



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL APLICADA AL PROCESO  
DE CAL VIVA, PARA EL HORNO VERTICAL No. 1 EN  
CEMENTOS PROGRESO, PLANTA LA PEDRERA.**

**Antonio Roberto García Escobar**

**Asesorado por: Ing. José Roberto Barillas Castellanos**

**Guatemala, febrero 2005**



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL APLICADA AL PROCESO  
DE CAL VIVA, PARA EL HORNO VERTICAL No. 1 EN  
CEMENTOS PROGRESO, PLANTA LA PEDRERA.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN  
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ANTONIO ROBERTO GARCÍA ESCOBAR**  
ASESORADO POR: ING. JOSÉ ROBERTO BARILLAS CASTELLANOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA

Guatemala, febrero de 2005



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO     | Ing. Sydney Alexander Samuels Milson |
| VOCAL I    | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos      |
| VOCAL II   | Lic. Amahán Sánchez Álvarez          |
| VOCAL III  | Ing. Julio David Galicia Celada      |
| VOCAL IV   | Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz      |
| VOCAL V    | Br. Elisa Yazminda Vides Leiva       |
| SECRETARIO | Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO     | Ing. Sydney Alexander Samuels Milson |
| EXAMINADOR | Ing. Edgar Florencio Montúfar Urizar |
| EXAMINADOR | Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez  |
| EXAMINADOR | Ing. Juan Carlos Córdova Zeceña      |
| SECRETARIO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco   |



**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración mi trabajo de graduación titulado:

**AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL APLICADA AL PROCESO DE  
CAL VIVA, PARA EL HORNO VERTICAL No. 1 EN CEMENTOS  
PROGRESO, PLANTA LA PEDRERA.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica con fecha 11 de noviembre de 2002 No. EIME.172.2002.

Antonio Roberto García Escobar









A CEMENTOS  
PROGRESO

Ing. Erick Zepeda, Ing. Rudy González, Ing. Byron Solares, Ing. Jorge Díaz, Ing. Axel Mendoza.  
Por la ayuda recibida en la realización de este trabajo.

A GRUPO COBRA C.A.

Ing. Luis Núñez, Ing. Henry Darce, Ing. Oscar Ovalle, Ing. Edgar Recinos, Ing. Alexis Osorio.  
Por el apoyo recibido.



# ÍNDICE GENERAL

|  |             |
|--|-------------|
| <b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....                   | <b>VI</b>   |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....                         | <b>X</b>    |
| <b>GLOSARIO</b> .....                                  | <b>XI</b>   |
| <b>RESUMEN</b> .....                                   | <b>XIII</b> |
| <b>OBJETIVOS</b> .....                                 | <b>XV</b>   |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                              | <b>XVI</b>  |
| <br>   |             |
| <b>1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CAL VIVA</b> .....    | <b>1</b>    |
| 1.1. La piedra caliza.....                             | 1           |
| 1.2. La construcción con caliza.....                   | 2           |
| 1.3. Breve descripción del proceso de cal.....         | 3           |
| 1.3.1. Extracción de materia prima.....                | 3           |
| 1.3.2. Reducción del tamaño de la piedra.....          | 4           |
| 1.3.3. Teoría de calcinación.....                      | 5           |
| 1.3.3.1. Temperatura de disociación.....               | 5           |
| 1.3.3.2. Tiempo de disociación.....                    | 7           |
| 1.3.3.3. Remoción del dióxido de carbono generado..... | 7           |
| 1.3.4. Recarbonatación de la cal.....                  | 7           |
| 1.3.5. Granza.....                                     | 8           |
| 1.3.6. Alta vrs baja temperatura de calcinación.....   | 8           |
| 1.4. El horno vertical en el proceso de cal.....       | 9           |
| 1.4.1. Transferencia de calor.....                     | 9           |
| 1.4.1.1. Hornos verticales a contracorriente.....      | 9           |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.4.1.2. Hornos verticales de corriente paralela regenerativos..... | 10        |
| 1.4.2. Calidad de la piedra.....                                    | 11        |
| 1.4.3. Grado de calcinación.....                                    | 12        |
| <b>2. INTRODUCCIÓN A LA AUTOMATIZACIÓN .....</b>                    | <b>15</b> |
| 2.1. La automatización industrial.....                              | 15        |
| 2.2. Historia de los PLC's .....                                    | 16        |
| 2.3. Descripción de un PLC .....                                    | 18        |
| 2.4. Componentes de un PLC .....                                    | 19        |
| 2.4.1. CPU o unidad de proceso lógico.....                          | 19        |
| 2.4.2. Memoria.....   | 19        |
| 2.4.3. Funciones.....   | 20        |
| 2.4.4. Procesador de comunicaciones .....                           | 21        |
| 2.4.5. Tarjetas modulares inteligentes.....                         | 21        |
| 2.4.6. Bus .....  | 21        |
| 2.4.7. Entradas y salidas.....                                      | 22        |
| 2.4.8. Fuente de poder .....  | 23        |
| 2.5. Programación de un PLC .....                                   | 23        |
| 2.5.1. Lenguaje de escalera (tipo NEMA).....                        | 24        |
| 2.5.2. Lenguaje de instrucciones o booleano (AWL) .....             | 25        |
| 2.5.3. Esquema de compuertas lógicas (FUP) .....                    | 26        |
| 2.5.4. Esquema de contactos (KOP) .....                             | 26        |
| 2.6. Análisis de costos .....                                       | 27        |
| 2.6.1. Costos de inversión .....                                    | 27        |
| 2.6.2. Costos de Falla .....  | 28        |
| 2.6.3. Costos de mantenimiento.....                                 | 28        |
| 2.6.4. Costos totales.....  | 29        |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>3.</b>    | <b>FUNCIONAMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS DE CONTROL Y DISPOSITIVOS DE POTENCIA INSTALADOS EN EL HORNO VERTICAL .....</b> | <b>31</b> |
| 3.1.         | Transductores .....   | 31        |
| 3.1.1.       | Clasificación de los transductores eléctricos .....   | 32        |
| 3.1.2.       | Selección de un transductor .....   | 34        |
| 3.1.3.       | Tipos de transductores utilizados en el proceso de cal viva .....   | 36        |
| 3.1.3.1.     | Transductores de temperatura .....  | 36        |
| 3.1.3.1.1.   | Escalas de medición de temperatura .....  | 36        |
| 3.1.3.1.2.   | Medición de temperatura .....   | 37        |
| 3.1.3.1.2.1. | Termocopla .....  | 37        |
| 3.1.3.1.2.2. | Circuito de termo resistencias (RTD) .....  | 39        |
| 3.1.3.1.2.3. | Termistor .....   | 41        |
| 3.1.3.2.     | Transductores piezoeléctricos .....   | 42        |
| 3.1.3.2.1.   | Tipos de presión .....  | 43        |
| 3.1.3.2.2.   | Medición de presión .....   | 45        |
| 3.1.3.3.     | Sensores de proximidad .....  | 48        |
| 3.1.3.3.1.   | Sensores de proximidad capacitivos .....  | 48        |
| 3.1.3.3.2.   | Sensores de proximidad inductivos .....   | 49        |
| 3.2.         | Electroválvulas .....   | 50        |
| 3.3.         | Motores .....   | 51        |
| 3.3.1.       | Motor de Inducción .....  | 51        |
| 3.4.         | Descripción del PLC .....   | 56        |
| 3.4.1.       | Variables de control .....  | 57        |
| <b>4.</b>    | <b>MONTAJE E INSTALACIÓN ELECTRICA DEL EQUIPO .....</b>   | <b>63</b> |
| 4.1.         | Instrumentos de control .....   | 63        |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 4.1.1.      | Ubicación de sensores en el proceso de calcinación .....                  | 63 |
| 4.1.2.      | Instalación de los sensores en el horno .....                             | 64 |
| 4.1.2.1.    | Transductores de temperatura .....  | 64 |
| 4.1.2.1.1.  | Montaje en campo .....  | 65 |
| 4.1.2.1.2.  | Instalación eléctrica de las termocoplas .                                | 67 |
| 4.1.2.2.    | Transductores de presión.....   | 69 |
| 4.1.2.2.1.  | Montaje en campo .....  | 70 |
| 4.1.2.2.2.  | Instalación eléctrica de los transductores<br>de presión.....             | 72 |
| 4.1.2.3.    | Sensores de posición .....  | 73 |
| 4.1.2.3.1.  | Sensores de posición capacitivos .....                                    | 74 |
| 4.1.2.3.1.1 | Detalle de funcionamiento ....  | 74 |
| 4.1.2.3.1.2 | Montaje en campo .....  | 75 |
| 4.1.2.3.1.3 | Instalación eléctrica de los<br>sensores de posición<br>capacitivos ..... | 76 |
| 4.1.2.3.2.  | Sensores de posición inductivos .....                                     | 77 |
| 4.1.2.3.2.1 | Montaje en campo .....  | 78 |
| 4.1.2.3.2.2 | Instalación eléctrica de los<br>sensores de posición<br>inductivos .....  | 80 |
| 4.2.        | Equipo electro-mecánico .....   | 81 |
| 4.2.1.      | Electro-válvulas .....  | 81 |
| 4.2.2.      | Motores .....   | 82 |
| 4.2.2.1.    | Instalación eléctrica.....  | 83 |
| 4.3.        | Equipo de control de proceso .....  | 86 |
| 4.3.1.      | Instalación del PLC .....   | 86 |
| 4.3.1.1.    | Panel PLC .....   | 86 |



|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 4.3.1.2.  | Instalación eléctrica del PLC .....         | 88         |
| <b>5.</b> | <b>AUTOMATIZACIÓN DEL HORNO DE CAL.....</b> | <b>89</b>  |
| 5.1.      | Proceso de transporte.....                  | 90         |
| 5.1.1.    | Descripción del proceso .....               | 90         |
| 5.1.2.    | Análisis de los diagramas de flujo.....     | 91         |
| 5.1.2.1.  | Llenado Inicial.....                        | 91         |
| 5.1.2.2.  | Llenado automático .....                    | 92         |
| 5.1.2.3.  | Grupo de transporte en modo campo .....     | 94         |
| 5.2.      | Proceso de calcinación.....                 | 95         |
| 5.3.      | Proceso de descarga .....                   | 96         |
|           | <b>CONCLUSIONES .....</b>                   | <b>99</b>  |
|           | <b>RECOMENDACIONES .....</b>                | <b>101</b> |
|           | <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                   | <b>103</b> |

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| 1. Diagrama de flujo simplificado del proceso de elaboración de cal hidratada..... | 4  |
| 2. Influencia de la presión en la temperatura de disociación .....                 | 6  |
| 3. Diagrama de operación de hornos en la fabricación de cal viva.....              | 11 |
| 4. Costos de inversión .....   | 27 |
| 5. Costos de falla .....   | 28 |
| 6. Costos de mantenimiento .....   | 29 |
| 7. Costos totales en un PLC .....  | 30 |
| 8. Efecto Seebeck.....   | 37 |
| 9. Voltaje Seebeck.....  | 38 |
| 10. Termoresistencia de dos cables .....   | 39 |
| 11. Termoresistencia de tres cables .....  | 40 |
| 12. Termoresistencia de cuatro cables .....  | 41 |
| 13. Tipos de presión .....   | 43 |
| 14. Elementos de un transductor piezoeléctrico .....                               | 46 |
| 15. Transductor capacitivo para medición de presión.....                           | 47 |
| 16. Transductor inductivo para medición de presión .....                           | 48 |

|  |    |
|--|----|
| 17. Composición básica de un solenoide electromagnético.....                             | 50 |
| 18. Curvas par-deslizamiento y corriente-deslizamiento en un motor de inducción .....    | 53 |
| 19. Instalación de ventiladores de tiro.....   | 55 |
| 20. Entradas y salidas en el PLC .....   | 56 |
| 21. Proceso de calcinación .....   | 63 |
| 22. Termocopla .....   | 64 |
| 23. Pozo para la toma de temperatura en ducto de tiro y aire primario.....               | 66 |
| 24. Ubicación e instalación de termocopla.....   | 67 |
| 25. Conexión del transmisor de temperatura .....   | 68 |
| 26. Diagrama esquemático de conexión de termocoplas.....                                 | 69 |
| 27. Instalación de transductores de presión PZ1 y PZ2.....                               | 70 |
| 28. Ubicación e instalación de transductor PZ3 .....                                     | 71 |
| 29. Conexión del transmisor de presión.....  | 72 |
| 30. Diagrama esquemático de los transductores de presión .....                           | 73 |
| 31. Estado de los contactos de salida en los sensores de posición capacitivos .....      | 75 |
| 32. Ubicación y montaje de sensores de nivel en la parte superior del horno de cal ..... | 76 |
| 33. Diagrama eléctrico de los sensores de nivel.....                                     | 77 |
| 34. Sensor de posición en compuerta de guillotina HC1.....                               | 79 |
| 35. Sensor de posición en motores.....   | 79 |
| 36. Diagrama de conexión de sensor capacitivo.....                                       | 80 |

|  |    |
|--|----|
| 37. Diagrama eléctrico electroválvulas .....           | 81 |
| 38. Esquemático de conexión de motores .....           | 83 |
| 39. Esquemático de conexión de ventiladores.....       | 84 |
| 40. Diseño del panel de control de motores.....        | 85 |
| 41. Panel PLC.....                                     | 87 |
| 42. Alimentación eléctrica del PLC .....               | 88 |
| 43. Proceso de transporte.....                         | 90 |
| 44. Secuencia de llenado inicial.....                  | 91 |
| 45. Secuencia de llenado automático .....              | 92 |
| 46. Secuencia de arranque del grupo de transporte..... | 93 |
| 47. Secuencia de paro del grupo de transporte .....    | 94 |
| 48. Secuencia de calcinación de cal cruda .....        | 95 |
| 49. Secuencia del proceso de descarga.....             | 97 |

## **TABLAS**

|  |    |
|--|----|
| I. Influencia de la caliza en los hornos verticales .....              | 12 |
| II. Tipos de cal que se pueden producir en los hornos verticales ..... | 13 |
| III. Instrucciones básicas en un PLC.....                              | 25 |
| IV. Características de los termopares .....                            | 38 |
| V. Direccionamiento módulo 01 .....                                    | 57 |
| VI. Direccionamiento módulo 02 .....                                   | 57 |

|   |    |
|---|----|
| VII. Direccionamiento módulo 04.....                | 58 |
| VIII. Direccionamiento módulo 05.....               | 58 |
| IX. Direccionamiento módulo 06.....                 | 59 |
| X. Direccionamiento módulo 07.....                  | 59 |
| XI. Direccionamiento módulo 08.....                 | 60 |
| XII. Direccionamiento módulo 10.....                | 60 |
| XIII. Direccionamiento módulo 11.....               | 60 |
| XIV. Direccionamiento módulo 12.....                | 61 |
| XV. Resumen de variables de proceso.....            | 61 |
| XVI. Descripción de motores en horno vertical ..... | 82 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>CaCO<sub>3</sub></b> | Fórmula química de la cal pura.   |
| <b>CaO</b>              | Fórmula química de la cal viva.   |
| <b>C</b>                | Capacitancia.   |
| <b>K</b>                | Constante dieléctrica del material existente entre las placas de un capacitor.                                |
| <b>d</b>                | Distancia en metros entre las placas e un capacitor.  |
| <b>A</b>                | Sección de las placas de un capacitor en mm <sup>2</sup> .  |
| <b>L</b>                | Inductancia.  |
| <b>n</b>                | Velocidad de giro del eje de un motor, en $\frac{\text{revoluciones}}{\text{minuto}}$ .                       |
| <b>n1</b>               | Velocidad síncrona de un motor.   |
| <b>P</b>                | Número de polos de un motor   |
| <b>S</b>                | Relación entre a velocidad de sincronismo y la velocidad mecánica del eje de un motor, llamada deslizamiento. |

## GLOSARIO

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b><i>Aprom feeder</i></b> | Es la máquina utilizada en el proceso de cal, para extraer la piedra de la tolva principal. Está compuesta de una banda metálica en forma de oruga.  |
| <b>Criva vibratoria</b>    | Es la máquina utilizada en el proceso de cal, para seleccionar el tamaño adecuado de la piedra utilizada en el proceso.                              |
| <b>Disociación</b>         | Es el fenómeno, en el cual existe la descomposición del carbonato de calcio y el magnesio en el proceso de cal.                                      |
| <b>Efecto Seebeck</b>      | Es la corriente eléctrica producida en uno de los extremos de una unión de metales diferentes, cuando se aplica calor al otro extremo.               |
| <b>FEM</b>                 | Es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, el cual genera un movimiento de electrones. También llamada “fuerza electro motriz”.       |
| <b>Multímetro</b>          | Es el instrumento utilizado para realizar mediciones de todo tipo de parámetros; los más comunes se utilizan para medición de parámetros eléctricos. |

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>PLC</b>                    | Es un aparato electrónico operado digitalmente que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones, las cuales implementan funciones específicas.                        |
| <b>Relevadores</b>            | Son dispositivos electromagnéticos que controlan el cierre y apertura de contactos eléctricos, también denominados relés.  |
| <b>RTD</b>                    | Es el conjunto de resistencias conectadas en serie-paralelo, utilizada para convertir cambios de la resistencia en un sensor en cambios de voltaje.  |
| <b>Transductor</b>            | Es el dispositivo que convierte señales mecánicas, sonoras, térmicas, químicas, etc, en señales eléctricas.  |
| <b>Variador de Frecuencia</b> | Es el dispositivo utilizado para arranque de motores de inducción de gran potencia. Su funcionamiento se basa en la disminución de la frecuencia de entrada en el motor, en el momento del arranque. |



## **RESUMEN**

El crecimiento de los procesos industriales, en las últimas décadas, va de la mano con la mejora en la tecnología aplicada a los mismos. Se observa un aumento significativo en la producción, que mantiene un alto porcentaje en la homogeneidad de la calidad del producto.

La automatización industrial consiste en un sistema muy versátil, que se encarga de la ejecución de las etapas en un proceso definido, y a través de la utilización de sistemas de control de proceso y equipos electro-mecánicos, llevan a cabo la realización del producto final bajo normas, lineamientos y estándares de calidad previamente establecidos.

El elemento principal de la automatización industrial es el “controlador lógico programable” (PLC por sus siglas en inglés). Éste interpreta los estados de dispositivos que convierten todo tipo de señales en el ambiente del proceso en señales eléctricas, y acciona los mecanismos destinados a cambiar los estados del producto en sus diferentes etapas.

En el presente trabajo, se expone el proceso de automatización para un horno de cal, el cual puede utilizarse en la realización de cualquier tipo de proceso. Se plantean los lineamientos principales para la realización de dicha automatización, recalcando las variables de proceso del mismo, las cuales se convierten en el punto de partida para la definición de los equipos e instrumentos utilizados en el presente trabajo.

Además, se presenta la descripción del funcionamiento de los equipos e instrumentos instalados en el horno vertical, así como detalles de instalación de los mismos, los cuales varían según su ubicación y la misión de los mismos, respecto al proceso de cal viva, conceptos que podrán aplicarse en la automatización de cualquier proceso.

# OBJETIVOS

## General

Estudiar los lineamientos básicos de automatización de un horno de cal y los detalles de instalación de los instrumentos transductores, los cuales se pueden encontrar en cualquier línea del proceso, dentro de la industria guatemalteca.

## Específicos

1. Conocer las ventajas y desventajas del sistema de automatización industrial, para la correcta elección del equipo.
2. Determinar las variables del proceso de cal, mediante el estudio de los diagramas de flujo y funcionamiento del horno de cal viva.
3. Analizar el tipo de instrumentación utilizada en el proceso de automatización de un horno de cal, tanto en detalles técnicos de funcionamiento, como la correcta instalación de los mismos.
4. Conocer el procedimiento al aplicar un sistema de automatización para un determinado tipo de proceso.

# INTRODUCCIÓN

La industria guatemalteca ha alcanzado niveles altos de producción y calidad; esto es en gran parte debido a la automatización industrial, la cual comprende, tanto a los dispositivos que convierten un proceso en automático, como la logística del proceso de automatización llevada a cabo en el diseño del sistema que se adecua a cada necesidad.

El dispositivo mas importante en el proceso de automatización es el PLC (controlador lógico programable por sus siglas en inglés), el cual puede definirse como toda máquina electrónica que se ha diseñado para controlar en tiempo real y en un medio industrial, procesos secuenciales de control. Su programación y manejo pueden ser realizados por personal con conocimientos eléctricos o electrónicos, sin previos conocimientos de informática.

Los PLC's surgen como equipos electrónicos sustitutos de los sistemas de control basados en relevadores, que se hacían más complejos; esto ocasionaba dificultades en cuanto a la instalación de los mismos. Los altos costos de operación y mantenimiento, y la poca flexibilidad y confiabilidad de los equipos, así como también el costo excesivo, impulsaron el desarrollo de los nuevos autómatas.

Entre las cualidades encontradas actualmente en un PLC, se puede mencionar la facilidad de programación del mismo, debido a que existen métodos para la realización de dicha tarea, que pueden ajustarse a los conocimientos técnicos de la persona dedicada a dicha labor.

Además, poseen una cualidad de fácil mantenimiento y reparación de los dispositivos, ya que están concebidos de una forma modular, en la cual cualquier elemento puede ser reemplazado rápidamente. Otra de sus características es que poseen un tamaño reducido, y un consumo de potencia menor al de un sistema de control por relevadores. Una gran ventaja de los PLC's, es la capacidad de comunicarse con un sistema central de datos, para procesos de monitoreo. Con esta cualidad, se obtiene un control de varios procesos funcionando simultáneamente.

Para que exista un correcto control, es necesario realizar un estudio de las características de cada proceso, debido a que se deben definir los dispositivos adecuados del sistema que se va a automatizar; la elección de estos dependerá, tanto del diagrama de flujo del proceso, como de las circunstancias, en las cuales actuara cada uno en su etapa respectiva. Estos dispositivos comprenden, tanto los transductores que transfieren todo tipo de señales, como los mecanismos adecuados para el control de arranque o paro de maquinas eléctricas, o el accionamiento de todo tipo de dispositivos necesarios en el proceso.

Los transductores se encargan de enviar al procesador la lectura de todo tipo de señales, como el posicionamiento de máquinas, lecturas de presiones o temperaturas, lectura de las corrientes eléctricas de las máquinas en funcionamiento para accionamiento de protecciones, etc.

El presente trabajo contiene gráficas de costos para un proceso cualquiera, que ayudan a determinar un estudio de las variables económicas del sistema que se desea automatizar, debido a que de ellas depende el tipo de inversión inicial, el tiempo para la recuperación del capital, y los cuidados necesarios para que la vida útil del equipo se prolongue el mayor tiempo posible.

El presente trabajo comprende tanto la fase del análisis de los diagramas de flujo para la determinación de los dispositivos a utilizarse en el control del proceso, como los detalles de funcionamiento e instalación de los dispositivos instalados en el horno vertical, así como el seguimiento de los mismos para la elaboración del programa de control adecuado, que actuará en nuestro controlador lógico programable "PLC".

# 1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CAL VIVA

## 1.1. La piedra caliza

Es una roca calcárea que contiene más de un cincuenta por ciento de carbonato de calcio. Se utiliza, tanto en la construcción de casas sencillas, como en la de imponentes monumentos. Su formación tuvo lugar hace mucho tiempo como resultado de una serie de procesos que produjeron diferentes clases de caliza. Animales marinos como almejas, caracoles y corales extraen carbonato de calcio del agua, y lo utilizan para formar sus conchas y esqueletos. Al morir estos organismos, los restos esqueléticos permanecen.

La caliza también se forma como resultado de la evaporación del agua en una solución de carbonato de calcio. En algunos casos, el carbonato de calcio del agua se precipita directamente y se acumula alrededor de ciertos manantiales, así como en el fondo de lagos y océanos. Los levantamientos de la corteza terrestre han hecho que algunas zonas, que antes estaban sumergidas en agua, queden por encima de la superficie de ésta. Es evidente que la caliza abunda. Se calcula que dicha piedra constituye el 20% de todas las rocas sedimentarias.

El mármol es una variedad de caliza. Éste se forma cuando los depósitos de caliza se ven sometidos al calor y presión durante largos períodos de tiempo. Muchas cavernas famosas tienen hermosas estalactitas y estalagmitas de caliza. Éstas se van formando por la filtración de gotas de agua con carbonato de calcio diluido.

## **1.2. La construcción con caliza**

La caliza es ideal para ciertos objetivos de la construcción. Se puede observar que proporciona un buen aislamiento a los edificios. Una pared construida con caliza de 30 cm. de grosor mantiene constante la temperatura interior, aun cuando en el exterior se produzcan variaciones de temperatura de hasta 20 grados centígrados. La masa de la pared de piedra caliza hace que su superficie interior permanezca a la temperatura media de la habitación.

La caliza también es muy útil para insonorizar (aislar un ambiente de ondas sonoras). Además, si se emplea adecuadamente puede incluso auto impermeabilizarse. El dióxido de carbono del agua de lluvia reacciona con la piedra y progresivamente forma una capa protectora impermeable sobre su superficie.

La caliza ha sido utilizada para la construcción de grandes estructuras; el famoso “arco del triunfo” de París es una de ellas; los bloques de piedra caliza de las pirámides de Egipto alcanzan pesos de hasta 16 toneladas. El mármol es una variedad de caliza susceptible de buen pulimento. El lustre y la belleza perdurables del mármol hicieron de éste, la piedra preferida de Miguel Ángel y otros escultores de su talla.

