primera planta molino de carbón.	L61-2W1.G1:D ^ L61-2W1.G2:D
L2	Orden de marcha ventilador de obturación del molino de carbón molido.	L61-VT1.M1:D
L3	Orden de marcha accionamiento principal molino de carbón.	L61-AP1.M1:D
L4	Orden de marcha válvula rotativa alimentación molino de carbón.	L61-VR1.M1:D
L5	Orden de marcha alimentador de placas bajo silo de carbón bruto.	L61-TP1.M1:D
L6	No orden de marcha accionamiento principal molino de carbón.	\neg L61-AP1.M1:D
L7	Orden de marcha rascador de cadenas bajo alimentador de placas.	L61-RD1.M1:D
L8	No Orden de marcha rascador de cadenas bajo alimentador de placas.	\neg L61-RD1.M1:D

Tabla 8.7. Listado de lugares perteneciente a la red de Petri del grupo molino y alimentación de material.

Por su parte, la Tabla 8.8 muestra el listado de transiciones pertenecientes al último de los grupos en arrancar de la instalación.

Transición	Actividad	Señales involucradas
T1	Orden de marcha secuencia molino de carbón y sirena - luz de aviso primera planta molino de carbón listo para arrancar.	OM-GMA \wedge L61-2W1.G1 OK \wedge L61-2W1.G2 OK
T2	Orden de marcha sirena - luz de aviso primera planta molino de carbón y ventilador de obturación del molino de carbón molido listo para arrancar.	L61-2W1.G1:D \wedge L61-2W1.G2:D \wedge L61-VT1.M1 OK
T3	Respuesta de marcha ventilador de obturación del molino de carbón y accionamiento principal molino de carbón listo para arrancar y no alarma contra incendios en filtro molino carbón activada y no posición acoplamiento accionamiento auxiliar molino de carbón y (no presión mínima aceite engrase reductor y no temperatura mínima aceite reductor y no flujo mínimo aceite reductor) y presión del sistema hidráulico entre 60 y 80 bares y respuesta de marcha bomba engrase reductor elegida y respuesta de marcha separador y respuesta de marcha ventilador filtro y válvula rotativa alimentación molino de carbón lista para arrancar y alimentador de placas bajo silo de carbón bruto listo para arrancar y no máximo nivel vibraciones molino y no máxima temperatura de ninguno de los cuatro rodillos del molino y no nivel máximo de vibraciones del reductor durante 10 segundos y no temperatura máxima del reductor del molino y temperatura gases de entrada molino de carbón > 65 °C y temperatura gases de salida molino de carbón > 65 °C.	L61-VT1.M1:R \wedge L61-AP1.M1 OK \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI \wedge \neg L61-AK1.X1:X \wedge (\neg L61-EL1.P1:N \wedge \neg L61-EL1.T1:N \wedge \neg L61-EL1.F1:N \wedge 60 bar < L61-UH1.P1 < 80 bar \wedge (L61-EL1.M1:R \vee L61-EL2.M1:R) \wedge L61-SP1.M1:R \wedge L61-VE1.M1:R \wedge L61-VR1.M1 OK \wedge L61-TP1.M1 OK \wedge \neg L61-MR1.N1:PV max \wedge \neg L61-MR1.T1:PV max \wedge \neg L61-MR1.T2:PV max \wedge \neg L61-MR1.T3:PV max \wedge \neg L61-MR1.T4:PV max \wedge \neg L61-MR1.N1:PV max 10 s \wedge \neg L61-MR1.T5:PV max \wedge L61-MR1.T6:PV > 65 °C \wedge L61-MR1.T7:PV > 65 °C
T4	Respuesta de marcha accionamiento principal molino de carbón y no máxima presión diferencial entrada molino y no máxima presión diferencial salida molino y retardo de 5 segundos.	L61-AP1.M1:R \wedge \neg L61-MR1.P1:PV max \wedge \neg L61-MR1.P2:PV max \wedge Re 5 s
T5	Respuesta de marcha válvula rotativa alimentación molino de carbón y alimentador de placas bajo silo de carbón bruto listo para arrancar y no nivel máximo de vibraciones.	L61-VR1.M1:R \wedge L61-TP1.M1 OK \wedge \neg L61-MR1.N1:PV max
T6	(No respuesta de marcha válvula rotativa alimentación molino de carbón o no respuesta de marcha alimentador de placas bajo silo de carbón bruto durante 15 segundos) o respuesta de marcha alimentador de placas bajo silo de carbón bruto o (rascador de cadenas bajo alimentador de placas listo para arrancar y retardo de 600 segundos).	(\neg L61-VR1.M1:R Temp.15 s \vee \neg L61-TP1.M1:R Temp. 15 s) \vee L61-TP1.M1:R \vee (L61-RD1.M1 OK \wedge Re 600 s)
T7	No respuesta de marcha accionamiento principal molino de carbón y retardo de 300 segundos y condiciones de T3.	(\neg L61-AP1.M1:R \wedge Re 300 s \wedge condiciones T3)
T8	Respuesta de marcha rascador de cadenas bajo alimentador de placas y retardo de 180 segundos.	L61-RD1.M1:R \wedge Re 180 s
T9	No respuesta de marcha rascador de cadenas bajo alimentador de placas y respuesta de marcha alimentador de placas bajo silo de carbón bruto y rascador de cadenas bajo alimentador de placas listo para arrancar y retardo de 600 segundos.	\neg L61-RD1.M1:R \wedge L61-TP1.M1:R \wedge L61-RD1.M1 OK \wedge Re 600 s

Tabla 8.8. Listado de transiciones perteneciente a la red de Petri del grupo molino y alimentación de material.