Por supuesto, no toda la caliza recibe un uso tan destacado. Mucha se pulveriza en molinos como primer paso para procesarla y convertirla en una variedad de productos importantes. Por ejemplo, desde tiempos bíblicos, el hombre ha calcinado la caliza para obtener cal (óxido de calcio). En aquel tiempo, la calcinación se llevaba a cabo en calderas de forma cónica o cilíndrica. La cal servía de ingrediente básico para hacer argamasa y se utilizaba para enlucir paredes y blanquear muros y sepulcros.



Hoy día la caliza tiene uno de los usos más importantes en el ramo de construcción, como es la producción de cemento y cal. El cemento tipo Pórtland (usado más comúnmente), necesita para su elaboración de un 80% a 85% de caliza.

### **1.3. Breve descripción del proceso de cal**

La piedra caliza es la materia prima para el proceso de fabricación de cal, el cual se divide en tres grandes secciones:

- Extracción de materia prima
- Calcinación
- Hidratación

#### **1.3.1. Extracción de materia prima**

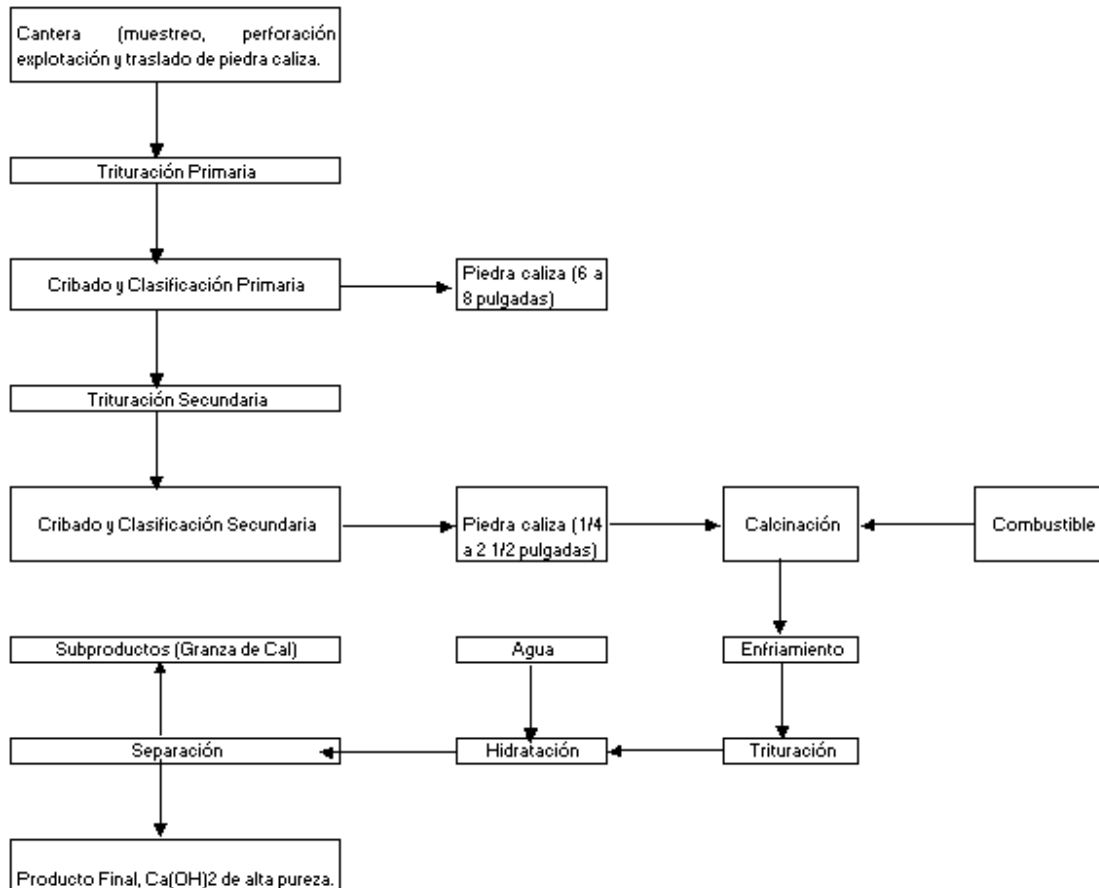
Este proceso se da en las canteras; consiste en la extracción de rocas, que utiliza métodos seguros, y luego es reducida a los tamaños adecuados para la fabricación de cal viva, que son transportadas hacia el lugar de calcinación.

En los métodos de extracción, se pueden utilizar equipos de barrenación de acuerdo de las características de la cantera (utilizando tractores) o bien usando algún equipo de explosivos, el cual dará la materia prima del tamaño adecuado para el proceso en cuestión.

El tamaño de la piedra dependerá del diseño mismo de la perforación, de la correcta selección de explosivos y de la distribución de los agujeros, así como de la secuencia de detonación.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo del proceso de cal.

**Figura 1. Diagrama de flujo simplificado del proceso de elaboración de cal hidratada**



### 1.3.2. Reducción del tamaño de la piedra

El tamaño de la piedra es muy importante, pues el proceso de un horno vertical posee un rango de granulometría especificado, para que el proceso de calcinación sea óptimo.

Esta reducción de tamaño se lleva a cabo mediante el uso de trituradoras; el uso de las mismas dependerá tanto del tamaño de la piedra original, como de la etapa de calcinación utilizada en la fabricación de cal viva.

### 1.3.3. Teoría de calcinación

Es un proceso de tipo reversible, donde al someter la piedra al calor el carbonato de calcio y el magnesio de la misma se descomponen, y producir así la cal viva. Esta reacción puede ser descrita en la siguiente ecuación:



Existen tres factores que afectan directamente a la cinética de la descomposición de la piedra caliza:

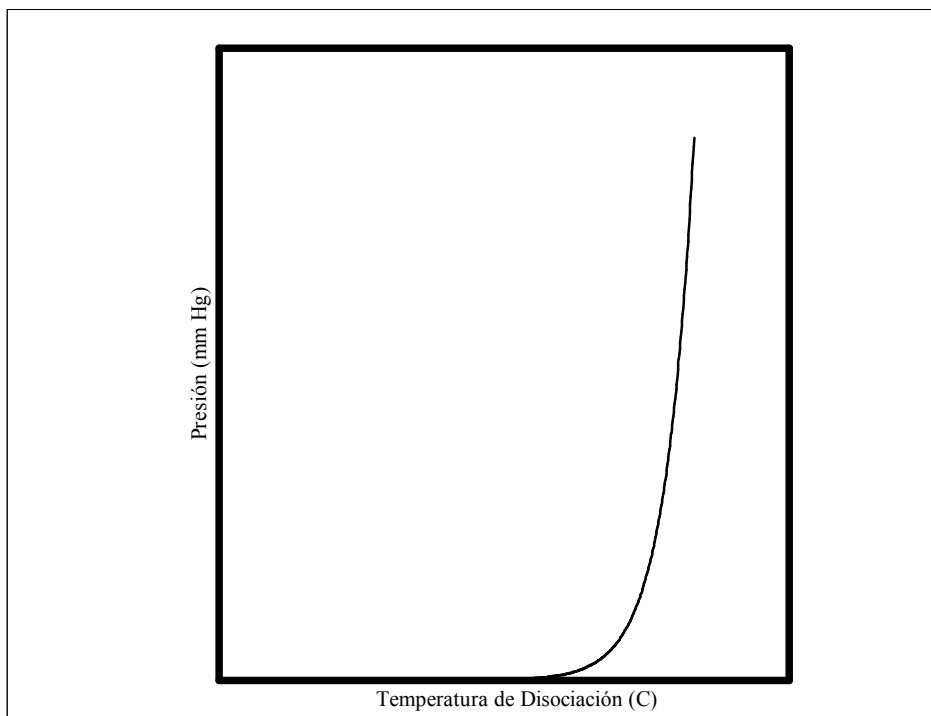
#### 1.3.3.1. Temperatura de disociación

La disociación es el fenómeno en el cual existe la descomposición del carbonato de calcio y el magnesio, la cual se dará desde la parte externa hacia el interior de la piedra. La temperatura de disociación es aquella que permite dicha descomposición.

Para que la reacción de disociación se lleve a cabo, es necesario mantener temperaturas por arriba de la temperatura de disociación. Una sub-calcinación de la piedra caliza da como resultado un producto denominado “granza” y una sobre-calcinación de piedra caliza, que produce un **CaO** de baja reactividad llamada “cal muerta”.

La temperatura de disociación para el carbonato de calcio puro es de 900°C y para el carbonato de magnesio es de 480°C. La temperatura de disociación de la piedra puede variar, según el número de carbonatos de caliza o magnesio que estén presentes en la piedra. La presión de disociación es fundamental, debido a que al aumentar la presión del sistema, se deberá aumentar la temperatura para poder mantener dicho proceso. A continuación, se presenta una gráfica comparativa de la temperatura de disociación y la presión en un horno de cal.

**Figura 2. Influencia de la presión en la temperatura de disociación**



### **1.3.3.2. Tiempo de disociación**

Este parámetro afecta directamente las características del producto terminado; cuanto más prolongado sea, el producto tendrá poca porosidad, mayor densidad y baja reactivada química.

### **1.3.3.3. Remoción del dióxido de carbono generado**

Depende de la estructura cristalina de la caliza, pues una a una caliza con fisuras le es fácil la eliminación del  $\text{CO}_2$ , contrario a la caliza que posee una estructura cristalina definida (calcita o mármol), ya que no poseen poros o fisuras por las cuales pueda escapar el  $\text{CO}_2$ .

### **1.3.4. Recarbonatación de la cal**

La calcinación está completa, cuando se logra eliminar todo el  $\text{CO}_2$  de la caliza, el cual es un proceso que nunca se da por completo debido al fenómeno de recarbonatación. Debido a que la superficie de la piedra está expuesta a un ambiente que contiene  $\text{CO}_2$  se dará una absorción del mismo, lo cual impedirá que la calcinación se dé al 100%. Este fenómeno de recarbonatación depende de las siguientes condiciones:

- Excesiva temperatura en algunas zonas del horno.
- Mala distribución de gases dentro del horno.
- Falta de ventilación en el horno.
- El tiempo prolongado de la piedra dentro del horno.

### **1.3.5. Granza**

Es un material calizo cercano al centro de la piedra de cal, que da como resultado una producción extra de **CO<sub>2</sub>** en la cal viva. Los valores de granza en la industria varían de un 0.5% a 8%, lo cual depende de la aplicación de la cal o de las necesidades del consumidor. Al disminuir el porcentaje de granza en la cal viva, existe un riesgo mayor de quemar la cal existente.

### **1.3.6. Alta vrs baja temperatura de calcinación**

Esta relación es muy importante dentro de la producción de cal viva, pues los aumentos o las disminuciones de la misma afectarán directamente la calidad del producto terminado. Al aumentar la temperatura de calcinación, el tiempo de retención de la piedra dentro del horno debe disminuir (tiempo de retención).

La temperatura óptima para obtener la máxima eficiencia de calcinación varía, según el tipo de piedra y puede ser determinada únicamente por experimentación. Sin embargo, esta temperatura se debe balancear con el de la temperatura óptima para obtener una máxima calidad en la cal, las cuales usualmente no coinciden. La diferencia entre las dos oscila entre 100 a 500 °F.

Los valores clásicos de temperatura para una caliza de alta pureza son los siguientes:

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| Temperatura optima de calcinación: | 1350 °F. |
| Temperatura optima de calidad:     | 1000 °F. |

La temperatura utilizada comúnmente en el proceso se encuentra en un punto intermedio entre la óptima de calcinación y la óptima de calidad.

#### **1.4. El horno vertical en el proceso de cal**

##### **1.4.1. Transferencia de calor**

La manera más eficiente de producir cal de alta calidad es aplicando una cantidad considerable de calor en el inicio del proceso, mientras que al final del mismo la temperatura debe disminuir. Al analizar este concepto, se pueden definir dos tipos de hornos verticales.

##### **1.4.1.1. Hornos verticales a contracorriente**

En este tipo de hornos, los gases calientes de combustión y el aire de enfriamiento ingresan por la parte baja del mismo, en la zona final de calcinación. Con dicho procedimiento, se corre el peligro de quemar la cal, especialmente en aquellos puntos donde la distribución de los gases de combustión y el aire de enfriamiento no sea homogénea.

En este tipo de hornos, también existe una baja transferencia de calor del aire de combustión en la zona de enfriamiento, además de que la entalpía de la cal limita la temperatura, lo que hace que calor sensible escape con las piedras de cal y por consiguiente se tendrá en la zona de descarga un producto con una temperatura muy alta para muchas aplicaciones industriales.

La transferencia de calor de los gases calientes en la parte superior es muy pobre, lo que provoca pérdidas considerables de energía en los gases de desecho del proceso de calcinación.

#### **1.4.1.2. Hornos verticales de corriente paralela regenerativos**

Los gases calientes ingresan por la parte superior del horno en donde existe la mayor diferencia de temperatura con la piedra caliza. Se obtiene una pequeña diferencia entre la temperatura de los gases y de la cal, al final de la zona de calcinación.

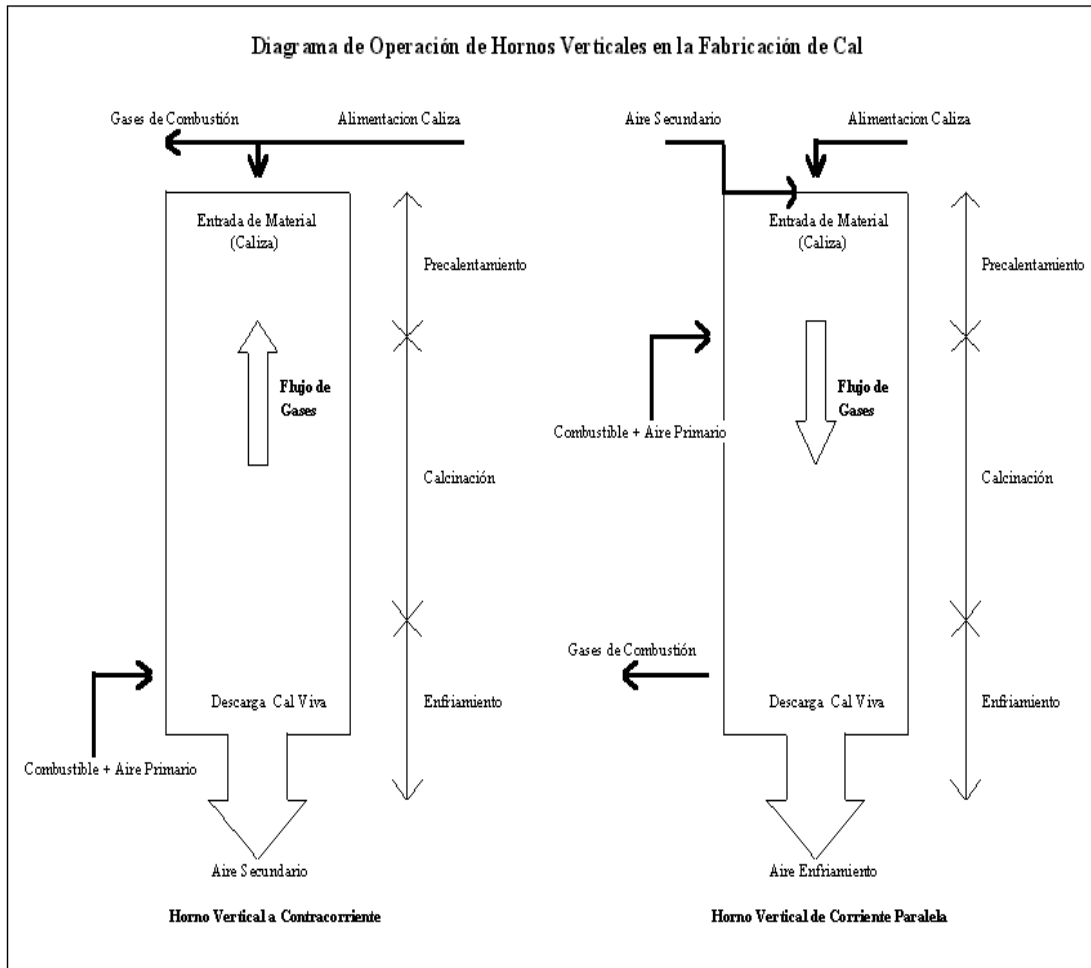
Con esto, se obtienen las condiciones ideales para la producción de cal viva. La temperatura de los gases de combustión es transferida hacia la piedra fría que se encuentra en algunas secciones del horno, lo que provoca una pequeña de-carbonatación en la parte baja de la zona de calcinación (proceso de precalentamiento). Debido al aprovechamiento de dichos gases, el horno regenerativo hace más económico el consumo de energía térmica.

Es necesario controlar el aire que es utilizado en la combustión, pues afecta directamente la longitud de la flama. Un exceso en el mismo produciría una flama más corta y una cantidad menor de aire aumenta la misma.

El aire de enfriamiento es introducido a presión por la parte baja del fondo del horno acondicionando la cal a una temperatura inferior a los 100 °C. En la figura siguiente, se presentan los diagramas de operación de los hornos de cal.



**Figura 3. Diagrama de operación de hornos en la fabricación de cal viva**



#### 1.4.2. Calidad de la piedra

En el mercado de la cal, se reclama un producto que posea una alta pureza; además, las características químicas y físicas son bien definidas. Se presenta una tabla comparativa de las dos opciones de hornos verticales.

**Tabla I. Influencia de la caliza en los hornos verticales**

| <b>Característica</b>                 | <b>Horno vertical a contracorriente</b>                                    | <b>Horno vertical regenerativo</b>  |
|---------------------------------------|--|---|
| Físicas: caliza, cristalinidad y poro | Sobre quemado; baja reactividad  | Moderado nivel de quemado.  |
| Decrepitación (pulverización)         | Cal no homogénea, nivel alto de obstrucciones, mala distribución de gases. | Cal no homogénea, nivel alto de obstrucciones.                                |
| Impurezas                             | Peligro de incrustaciones (sílice), baja reactividad de la cal.            | Peligro de incrustaciones (sílice), baja reactividad de la cal moderadamente. |

**Fuente:** CIFUENTES SOTO, VICTOR HUGO. **Conversión de un horno de *clinker* a horno de cal en la planta La Pedrera.**

### **1.4.3. Grado de calcinación**

Se dan tres tipos de cal, los cuales están expuestos a continuación:

- Cal reactiva
- Cal de reactividad media
- Cal sobre quemada

El objetivo de las industrias es la producción de cal reactiva; se presenta una tabla comparativa de los tipos de cal obtenidos en los hornos verticales.

**Tabla II. Tipos de cal que se pueden producir en los hornos verticales**

| <b>Tipo horno</b>       | <b>Horno vertical a contracorriente</b> | <b>Horno vertical regenerativo</b>      |
|-------------------------|---|---|
| Cal reactiva            | Parte intermedia de la piedra           | Parte intermedia y externa de la piedra |
| Cal mediana reactividad | Parte intermedia y externa de la piedra | Parte externa de la piedra              |
| Cal sobre quemada       | Parte externa y piedras pequeñas        | Parte externa o piedras pequeñas        |
| Granza                  | Parte central de las piedras (5-12 %)   | Parte central de las piedras (5-10 %)   |

**Fuente:** CIFUENTES SOTO, VICTOR HUGO. **Conversión de un horno de *Clinker* a horno de cal en la planta La Pedrera.**

El tiempo de calcinación varía según el tipo de horno; se aconseja un tiempo de 18 a 24 horas para un horno vertical a contracorriente y de 24 horas para un horno regenerativo. Los hornos verticales poseen poca flexibilidad de obtener productos de calidades diferentes para aplicaciones diversas.

El horno vertical, instalado en cementos progreso, funciona a contracorriente. El flujo de los gases va desde la parte inferior, hasta la parte superior del mismo donde los gases son expulsados.

La temperatura de precalentamiento del horno es de aproximadamente 300 grados centígrados, y la temperatura de calcinación se encuentra entre 900 y 1200 grados centígrados.

## **2. INTRODUCCIÓN A LA AUTOMATIZACIÓN**

### **2.1. La automatización industrial**

La automatización industrial es la aplicación de varios dispositivos, con el fin de poder controlar en tiempo real y en un medio industrial, procesos secuenciales de control.

Las fábricas automatizadas deben proporcionar en sus sistemas alta confiabilidad, gran eficiencia y flexibilidad. Una de las bases principales de tales fábricas es un dispositivo electrónico llamado controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés).

Este dispositivo, desde que fue inicialmente introducido, evolucionó con nuevos componentes electrónicos, y se agregaron funciones especiales para el control de procesos más complejos.

Los controladores lógicos programables son diseñados usando lo último en diseño de microprocesadores y circuitería electrónica, lo cual proporciona una mayor confiabilidad en su operación en aplicaciones industriales, donde existen peligros, debido al medio ambiente, alta repetibilidad, altas temperaturas, ruido o ambiente eléctrico, suministro de potencia eléctrica no confiable, vibraciones mecánicas, etc.

## **2.2. Historia de los PLC's**

Los controladores lógicos programables surgen como equipos electrónicos sustitutos de los sistemas de control basados en relevadores, que se hacían más complejos; esto arrojaba dificultades en cuanto a la instalación de los mismos.

Los altos costos de operación y mantenimiento y la poca flexibilidad y confiabilidad de los equipos, así como también el costo excesivo, impulsaron el desarrollo de los nuevos autómatas.

Los PLC's nacieron al final de la década de los 60's y principios de los 70's. Las industrias que propiciaron este desarrollo fueron las automotrices, que usaban sistemas industriales basadas en relevadores (relés), en sus sistemas de manufactura.

Los primeros se usaron solamente como reemplazo de relevadores, es decir, que su capacidad se reducía exclusivamente al control on-off (de dos posiciones) en máquinas y procesos industriales. De hecho, todavía se siguen usando en muchos casos como tales. La gran diferencia con los controles por relevadores fue su facilidad de instalación, ocupan menor espacio, costo recudido y proporcionan autodiagnósticos sencillos.

Poco a poco se fue mejorando la idea inicial de los PLC's, hasta convertirlos en lo que ahora son, "sistemas electrónicos versátiles y flexibles". El control lógico programable es ideal para ser operado en condiciones críticas industriales, ya que fue diseñado para su uso en el medio ambiente industrial.

Cuando se decidió implementar un sistema diferente para mejorar el desempeño industrial de una empresa, los diseñadores pensaron que dicho dispositivo debería reunir las siguientes cualidades:

- El dispositivo de control debería ser fácil y rápidamente programable por el usuario, con un mínimo de interrupción.
- Todos los componentes del sistema deberían ser capaces de operar en plantas industriales, sin un especial equipo de soporte, de hardware o de ambiente.
- El sistema tenía que ser de fácil mantenimiento y reparación, e incluir indicadores del estado de los mismos, para facilitar las reparaciones y la búsqueda de errores.
- Debía ser pequeño y consumir menor potencia que los sistemas de control por relevadores.
- Ser capaz de comunicarse con un sistema central de datos para propósitos de monitoreo.
- Las señales de salida deberían manejar arranques de motores y válvulas solenoides, que operan con la tensión de red en corriente alterna.
- A la vez, ser competitivo en costo de venta e instalación, respecto de los sistemas basados en Relevadores.

Los PLC's actuales no solamente cumplen estos requisitos sino que los superan.

Actualmente es una computadora de propósito específico que proporciona una opción más flexible y funcional para los sistemas de control industriales.

### **2.3. Descripción de un PLC**

Es un aparato electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones, las cuales implementan funciones específicas como lógicas, secuenciales, temporización, conteo y aritmética, para controlar, a través de módulos de entrada / salida digitales y analógicas, varios tipos de máquinas o procesos. Su programación y manejo pueden ser realizados por personal con conocimientos eléctricos o electrónicos, sin previos conocimientos sobre informática.

Una computadora digital que es usada para ejecutar las funciones de un controlador programable, se puede considerar bajo este rubro; se excluyen los controles secuenciales mecánicos.

Al PLC también se le puede definir como una “caja negra”, en la que existen terminales de entrada y salida, los cuales serán conectados a pulsadores, finales de carrera, foto celdas y todo equipo de detección en los terminales de entrada, así como a la salida a bobinas de contactores para control de motores, electroválvulas, lámparas, etc, de tal forma que la actuación de esos últimos están en función de las señales de entrada que estén activadas en cada momento, según el programa almacenado.

Poseen un puerto de comunicación, por medio del cual el programador puede comunicarse con el mismo, modificar el programa, incluso cuando se están ejecutando las instrucciones en tiempo real.

La tarea del usuario se reduce a realizar el “programa”, que no es más que la relación entre señales de entrada y salida, que se deben cumplir para realizar actividades establecidas.



## **2.4. Componentes de un PLC**

Los pequeños PLC's son compactos y contienen, en un solo dispositivo, todos los componentes. En cambio, los mayores son del tipo modular y se conectan las diferentes partes, de manera que pueden ser reemplazadas individualmente.

Consiste en las siguientes partes:

### **2.4.1. CPU o unidad de proceso lógico**

Reside en un circuito integrado denominado microprocesador o microcontrolador; es el director de las operaciones del mismo. Por extensión, todo el "cerebro" del PLC se denomina CPU.

Se especifica mediante el tiempo que requiere en procesar 1K de instrucciones, y por el número de operaciones diferentes que puede procesar. Normalmente el primer valor va desde menos de un milisegundo a unas decenas de milisegundos, y el segundo de 40 a más de 200 operaciones diferentes.

### **2.4.2. Memoria**

Es el lugar de residencia, tanto del programa, como de los datos que se van obteniendo durante la ejecución del programa. Existen dos tipos de memoria, según su ubicación; la residente, que está junto o en el cpu y la exterior, que puede ser retirada por el usuario para su modificación o copia. De este último, existen memorias borrables (ram, eeprom) y no borrables (eprom), según su aplicación.

Para reprogramar un módulo eprom se utiliza luz ultravioleta. En el módulo *eeeprom*, el contenido queda borrado al sobrescribir en él utilizando un aparato de programación.

Las memorias en los programas van de 1 K a unos 128 K.

### **2.4.3. Funciones**

Se refieren a operandos internos, con los cuales cuenta el cpu, como temporizadores, marcas y contadores.

Dependiendo del modelo, el cpu cuenta con una determinada cantidad tanto de temporizadores para controlar funciones de tiempo para cualquier aplicación, con opción a retardos, y en ellos encontramos prácticamente todas las funciones que poseen los relés de tiempo que se encuentran en el mercado.

Los contadores se encargan de llevar un control de conteo de operaciones o funciones dentro del programa. Utilizando sus salidas se pueden activar secuencias complejas en arranques de motores, o controlar acciones variadas en un proceso determinado.

Las marcas tienen la función de “contactos auxiliares” dentro del programa, funcionan con un estado “binario” (on-off). Utiliza el estado de las mismas para control, ya sea de otras secuencias del programa o de salidas directas hacia los bornes de salida del PLC.

#### **2.4.4. Procesador de comunicaciones**

Las comunicaciones del CPU son llevadas a cabo por un circuito especializado con protocolos de los tipos RS-232C, TTY o PIB (IEEE-485), según el fabricante y la sofisticación del PLC.

#### **2.4.5. Tarjetas modulares inteligentes**

Para los PLC's modulares, existen tarjetas con funciones específicas que relevan al microprocesador de las tareas que requieren de gran velocidad o de gran exactitud. Estas tarjetas se denominan inteligentes por contener un microprocesador dentro de ellas para su funcionamiento propio. El enlace al PLC se efectúa mediante el cable (bus) o tarjeta de respaldo y a la velocidad del cpu principal.

Las funciones que se encuentran en este tipo de tarjetas son de:

- Posicionamiento de servomecanismos
- Contadores de alta velocidad
- Transmisores de temperatura
- Puerto de comunicación basic

#### **2.4.6. Bus**

Los sistemas modulares requieren de una conexión entre los distintos elementos del sistema; esto sólo se logra mediante un bastidor, que a la vez es soporte mecánico de los mismos.

Este bastidor contiene la conexión a la fuente de voltaje, así como del “bus” de direcciones y de datos con el que se comunican las tarjetas y el cpu.

En el caso de tener muchas tarjetas de entradas / salidas, o de requerirse éstas en otra parte de la máquina, a cierta distancia de la CPU, es necesario adaptar un bastidor adicional que sea continuación del original, con una conexión entre bastidores para la comunicación.

Esta conexión, si es cercana, puede lograrse con un simple cable paralelo, y en otros casos se requiere de un procesador de comunicaciones para emplear fibra óptica o una red con protocolo establecida.

#### **2.4.7. Entradas y salidas**

Para llevar a cabo la comparación necesaria en un control automático, es preciso que el PLC tenga comunicación al exterior. Esto se logra mediante una interfase llamada de entradas y salidas, de acuerdo a la dirección de los datos vistos desde el PLC.

El número de entradas y salidas va desde un número de 06 en los tipo micro, a varios miles en PLC´s tipo Modulares. El tipo preciso de entradas y salidas depende de la señal eléctrica que se va a utilizar:

- CORRIENTE ALTERNA 24, 48, 120, 220V. Salidas: triac (conmutación al paso por cero de la corriente), relevador.
- CORRIENTE DIRECTA (DIGITAL) 24, 120 V. Entradas: *Sink*, *Source*. Salidas: transistor NPN, transistor PNP, relevador.

- CORRIENTE DIRECTA (ANALÓGICA) 0 – 5, 0 – 10 voltios. 0 – 20, 4 – 20 miliamperios. Entradas y salidas analógicas.

Pueden acoplarse varios módulos de entrada / salida, que depende del tipo del mismo. Generalmente estos módulos poseen 8 canales y pueden ser de cualquiera de los tipos antes mencionados.

#### **2.4.8. Fuente de poder**

Se requiere una fuente de voltaje para la operación de todos los componentes, y ésta puede ser externa en los sistemas modulares o interna en los más compactos.

Además, en el caso de una interrupción del suministro eléctrico, para mantener la información en la memoria borrable tipo RAM, como es la hora y fecha, y los registros de contadores, etc, se requiere de una fuente auxiliar. En los PLC's compactos, se utiliza un capacitor de gran capacidad ya integrado en el sistema; en los modulares, es preciso adicionar una batería externa.

### **2.5. Programación de un PLC**

Trabajan como todos los circuitos electrónicos, únicamente con dos estados lógicos, "alto y bajo", "on y off", "1 y 0", etc. (sistema binario). Es necesario un lenguaje de programación que traduzca las ideas humanas a estados lógicos.

Los lenguajes de programación varían según el fabricante, y la manera de acceder a dichos controladores también varían. En el programa, se designan mediante direcciones los registros, contadores, temporizadores, y las entradas y salidas.

En los PLC's pequeños, estas direcciones están asignadas por el fabricante, pero en los mayores, pueden ser definidas por el usuario, con mayor aprovechamiento de la memoria.

En general, se puede hablar de cuatro grandes grupos de lenguajes de programación:

- ESCALERA
- INSTRUCCIONES
- POR FUNCIONES
- POR PASOS

### **2.5.1. Lenguaje de escalera (tipo NEMA)**

Es el más conocido en el área de influencia norteamericana, ya que invariablemente de todos los PLC's de fabricación americana o japonesa permiten su programación en este lenguaje, ya sea para emplear los mismos diagramas de control alambrado existentes en las máquinas, que se reconvierten o, para capacitar fácilmente al personal de mantenimiento en el manejo y arreglo de estos aparatos.

## 2.5.2. Lenguaje de instrucciones o booleano (AWL)

Es el tipo más poderoso de los lenguajes de programación en cualquier marca de aparato, ya que es lo más cercano al lenguaje de la máquina, y puede hacer uso de particularidades de los microprocesadores, con lo cual se hace más rápido un programa o, más compacto.

A continuación, se presenta un listado de instrucciones básicas:

**Tabla III. Instrucciones básicas en un PLC**

|  |
|--|
| <p><b>Instrucciones de Lógica de Relé</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Examina si es cerrado (contactos normalmente abiertos)</li><li>- Examina si es abierto (contactos normalmente cerrados)</li><li>- Activación de Salida</li><li>- Enclavación de Salida</li><li>- Desenclavamiento de Salida</li></ul> <p><b>Temporizadores</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Temporizador a la conexión</li><li>- Temporizador a la desconexión.</li><li>- Temporizador retentivo</li></ul> <p><b>Contadores progresivos y regresivos</b></p> <p><b>Contadores de alta velocidad</b></p> <p><b>Instrucciones Matemáticas</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Suma</li><li>- Resta</li><li>- División</li><li>- Multiplicación</li><li>- Borrar</li><li>- Raíz Cuadrada</li></ul> <p><b>Lógica Booleana</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- AND, OR, OR exclusivo, NOT y cambio de signo.</li></ul> <p><b>Comparación</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- igual</li><li>- mayor que</li><li>- menor que</li><li>- mayor o igual que</li><li>- menor o igual que</li></ul> <p><b>Manejo de Datos</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Transferencia, transferencia con máscara</li><li>- FIFO y LIFO (primero en entrar, primero en salir; último en entrar, primero en salir)</li><li>- Conversión de BCD a binario</li><li>- Conversión de binario a BCD</li></ul> <p><b>Instrucciones específicas de la aplicación</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Secuenciador</li><li>- Desplazamiento de bits.</li></ul> <p><b>Flujo de Programa</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Subrutina</li><li>- MCR (reestablecimiento del control maestro)</li><li>- Entrada o salida inmediata con máscara</li><li>- Interrupción temporizada seleccionable</li><li>- Saltos</li></ul> |
|--|

Fuente: "Micro Mentor", Rockwell Automation, Pub. 1761-MMBES septiembre 1998.

### **2.5.3. Esquema de compuertas lógicas (FUP)**

También llamada “Programación por funciones”. Es el preferido por los europeos. Es el más matemático de los lenguajes, al requerirse el manejo de tablas de verdad y simplificación de funciones lógicas booleanas para su empleo.

### **2.5.4. Esquema de contactos (KOP)**

También llamado “programación por pasos”. Este lenguaje fue inventado por ingenieros de la marca francesa Telemecanique, y posteriormente se hizo lenguaje estándar IEC, y son ahora muchos los fabricantes que tienen su propia versión. Es en práctica un lenguaje más elevado que los anteriores al permitir, con una simple instrucción, hacer lo que en otros requería varias y complejas instrucciones, siempre y cuando se pueda programar la operación de la máquina de manera secuencial. Este lenguaje es muy apropiado para el manejo de posicionadores, alimentadores, y todo aparato cuyos movimientos mecánicos sean repetitivos.

La más destacada característica de los PLC´s es que puede procesar cada instrucción en el orden de micro-segundos; llegan a tener la memoria para procesar hasta 4.000 instrucciones; la alimentación de voltaje de los mismos puede ser de corriente directa o alterna, y poseen hasta 256 “marcas” internas (dependiendo del fabricante).



## 2.6. Análisis de costos

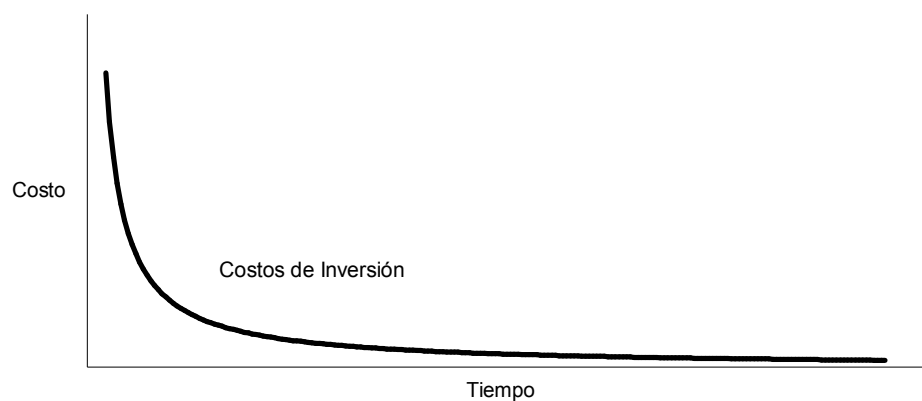
Los costos totales comprenden:

- Costos de inversión
- Costos de falla
- Costos de mantenimiento.

### 2.6.1. Costos de inversión

Éstos comprenden los costos iniciales y los costos de depreciación. Para cualquier sistema, los costos iniciales son altos, debido a que en ellos se incluyen los costos de diseño, componentes. Los valores de los mismos irán bajando, respecto al tiempo debido al uso del equipo. La forma, en la cual se deprecia el equipo, se puede observar en la gráfica siguiente:

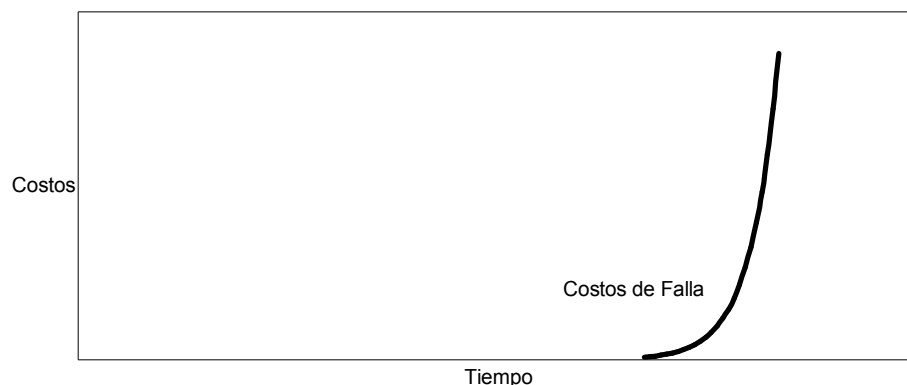
**Figura 4. Costos de inversión**



### 2.6.2. Costos de Falla

Los costos iniciales de falla, en un PLC, son cero. Después de transcurrir un tiempo estimado de vida útil, empezarán a incrementarse debido al desgaste del equipo. Más adelante estos costos pueden ser muy significantes, ya que al transcurrir el tiempo los costos son tan elevados, por lo que el equipo deja de ser rentable económicamente y es necesario realizar una evaluación para sustituirlo por otro sistema. El incremento de los costos de falla, respecto del tiempo, se pueden observar en la gráfica siguiente:

**Figura 5. Costos de falla**

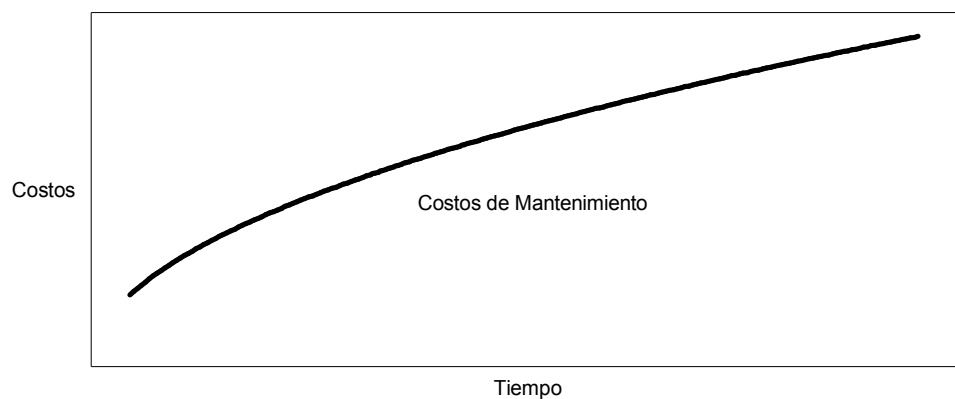


### 2.6.3. Costos de mantenimiento

Estos costos son debidos al mantenimiento del equipo, debido a que debe estar siempre en condiciones adecuadas para su funcionamiento. Los costos de mantenimiento varían según el tipo del mismo. La persona a cargo debe de realizar una programación de mantenimiento para el equipo y sus costos serán amortizados con la extensión de la vida útil del equipo.

Es imperante el estricto control del sistema en sí, ya que los costos no se basan únicamente en la puesta en marcha de la parte mecánica y de funcionamiento del equipo, sino también habría que añadir las pérdidas por la baja de producción, que se genera cuando el equipo se encuentra en mantenimiento. A continuación, se puede observar una estimación de los costos del mismo.

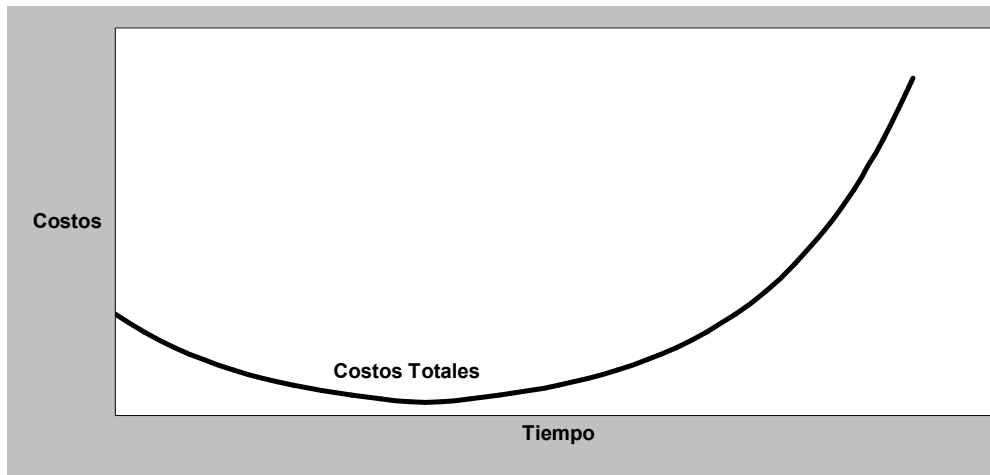
**Figura 6. Costos de mantenimiento**



#### **2.6.4. Costos totales**

Resultan de la suma de los costos anteriormente citados. El comportamiento de la curva de costos totales refleja grandes valores al inicio y al final de la misma. Existe una región en la curva, en la cual los costos son mínimos; el objetivo de realizar el mantenimiento es el de prolongar el mayor tiempo posible el tiempo para esos costos mínimos. Los costos totales para un sistema de automatización, se representan en la siguiente figura:

**Figura 7. Costos totales en un PLC**



Es imperante realizar un estudio de las variables económicas del sistema que se desea automatizar, debido a que de ellas depende tanto el tipo de inversión inicial que se tendrá, el tiempo para la recuperación del capital invertido, y los cuidados necesarios, para que la vida útil del equipo se prolongue el mayor tiempo posible.

### **3. FUNCIONAMIENTO DE LOS INSTRUMENTOS DE CONTROL Y DISPOSITIVOS DE POTENCIA INSTALADOS EN EL HORNO VERTICAL**

#### **3.1. Transductores**

Para la aplicación de la automatización, industrial se necesitan medir diversas señales no eléctricas, las cuales deben de ser convertidas a señales eléctricas utilizando un dispositivo llamado transductor.

El transductor es un dispositivo, que al ser afectado por la energía de entrada en un sistema de medición, proporciona una energía proporcional en su salida, la cual puede ser acoplada a un sistema mecánico, eléctrico, térmico, químico, óptico; etc.

Los transductores eléctricos son aquellos dispositivos que, independientemente del tipo de variable de entrada, proporcionarán en su salida una señal eléctrica proporcional al cambio de energía en la variable medida. La variación de parámetros físicos como calor, intensidad luminosa, humedad, movimiento, que puede ser convertida en señales eléctricas por medio de los mismos.

### **3.1.1. Clasificación de los transductores eléctricos**

Los transductores se pueden clasificar, según su aplicación, en método de conversión de energía, naturaleza de la señal de salida, etc. A continuación, se presenta una pequeña clasificación de transductores según la señal de salida de los mismos:

- **Potenciómetro**

El posicionamiento de un cursor por medio de una fuerza externa varía la resistencia en un potenciómetro. Puede ser utilizado para medición de presión o posicionamiento.

- **Termistor**

La resistencia de ciertos óxidos de metal, con coeficiente de temperatura de resistencia negativo, cambia con la temperatura. Utilizado comúnmente en sistemas de medición de temperatura.

- **Dispositivo de capacitancia variable**

Una fuerza aplicada externamente varía la distancia entre dos placas paralelas. Es usado en medición de presión y desplazamiento.

- **Dispositivo de placas fijas**

Su funcionamiento se basa en el cambio del material del dieléctrico entre dos placas. Este capacitor es utilizado para medición del nivel de líquidos, así como su espesor.

- **Transductor de circuito magnético**

En este tipo de transductor, se utiliza una bobina, en la cual se modifica el circuito magnético de la misma, y se varía en su salida la FEM inducida. Son utilizados para medición de Presión y Desplazamiento.

- **Detector de reluctancia**

En este tipo de transductor, la resistencia del circuito magnético cambia al variar la posición del núcleo de hierro en una bobina. Es frecuentemente utilizado para medición de vibración, posicionamiento, cambios de presión y desplazamiento.

- **Transductor como transformador diferencial**

La variable de salida del mismo es el voltaje diferencial existente entre dos devanados secundarios en un transformador, los cuales varían al mover el núcleo por medio de un a fuerza externa. Es utilizado para medición de presión, fuerza, desplazamiento y posición.

- **Generador de bobina móvil**

El movimiento de una bobina dentro de un campo magnético genera una FEM, la cual es proporcional a la velocidad angular en la misma. Es utilizado en mediciones de velocidad o vibración.

- **Termopar y termopila**

Cuando una unión de dos metales disímiles o semiconductores se calienta, se produce una diferencia de voltaje entre sus extremos. Es usado en medición de temperatura, flujo de calor o radiación.

- **Celda fotovoltaica**

Se genera un voltaje cuando se le aplica energía radiante a un dispositivo de unión semiconductor. Es utilizado en mediciones de luz.

- **Detector piezoeléctrico**

Al aplicar una fuerza externa a dos materiales cristalinos como el cuarzo, se genera una FEM. Se utiliza en medición de sonido, vibración y cambios de presión.

### **3.1.2. Selección de un transductor**

En la automatización industrial, es necesario elegir el transductor ideal para una determinada variable de proceso. En vista de que el mercado nos ofrece una diversidad de elementos, es necesario conocer las siguientes características de los mismos, para poder así obtener mejores resultados.

- Parámetros fundamentales del transductor: tipo y rango de medición, sensibilidad, excitación.
- Condiciones físicas: conexiones eléctricas y mecánicas, condiciones de montaje, resistencia a la corrosión.



- Condiciones de ambiente: efectos de la no linealidad, efectos de histéresis, respuesta en frecuencia, resolución.
- Condiciones ambientales: efectos de la temperatura, aceleración, golpes y vibraciones.
- Compatibilidad con el equipo asociado: condiciones de balance de peso, tolerancia de la sensibilidad, acoplamiento de impedancias, resistencia de aislamiento.

Las primeras dos comprenden características eléctricas y mecánicas básicas del transductor. Las otras dos, se basan directamente al funcionamiento del mismo (exactitud), para la correcta medición de la variable de proceso. La última considera la compatibilidad del transductor con el equipo asociado al sistema.

Como cualquier dispositivo de medición, el funcionamiento del transductor está ligado a cierto margen de error, el cual debe ser reducido para que esté dentro del rango de exactitud requerido, por medio de los siguientes métodos:

1. Calibración de sistema.
2. Monitoreo simultáneo del ambiente.
3. Control artificial del ambiente.

El uso de estas técnicas provee un ambiente “ideal” para el funcionamiento del transductor, por medio del cual se pueden realizar calibraciones directas o manipulaciones en el ambiente del mismo (aislamiento de calor, vibraciones, etc.), para así lograr una eficiencia en el funcionamiento del mismo.

### **3.1.3. Tipos de transductores utilizados en el proceso de cal viva**

Como en cualquier proceso, es necesario conocer las variables del mismo, para poder definir un método preciso de automatización. A continuación, se presentan diversas variables en el proceso de cal viva.

#### **3.1.3.1. Transductores de temperatura**

##### **3.1.3.1.1. Escalas de medición de temperatura**

Galileo inventó el termómetro alrededor de 1592, el cual se basó en la medición de la longitud de contracción y dilatación de alcohol dentro de un sistema comprendido por una esfera y un tubo de vidrio. Al aumentar la temperatura, el aire en la esfera se extendía y hacía que el líquido se elevara, por el contrario, cuando la temperatura disminuía. Esta fue la primera forma de medición de temperatura. Luego se inventó el termómetro “florentine”, que tenía un mejor diseño y además incorporaba una escala graduada.

Alrededor de 1700 el holandés Gabriel Fahrenheit inventó el termómetro de mercurio, y basó su escala en dos puntos; el más bajo era la temperatura menor, a la cual se podía mezclar el cloruro de amonio ( $0^{\circ}$ ) y el punto más alto, la temperatura de la sangre humana ( $96^{\circ}$ ).

En 1742 nació la escala centígrada, gracias a Anders Celsius, que en 1948 se oficializó como escala “Celsius”. Luego, en 1800 William Thompson (Sir Kelvin), desarrolló el balance de la termodinámica universal, cuando basó el coeficiente de expansión de un gas ideal. Kelvin estableció el concepto de cero absoluto, el cual es usado actualmente en la termometría.

La escala Rankine es simplemente el equivalente de la temperatura Fahrenheit en la escala Kelvin.

### 3.1.3.1.2. Medición de temperatura

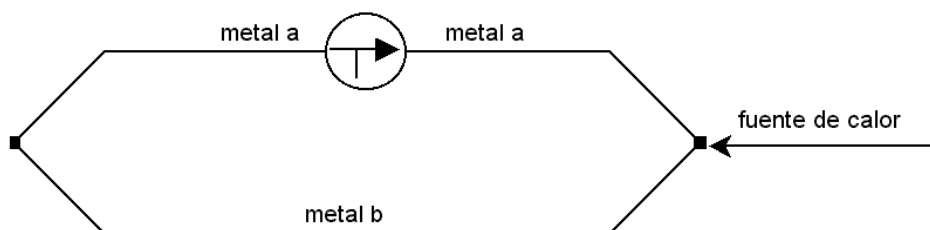
Para la medición de temperatura, en un proceso industrial, existen tres métodos más comunes:

- Termocopla
- RTD
- Termistor

#### 3.1.3.1.2.1 Termocopla

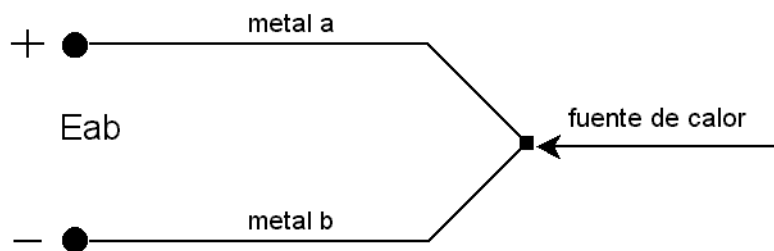
Tomas *Seebeck* descubrió en 1821, que cuando dos alambres compuestos de metales diferentes se juntan en ambos extremos y se calientan en uno de los mismos, se produce una corriente eléctrica. A esto se le llamó efecto *Seebeck*.

**Figura 8. Efecto Seebeck**



Si a este circuito se rompe en el centro, el voltaje en los extremos (voltaje *seebeck*) es función de la temperatura de la unión y de la composición de los dos metales.