Para finalizar este apartado, en la Figura 8.4 se muestra la red de Petri perteneciente al grupo molino y alimentación de material.

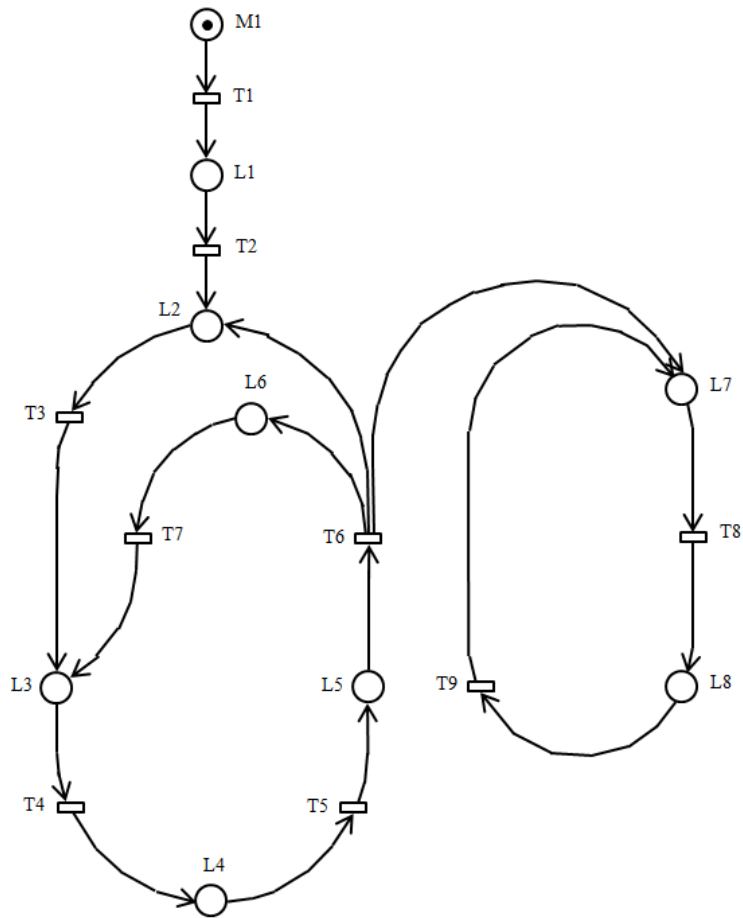


Figura 8.4. Diagrama de la red de Petri que representa el grupo molino y alimentación de material.

8.6. Red de Petri global

Como se explicó al inicio de este capítulo, la red de Petri global de la instalación se podrá conformar uniendo las cuatro redes de Petri que definen cada uno de los grupos en los que está dividida. De hecho, sería posible con sólo un golpe de ratón arrancar todo el molino en secuencia siempre y cuando la opción bypass esté habilitada en cada uno de los grupos. De este modo arrancarían el primero de ellos y continuarían arrancando el resto siempre y cuando se cumplieran todos los enclavamientos necesarios.

Esto se traduce en que en el listado de transiciones de la red de Petri global existirán tres de ellas, en concreto la T7, la T10 y la T25 que podrán también activarse hacia la ruta que conduce al siguiente grupo sólo cuando el modo bypass esté activado “*bypass on*” y la primera de las máquinas del siguiente grupo esté lista para arrancar.

Por otro lado, en la red de Petri global del sistema se presentará la posibilidad de ir arrancando la instalación grupo a grupo por parte del operario de control. Es por ello

que aparecerán los cuatro estados iniciales de reposo identificados como M1 para el grupo engrase reductor, M2 para el grupo sistema hidráulico, M3 para el grupo circuito de gases y M4 para el grupo molino y alimentación de material. A través de estos estados iniciales se podrán activar las transiciones pertinentes para poner en marcha el grupo correspondiente.

En la Tabla 8.9 se muestra el listado de lugares perteneciente a la red de Petri global del sistema, mientras que la Tabla 8.10 mostrará el listado de transiciones. Finalmente, la Figura 8.5 mostrará la red de Petri global del molino de carbón.

Lugar	Actividad	Señales involucradas
L1	Orden de marcha bomba 1 engrase reductor.	L61-EL1.M1:D
L2	Orden de marcha caldeo 1 aceite reductor y orden de marcha caldeo 2 aceite reductor.	L61-EL1.H1:D ^ L61-EL2.H1:D
L3	No orden de marcha caldeo 1 aceite reductor y no orden de marcha caldeo 2 aceite reductor.	\neg L61-EL1.H1:D ^ \neg L61-EL2.H1:D
L4	Orden de marcha bomba 2 engrase reductor.	L61-EL2.M1:D
L5	Orden de marcha refrigerador aceite reductor.	L61-VX1.M1:D
L6	No orden de marcha refrigerador aceite reductor.	\neg L61-VX1.M1:D
L7	Orden de marcha bomba sistema hidráulico.	L61-UH1.M1:D
L8	No orden de marcha bomba sistema hidráulico.	\neg L61-UH1.M1:D
L9	Orden de marcha válvula bajada de presión sistema hidráulico.	L61-VA1.M1:D
L10	No orden de marcha válvula bajada de presión sistema hidráulico.	\neg L61-VA1.M1:D
L11	Orden de marcha sirena y luz de aviso tercera planta molino de carbón.	L91-2W1.G1:D ^ L91-2W1.G2:D
L12	Orden de marcha ventilador filtro silo de carbón molido.	L91-VE1:D
L13	Orden de marcha desempolvado filtro silo de carbón molido.	L91-FT1.C1:D
L14	Orden de marcha válvula rotativa evacuación filtro molino de carbón.	L61-VR2.M1:D
L15	Orden de marcha sinfín evacuación filtro molino de carbón.	L61-GU1.M1:D
L16	Orden de marcha desempolvado filtro molino de carbón.	L61-FT1.C1:D
L17	Orden de marcha separador molino de carbón.	L61-SP1.M1:D
L18	Orden de marcha ventilador filtro molino de carbón.	L61-VE1.M1:D
L19	Orden de marcha compuerta todo - nada entrada molino de carbón.	L51-VQ1.M1:DX
L20	Orden de marcha compuerta proporcional entrada molino de carbón.	L51-PC1.M1:DX
L21	Orden de marcha compuerta todo - nada entrada filtro molino de carbón.	L61-VQ1.M1:DX
L22	Orden de marcha compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón .	L61-VQ2.M1:DX
L23	Orden de marcha compuerta proporcional recirculación molino de carbón.	L51-PC2.M1:DX
L24	Orden de marcha sirena y luz de aviso primera planta molino de carbón.	L61-2W1.G1:D ^ L61-2W1.G2:D
L25	Orden de marcha ventilador de obturación del molino de carbón molido.	L61-VT1.M1:D
L26	Orden de marcha accionamiento principal molino de carbón.	L61-AP1.M1:D
L27	Orden de marcha válvula rotativa alimentación molino de carbón.	L61-VR1.M1:D
L28	Orden de marcha alimentador de placas bajo silo de carbón bruto.	L61-TP1.M1:D
L29	No orden de marcha accionamiento principal molino de carbón.	\neg L61-AP1.M1:D
L30	Orden de marcha rascador de cadenas bajo alimentador de placas.	L61-RD1.M1:D
L31	No Orden de marcha rascador de cadenas bajo alimentador de placas.	\neg L61-RD1.M1:D

Tabla 8.9. Listado de lugares perteneciente a la red de Petri global del molino de carbón.