**Figura 9. Voltaje Seebeck**



El voltaje *seebeck* no se puede medir con un voltímetro, debido a que la resistencia interna del mismo afecta la medición, y crea un circuito nuevo. Es necesario realizar una compensación y utilizar un multímetro digital, para poder obtener una interpolación y así encontrar el valor del cambio de temperatura.

Un termopar consiste en la unión de dos metales diferentes, cuando existe un cambio de temperatura en el punto de unión de dichos metales, se produce una fuerza electromotriz (FEM), la cual será proporcional al cambio de temperatura.

**Tabla IV. Características de los termopares**

| TIPO DE UNIÓN | METALES             | RANGO DE TEMPERATURA |
|---------------|---------------------|----------------------|
| J             | Hierro + constantan | -40 a 750 °C         |
| E             | Cromo + constantan  | -40 a 800 °C         |
| T             | Cobre + constantan  | -40 a 350 °C         |
| K             | Cromo + aluminio    | -40 a 1100 °C        |

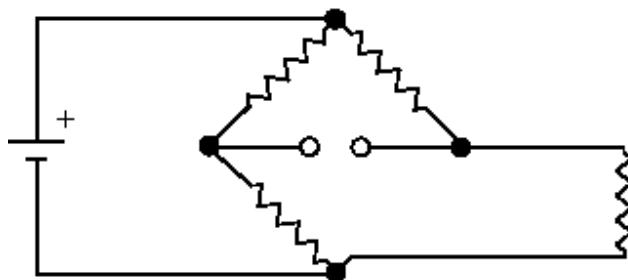
### 3.1.3.1.2.2 Circuito de termo resistencias (RTD)

En los transmisores de temperatura, los sensores se utilizan en unión con un puente (conjunto de resistencias en serie-paralelo) que, al tener el mismo valor, producen una salida a cero. La sustitución del sensor por uno de los elementos proporciona una forma adecuada de convertir los cambios de resistencia del sensor en una señal de voltaje. Reemplazando algunas de las resistencias fijas o potenciómetros, permite realizar ajustes. Existen varias formas de utilizar una termo resistencia en un circuito puente.

- **Circuito de termo resistencia (RTD) de dos hilos**

El circuito más sencillo utiliza una termo resistencia (RTD) de dos cables. La termo resistencia simplemente reemplaza a un elemento del puente, lo que provoca el desequilibrio del mismo, a la vez que cambia su resistencia. La salida se lee directamente o se utiliza para dirigir otra circuitería en el transmisor. Si la termo resistencia se coloca a cualquier distancia entre el transmisor y el puente, se utilizan hilos conductores más económicos para conectar la misma al puente. Una de las desventajas es que los hilos conductores aportan resistencia al circuito y ocasionan errores en la lectura.

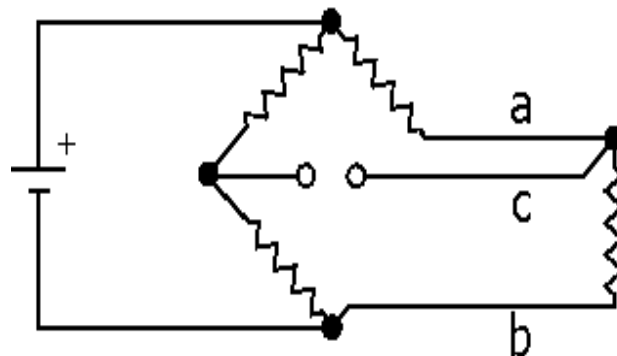
**Figura 10. Termoresistencia de dos cables**



- **Circuito de termo resistencia (RTD) de tres hilos**

Para eliminar el error introducido por el efecto del hilo conductor, es común el uso de una termo resistencia de tres hilos. Durante este procedimiento, el efecto de resistencia de cada cable de conexión del esquema, se cancela por el puente, porque cada uno está en un lado opuesto del mismo. El tercer cable "c" es un hilo sensor. El sistema de los tres hilos no elimina todos los efectos del hilo conductor. Pero al estar los sensores generalmente localizados bastante cerca de sus transmisores, los efectos del hilo conductor y el sistema proporcionan un porcentaje de error razonable.

**Figura 11. Termoresistencia de tres cables**

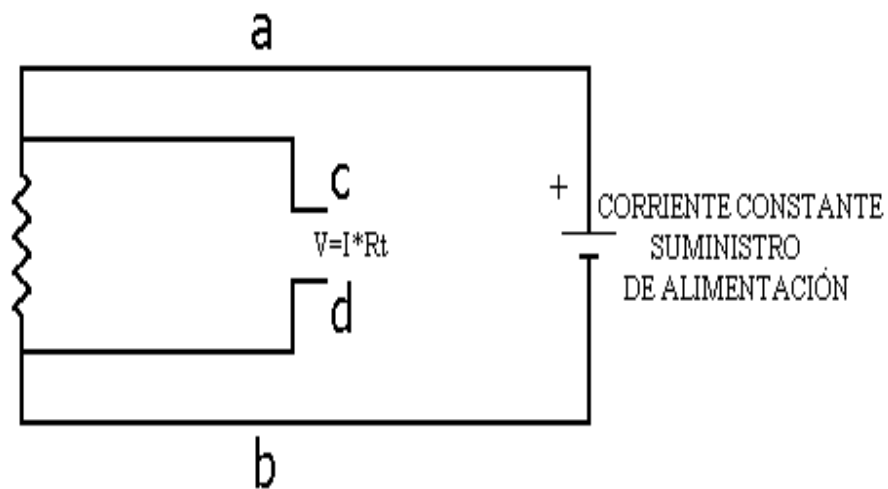


- **Circuito de termo resistencia (RTD) de cuatro hilos.**

La forma más eficaz de eliminar los efectos de hilos conductores es utilizando cualquiera de las versiones del sistema de cuatro hilos; un sistema que no requiere puente se muestra en la figura.

En este método, una corriente constante de alimentación se conecta a los dos terminales de la termo resistencia, de los cuales se extrae una señal de voltaje. La caída de voltaje en la termo resistencia es totalmente independiente del efecto de los hilos conductores.

**Figura 12. Termoresistencia de cuatro cables**



### 3.1.3.1.2.3 Termistor

Al igual que el RTD, el termistor es un resistor sensible a la temperatura. La termocopla es el transductor más versátil y el RTD es el más estable. La palabra que mejor describe a un termistor es la sensibilidad.

De las tres categorías de sensores, el termistor exhibe un gran cambio en su valor con valores de temperatura pequeños.

Generalmente están compuestos por materiales semiconductores; al contrario de la termocopla y del RTD, éste posee un coeficiente de temperatura (TC) negativo, es decir que su resistencia disminuye al aumentar el valor de la temperatura. Este coeficiente puede ser un gran porcentaje por grado celsio, por lo cual puede detectar cambios de temperatura imperceptibles para las termocoplas y los RTD.

El precio, que se debe pagar por esa gran sensibilidad en los termistores, es que se pierde la linealidad en su curva de funcionamiento. El termistor es extremadamente no-lineal, y depende grandemente de los parámetros de proceso. Es por eso que los fabricantes no han podido estandarizar una curva de respuesta, así como las que se definen para los otros tipos de sensores.

### 3.1.3.2. Transductores piezoeléctricos

La presión puede definirse como una fuerza por unidad de área o superficie, en donde para la mayoría de los casos se mide directamente por su equilibrio directamente con otra fuerza conocida, que puede ser la de una columna liquida, un resorte, un embolo cargado con un peso o un diafragma cargado con un resorte o cualquier otro elemento, que puede sufrir una deformación cualitativa cuando se le aplica la presión.

Tenemos que:

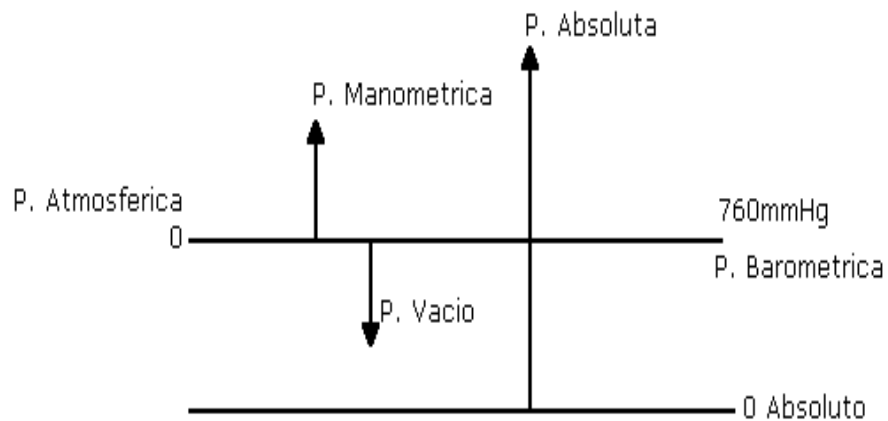
$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}} = \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$



### 3.1.3.2.1. Tipos de presión

La relación de los diferentes tipos de presión se expresa en la figura siguiente:

**Figura 13. Tipos de presión**



- **Presión absoluta**

Es la presión de un fluido medido con referencia al vacío perfecto o cero absoluto. La presión absoluta es cero únicamente, cuando no existe choque entre las moléculas lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso, o cuando la velocidad molecular es muy pequeña.

Este término se creó debido a que la presión atmosférica varía con la altitud y muchas veces los diseños se hacen en otros países a diferentes altitudes sobre el nivel del mar, por lo que un término absoluto unifica criterios.

- **Presión atmosférica**

El hecho de estar rodeados por una masa gaseosa (aire), y al tener éste aire un peso que actúa sobre la tierra, quiere decir que estamos sometidos a una presión (atmosférica), que es la presión ejercida por la atmósfera de la tierra, tal como se mide normalmente por medio del barómetro (presión barométrica). Al nivel del mar o a las alturas próximas a éste, el valor de la presión es cercano a  $14.7 \text{ lb/plg}^2$  (760 mm Hg); estos valores disminuyen con la altitud.

- **Presión manométrica**

Son normalmente las presiones superiores a la atmosférica, que se mide por medio de un elemento que se define la diferencia entre la presión, que es desconocida y la presión atmosférica que existe; si el valor absoluto de la presión es constante y la presión atmosférica aumenta, la presión manométrica disminuye; esta diferencia generalmente es pequeña, mientras que en las mediciones de presiones superiores, dicha diferencia es insignificante, es evidente que el valor absoluto de la presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

La presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

Presión absoluta = Presión manométrica + Presión atmosférica.

- **Vacío**

Se refiere a presiones manométricas menores que la atmosférica, que normalmente se miden, mediante los mismos tipos de elementos con que se miden las presiones superiores a la atmosférica, es decir, por diferencia entre el valor desconocido y la presión atmosférica existente. Los valores que corresponden al vacío aumentan al acercarse al cero absoluto y, por lo general, se expresa a modo de centímetros de mercurio (cm Hg), metros de agua, etc.

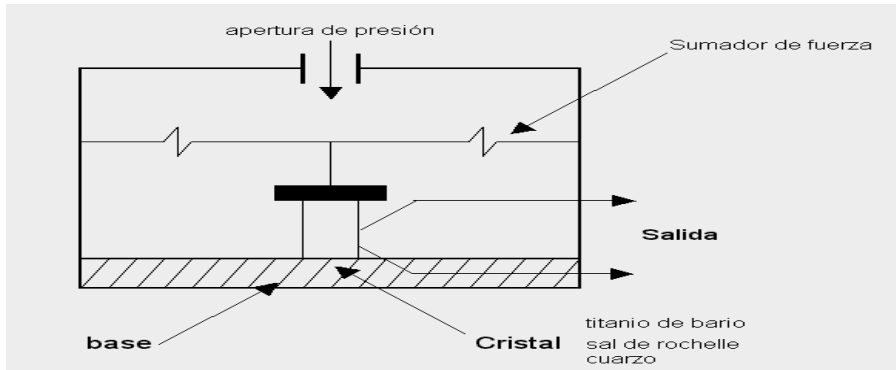
De la misma manera que para las presiones manométricas, las variaciones de la presión atmosférica tienen sólo un efecto pequeño en las lecturas del indicador de vacío. Sin embargo, las variaciones pueden llegar a ser de importancia, que todo el intervalo, hasta llegar al cero absoluto y sólo comprende 760 Mm. Hg.

### **3.1.3.2.2. Medición de presión**

Un transductor piezoeléctrico posee materiales cristalinos asimétricos “cuarzo, titanio de bario y sales de rochelle”. Estos materiales producen una diferencia de potencial “FEM”, cuando están expuestos a un esfuerzo.

El principio de funcionamiento es el siguiente: uno de estos cristales se colocan entre una base sólida y un elemento sumador de fuerza. Cuando existe una fuerza aplicada desde el exterior, entra en el transductor por su apertura de presión y aplica la misma a la parte superior del cristal. Ésta produce una FEM a través del cristal, la cual es proporcional a la magnitud de la presión que se está aplicando.

**Figura 14. Elementos de un transductor piezoeléctrico**



Este tipo de transductores posee una respuesta muy buena a alta frecuencia (sensible a los cambios de presión instantáneos). El principal uso es en los acelerómetros de alta frecuencia. En una aplicación como esta, la FEM puede variar desde 1 a 30 mili-voltios por “g” de aceleración.

Estos transductores no necesitan una fuente externa de potencia. La principal desventaja es que no se puede utilizar en condiciones estáticas. Además, las variaciones en la temperatura del cristal afectan al voltaje de salida.

- **Utilización de transductores capacitivos**

La capacitancia en un capacitor de placas paralelas está dada por la siguiente ecuación:

$$C: (k \cdot A \cdot \epsilon_0) / d \quad (\text{faradios})$$

Donde:

A = área de cada placa (m<sup>2</sup>)

d = Distancia entre las placas (m)

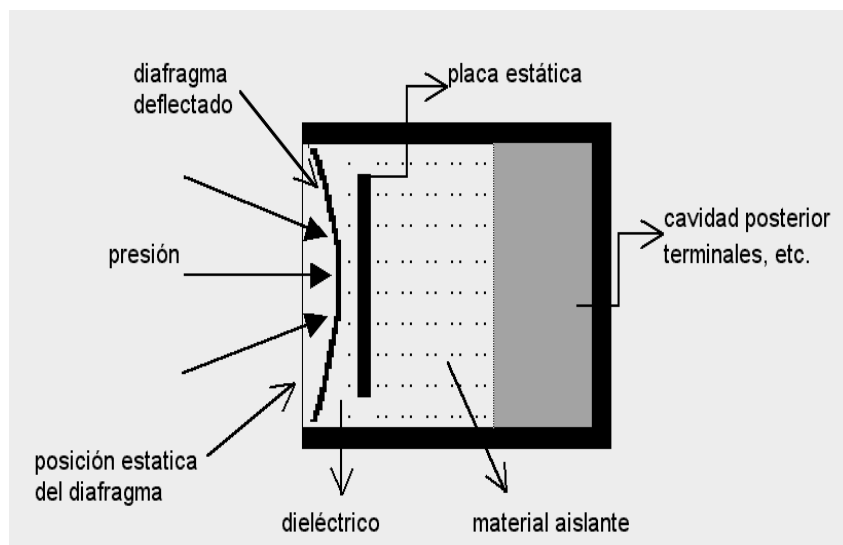
$\epsilon_0 = 9.85 \times 10^{12}$  (Faradios/m)

k = constante dieléctrica del material

Debido a que la capacitancia es inversamente proporcional a la distancia entre las placas paralelas, cualquier variación en “d” origina una correspondiente variación en la capacitancia. Éste es el principio aplicado al transductor capacitivo. Al aplicar una fuerza al diafragma, el cual está dispuesto como placa de un capacitor simple, cambia la distancia entre el diafragma y la placa estática. El cambio resultante en la capacitancia del transductor se puede medir con un circuito puente de ca, pero generalmente se mide con un circuito oscilador.

El transductor, como parte de dicho circuito, provoca un cambio en la frecuencia del oscilador, el cual es una medida de la magnitud de la fuerza aplicada.

**Figura 15. Transductor capacitivo para medición de presión**

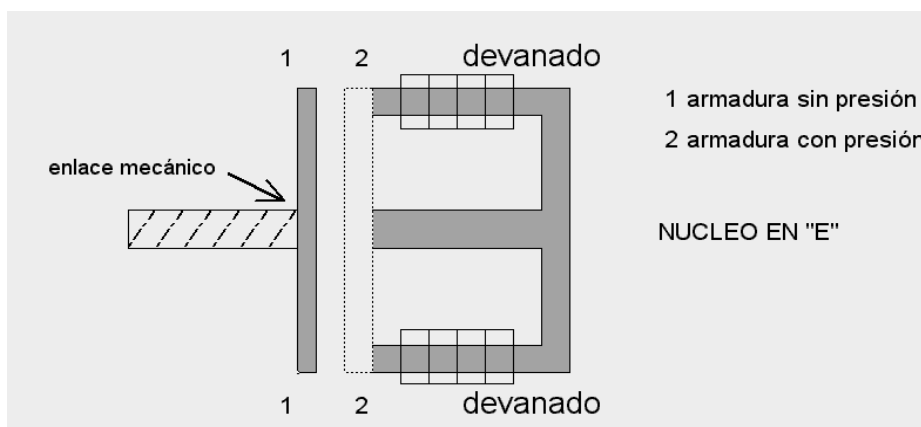


Este transductor posee una excelente respuesta en frecuencia y se puede utilizar en fenómenos estáticos y dinámicos. Su mayor desventaja es la sensibilidad del mismo a variaciones de temperatura.

- **Utilización de transductores inductivos**

Este tipo de transductor proporciona una medición de fuerza, la cual se logra por medio del cambio de la razón de inductancia, ya sea dentro de un par de bobinas, o mediante el uso de una sola bobina.

**Figura 16. Transductor inductivo para medición de presión**



### 3.1.3.3. Sensores de proximidad

#### 3.1.3.3.1. Sensores de proximidad capacitivos

Su principio de funcionamiento es similar al de los transductores capacitivos descritos en la medición de presión, con la diferencia de que el dieléctrico utilizado no es más que el material del proceso, se pueden encontrar en el mercado diferentes diseños para detección tanto de líquidos como sólidos.

Poseen una sonda o sensor, el cual se encuentra interactuando con el ambiente y conectado a un circuito oscilador de ca. Al existir un cambio en el entorno de la sonda, modifica la capacitancia entre las placas de la misma y, por lo tanto, modifica la corriente que circula en el circuito oscilador, lo cual provoca el aumento o disminución de las oscilaciones.

Al colocar circuito de conmutación para el monitoreo de las oscilaciones, se obtiene un sensor de posición, el cuál funcionará como un contacto abierto o cerrado; dependiendo de la presencia o ausencia de material en la parte sensible del sensor.

#### **3.1.3.3.2. Sensores de proximidad inductivos**

Son diseñados para detección de objetos metálicos; al igual que los sensores capacitivos, están compuestos principalmente por un circuito oscilador, con la gran diferencia de poseer un bobinado instalado en la cara sensible del sensor.

El bobinado crea un campo magnético alterno, que interactúa con su entorno; al acercarse un componente metálico al sensor, éste provoca la elevación de las corrientes inducidas en el bobinado, las cuales son una carga adicional al circuito oscilador y provocan la parada de las oscilaciones.

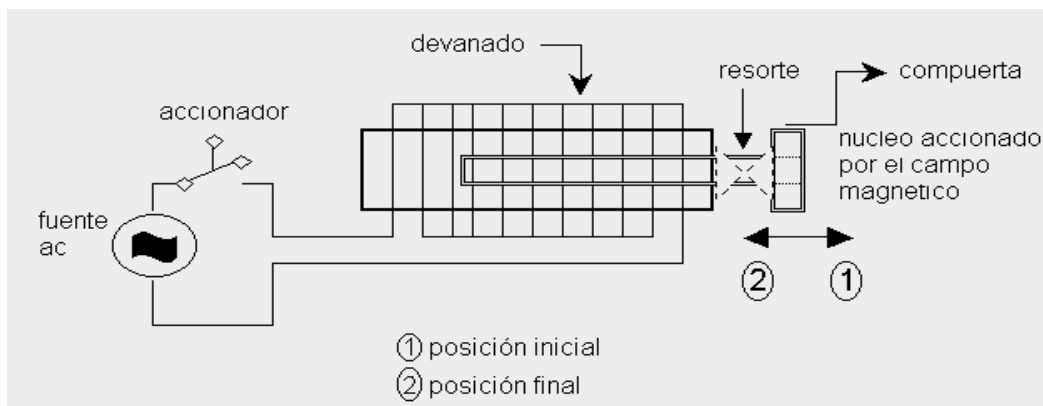
Los detectores de proximidad inductivos funcionan como interruptores de posición mecánica, con la ventaja de la ausencia de contacto del dispositivo con la superficie que va a censar, además del buen funcionamiento en presencia de polvo, aceite, humedad, etc., lo cual disminuye todos los conflictos mecánicos de los interruptores.

Este tipo de sensores posee una gran respuesta a la frecuencia; su funcionamiento es óptimo en procesos rápidos, como el de monitoreo de movimiento de piezas o el montaje en serie.

### 3.2. Electroválvulas

Son dispositivos que utilizan señales eléctricas para accionar pequeños solenoides electromagnéticos, que controlan la apertura y cierre de válvulas. En la instalación del horno vertical, las electro-válvulas controlan el flujo de aire a presión que alimenta un dispositivo mecánico llamado pistón, el cual se utiliza para la apertura y cierre de las compuertas instaladas en las áreas de carga y descarga del horno.

**Figura 17. Composición básica de un solenoide electromagnético**



Cuando una corriente eléctrica circula por un solenoide, se produce un campo magnético que acciona un dispositivo mecánico, que es utilizado para controlar el paso del flujo de aire anteriormente funcionado.



### **3.3. Motores**

Se denomina motor a la máquina eléctrica que convierte la energía eléctrica en energía mecánica giratoria; existe una gran variedad de motores, pero en esta sección se dará una breve descripción del funcionamiento de los motores de inducción, los cuales fueron utilizados en la instalación del horno vertical.

#### **3.3.1. Motor de Inducción**

El movimiento del eje es producido por la interacción de los campos magnéticos entre los devanados del estator y del rotor del mismo. Cuando se excita el devanado del estator, mediante una fuente polifásica balanceada, se produce un campo magnético en el entrehierro que gira a una velocidad llamada sincrónica, la cual es determinada por el número de polos y la frecuencia de la energía eléctrica aplicada al estator.

La velocidad sincrónica está dada por la siguiente fórmula:

$$\text{Velocidad sincrónica} = \frac{120 * \text{frecuencia de la red}}{\text{Número de polos del motor}}$$

El rotor puede ser de dos tipos.

- Rotor devanado
- Rotor con arrollamiento de jaula de ardilla

Un rotor devanado tiene un arrollamiento polifásico semejante al del estator, y un embobinado con el mismo número de polos que éste. Las terminales de este arrollamiento están conectadas a unos anillos deslizantes aislados, los cuales están montados sobre el eje.

Un rotor jaula de ardilla consta de barras de cobre de gran sección, alojadas en ranuras alrededor del rotor y cortocircuitadas por dos aros en los extremos. Las grandes ventajas de este tipo de rotores son su gran simplicidad y robustez.

El motor de inducción funciona como un transformador con el secundario en cortocircuito. El giro se produce cuando los campos inducidos en los devanados del rotor tratan de alinearse con los campos inductores que giran en el estator.

El deslizamiento en un motor de inducción es la relación existente entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor, y su cálculo se da de la siguiente forma:

Siendo:

- s** deslizamiento
- n** número de revoluciones por minuto del rotor
- n1** velocidad sincrónica del campo magnético del estator

$$s = \frac{n1 - n}{n1}$$

o bien:

$$n = n1 * (1 - s)$$

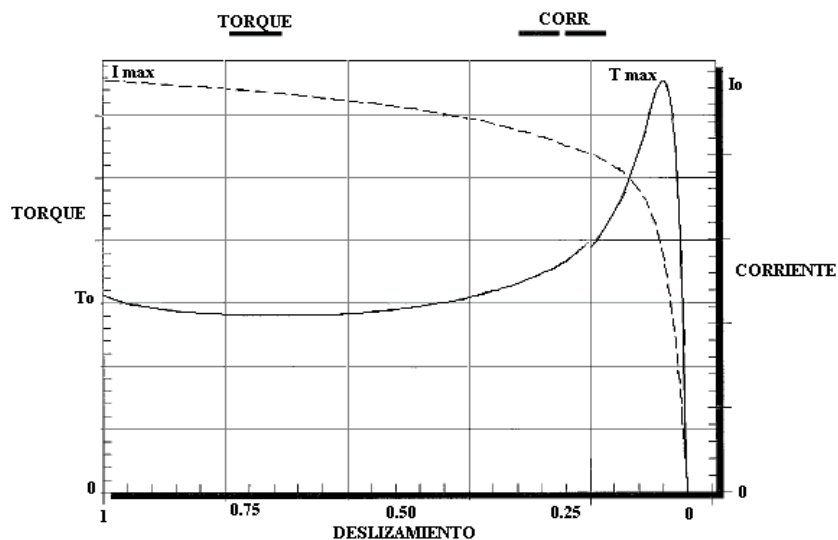
Este movimiento relativo entre el flujo del estator y el devanado del rotor induce voltajes de frecuencia  $s f$ , llamada también frecuencia de deslizamiento, en el rotor.

En el arranque, el rotor se encuentra en reposo y la frecuencia de la tensión inducida en el mismo es igual a la frecuencia del estator; se produce un par de arranque que tiende a hacer girar el rotor en el sentido del campo magnético giratorio del estator.

Si el par de arranque es suficiente, para que el motor supere su inercia, el rotor llegará a su velocidad de operación, la cual nunca llegará a la velocidad de sincronismo, ya que si el rotor gira a la misma velocidad que los campos del estator, no existiría inducción.

El comportamiento de la corriente del motor y del par del mismo se puede observar en la siguiente gráfica.

**Figura 18. Curvas par-deslizamiento y corriente-deslizamiento en un motor de inducción**



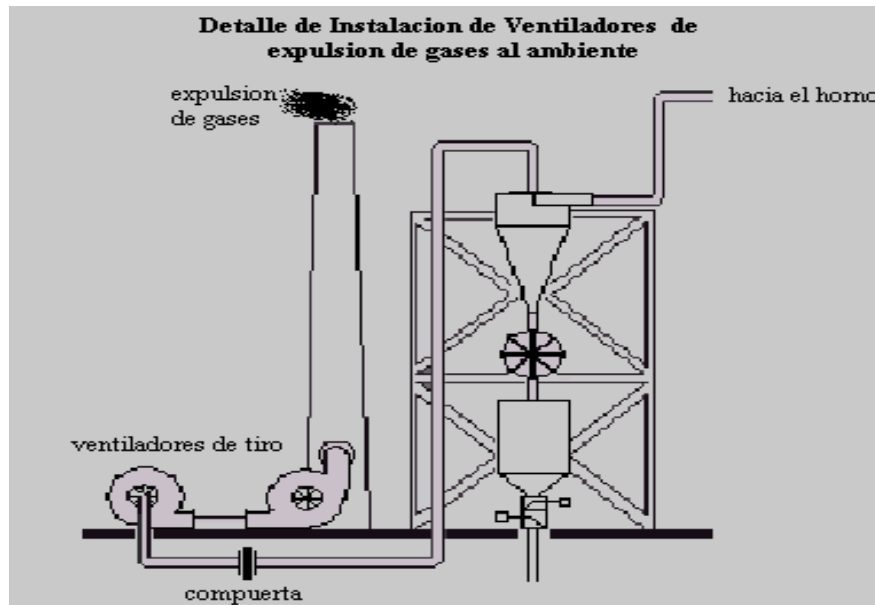
En condiciones normales de funcionamiento, el deslizamiento es del orden del 3 al 10 % a plena carga.

Se puede considerar a un motor con jaula de ardilla, como una máquina de velocidad constante, la cual disminuye una pequeña cantidad cuando el motor se encuentra en plena carga, respecto a un motor girando al vacío. Contrario a un motor con rotor devanado, en el cual se puede obtener una variación de la velocidad, cuando se introduce una resistencia externa en el circuito del rotor.

En el horno vertical, se pueden encontrar diversos tipos de aplicaciones para este tipo de motores; se pueden mencionar los motores utilizados en ventiladores, los cuales son sometidos a un gran esfuerzo en el arranque, debido a que deben vencer diferentes cargas adicionales, como:

- Carga debida al peso de las aspas del ventilador, las cuales presentan una mayor inercia en el arranque.
- Carga producida por la baja temperatura del aire en el arranque lo cual se debe principalmente a que al iniciar el proceso de calcinación, el aire dentro del horno posee mayor densidad debido a su baja temperatura, la cual irá disminuyendo conforme el horno llegue a su temperatura de operación, y así disminuye la carga aplicada al eje del motor. Para eliminar esta carga, es necesario instalar una compuerta que impida la succión del aire que está dentro del horno, la cual se abrirá lentamente, cuando el motor alcance su velocidad de operación.

**Figura 19. Instalación de ventiladores de tiro**



Es necesario tomar en cuenta estas consideraciones en el momento arranque; de lo contrario, el motor no se podrá poner en marcha debido a la intervención de las protecciones. Es necesario realizar las graduaciones en los dispositivos de protección para que los ventiladores puedan llegar a su estado de operación.

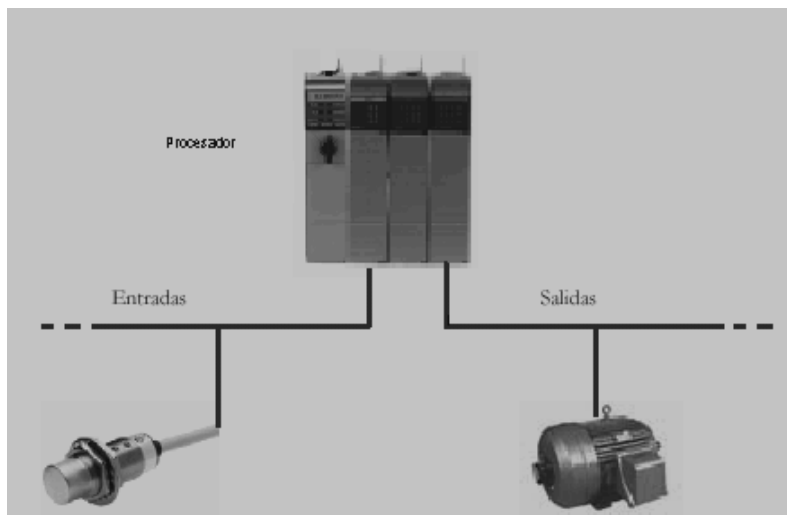
Debido a que las curvas de arranque de dichos motores no corresponden a las curvas de las protecciones especificadas para el mismo motor utilizado, en otro tipo de proceso, será necesario analizar ambas curvas para determinar qué rango de protección se necesita para cada caso en específico.

Generalmente se utilizan distintos métodos para el arranque del motor, los cuales pueden ir desde un arranque a voltaje reducido, hasta un arranque utilizando un variador de frecuencia. Para poder definir el tipo de arranque adecuado, es necesario hacer un estudio de costos para cada caso en especial, los cuales generalmente aumentarán según la potencia del motor.

### 3.4. Descripción del PLC

El control de los dispositivos de campo en el horno de cal de la pedrera, se realizó a través de un sistema *SLC500* de *Allen Bradley*, el cual recibe las señales del estado de los dispositivos y dependiendo de éstas y de los comandos del operador del sistema, se tomará, acción sobre los dispositivos de salida.

**Figura 20. Entradas y salidas en el PLC**



**Fuente:** Intek Guatemala, ref.: GT-01-22-0055

La elección del sistema de automatización fue realizada después de analizar el número de entradas y salidas a controlar; como se pudo observar en páginas anteriores, cada equipo posee un determinado número de dispositivos, que envían señales al autómatas para realizar el control del proceso.

### 3.4.1. Variables de control

Se dividen en tres grupos: el proceso de transporte que está distinguido por la numeración 411, el de calcinación con la numeración 461 y el de descarga 491. A continuación, se presentan los listados de las variables de control utilizadas en los módulos de entradas y salidas del autómeta.

**Tabla V. Direccionamiento módulo 01**

Módulo 01, Entradas Analógicas

|         |             |  |
|---------|-------------|--|
| I:01/00 | Libre       |  |
| I:01/01 | 461-VE1-JZ1 | Futura instalación de monitoreo de la corriente en VE1 |
| I:01/02 | 461-VE2-JZ1 | Futura instalación de monitoreo de la corriente en VE2 |
| I:01/03 | 461-VE3-JZ1 | Futura instalación de monitoreo de la corriente en VE3 |
| I:01/04 | Libre       |  |
| I:01/05 | Libre       |  |
| I:01/06 | Libre       |  |
| I:01/07 | Libre       |  |

**Tabla VI. Direccionamiento módulo 02**

Módulo 02, Entradas Analógicas

|         |              |   |
|---------|--------------|---|
| I:02/00 | 461-HV1c-TZ1 | Señal de transductor de temperatura TZ1       |
| I:02/01 | 461-HV1c-TZ2 | Señal de transductor de temperatura TZ2       |
| I:02/02 | 461-HV1d-TZ3 | Señal de transductor de temperatura TZ3       |
| I:02/03 | 461-HV1d-TZ4 | Espacio para colocación de med de temperatura |
| I:02/04 | 461-HV1c-PZ1 | Señal de transductor de presión PZ1           |
| I:02/05 | 461-HV1c-PZ2 | Señal de transductor de presión PZ2           |
| I:02/06 | 461-HV1d-PZ3 | Señal de transductor de presión PZ3           |
| I:02/07 | 461-HV1d-PZ4 | Espacio para colocación de med de presión     |

### Tabla VII. Direccionamiento módulo 04

Módulo 4 , Entradas Digitales

|         |             |   |
|---------|-------------|---|
| I:04/00 | Libre       |   |
| I:04/01 | Libre       |   |
| I:04/02 | Libre       |   |
| I:04/03 | Libre       |   |
| I:04/04 | Libre       |   |
| I:04/05 | Libre       |   |
| I:04/06 | 411-CQ1-EK1 | Señal de Voltaje de Alimentación para compuerta de Guillotina |
| I:04/07 | 411-CQ1-VG1 | Señal Botonera en Campo compuerta de Guillotina               |
| I:04/08 | 411-CQ1-ZX1 | Señal de sensor Compuerta de Guillotina Abierta               |
| I:04/09 | 411-CQ1-ZY1 | Señal de sensor Compuerta de Guillotina Cerrada               |
| I:04/10 | 411-CQ2-EK1 | Señal de Voltaje de Alimentación para Compuerta Alimentación  |
| I:04/11 | 411-CQ2-VG1 | Señal de Botonera en Campo para Compuerta Alimentación HC     |
| I:04/12 | 411-CQ2-ZX1 | Señal de sensor Compuerta Alimentación HC Abierta             |
| I:04/13 | 411-CQ2-ZY1 | Señal de sensor Compuerta Alimentación HC Cerrada             |
| I:04/14 | 491-PB1-EK1 | Señal de Voltaje de Alimentación para compuerta de Descarga 1 |
| I:04/15 | 491-PB1-VG1 | Señal de Botonera en Campo para Compuerta de Descarga 1       |

### Tabla VIII. Direccionamiento módulo 05

Módulo 5, Entradas Digitales

|         |             |   |
|---------|-------------|---|
| I:05/00 | 491-PB1-ZX1 | Señal de sensor Compuerta Descarga 1 Abierta                  |
| I:05/01 | 491-PB1-ZY1 | Señal de sensor Compuerta Descarga 1 Cerrada                  |
| I:05/02 | 491-PB2-EK1 | Señal de Voltaje de Alimentación para compuerta de Descarga 2 |
| I:05/03 | 491-PB2-VG1 | Señal de Botonera en Campo para Compuerta de Descarga 2       |
| I:05/04 | 491-PB2-ZX1 | Señal de sensor Compuerta Descarga 2 Abierta                  |
| I:05/05 | 491-PB2-ZY1 | Señal de sensor Compuerta Descarga 2 Cerrada                  |
| I:05/06 | Libre       |   |
| I:05/07 | 411-BT1-MS1 | Señal de Stop en botonera BT1                                 |
| I:05/08 | 411-BT1-MT1 | Disparo de dispositivo térmico NC BT1                         |
| I:05/09 | 411-BT1-RJ1 | Señal de accionamiento STOP de Emergencia en BT1              |
| I:05/10 | 411-BT1-SN1 | Señal de sensor de movimiento en BT1                          |
| I:05/11 | 411-BT1-MG1 | Señal de Start en botonera BT1                                |
| I:05/12 | 411-BT1-MR1 | Señal de Voltaje desde contacto NO en Contactor BT1           |
| I:05/13 | Libre       |   |
| I:05/14 | Libre       |   |
| I:05/15 | Libre       |   |



**Tabla IX. Direccionamiento módulo 06**

Módulo 6, Entradas Digitales

|         |             |   |
|---------|-------------|---|
| I:06/00 | 411-BT2-MS1 | Señal de Stop en botonera BT2                       |
| I:06/01 | 411-BT2-MT1 | Disparo de dispositivo térmico NC BT2               |
| I:06/02 | 411-BT2-RJ1 | Señal de accionamiento STOP de Emergencia en BT2    |
| I:06/03 | 411-BT2-SN1 | Señal de sensor de movimiento en BT2                |
| I:06/04 | 411-BT2-MG1 | Señal de Start en botonera BT2                      |
| I:06/05 | 411-BT2-MR1 | Señal de Voltaje desde contacto NO en Contactor BT2 |
| I:06/06 | Libre       |   |
| I:06/07 | Libre       |   |
| I:06/08 | 411-CV1-MG1 | Señal de Start en botonera CV1                      |
| I:06/09 | 411-CV1-MR1 | Señal de Voltaje desde contacto NO en Contactor CV1 |
| I:06/10 | 411-CV1-MS1 | Señal de Stop en botonera CV1                       |
| I:06/11 | 411-CV1-SN1 | Señal de sensor de movimiento en CV1                |
| I:06/12 | 411-DP1-MG1 | Señal de Start en botonera DP1                      |
| I:06/13 | 411-DP1-MR1 | Señal de Voltaje desde contacto NO en Contactor DP1 |
| I:06/14 | 411-DP1-MS1 | Señal de Stop en botonera DP1                       |
| I:06/15 | 411-DP1-SN1 | Señal de sensor de movimiento en DP1                |

**Tabla X. Direccionamiento módulo 07**

Módulo 7, Entradas Digitales

|         |             |  |
|---------|-------------|--|
| I:07/00 | 411-BT3.MG1 | Señal de Start en botonera BT3                         |
| I:07/01 | 411-BT3.MR1 | Señal de Voltaje desde contacto NO en Contactor BT3    |
| I:07/02 | 411-BT3.MS1 | Señal de Stop en botonera BT3                          |
| I:07/03 | 411-BT3.SN1 | Señal de sensor de movimiento en BT3                   |
| I:07/04 | 461-ED1.MG1 | Señal de Start en botonera ED1                         |
| I:07/05 | 461-ED1.SN1 | Señal de sensor de movimiento en ED1                   |
| I:07/06 | 461-ED1.MS1 | Señal de Stop en botonera ED1                          |
| I:07/07 | 461-ED1.MR1 | Señal de Voltaje desde contacto NO en Contactor ED1    |
| I:07/08 | 411-TL1-LH1 | Señal de Sensor de Nivel, en Tolva de Alimentación HC1 |
| I:07/09 | 461-HV1-LH1 | Señal de sensor de Nivel Alto Interno, HC1             |
| I:07/10 | Libre       |  |
| I:07/11 | 461-VE2-MG1 | Señal de Start en botonera VE2                         |
| I:07/12 | 461-VE2-MR1 | Señal de Voltaje desde contacto NO en Contactor VE2    |
| I:07/13 | 461-VE2-MS1 | Señal de Stop en botonera VE2                          |
| I:07/14 | 461-VE1-MG1 | Señal de Start en botonera VE1                         |
| I:07/15 | 461-VE1-MR1 | Señal de Voltaje desde contacto NO en Contactor VE1    |

**Tabla XI. Direccionamiento módulo 08**

Módulo 8, Entradas Digitales

|         |             |   |
|---------|-------------|---|
| I:08/00 | 461-VE1-MS1 | Señal de Stop en botonera VE1                       |
| I:08/01 | 461-VE3-MG1 | Señal de Start en botonera VE3                      |
| I:08/02 | 461-VE3-MR1 | Señal de Voltaje desde contacto NO en Contactor VE3 |
| I:08/03 | 461-VE3-MS1 | Señal de Stop en botonera VE3                       |
| I:08/04 | 411-2W1.EK1 | Voltaje alimentación sirena, proceso de Transporte  |
| I:08/05 | 461-2W1.EK1 | Voltaje alimentación sirena, proceso de Calcinación |
| I:08/06 | Libre       |   |
| I:08/07 | Libre       |   |
| I:08/08 | Libre       |   |
| I:08/09 | Libre       |   |
| I:08/10 | Libre       |   |
| I:08/11 | Libre       |   |
| I:08/12 | Libre       |   |
| I:08/13 | Libre       |   |
| I:08/14 | Libre       |   |
| I:08/15 | Libre       |   |

**Tabla XII. Direccionamiento módulo 10**

Módulo 10, Salidas Digitales

|         |             |   |
|---------|-------------|---|
| O:10/00 | Libre       |   |
| O:10/01 | Libre       |   |
| O:10/02 | 411-CQ1-VD1 | Accionamiento de Electroválvula para Compuerta de Guillotina    |
| O:10/03 | 411-CQ2-VD1 | Accionamiento de Electroválvula para Compuerta Alimentación HCl |
| O:10/04 | 491-PB1-VD1 | Accionamiento de Electroválvula para Compuerta Descarga 1       |
| O:10/05 | 491-PB2-VD1 | Accionamiento de Electroválvula para Compuerta Descarga 2       |
| O:10/06 | 411-BT1-MD1 | Alimentación de Bobina BT1                                      |
| O:10/07 | Libre       |   |

**Tabla XIII. Direccionamiento módulo 11**

Módulo 11, Salidas Digitales

|         |             |                            |
|---------|-------------|----------------------------|
| O:11/00 | 411-BT2-MD1 | Alimentación de Bobina BT2 |
| O:11/01 | 411-BT3-MD1 | Alimentación de Bobina BT3 |
| O:11/02 | 411-CV1-MD1 | Alimentación de Bobina CV1 |
| O:11/03 | 411-DP1-MD1 | Alimentación de Bobina MD1 |
| O:11/04 | Libre       |                            |
| O:11/05 | 461-ED1-MD1 | Alimentación de Bobina ED1 |
| O:11/06 | 461-VE2-MD1 | Alimentación de Bobina VE2 |
| O:11/07 | 461-VE1-MD1 | Alimentación de Bobina VE1 |

#### Tabla XIV. Direccionamiento módulo 12

Módulo 12, Salidas Digitales

|         |             |  |
|---------|-------------|--|
| O:12/00 | 461-VE3-MD1 | Alimentación de Bobina VE3               |
| O:12/01 | 411-2W1.MD1 | Sirena de alarma, proceso de Transporte  |
| O:12/02 | 461-2W1.MD1 | Sirena de alarma, proceso de Calcinación |
| O:12/03 | Libre       |  |
| O:12/04 | Libre       |  |
| O:12/05 | Libre       |  |
| O:12/06 | Libre       |  |
| O:12/07 | Libre       |  |

El resumen de entradas y salidas, así como los espacios utilizados por las tarjetas en los módulos del PLC, se describen en la siguiente figura.

#### Tabla XV. Resumen de variables de proceso

| Descripción          | No | No Tarjetas | I/O por Módulo |
|----------------------|----|-------------|----------------|
| Entradas Digitales:  | 69 | 5           | 16             |
| Salidas Digitales:   | 17 | 3           | 8              |
| Entradas Analógicas: | 14 | 2           | 8              |
| Salidas Analógicas:  | 1  | 1           | 4              |

Los espacios libres en los módulos se han dispuesto para futuras ampliaciones. Las entradas / salidas de los módulos 3, 9 y 13 han quedado sin asignación.

El trabajo de direccionamiento es realizado por la persona a cargo del proyecto. Luego de realizado, se efectúa el pedido del autómata al proveedor, el cual proporcionará el panel del PLC y realizará la programación del mismo, tomando en cuenta, además, los diagramas de flujo correspondientes a cada proceso.



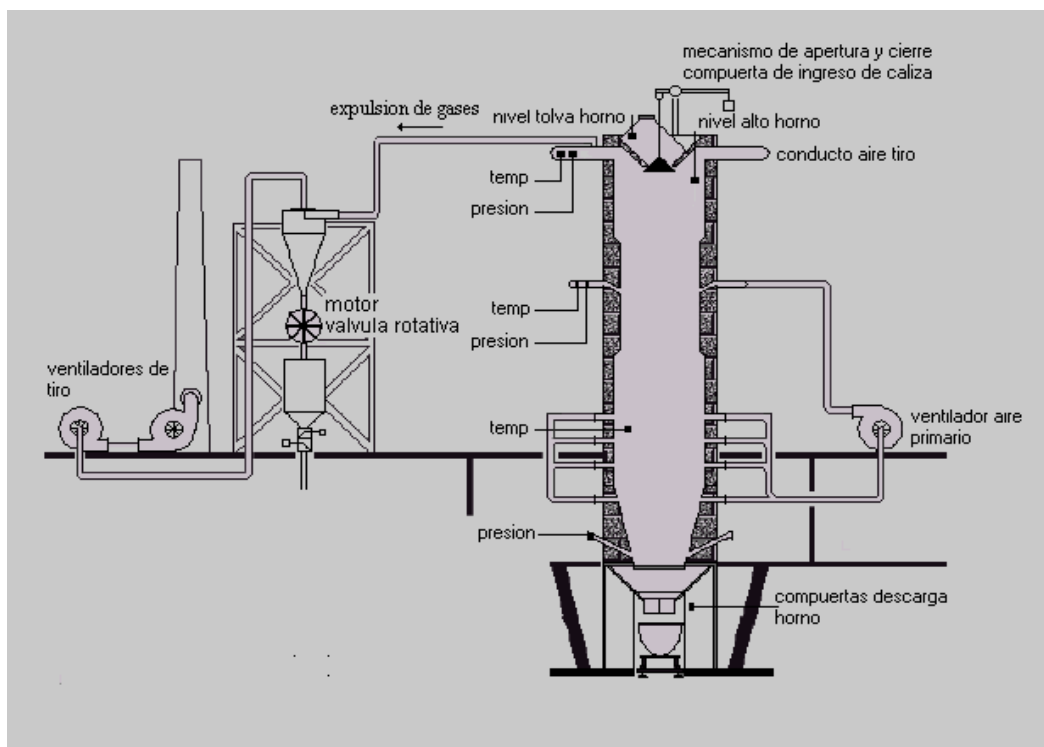
## 4. MONTAJE E INSTALACIÓN ELECTRICA DEL EQUIPO

### 4.1. Instrumentos de control

#### 4.1.1. Ubicación de sensores en el proceso de calcinación

A continuación, se muestra la figura del proceso de calcinación del horno vertical, en la cual se puede observar la ubicación de los distintos transductores, tanto de temperatura y presión, como los sensores que determinarán la cantidad de piedra existente en la tolva de ingreso y dentro del horno vertical.

**Figura 21. Proceso de calcinación**

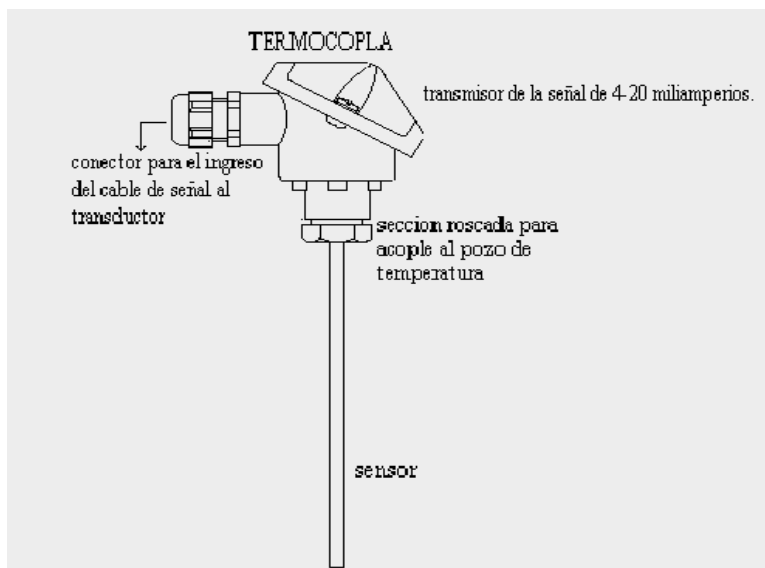


## 4.1.2. Instalación de los sensores en el horno

### 4.1.2.1. Transductores de temperatura

Los transductores de temperatura instalados en el horno vertical son termocoplas tipo K, debido a la temperatura de operación del horno, la cual puede alcanzar los 1200 grados centígrados.

**Figura 22. Termocopla**



Las termocoplas están instaladas en el ducto de tiro o de salida de los gases, en la parte de precalentamiento del horno y en la sección de los quemadores o área de calcinación de la piedra.

La instalación de las mismas se divide en los siguientes pasos:

- Montaje en campo
- Instalación eléctrica

Para la identificación de estos sensores, se les ha denominado TZ1, TZ2 y TZ3.

#### **4.1.2.1.1. Montaje en campo**

A continuación, se presentan los detalles de montaje de las diferentes termocoplas instaladas en el horno vertical de la pedrera.

- **Termocoplas TZ1 y TZ2.**

El detalle de instalación de ambas termocoplas es el mismo. Están situadas una en el ducto de extracción de los gases del horno y la otra en el área de precalentamiento, donde se toma el aire que alimentará el área de los quemadores.

La termocopla TZ1 proporciona la temperatura de los gases, que se extraen del horno vertical. Este dispositivo se encuentra ubicado en un ducto de hierro en forma de dona, la cual está ubicada en la parte superior del horno.

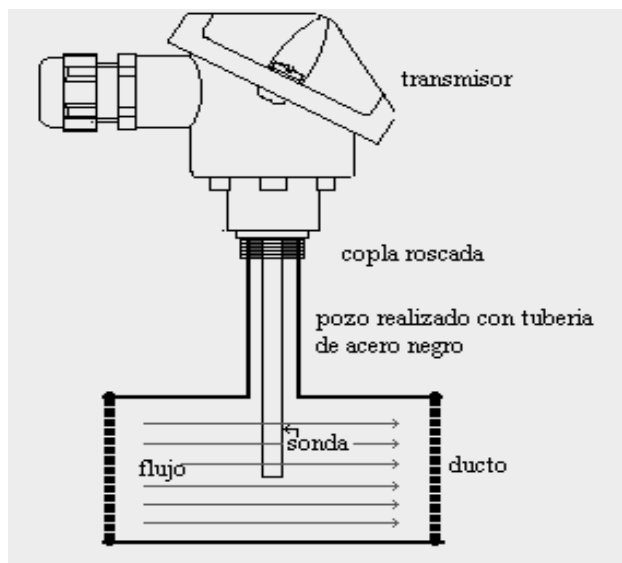
La termocopla TZ2 se encuentra ubicada en la sección de precalentamiento de la piedra; proporciona la información de la temperatura del aire que está circulando en el área de precalentamiento y va hacia los quemadores para el proceso de combustión.