Transición	Actividad	Señales involucradas
T1	(Selección bomba 1 engrase reductor y orden de marcha grupo engrase reductor y bomba 1 engrase reductor lista para arrancar) o (Selección bomba 2 engrase reductor y orden de marcha grupo engrase reductor y bomba 2 engrase reductor lista para arrancar).	(Sel. L61-EL1.M1 \wedge OM-GER \wedge L61-EL1.M1 OK) \vee (Sel. L61-EL2.M1 \wedge OM-GER \wedge L61-EL2.M1 OK)
T2	((Temperatura aceite reductor $< 20^\circ\text{C}$ o temperatura mínima aceite reductor activada) y respuesta de marcha bomba 1 engrase reductor y caldeo 1 aceite reductor listo para arrancar y caldeo 2 aceite reductor listo para arrancar y no temperatura máxima grupo 1 resistencias caldeo aceite reductor y no temperatura máxima grupo 2 resistencias caldeo aceite reductor) o (temperatura aceite reductor $> 50^\circ\text{C}$ o temperatura máxima aceite en refrigerador de aire y refrigeración aceite reductor listo para arrancar) o (orden de marcha bomba 1 engrase reductor y no respuesta de marcha bomba 1 engrase reductor y bomba 2 engrase reductor lista para arrancar).	((L61-EL1.T4:PV $< 20^\circ\text{C}$ \vee L61-EL1.T1:N) \wedge L61-EL1.M1:R \wedge L61-EL1.H1 OK \wedge L61-EL2.H1 OK \wedge \neg L61-EL1.T2.M \wedge \neg L61-EL1.T3.M) \vee (L61-EL1.T4:PV $> 50^\circ\text{C}$ \vee L61-VX1.T1:M \wedge L61-VX1.M1 OK) \vee (L61-EL1.M1:D \wedge \neg L61-EL1.M1:R \wedge L61-EL2.M1 OK)
T3	Respuesta de marcha caldeo 1 aceite reductor y respuesta de marcha caldeo 2 aceite reductor y (temperatura aceite reductor $> 30^\circ\text{C}$ o temperatura máxima aceite reductor activada).	L61-EL1.H1:R \wedge L61-EL2.H1:R \wedge (L61-EL1.T4:PV $> 30^\circ\text{C}$ \vee L61-EL1.T1:M)
T4	No respuesta de marcha caldeo 1 aceite reductor y no respuesta de marcha caldeo 2 aceite reductor y (respuesta de marcha bomba 1 engrase reductor o respuesta de marcha bomba 2 engrase reductor) y (temperatura aceite reductor $< 20^\circ\text{C}$ o temperatura mínima aceite reductor activada) y caldeo 1 aceite reductor listo para arrancar y caldeo 2 aceite reductor listo para arrancar y no temperatura máxima grupo 1 resistencias caldeo aceite reductor y no temperatura máxima grupo 2 resistencias caldeo aceite reductor.	\neg L61-EL1.H1:R \wedge \neg L61-EL2.H1:R \wedge (L61-EL1.M1:R \vee L61-EL2.M1:R) \wedge (L61-EL1.T4:PV $< 20^\circ\text{C}$ \vee L61-EL1.T1:N) \wedge L61-EL1.H1 OK \wedge L61-EL2.H1 OK \wedge \neg L61-EL1.T2.M \wedge \neg L61-EL1.T3.M
T5	(Orden de marcha bomba 2 engrase reductor y no respuesta de marcha bomba 2 engrase reductor y bomba 1 engrase reductor lista para arrancar) o ((temperatura aceite reductor $< 20^\circ\text{C}$ o temperatura mínima aceite reductor activada) y respuesta de marcha bomba 2 engrase reductor y caldeo 1 aceite reductor listo para arrancar y caldeo 2 aceite reductor listo para arrancar y no temperatura máxima grupo 1 resistencias caldeo aceite reductor y no temperatura máxima grupo 2 resistencias caldeo aceite reductor) o (temperatura aceite reductor $> 50^\circ\text{C}$ o temperatura máxima aceite en refrigerador de aire y refrigeración aceite reductor listo para arrancar).	(L61-EL2.M1:D \wedge \neg L61-EL2.M1:R \wedge L61-EL1.M1 OK) \vee ((L61-EL1.T4:PV $< 20^\circ\text{C}$ \vee L61-EL1.T1:N) \wedge L61-EL2.M1:R \wedge L61-EL1.H1 OK \wedge L61-EL2.H1 OK \wedge \neg L61-EL1.T2.M \wedge \neg L61-EL1.T3.M) \vee (L61-EL1.T4:PV $> 50^\circ\text{C}$ \vee L61-VX1.T1:M \wedge L61-VX1.M1 OK)
T6	Respuesta de marcha refrigeración aceite reductor y temperatura aceite reductor $< 45^\circ\text{C}$.	L61-VX1.M1:R \wedge L61-EL1.T4:PV $< 45^\circ\text{C}$
T7	(No respuesta de marcha refrigeración aceite reductor y temperatura aceite reductor $> 50^\circ\text{C}$ o temperatura máxima aceite en refrigerador de aire y refrigeración aceite reductor listo para arrancar) o (modo bypass activado en engrase reductor y no nivel mínimo tanque sistema hidráulico y bomba sistema hidráulico lista para arrancar).	(\neg L61-VX1.M1:R \wedge L61-EL1.T4:PV $> 50^\circ\text{C}$ \vee L61-VX1.T1:M \wedge L61-VX1.M1 OK) \vee (bypass on engrase reductor \wedge \neg L61-UH1.L1:N \wedge L61-UH1.M1 OK)
T8	Orden de marcha secuencia sistema hidráulico y no nivel mínimo tanque sistema hidráulico y bomba sistema hidráulico lista para arrancar.	OM-GSH \wedge \neg L61-UH1.L1:N \wedge L61-UH1.M1 OK
T9	(Respuesta de marcha bomba sistema hidráulico y presión sistema hidráulico 5 bares mayor que consigna) o (nivel mínimo tanque sistema hidráulico).	(L61-UH1.M1:R \wedge L61-UH1.P1:PV $>$ consigna + 5 bares) \vee (L61-UH1.L1:N)
T10	(Presión sistema hidráulico mayor que 170 bares) o (presión sistema hidráulico 10 bares menor que consigna y no nivel mínimo tanque sistema hidráulico) o (modo bypass activado grupo sistema hidráulico y sirena - luz de aviso tercera planta molino de carbón listo para arrancar).	(L61-UH1.P1:PV > 170 bar) \vee (L61-UH1.P1:PV $<$ consigna - 10 bar \wedge \neg L61-UH1.L1:N) \vee (bypass on sistema hidráulico \wedge L91-2W1.G1 \wedge L91-2W1.G2 OK)
T11	Respuesta de marcha válvula bajada de presión sistema hidráulico \wedge presión sistema hidráulico 5 bares mayor que consigna.	L61-VA1.M1:R \wedge L61-UH1.P1:PV $<$ consigna + 5 bares