Para realizar estas mediciones de una manera correcta, es necesario que las sondas de la termocoplas estén ubicadas aproximadamente al centro de cada uno de los ductos de las dos áreas previamente expuestas.

Se instaló un pozo de un diámetro de dos pulgadas para cada una, el cual consiste en un tubo de acero negro con un conector roscado de 1/2" en el extremo superior, para el acople de la sonda hacia el transmisor de temperatura.

En el interior del pozo, se aloja la sonda de la termocopla; en la figura se muestra la instalación del mismo.

**Figura 23. Pozo para la toma de temperatura en ducto de tiro y aire primario**



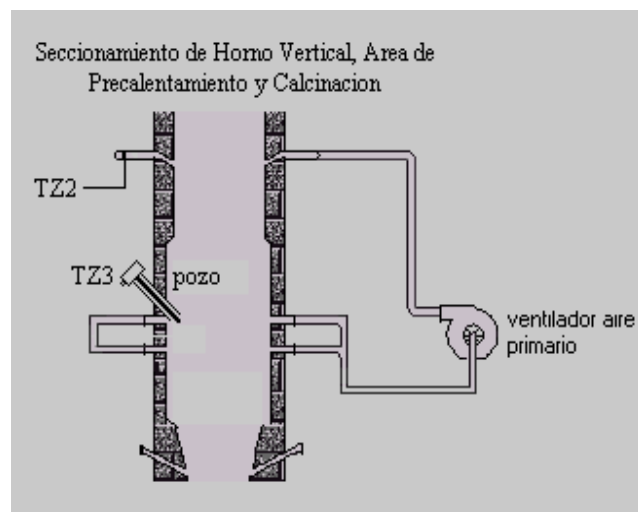
- **Termocopla TZ3.**

La termocopla TZ3 indica la temperatura en el punto de calcinación. Esta medición es la más importante para el proceso de producción de cal viva; está instalada en el centro del área de quemadores.



Para la instalación de dicha termocopla, se realizó un pozo con tubería de acero negro de dos pulgadas, la cual atraviesa la pared del horno directamente hacia el área de calcinación. El pozo fue ubicado entre dos de los quemadores laterales.

**Figura 24. Ubicación e instalación de termocopla**



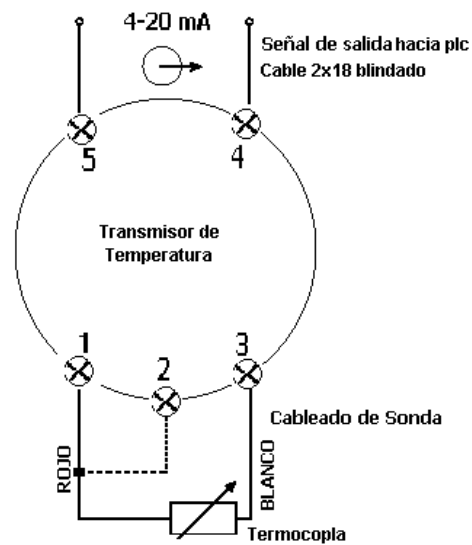
#### **4.1.2.1.2. Instalación eléctrica de las termocoplas**

Como se mencionó anteriormente, la señal eléctrica de los sensores de temperatura es una señal analógica de 4 a 20 miliamperios, debido a que la sonda de la termocopla únicamente varía su resistencia, respecto a la temperatura, es necesario un circuito que convierta esta variación en la señal analógica que será interpretada por el PLC.

Para este fin, la termocopla posee un circuito transmisor, el cual utiliza una fuente de voltaje proveniente del PLC y que servirá para convertir las variaciones de resistencia de la sonda de temperatura en una señal de 4 a 20 miliamperios.

La conexión de los terminales del transmisor, utilizado en la instalación del dichas termocoplas, se define en la siguiente figura.

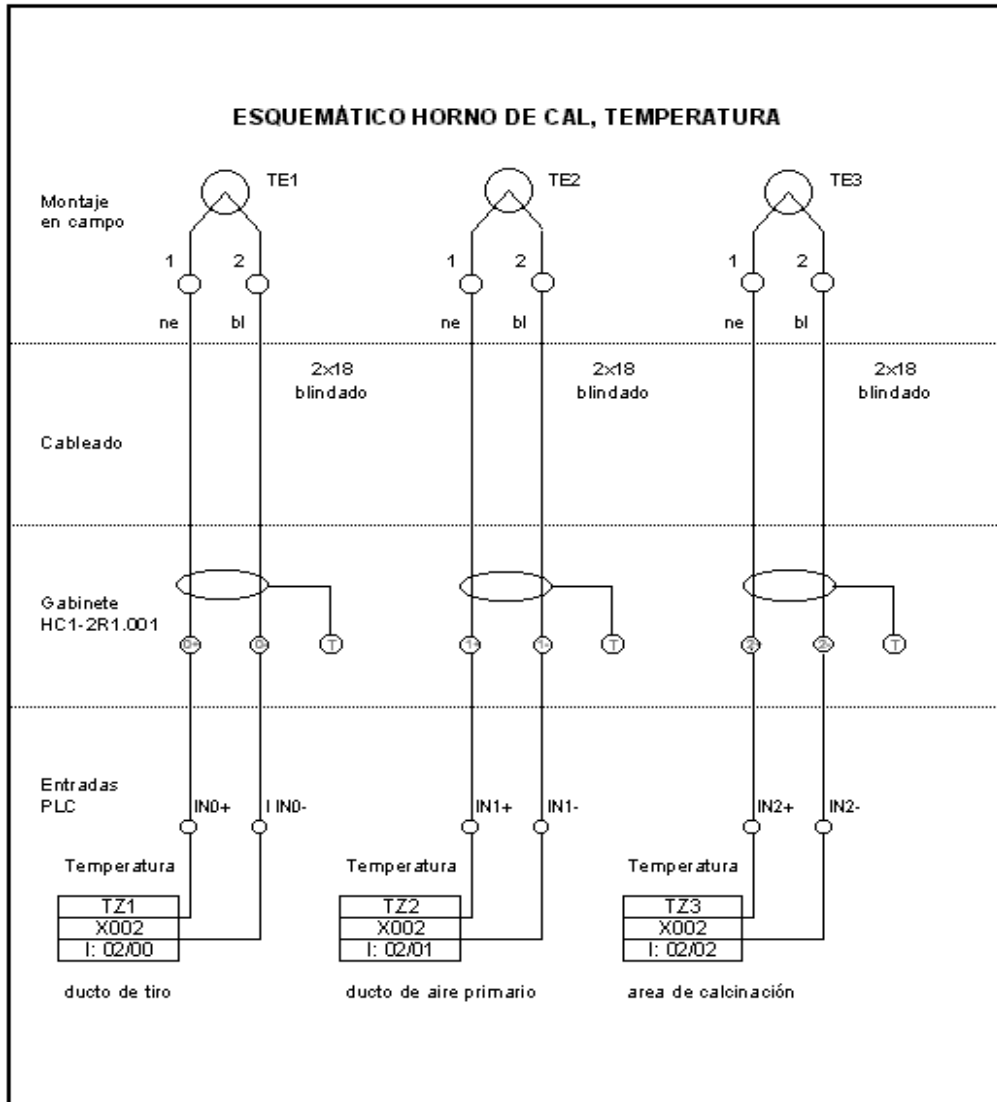
**Figura 25. Conexión del transmisor de temperatura**



El cable, que va desde el transmisor hacia el PLC, debe ser blindado para eliminar interferencia en la señal producida por los campos magnéticos, que existan en el ambiente en la trayectoria de la termocopla al panel del PLC.

Luego, se conecta el extremo del cable blindado en los bornes del módulo de entrada analógica del PLC, el cual interpretará la señal de miliamperios correspondiente a cada termocopla, para realizar el control del proceso en el programa del horno.

**Figura 26. Diagrama esquemático de conexión de termocoplas**



#### 4.1.2.2. Transductores de presión

Los transductores de presión utilizados son del tipo diferencial, con lo cual se observa los cambios de presión en puntos específicos del proceso, respecto a la presión atmosférica. Están ubicados en las áreas de expulsión de gases, precalentamiento y calcinación.

Para la identificación, a dichos transductores, se les ha denominado PZ1, PZ2 y PZ3.

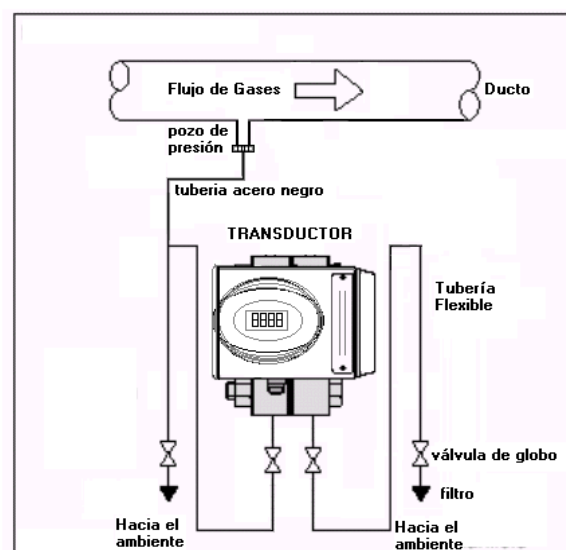
#### 4.1.2.2.1. Montaje en campo

- **Medidores de presión PZ1 y PZ2**

El detalle de instalación para estos medidores es el mismo, debido a que se encuentran ubicados, uno en el ducto de tiro y el otro en el ducto de aire primario, al igual que las termocoplas TZ1 y TZ2.

Para realizar la medición se realizaron pozos de presión, los cuales consisten en la instalación de tubería de acero negro de ½ pulgada. La tubería está fija a los ductos por soldaduras, y conectada a los medidores por medio de acoples mecánicos de válvulas de globo y por tubería flexible en una de las entradas del transductor.

**Figura 27. Instalación de transductores de presión PZ1 y PZ2**

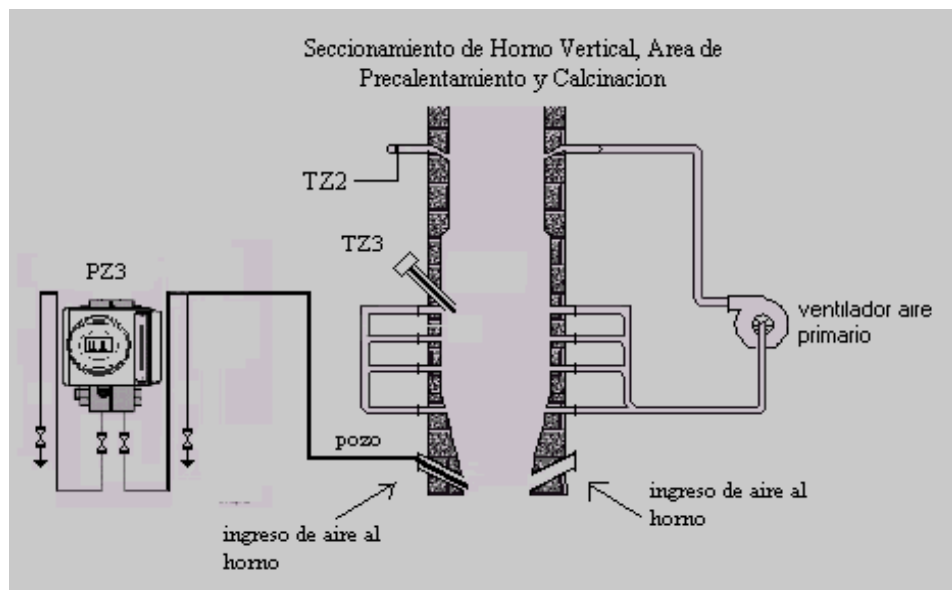


La otra entrada del transductor de presión posee un acople con tubería flexible y válvulas de globo, además de un filtro que protege al transductor del ingreso de impurezas, que estén presentes en el ambiente.

- **Medidor de presión PZ3**

Este transductor indica la presión de aire que succiona el horno. El pozo se encuentra ubicado dentro de uno de los ductos de ingreso al mismo. Se realizó con tubería de ½ pulgada de acero negro. El detalle de montaje es similar al de los transductores de presión anteriores.

**Figura 28. Ubicación e instalación de transductor PZ3**

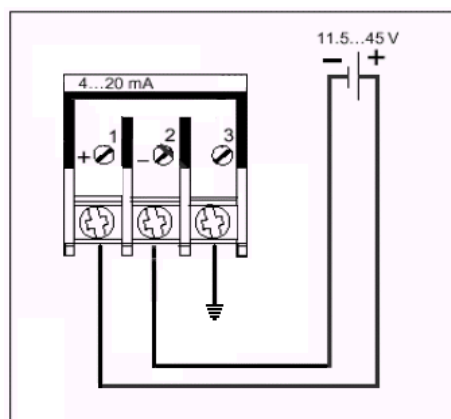


#### 4.1.2.2.2. Instalación eléctrica de los transductores de presión

Para el funcionamiento de dichos transductores, es necesario una fuente de voltaje directo en el rango de 11.5 a 45 voltios, la cual no es más que la instalada en el PLC para la medición de todas las señales analógicas.

El transductor posee un circuito electrónico, el cual varía la resistencia interna en los contactos de salida hacia el PLC, y que puede llegar hasta 1560 ohmios. La resistencia mínima que debe de tener el cable que conecta al PLC con el transductor es de 250 ohmios. El transductor se conecta en serie a los bornes analógicos del PLC, y al variar su resistencia se obtiene una señal analógica de 4 a 20 miliamperios.

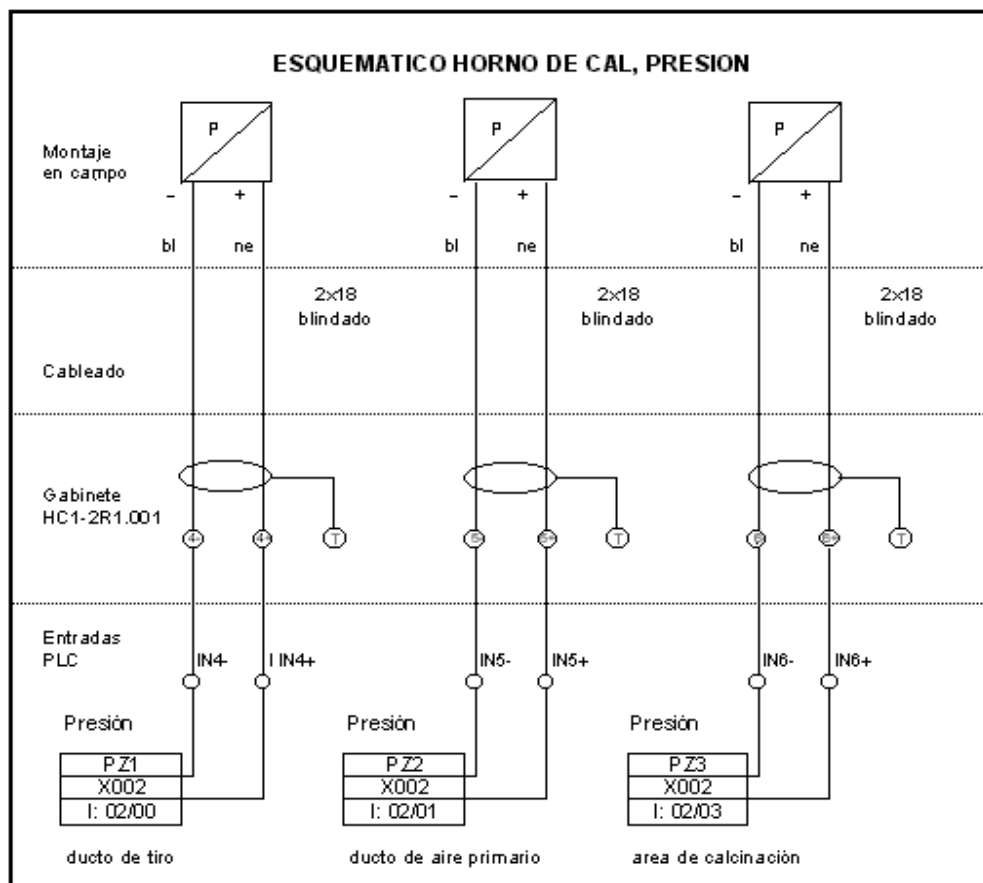
**Figura 29. Conexión del transmisor de presión**



El cable instalado en los medidores de presión es blindado, al igual que en la instalación de los medidores de temperatura.

El diagrama de conexión completo de los transductores de presión se indica en la figura siguiente:

**Figura 30. Diagrama esquemático de los transductores de presión**



#### 4.1.2.3. Sensores de posición

Se utilizaron diferentes tipos de sensores de posición en la instalación del horno, debido a que no sólo indican la existencia o no de la materia prima, sino también los estados de arranque o paro de los motores instalados y la apertura o cierre de las diferentes compuertas mecánicas, que funcionan con pistones accionados por las electroválvulas.

Dependiendo del tipo de material, se instalaron sensores capacitivos e inductivos.

#### **4.1.2.3.1. Sensores de posición capacitivos**

El sensor capacitivo puede detectar la existencia de materiales no metálicos, pues varía su capacitancia, debido a que el material afecta directamente la composición de su dieléctrico. En este caso, los sensores capacitivos fueron instalados para la detección de nivel de piedra caliza.

Poseen una sonda que se instala dentro del área requerida, la cual envía la señal a un dispositivo que la interpreta y convierte, para luego manipular sus salidas como contactos abiertos o cerrados, los cuales cambian su estado al detectar la presencia del material.

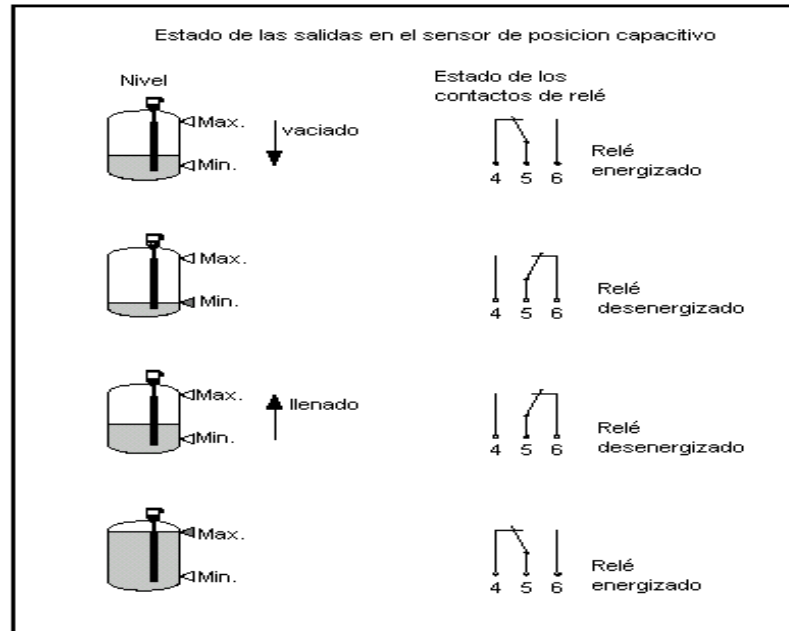
##### **4.1.2.3.1.1 Detalle de funcionamiento**

El sensor contiene dos partes principales: la primera es la sonda que está en contacto con el material, y la segunda es un amplificador de señal, que se conecta directamente al módulo de entradas en el PLC.

Los cambios en los estados de llenado y vaciado en ambos sensores activan el amplificador de señal, el cual controla la apertura y cierre de dos contactos, en la forma como se describe en la figura siguiente.



**Figura 31. Estado de los contactos de salida en los sensores de posición capacitivos**



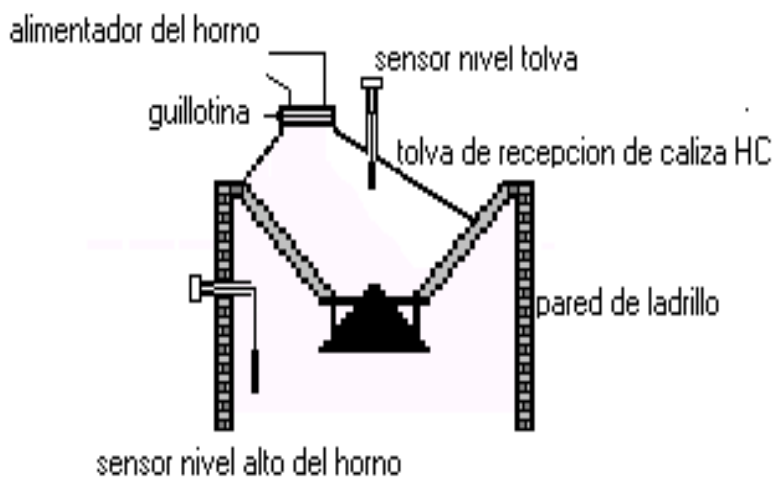
Como se puede verificar en la figura, la variación de los estados en los contactos al exterior se da únicamente al alcanzar los niveles máximos y mínimos preestablecidos; la sensibilidad del sensor fue seleccionada previamente para la detección de la piedra caliza.

#### 4.1.2.3.1.2 Montaje en campo

En la instalación del horno vertical, se utilizaron dos sensores capacitivos; el primero sirve para detectar el llenado de la tolva de recepción de caliza, que se encuentra montada en la parte superior del horno de cal, la cual funciona con el proceso de transporte; el otro indica el nivel máximo de la piedra dentro del horno, que se encuentra en el proceso de calcinación.

A continuación, se presenta un segmento del horno vertical, en el cual se puede observar la ubicación de los sensores de nivel capacitivos instalados.

**Figura 32. Ubicación y montaje de sensores de nivel en la parte superior del horno de cal**



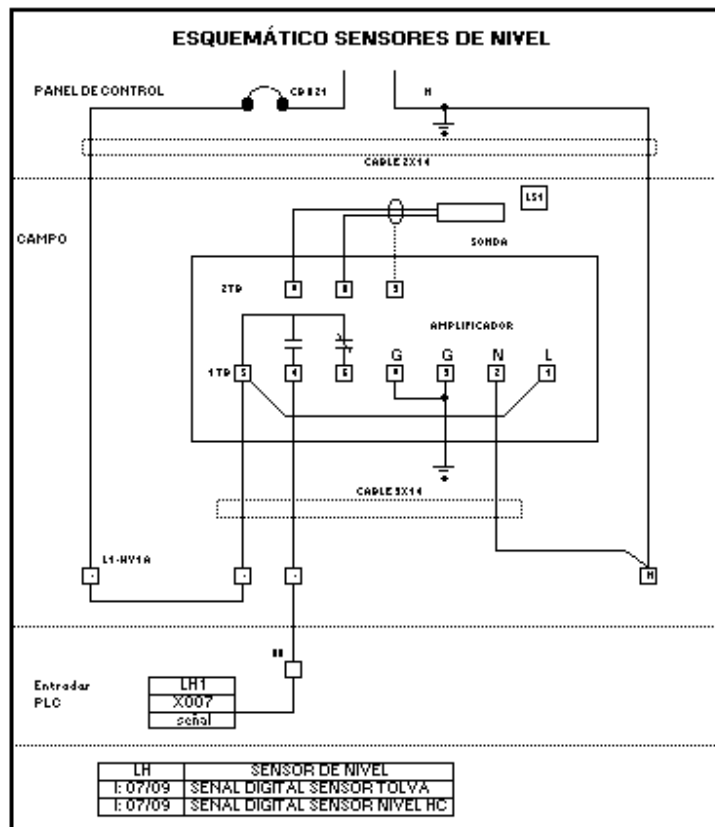
Como se puede observar, los pozos realizados para la instalación de las sondas de los sensores capacitivos son similares a los que se utilizaron en el montaje de los sensores de temperatura y presión, aunque en este caso se utilizaron tuberías de 2 pulgadas.

#### **4.1.2.3.1.3 Instalación eléctrica de los sensores de posición capacitivos**

Para la instalación eléctrica de dichos sensores, se utiliza un cable 2x14, que sirve para la interconexión entre las bornas en el panel de control, y un 3x14, que sirve tanto para alimentar el dispositivo, como para llevar la señal del mismo hacia las bornas del PLC.

El diagrama de conexión, para los sensores capacitivos y el direccionamiento de las señales digitales, se puede observar en la figura siguiente.

**Figura 33. Diagrama eléctrico de los sensores de nivel**



#### 4.1.2.3.2. Sensores de posición inductivos

Los sensores inductivos funcionan mediante la interacción entre el campo magnético producido internamente en el dispositivo y el material metálico que se va a detectar. Al colocar un metal en el campo magnético del sensor, se produce una carga al circuito oscilador del mismo, que hace que el sensor cambie la señal de voltaje conectada al módulo de entrada digital en el PLC.

Pueden existir sensores de contacto normalmente cerrado “NO” y normalmente abierto “NA”. El tipo de salida del mismo se debe de tomar en cuenta al realizar la programación del PLC. Los sensores instalados en el horno de cal son del tipo “NO” y funcionan con un voltaje alterno de 20 a 264 voltios.

#### **4.1.2.3.2.1 Montaje en campo**

El detalle de montaje de dichos sensores es similar para cualquier tipo de proceso. Se basa en la fabricación de una base de metal en forma de angular, que contenga un orificio del diámetro del sensor, instalada a una corta distancia del punto a detectar. Las distancias entre el material y el sensor son proporcionadas por el fabricante.