Transición	Actividad	Señales involucradas
T12	Orden de marcha secuencia transporte al silo de carbón molino y sirena - luz de aviso tercera planta molino de carbón listo para arrancar.	OM-GCG \wedge L91-2W1.G1 \wedge L91-2W1.G2 OK
T13	Orden de marcha sirena - luz de aviso tercera planta molino de carbón y ventilador filtro silo de carbón molido listo para arrancar y no nivel máximo silo de carbón molino y no peso máximo silo de carbón molido.	L91-2W1.G1:D \wedge L91-2W1.G2:D \wedge L91-VE1 OK \wedge \neg L91-3B1.L1:M \wedge \neg L91-3B1.W1:PV max
T14	Respuesta de marcha ventilador filtro silo de carbón molido y desempolvado filtro silo de carbón molido listo para arrancar.	L91-VE1:R \wedge L91-FT1.C1 OK
T15	Respuesta de marcha desempolvado filtro silo de carbón molido y válvula rotativa evacuación filtro molino de carbón lista para arrancar y retardo de 5 segundos.	L91-FT1.C1:R \wedge L61-VR2.M1 OK \wedge Re 5 s
T16	Respuesta de marcha válvula rotativa evacuación filtro molino de carbón y sinfín evacuación filtro molino de carbón listo para arrancar y no temperatura material en sinfín evacuación filtro molino de carbón máxima.	L61-VR2.M1:R \wedge L61-GU1.M1 OK \wedge \neg L61-GU1.T1:PV max
T17	Respuesta de marcha sinfín evacuación filtro molino de carbón y desempolvado filtro molino de carbón listo para arrancar y no presión mínima desempolvado filtro molino de carbón y no temperatura entrada gases filtro molino de carbón máxima y no temperatura salida gases filtro molino de carbón máxima.	L61-GU1.M1:R \wedge L61-FT1.C1 OK \wedge \neg L61-FT1.P1:N \wedge \neg L61-FT1.T1:PV max \wedge \neg L61-FT1.T2:PV max
T18	Respuesta de marcha desempolvado filtro molino de carbón y separador molino de carbón listo para arrancar y retardo de 10 segundos.	L61-FT1.C1:R \wedge L61-SP1.M1 OK \wedge Re 10 s
T19	Respuesta de marcha separador molino de carbón y ventilador filtro molino de carbón listo para arrancar y no alarma conraintencios en filtro molino carbón activada y no temperatura salida ventilador filtro molino de carbón máxima y retardo de 10 segundos.	L61-SP1.M1:R \wedge L61-VE1.M1 OK \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI \wedge \neg L61-VE1.T1:PV max \wedge Re 10 s
T20	Respuesta de marcha ventilador filtro molino de carbón y compuerta todo - nada entrada molino de carbón lista para arrancar y no alarma conraintencios en filtro molino carbón activada y retardo de 30 segundos.	L61-VE1.M1:R \wedge L51-VQ1.M1 OK \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI \wedge Re 30 s
T21	Respuesta de marcha abrir compuerta todo - nada entrada molino de carbón y retardo 20 s hasta compuerta todo - nada entrada molino de carbón abierta y no cerrada y final de carrera de seguridad no activado y compuerta proporcional entrada molino de carbón lista para arrancar y no alarma conraintencios en filtro molino carbón activada.	L51-VQ1.M1:RX \wedge Re 20 s \rightarrow \neg L51-VQ1.X1:X \wedge L51-VQ1.Y1:Y \wedge L51-VQ1.Y2:Y \wedge L51-PC1.M1 OK \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI
T22	Respuesta de marcha abrir compuerta proporcional entrada molino de carbón y compuerta todo - nada entrada filtro molino de carbón lista para arrancar y no alarma conraintencios en filtro molino carbón activada y retardo de 5 segundos.	L51-PC1.M1:RX \wedge L61-VQ1.M1 OK \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI \wedge Re 5 s
T23	Respuesta de marcha abrir compuerta todo - nada entrada filtro molino de carbón más retardo 20 s hasta compuerta todo - nada entrada filtro molino de carbón abierta y no cerrada y final de carrera de seguridad no activado y compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón lista para arrancar y no alarma conraintencios en filtro molino carbón activada.	L61-VQ1.M1:RX \wedge Re 20 s \rightarrow \neg L61-VQ1.M1:X1:X \wedge L61-VQ1.Y1:Y \wedge L61-VQ1.Y2:Y \wedge L61-VQ2.M1 OK \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI
T24	Respuesta de marcha abrir compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón más retardo 20 s hasta compuerta todo - nada salida filtro molino de carbón abierta y no cerrada y compuerta proporcional recirculación molino de carbón lista para arrancar y no alarma conraintencios en filtro molino carbón activada.	L61-VQ2.M1:RX \wedge Re 20 s \rightarrow \neg L61-VQ2.M1:X1:X \wedge L61-VQ2.Y1:Y \wedge L51-PC2.M1 OK \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI
T25	Respuesta de marcha abrir compuerta proporcional recirculación molino de carbón hasta alcanzar consigna o modo bypass activado grupo circuito de gases y sirena - luz de aviso primera planta molino de carbón listo para arrancar.	(L51-PC2.M1:RX) \vee (bypass on circuito de gases \wedge L61-2W1.G1 OK \wedge L61-2W1.G2 OK)