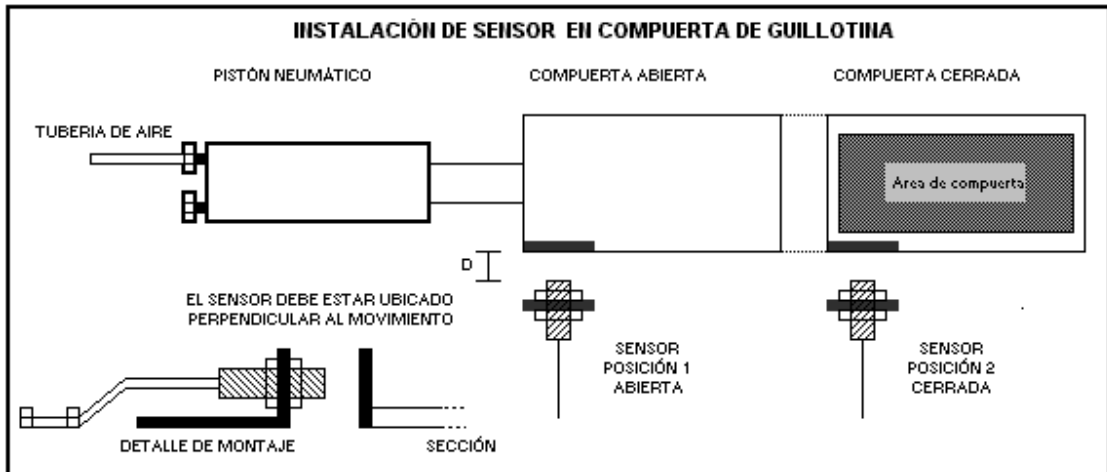
Este tipo de transductores están instalados para detectar el movimiento de maquinaria de todo tipo; es preciso saber si existe vibración o algún factor que pueda dañarlo. La correcta instalación del mismo se tiene cuando se coloca en línea perpendicular al movimiento de la máquina.

A continuación, se presenta el criterio de montaje para sensores inductivos.

- Detección de movimiento longitudinal.

Es necesaria la instalación de varios sensores, cuando se efectúa el monitoreo de mecanismos que poseen varios estados. La cantidad de sensores dependerá del número de los mismos.

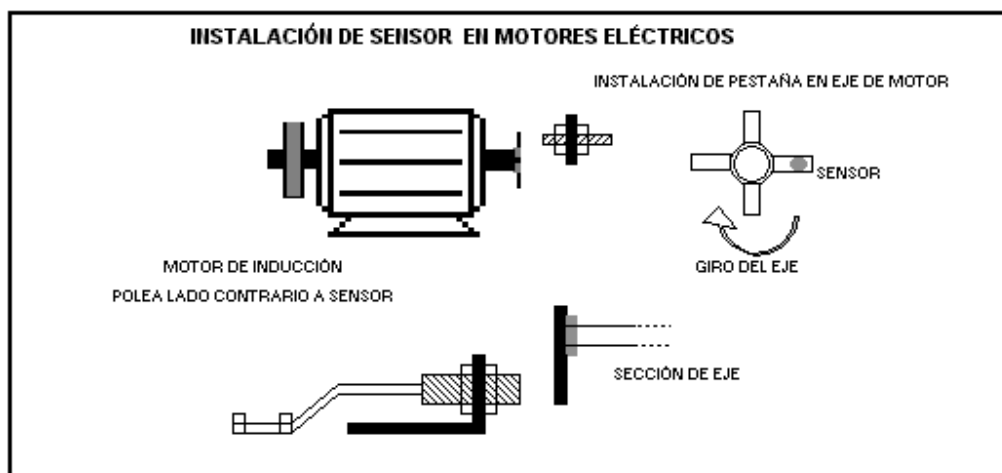
**Figura 34. Sensor de posición en compuerta de guillotina HC1**



- Detección de movimiento en motores

La detección de movimiento de cualquier mecanismo giratorio se obtiene por medio de pulsos; el programa del PLC reconoce el mal funcionamiento de una máquina giratoria, cuando en determinado tiempo no se obtienen las pulsaciones enviadas por el transductor.

**Figura 35. Sensor de posición en motores**



Al realizar el monitoreo de bandas sin fin, el sensor debe ser instalado en el extremo opuesto al motor en la banda transportadora; debido a que lo importante en el proceso es que el mecanismo funcione correctamente, por lo que existen factores ajenos al motor, que pueden provocar mal funcionamiento.

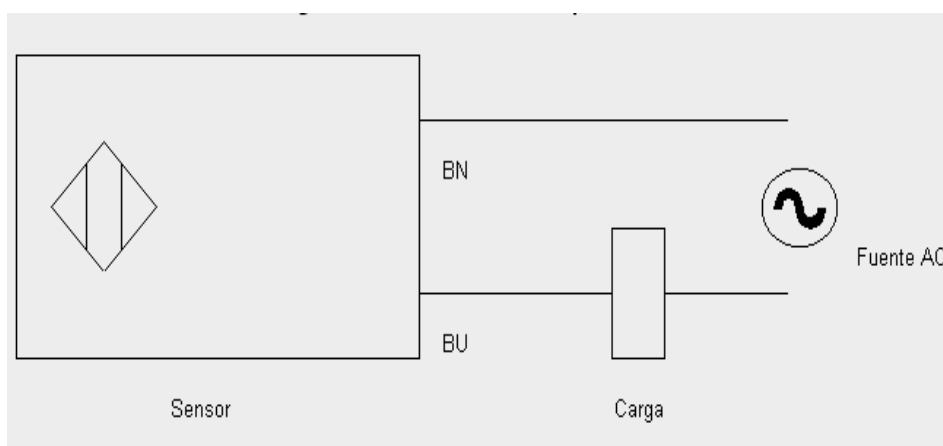
#### 4.1.2.3.2 Instalación eléctrica de los sensores de posición inductivos

Los sensores instalados poseen dos hilos para su conexión eléctrica. Uno de ellos va directamente hacia la línea de alimentación y el otro hacia la carga.

El voltaje de funcionamiento de este tipo de sensores posee un rango de 20 a 264 voltios ac y pueden ser conectados a una carga de entre 5 y 300 amperios.

El detalle de la instalación eléctrica de un sensor de posición capacitivo, a una carga cualquiera, se describe en la siguiente figura.

**Figura 36. Diagrama de conexión de sensor capacitivo**



Para la interacción entre el sensor capacitivo y el PLC, únicamente se alimenta la entrada con una línea de 110 voltios ac, y la salida va directamente hacia los bornes de entrada digital del autómata mediante un cable 2x14 awg.

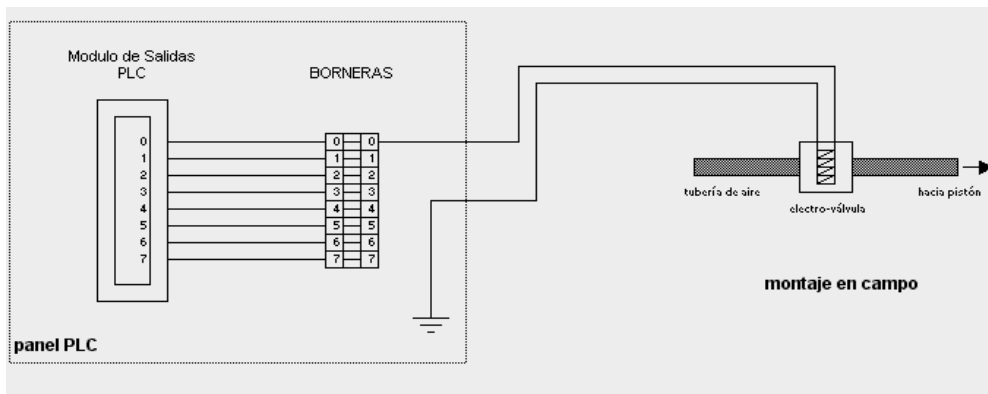
## 4.2. Equipo electro-mecánico

### 4.2.1. Electro-válvulas

Como se describió anteriormente, las electroválvulas no son más que mecanismos de apertura o cierre controladas por un solenoide electromagnético. Las instaladas en el horno vertical están diseñadas para el control de válvulas de paso de aire a presión, el cual será utilizado para accionar mecanismos neumáticos denominados pistones.

Debido a que los solenoides de las electro-válvulas usadas en el horno vertical funcionan con un voltaje alterno de 120 voltios, la instalación eléctrica consiste únicamente en la conexión de la salida digital del PLC directamente hacia el borne de entrada de la electro-válvula. El otro borne se conecta a la barra de tierra dispuesta en el panel de control.

**Figura 37. Diagrama eléctrico electroválvulas**



El direccionamiento de los módulos de salidas y entradas del PLC se detallarán posteriormente.

#### 4.2.2. Motores

A continuación, se describen los datos más importantes de los motores instalados en el horno vertical, según el proceso al que pertenecen.

**Tabla XVI. Descripción de motores en horno vertical**

| <b>Proceso</b> | <b>Descripción</b>              | <b>Potencia</b> | <b>Amperios</b> | <b>Cable instalado</b> |
|----------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| Calcinación    | Ventilador de aire primario VE1 | 40 H.P.         | 44.86 Amp       | 3x4 awg + T            |
| Calcinación    | Ventilador de aire primario VE2 | 40 H.P.         | 44.86 Amp       | 3x4 awg + T            |
| Calcinación    | Ventilador de tiro              | 40 H.P.         | 44.86 Amp       | 3x4 awg + T            |
| Calcinación    | Válvula rotativa                | 05 H.P.         | 5.61            | 3x12 awg + T           |
| Transporte     | Aprom feeder                    | 20 H.P.         | 22.43 Amp       | 3x8 awg + T            |
| Transporte     | Criva vibratoria                | 15 H.P.         | 16.82 Amp       | 3x10 awg + T           |
| Transporte     | Banda transportadora 1          | 7.5 H.P.        | 8.41 Amp        | 3x12 awg + T           |
| Transporte     | Banda transportadora 2          | 7.5 H.P.        | 8.41 Amp        | 3x12 awg + T           |
| Transporte     | Banda transportadora 3          | 05 H.P.         | 5.61 Amp        | 3x12 awg + T           |

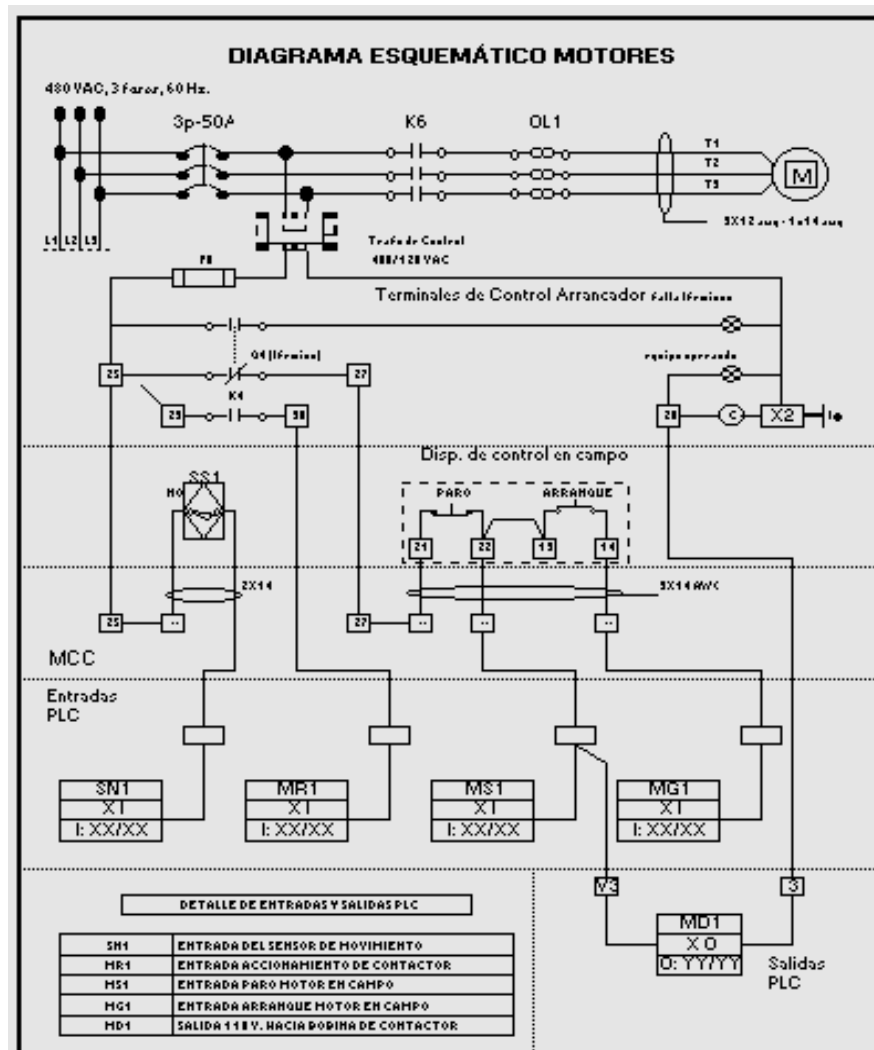
Se realizaron los cálculos de la corriente nominal de dichos motores a un voltaje de alimentación de 480 V ac.



### 4.2.2.1. Instalación eléctrica

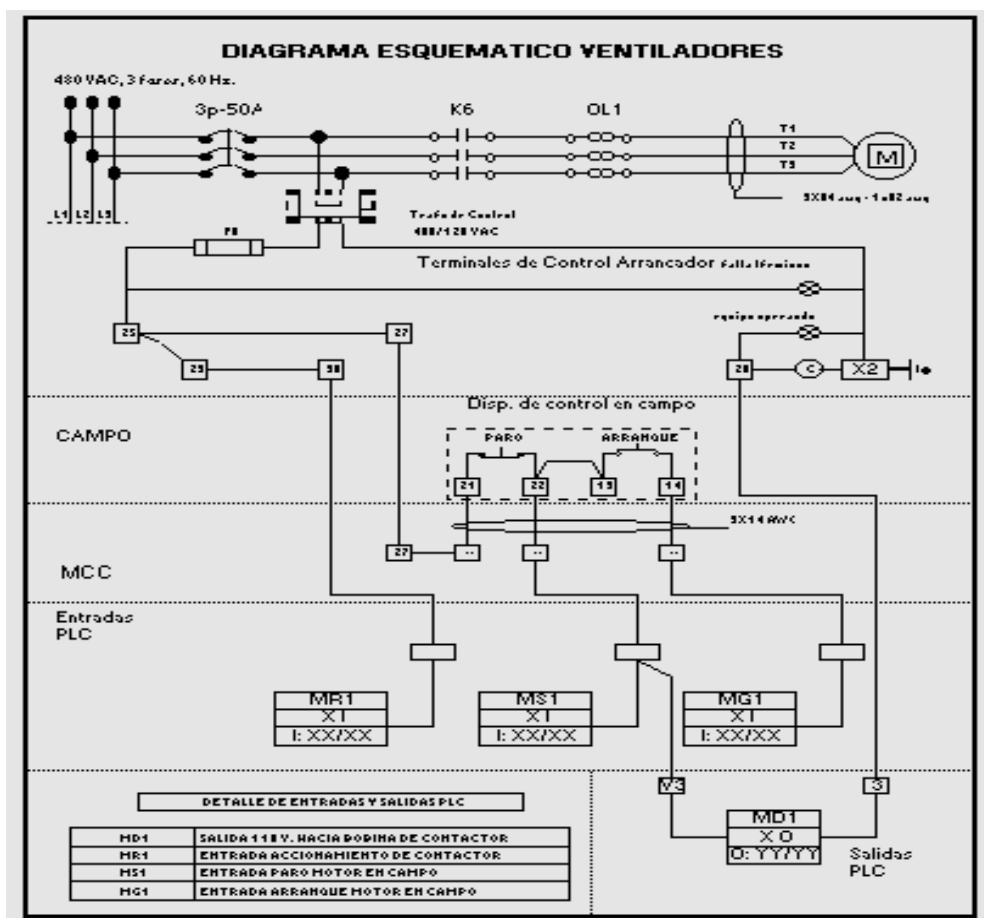
Los diagramas de conexión eléctrica de los motores instalados en el horno vertical poseen diferencias entre sí. Esto es debido a que las variables de control en un motor de ventilador son distintas a la de una banda transportadora. A continuación, se presentan algunos diagramas eléctricos de los motores instalados y su interconexión con el PLC.

Figura 38. Esquemático de conexión de motores



El anterior diagrama es la base para la instalación eléctrica de los motores eléctricos, con pequeñas variaciones como la ausencia de sensor de movimiento para los ventiladores, como se puede observar en el siguiente esquemático.

**Figura 39. Esquemático de conexión de ventiladores**

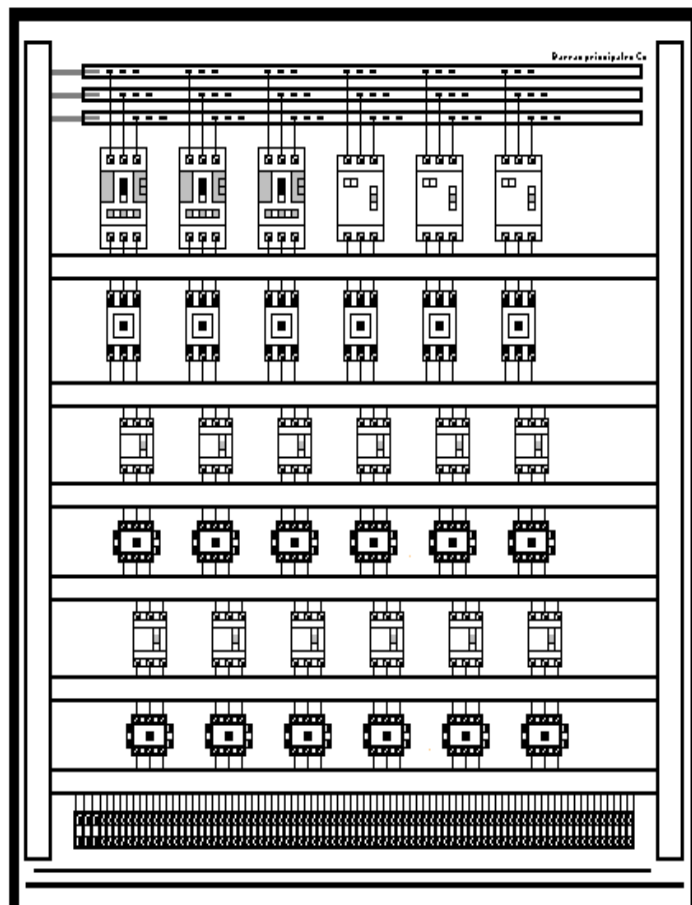


Debido a que los equipos electro-mecánicos, en la mayoría de los casos, consumen corrientes que no se pueden controlar desde los contactos de salida del PLC, es necesario instalar un panel exclusivo de distribución de potencia, el cual se convierte en el medio de conexión entre algunos equipos en campo y el PLC.

A este panel se le denomina “centro de control de motores” o por sus siglas en inglés MCC. Recibe señales de baja potencia provenientes del PLC y acciona las máquinas eléctricas mediante dispositivos de control, los cuales pueden variar desde un arrancador simple constituido de un contactor y sus protecciones, hasta un sistema de arranque no lineal para una máquina específica.

El diseño del panel de control de motores del horno vertical, se puede observar en la figura siguiente:

**Figura 40. Diseño del panel de control de motores**



De esta forma, las señales del PLC se conectan a las borneras en la parte inferior del panel, y el cableado de los motores va directamente hacia los bornes de salida en cada contactor.

### **4.3. Equipo de control de proceso**

Anteriormente se describe la instalación de los diferentes transductores utilizados en el proceso de automatización del horno de cal. Las señales eléctricas, proporcionadas por dichos transductores, deben ser interpretadas por nuestro autómatas programable.

Además, se proporcionan diagramas eléctricos de conexión de los motores eléctricos y válvulas electromagnéticas, que efectúan movimientos mecánicos o de apertura y cierre de compuertas neumáticas, para los procesos de transporte y calcinación del horno vertical.

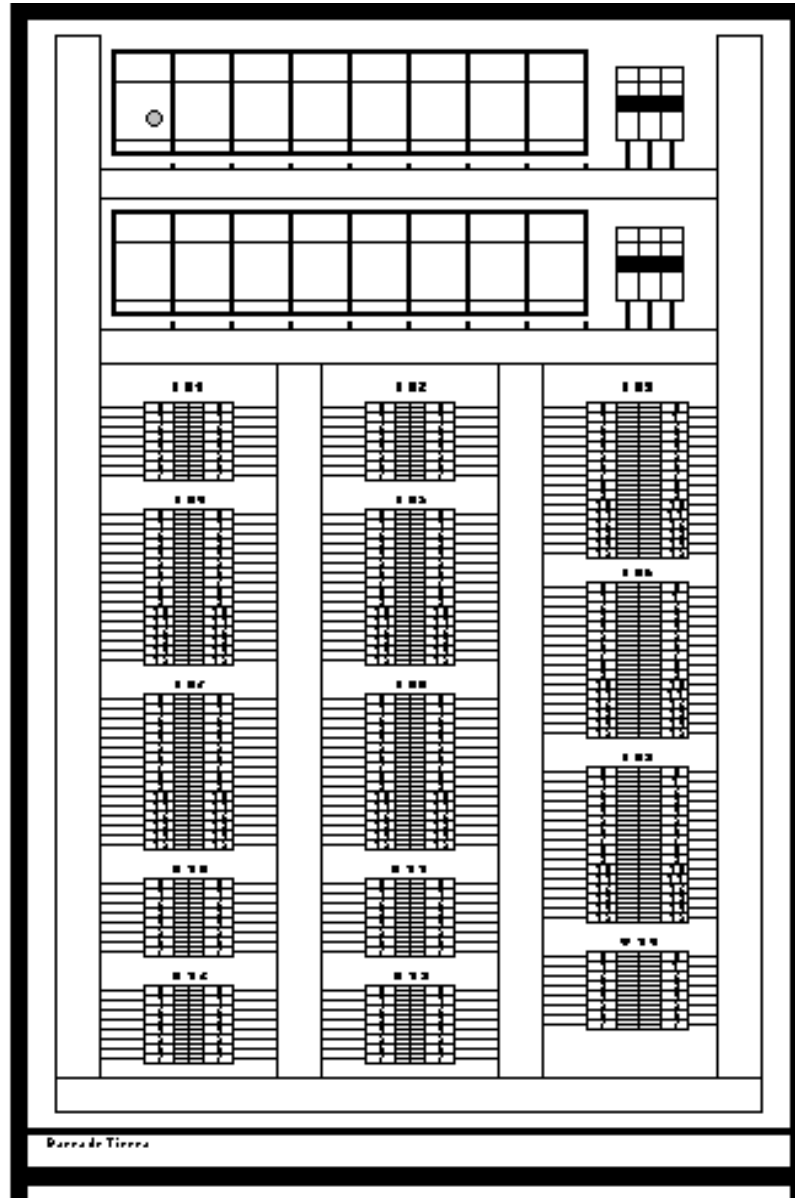
Como se puede observar en los diagramas, se generalizan dos paneles de control. El primero está destinado para los equipos de potencia, armado por el personal del área eléctrica, el otro contiene al PLC, el cual es proporcionado por el proveedor del autómatas, previo estudio de los requerimientos del proceso.

#### **4.3.1. Instalación del PLC**

##### **4.3.1.1. Panel PLC**

El panel del PLC es proporcionado por el proveedor; contiene el número de entradas y salidas necesarias para el control del proceso, además de espacios para futuros cambios en el mismo.

Figura 41. Panel PLC

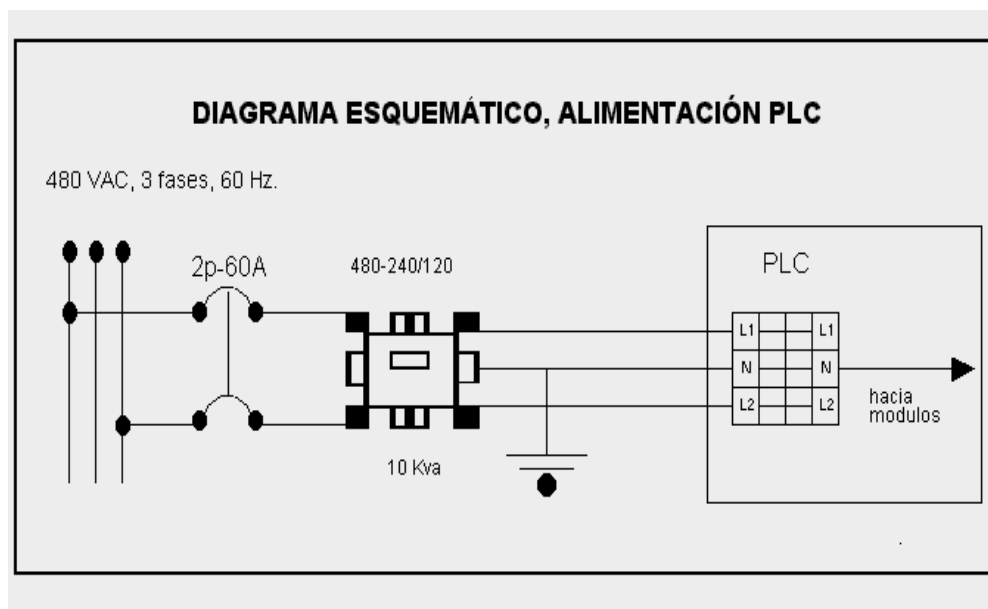


Como se puede observar en las tablas de direccionamiento, antes mostradas, la conexión de las señales se realiza hacia las borneras de cada uno de los módulos.