Transición	Actividad	Señales involucradas
T26	Orden de marcha secuencia molino de carbón y sirena - luz de aviso primera planta molino de carbón listo para arrancar.	OM-GMA \wedge L61-2W1.G1 OK \wedge L61-2W1.G2 OK
T27	Orden de marcha sirena - luz de aviso primera planta molino de carbón y ventilador de obturación del molino de carbón molido listo para arrancar.	L61-2W1.G1:D \wedge L61-2W1.G2:D \wedge L61-VT1.M1 OK
T28	Respuesta de marcha ventilador de obturación del molino de carbón y accionamiento principal molino de carbón listo para arrancar y no alarma contra incendios en filtro molino carbón activada y no posición acoplamiento accionamiento auxiliar molino de carbón y (no presión mínima aceite engrase reductor y no temperatura mínima aceite reductor y no flujo mínimo aceite reductor) y presión del sistema hidráulico entre 60 y 80 bares y respuesta de marcha bomba engrase reductor elegida y respuesta de marcha separador y respuesta de marcha ventilador filtro y válvula rotativa alimentación molino de carbón lista para arrancar y alimentador de placas bajo silo de carbón bruto listo para arrancar y no máximo nivel vibraciones molino y no máxima temperatura de ninguno de los cuatro rodillos del molino y no nivel máximo de vibraciones del reductor durante 10 segundos y no temperatura máxima del reductor del molino y temperatura gases de entrada molino de carbón > 65 °C y temperatura gases de salida molino de carbón > 65 °C.	L61-VT1.M1:R \wedge L61-AP1.M1 OK \wedge \neg L61-VQ2.M1:FI \wedge \neg L61-AK1.X1:X \wedge (\neg L61-EL1.P1:N \wedge \neg L61-EL1.T1:N \wedge \neg L61-EL1.F1:N) \wedge 60 bar < L61-UH1.P1 < 80 bar \wedge (L61-EL1.M1:R \vee L61-EL2.M1:R) \wedge L61-SP1.M1:R \wedge L61-VE1.M1:R \wedge L61-VR1.M1 OK \wedge L61-TP1.M1 OK \wedge \neg L61-MR1.N1:PV max \wedge \neg L61-MR1.T1:PV max \wedge \neg L61-MR1.T2:PV max \wedge \neg L61-MR1.T3:PV max \wedge \neg L61-MR1.T4:PV max \wedge \neg L61-MR1.N1:PV max 10 s \wedge \neg L61-MR1.T5:PV max \wedge L61-MR1.T6:PV > 65 °C \wedge L61-MR1.T7:PV > 65 °C
T29	Respuesta de marcha accionamiento principal molino de carbón y no máxima presión diferencial entrada molino y no máxima presión diferencial salida molino y retardo de 5 segundos.	L61-AP1.M1:R \wedge \neg L61-MR1.P1:PV max \wedge \neg L61-MR1.P2:PV max \wedge Re 5 s
T30	Respuesta de marcha válvula rotativa alimentación molino de carbón y alimentador de placas bajo silo de carbón bruto listo para arrancar y no máximo nivel de vibraciones.	L61-VR1.M1:R \wedge L61-TP1.M1 OK \wedge \neg L61-MR1.N1:PV max
T31	(No respuesta de marcha válvula rotativa alimentación molino de carbón o no respuesta de marcha alimentador de placas bajo silo de carbón bruto durante 15 segundos) o respuesta de marcha alimentador de placas bajo silo de carbón bruto o (rascador de cadenas bajo alimentador de placas listo para arrancar y retardo de 600 segundos).	(\neg L61-VR1.M1:R Temp. 15 s \vee \neg L61-TP1.M1:R Temp. 15 s) \vee L61-TP1.M1:R \vee (L61-RD1.M1 OK \wedge Re 600 s)
T32	No respuesta de marcha accionamiento principal molino de carbón y retardo de 300 segundos y condiciones de T28.	(No L61-AP1.M1:R \wedge Re 300 s \wedge condiciones T28)
T33	Respuesta de marcha rascador de cadenas bajo alimentador de placas y retardo de 180 segundos.	L61-RD1.M1:R \wedge Re 180 s
T34	No respuesta de marcha rascador de cadenas bajo alimentador de placas y respuesta de marcha alimentador de placas bajo silo de carbón bruto y rascador de cadenas bajo alimentador de placas listo para arrancar y retardo de 600 segundos.	\neg L61-RD1.M1:R \wedge L61-TP1.M1:R \wedge L61-RD1.M1 OK \wedge Re 600 s

Tabla 8.10. Listado de transiciones perteneciente a la red de Petri global del molino de carbón.