#### 4.3.1.2. Instalación eléctrica del PLC

Para el funcionamiento del panel del PLC, se instaló un transformador 480-120/240 v de 10 kva. Las líneas de alimentación se conectan en las borneras, que están dispuestas en la parte superior del panel identificadas por el fabricante.

**Figura 42. Alimentación eléctrica del PLC**



## 5. AUTOMATIZACIÓN DEL HORNO DE CAL

El proceso de automatización comprende, tanto la instalación de los equipos e instrumentos en campo, como el diseño del programa que va a ejecutar el autómata. Independientemente del proveedor seleccionado para tal fin, es necesario realizar un análisis de los diagramas de flujo de los distintos estados del proceso, para poder diseñar la secuencia de eventos que el programa ejecutará, para cumplir con las especificaciones del producto terminado.

En el horno de cal de La Pedrera, se encuentran tres procesos que delimitan el funcionamiento del mismo. Éstos, aunque son controlados individualmente, interactúan entre sí para maximizar tanto la producción en bruto como la efectividad en el proceso.

Los tres procesos del horno vertical, para la producción de cal viva, son los siguientes.

- Proceso de transporte
- Proceso de calcinación
- Proceso de descarga

A continuación, se realizará el estudio de las diferentes secuencias de proceso, para determinar los lineamientos básicos necesarios para el programa de control.

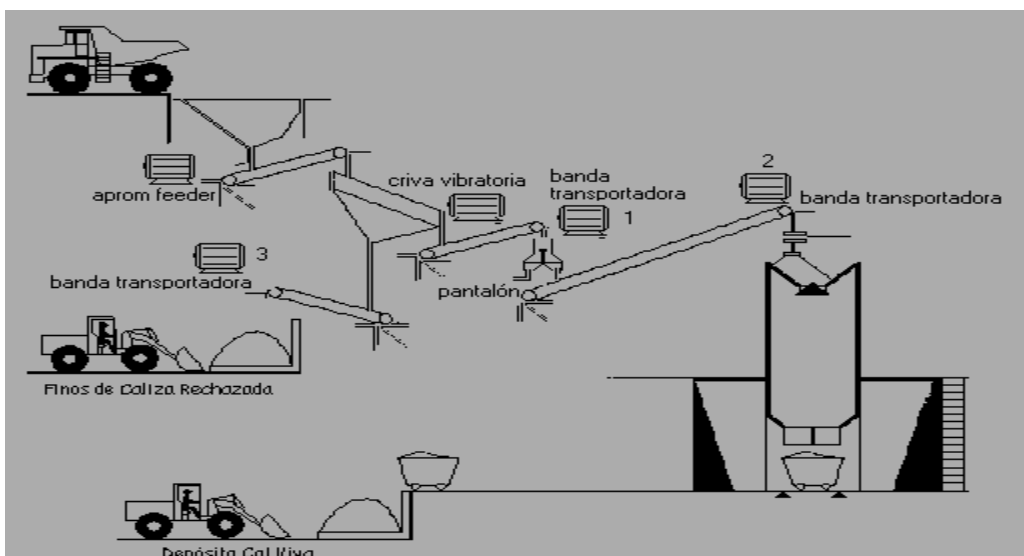
## 5.1. Proceso de transporte

### 5.1.1. Descripción del proceso

Las variables de control para el proceso de transporte comprenden desde el funcionamiento individual de cada máquina, hasta los sensores de nivel instalados en la tolva de ingreso de caliza y el sensor de nivel del horno vertical.

En el proceso de transporte, los equipos se accionan en secuencia, iniciando desde las bandas transportadoras, que se encuentran más cerca del horno, hasta la activación del *aprom feeder* que inicia el recorrido de la piedra caliza. La secuencia de paro del sistema de transporte se da en forma inversa, desactivando primero el ingreso de caliza en las bandas transportadoras, para luego realizar la desactivación de los demás equipos y el cierre de las compuertas, que están instaladas en la parte superior del horno. Cualquier falla en el sistema desactiva todo el equipo de transporte en forma instantánea. La figura del proceso de transporte se puede observar a continuación.

**Figura 43. Proceso de transporte**





### 5.1.2. Análisis de los diagramas de flujo

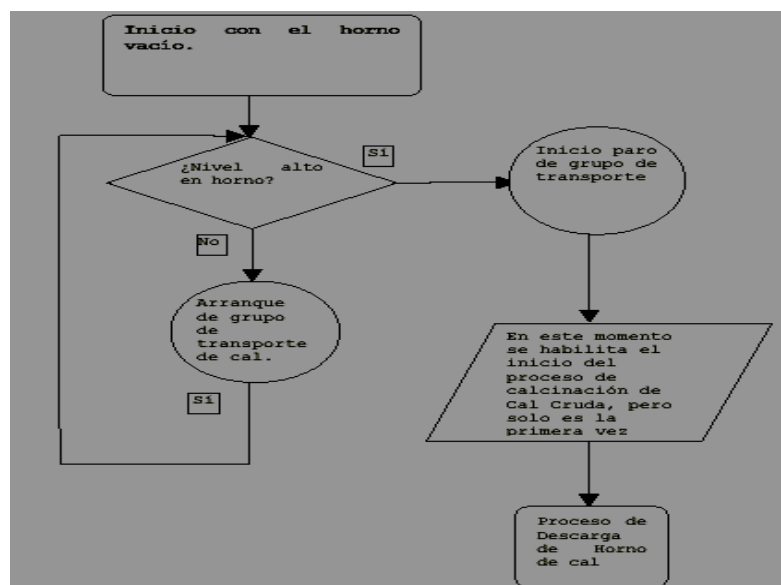
Para el proceso de transporte, se han definido tres secuencias de accionamiento del equipo, que el PLC debe ejecutar.

- Llenado inicial
- Llenado automático
- Activación del equipo en modo campo

#### 5.1.2.1. Llenado Inicial

El sistema de transporte sólo se puede activar en llenado inicial, cuando el horno no esté lleno y no se está calcinando. De este modo se abre la compuerta de guillotina y la compuerta tipo pera a la vez, y si el proceso de calcinación está activado, una significativa cantidad de calor se perdería por este medio.

Figura 44. Secuencia de llenado inicial



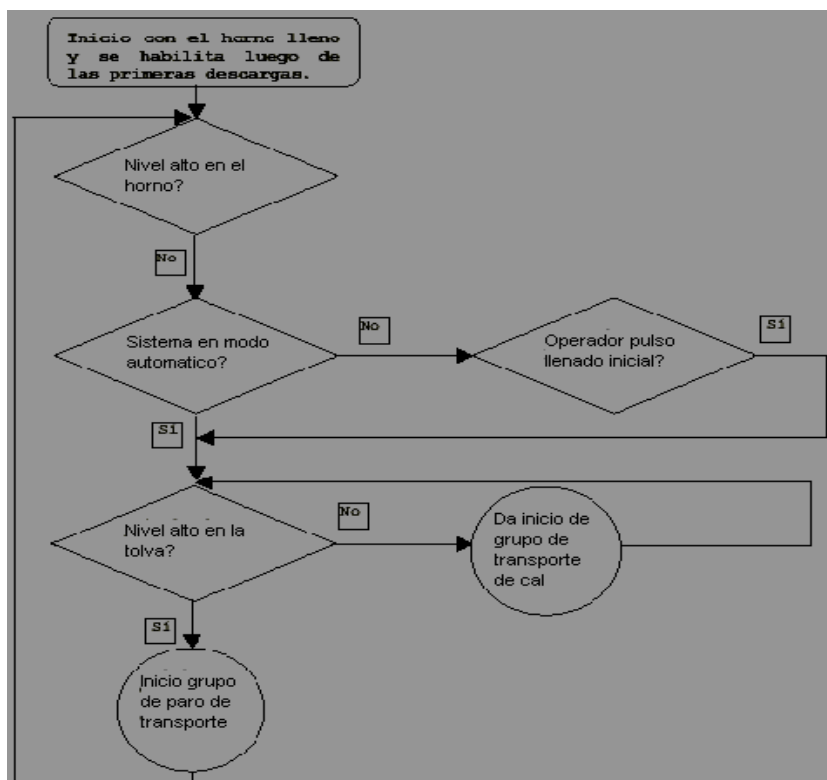
Como se puede observar en el diagrama de flujo, para esta secuencia se habilitan cuatro sub programas.

- Arranque de grupo de transporte
- Paro de grupo de transporte
- Activación de proceso de calcinación
- Proceso de descarga

### 5.1.2.2. Llenado automático

Esta secuencia es habilitada después de las primeras descargas; los sensores de nivel en la tolva y del horno habilitan dicho funcionamiento.

Figura 45. Secuencia de llenado automático



En la secuencia de llenado automático, al igual que en la de llenado inicial, se habilitan los programas de arranque y el paro del grupo de transporte.

El sistema se detendrá después de haber detectado unos cuantos segundos el nivel alto en el horno, si está en llenado inicial y nivel alto en la tolva y si es llenado normal.

A continuación, se presentan los diagramas de flujo del arranque y paro del grupo de transporte.

**Figura 46. Secuencia de arranque del grupo de transporte**

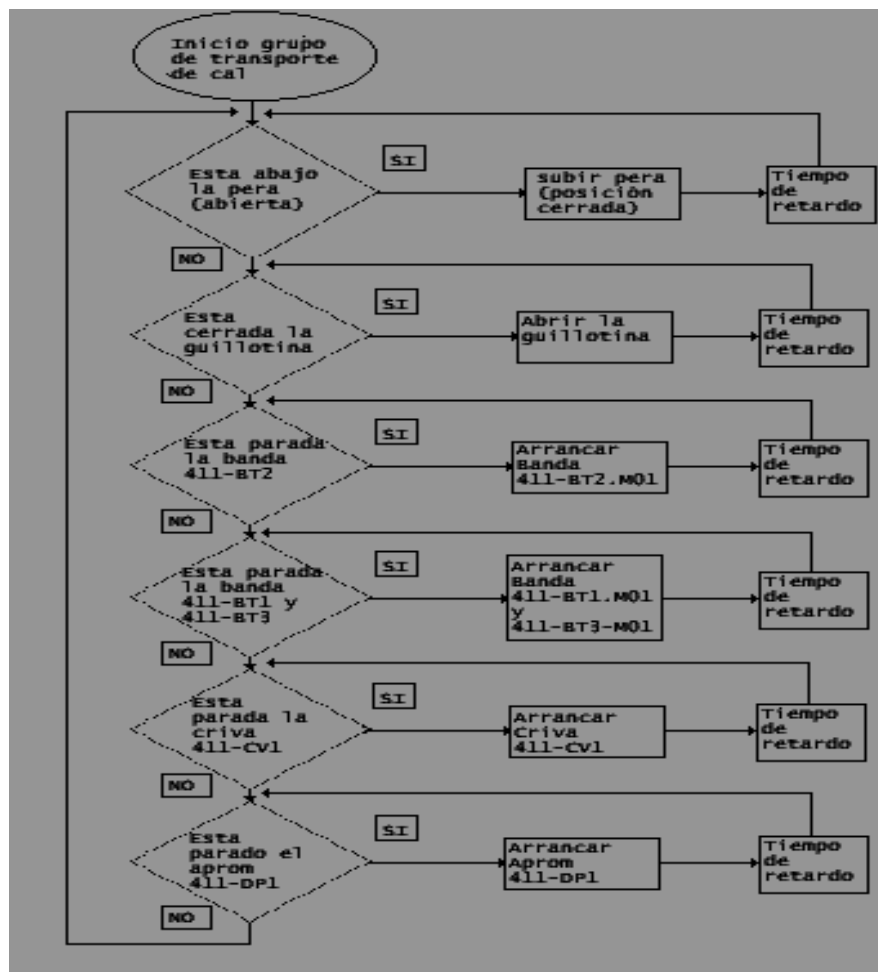
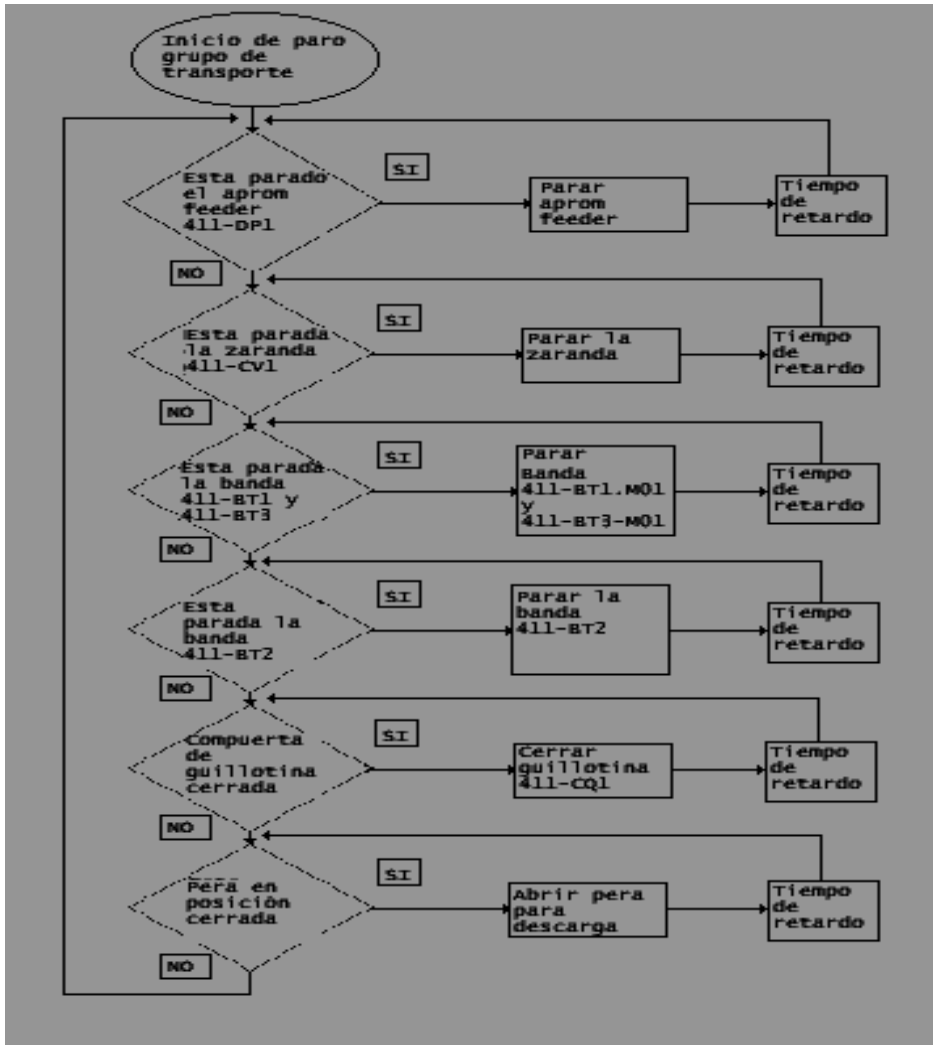


Figura 47. Secuencia de paro del grupo de transporte



### 5.1.2.3. Grupo de transporte en modo campo

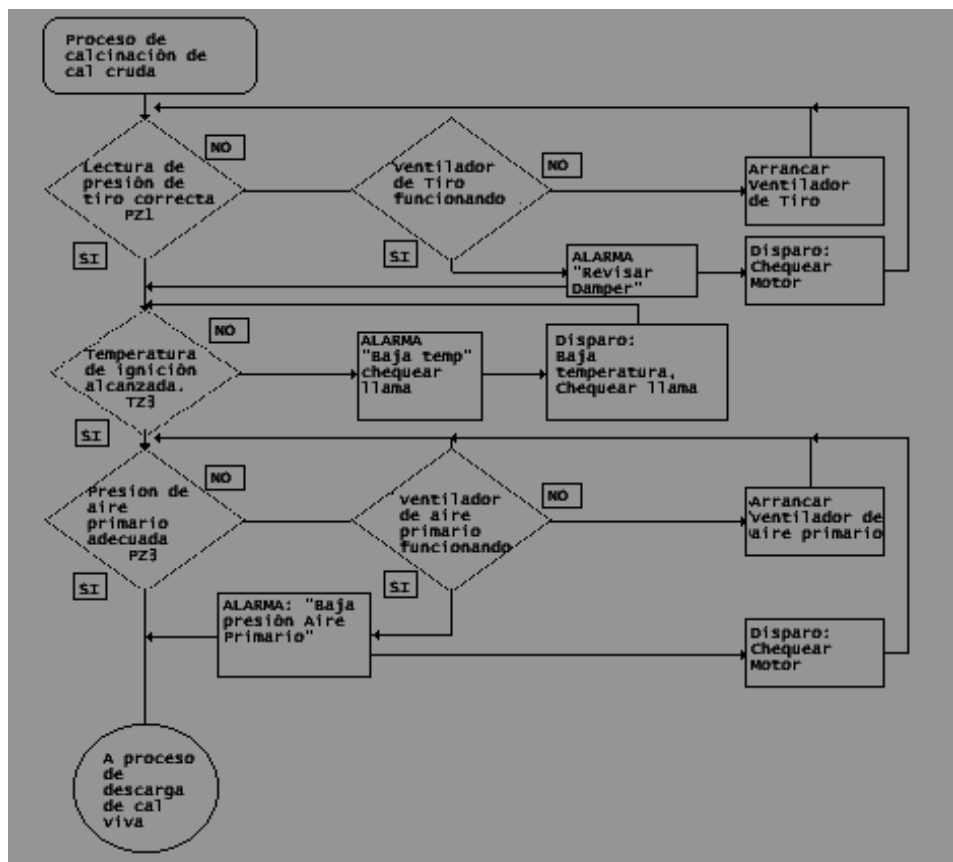
Al seleccionar el modo campo en el grupo de transporte, se deshabilita toda la secuencia de llenado automático. El campo de transporte es independiente, así como su paro de emergencia.

En dicho modo, el operador controla cada dispositivo individualmente, para realizar así acciones de vaciado de bandas transportadoras o correcciones en el funcionamiento de los equipos ligados al área de transporte.

## 5.2. Proceso de calcinación

La secuencia del proceso de calcinación es menos compleja, que la descrita en el área de transporte. La activación del proceso inicia por medio de un comando del operador y no depende directamente del nivel de piedra en el horno.

Figura 48. Secuencia de calcinación de cal cruda



Las alarmas de temperatura descritas en el diagrama de flujo son muy importantes, debido a que podrían ser debidas a la falta de piedra en el horno, lo cual provocaría un sobre-calentamiento que dañaría el producto en proceso e incluso la estructura física del horno.

Los arranques y paros de los ventiladores se hacen independiente en el campo, debido a la carga extra ejercida por la densidad del aire frío en el momento del inicio del proceso y controlada manualmente con la apertura de una compuerta instalada en la tubería de salida de los gases del horno.

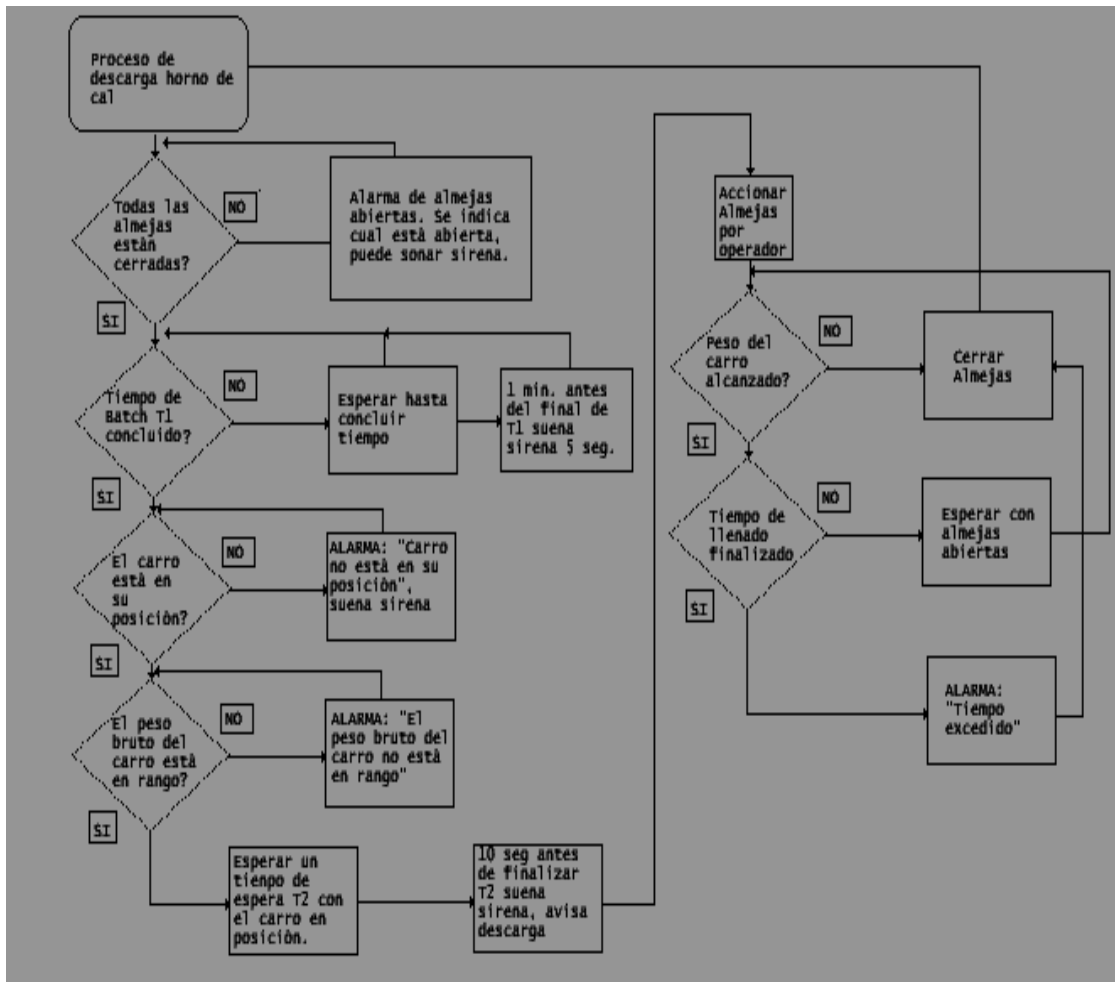
### **5.3. Proceso de descarga**

Para el sistema de descarga, se dispone de un carro de recepción de material, el cual está dispuesto en dos rieles. Se controla, tanto su posicionamiento, así como el peso del mismo en el momento de la descarga. Se dispone de dos compuertas tipo almeja, que son accionadas, ya sea por ejecución del programa o en forma manual.

El tiempo entre descargas se denomina “tiempo de batch”; las descargas se realizan alternando la apertura de las almejas, para evitar que el material sobrepase los límites de recepción del carro destinado para dicho proceso.

La descarga del horno vertical se realiza de una forma manual; el operador acciona cada una de las almejas, y esta a cargo de librar al mecanismo de posibles problemas en el mismo, que se deben a obstrucciones del material.

Figura 49. Secuencia del proceso de descarga



Luego de realizar el diseño de los diagramas de flujo secuenciales de los procesos de transporte, calcinación y descarga del horno vertical, se procede a la realización del programa de control, el cual estará a cargo del proveedor del autómatas.





## CONCLUSIONES

1. La automatización industrial es una rama de la ingeniería dedicada al control del funcionamiento de varios equipos, en un mismo proceso, por medio de un sistema controlado por una minicomputadora "PLC", que ejecuta comandos ingresados por el programador y monitorea el estado de la maquinaria en funcionamiento.
2. Los transductores son parte esencial en el proceso de automatización, ya que le proveen al PLC la lectura de los diferentes parámetros en cualquier tipo de proceso.
3. Para la elección del "transductor ideal", en cada estado de proceso, es necesario realizar un estudio que indique si el equipo elegido está diseñado para el entorno del proceso, en el cual se necesita.
4. El equipo deja de ser funcional en el momento en que los costos totales igualan el valor de una nueva inversión inicial, para un equipo más sofisticado.

5. Los detalles de montaje de cualquier transductor deben estar de acuerdo con sus normativas de funcionamiento, extendidas por el proveedor del mismo.
  
6. Para realizar el programa de control de proceso, es primordial analizar los diagramas de flujo del mismo, ya que ayudan a determinar la secuencia de ejecución de los comandos controlados por el PLC.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un análisis de las variables del proceso por automatizar; pues la elección del tipo de PLC, va de la mano, tanto con la cantidad de señales controladas por el mismo, como por la complejidad del programa utilizado. Existen opciones de micro/PLC, para actividades que tengan pocas variables de control y que no requieran una gran capacidad en la ejecución de los comandos del proceso.
2. Es necesario realizar un análisis de costos periódicamente, para evaluar la factibilidad de nuestro proyecto de automatización. Esto es porque dicho estudio proveerá la información acerca de la inversión necesaria para que se prolongue la vida útil del equipo.
3. La vida útil del PLC aumenta cuando el programa de mantenimiento del mismo es efectivo, por lo que es conveniente contar con un sistema que facilite la ejecución de los diferentes tipos de mantenimiento.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Cifuentes Soto, Victor Hugo. Conversión de un horno de clinker a horno de cal en la planta La Pedrera. Tesis Ing. Química, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 61 pp.
2. Dardon, Fernando. Seguridad industrial. Tesis Ing. Mec. Industrial Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2001. 120 pp.
3. *ENDRESS+HAUSER*, INSTRUMENTS. **Catálogo de especificaciones generales**, sl. (3):34.1995.
4. Mena Rosales, Luis Fernando. Autómata programable. Tesis Ing. Mec. Eléctrica Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1995. 67 pp.
5. Monterroso, Marco Vinicio. Autómata programable – Simatic – Relés eléctricos. Tesis Ing. Mec. Eléctrica, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1990. 139 pp.