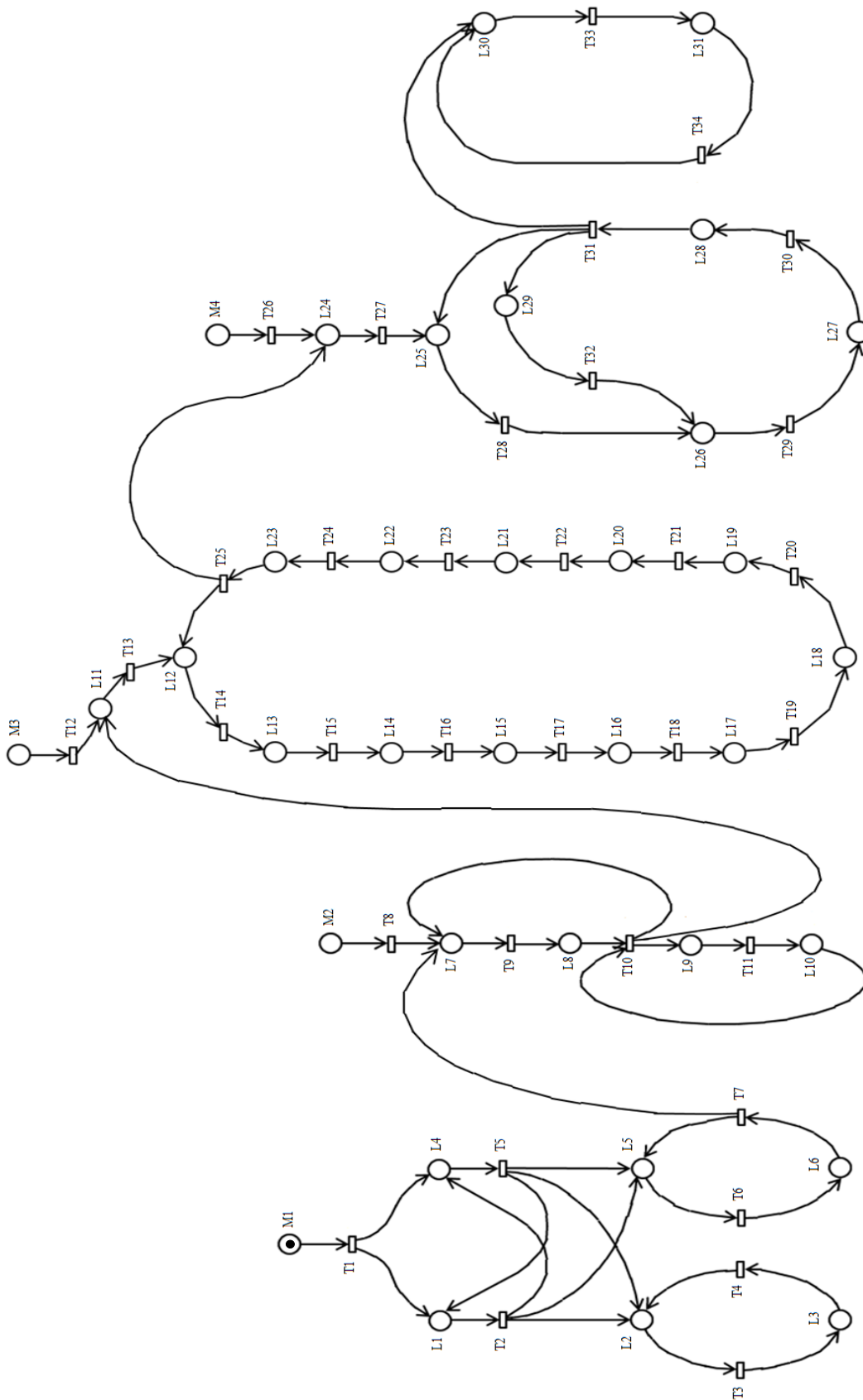


Figura 8.5. Diagrama de la red de Petri global de la instalación del molino de carbón.

9

Conclusiones y trabajos futuros

En el presente trabajo se ha descrito todo el proceso que se ha tenido que llevar a cabo para acometer el cambio del sistema de control de una instalación industrial. Como se ha visto, el primer paso es describir detalladamente el proceso. Para ello hay que tener un alto nivel de conocimiento de cómo deben manejarse las máquinas y cual es su punto óptimo de trabajo. Deben detallarse todas y cada una de las señales que intervienen en el proceso, ya que serán necesarias para poder seguir avanzando en la tarea planteada.

Una vez descrito minuciosamente la forma en la que trabaja la instalación, deberá plantearse si es necesario algún cambio en el tipo de accionamientos. En este caso, además del cambio de toda la aparamenta en el CCM, se cambiaron el tipo de arrancador de tres máquinas críticas, el accionamiento principal del molino, el del ventilador del filtro principal y el de la bomba de impulsión del aceite hidráulico. Estos cambios han sido posibles debido al avance en la electrónica de potencia, lo que ha permitido desarrollar arrancadores electrónicos o suaves y variadores de frecuencia para motores de gran consumo. La inclusión de este tipo de arrancadores supuso reducir el coste del consumo energético de la instalación y reducir la complejidad de la misma.

Este tipo de instalaciones, una vez puestas a régimen, necesitan un mínimo de intervención por parte del operario de sala de control. Para lograr este objetivo, el sistema de control debe estar lo suficientemente afinado para que actúe por sí solo ante cambios en las condiciones de trabajo, siempre buscando el máximo rendimiento y la seguridad para las máquinas y las personas. Es por ello que los lazos de control de las variables críticas del sistema deben estar sustentadas por modelos lo más fieles posible a la realidad. A partir de estos modelos se podrán utilizar las técnicas de control que se consideren necesarias para conseguir el rendimiento óptimo de la instalación.

Para obtener el mejor desempeño del molino se han definido tres lazos de control, obteniéndose mediante ensayos reales de campo la función de transferencia de dos de ellos. Queda pendiente para trabajos futuros el utilizar las técnicas de control adecuadas para conseguir un comportamiento idóneo de los mismos. En especial, el lazo de control de la depresión del molino es susceptible de ser mejorado con este tipo de técnicas. Así se podrían reducir los efectos de la perturbación a la que se ve afectado debido a los disparos de los cañones de aire de la torre del intercambiador del horno.

Finalmente, para poder implantar en un PLC comercial la lógica que gobierne toda la instalación, será necesario definir en primer lugar las subredes de Petri que intervienen en el sistema y a partir de las mismas se podrá obtener una red de Petri global de toda la instalación.

Referencias

- [1] A. López, F. Blanco, M.A. Gutiérrez. Mejora del rendimiento en una cementera mediante el empleo de combustibles alternativos. *Revista Electrónica de Medioambiente*, Vol. 12 N°1-2012, pág.: 47-61.
- [2] A.R. Santos, R.J. Silva. Análisis del consumo de coque de petróleo en algunos sectores industriales. *Información tecnológica*, Vol. 19 N°2-2008, pág.: 93-101.
- [3] "Pt100, su operación, instalación y tablas."
www.electronicaestudio.com/docs/nt-004.pdf. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [4] J.M. Hidalgo de Cisneros. Los molinos verticales en la industria del cemento. *Loesche Española de Ingeniería*.
- [5] www.fluidtechnik.com/es/. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [6] www.loesche.com/es. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [7] T. Wildi. Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. Ed. *Pearson Educación*, México, 2007.
- [8] www.new.abb.com/es. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [9] www.cefem-group.com/es. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [10] www.wika.es. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [11] www.es.endress.com/es. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [12] www.eletta.se/en/. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [13] www.schenckprocess.com/es. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [14] www.se.com/es/es/. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [15] www.pepperl-fuchs.com/spain/es/index.htm. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [16] www.pruftechnik.com/es/. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [17] www.profibus.es/profibus. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [18] K. J. Aström, T. Hägglund. Control PID avanzado. *Pearson Education*, 2009.

- [19] K. J. Aström, B. Wittenmark. *Sistemas Controlados por Computador*. Paraninfo, 1988.
- [20] www.es.mathworks.com/help/ident/. Accedido el 4, noviembre 2019.
- [21] M. Silva. *Las Redes de Petri: en la Automática y la Informática*. Thomson 2002.
- [22] L. D. Murillo. Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables. *Tecnología en Marcha*, Vol. 21, N.º 4, Octubre - diciembre 2008, pp. 102 - 125.

Resumen

Dentro del grupo de industrias conocidas como electrointensivas se encuentran las fábricas de cemento. Este tipo de instalaciones consumen gran cantidad de energía eléctrica para llevar a cabo el proceso de transformación de la caliza en cemento. Además de energía eléctrica, también consumen combustibles fósiles que deben ser quemados en el horno de cemento, donde se produce la transformación de la caliza en Clinker, el componente principal del cemento.

El combustible fósil, un derivado del petróleo, petroleum coke o más conocido por su abreviación pet coke, llega a las plantas con una granulometría y finura inadecuados, por lo que debe ser molturado con anterioridad a su uso. Este proceso de molturación se lleva a cabo en los denominados molinos de carbón, pudiendo ser estos de rodillos o de bolas.

Este tipo de instalaciones fueron implantadas en la mayoría de las fábricas de cemento a partir de los años 80, debido a la subida del precio del petróleo tras la crisis de los 70. Desde entonces hasta nuestros días la tecnología ligada al control automático, así como el avance en la electrónica de potencia ha hecho que la parte eléctrica de este tipo de instalaciones industriales se haya quedado obsoleta.

En el presente trabajo se llevará a cabo todo el proceso previo de ingeniería que es necesario acometer antes de iniciar un cambio de sistema de control, instrumentación de campo, así como de aparataje eléctrico de un molino de carbón dentro de una fábrica de cemento.

Se trata de una instalación que alberga unos 40 motores, entre los que se encuentran aquellos que arrancan directamente, mediante arrancador suave o mediante variador de frecuencia. Dentro de los dispositivos de instrumentación de campo se encuentran medidores de temperatura, de presión, tanto para gases como para líquidos, de posición, de peso y de vibraciones. Todas las señales generadas, tanto en campo como dentro del centro de control de motores (CCM), deben ser enviadas al sistema de control que gobierne la instalación. Este sistema de control poseerá un Scada desde el cual el operario de sala de control gobernará el molino. El avance de la tecnología en cuestión de comunicaciones ha hecho posible que grandes cantidades de información puedan ser transmitidas a través de un par de fibra óptica. Por este motivo, el sistema de control elegido está basado en el bus Profibus a través de fibra óptica. La implantación del sistema de control será distribuida, es decir, todas las señales que se generan en campo se irán concentrando en distintas cajas de campo, que se unirán a través de un anillo de fibra óptica junto con las señales generadas en el CCM para terminar en el puesto de control.

El trabajo previo del ingeniero comienza con el estudio pormenorizado de la instalación, tanto desde el punto de vista eléctrico como de proceso. En esta fase se obtendrá una imagen de cómo está la instalación antes y cómo se quiere que esté después del cambio. Será necesario listar cada una de las señales que intervienen, definir qué accionamientos quieren cambiarse y por qué tipo, realizar ensayos de proceso sobre la instalación para determinar el modelo que mejor defina los distintos lazos de control y desarrollar la red de Petri correspondiente para, a partir de ella, realizar la programación del sistema de control. Este trabajo puede ser extrapolado a cualquier instalación eléctrica que quiera ser modernizada y puede valer de guía a muchos otros ingenieros.