UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2016

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA MODERNIZACIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE CABLES BASADO EN PLC

JOEL SALINAS, MARCO ANDRÉS

Universidad Técnica Federico Santa María

http://hdl.handle.net/11673/13183

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO – CHILE

"DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE CABLES BASADO EN PLC"

MARCO ANDRÉS JOEL SALINAS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO CON MENCIÓN EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: SR. ALEJANDRO SUAREZ

PROFESOR CO-REFERENTE: SR. DANIEL ERRAZ

SEPTIEMBRE – 2016

AGRADECIMIENTOS

A quienes incondicionalmente me han apoyado desde incluso antes de nacer, a quienes consistemente me han brindado soporte en todos los desafíos de mi vida, a quienes sin importar mi edad, me siguen ofreciendo consejos invaluables, a quienes algún día me gustaría poder retribuir todo lo que me han dado…

A mis Padres.

RESUMEN

El presente trabajo muestra el desarrollo y la implementación de un sistema de automatización de una maquina extrusora de cables basado en PLC. En primer lugar se habla de la importancia y de las motivaciones que justifican la inversión de un proyecto de automatización. También se da una breve descripción de la empresa en la cual fue llevado a cabo el procedimiento.

Se estudian los sistemas de automatización que darán vida al proyecto, así como los elementos mecánicos que lo componen. Poniendo especial énfasis en el proceso de extrusión y el sistema de transmisión de datos PROFIBUS y su importancia en el mundo globalizado.

Una vez estudiados los elementos pertinentes y las diferentes alternativas de solución, se procede a describir la modificación, para poder destacar las modificaciones por sobre los sistemas que perdurarán. Estas modificaciones serán estudiadas en profundidad para así determinar los alcances del nuevo sistema. Se presenta una breve introducción a la instrumentación y los accionamientos de velocidad variable.

A continuación se procede a describir la filosofía de control, la cual es implementada en el software *"TIA Portal"* de SIEMENS. Se describe la programación mostrando las líneas de código que lo componen. Se muestra el tratamiento de variables locales y de periferia, representación de valores analógicos, generación de funciones, lazos de control, controladores PID y modulación por ancho de pulsos.

Para concluir se muestran los diagramas de bloques que detallan la estrategia de control, y como se interconectan entre sí para finalmente conseguir graficas que muestran la evolución de las variables en el tiempo y como éstas responden a la filosofía de control propuesta.

ABSTRACT

This paper presents the development and implementation of an automation system of an extruder machine based on PLC. First of all, the importance and motivations that justify the investment of an automation project will be seen. It also gives a brief description of the company in which was carried out the procedure.

Automation systems that gives life to the project are studied and the mechanical elements which compose it. The emphasis will be on the extrusion process, data transmission system PROFIBUS and his status in a globalized world.

Once studied the relevant elements and the various alternative solutions, the paper proceed to describe the modification, in order to highlight changes over systems that will endure. These changes will be studied in depth to determine the features of the new system. A brief introduction to instrumentation and variable speed drives is presented.

Then the control philosophy will be described, which is implemented in "TIA Portal" environment. Programming is described showing the code lines. The treatment of local variables, analog value representation, generating functions, control loops, PID controllers and pulse-width modulation is also shown.

To conclude, the block diagrams that detail the control strategy are displayed, as how are they interconnected to finally get graphs exhibit the evolution of variables over time and how they respond to the proposal philosophy of control.

INDICE

Agradecimientos 3

Resumen 4

Abstract 5

Índice 6

Listado de figuras 12

Listado de tablas 17

1.- Introducción 18

1.1.- Objetivos 19

1.2.- Contexto general 19

1.2.1.- Nexans 19

1.2.2.- *"Retrofit"* 20

2.- Estado del arte 22

3.- Línea de extrusión 24

3.1.- Extrusión 24

3.2.- CV11. Componentes principales 26

3.2.1.- Extrusora de 4½" 27

3.2.2.- Extrusora de 2½" 27

3.2.3.- Extrusora de 2½” móvil 28

3.2.4.- Capstan de entrada 30

3.2.5.- Tubo de vulcanizado 31

3.2.6.- Capstan de salida 32

3.2.7.- Scholz 33

3.2.8.- Oruga de salida 34

3.2.9.- Enrollador 35

3.2.10.- Tolvas 35

3.2.11.- Sikora 36

4.- Descripción de la modificación 38

4.1.- Cambio de equipos electrónicos, incluidos los gabinetes 38

4.2.- Cambio de tablero de control por PLC 40

4.3.- Cambio de motores 41

4.4.- Cambio de controladores 42

4.5.- Gabinetes 42

5.- Sistemas de transmisión de datos 44

5.1.- ¿Por qué usar sistemas de transmisión de datos? 44

5.2.- Manufactura Integrada por Computador, CIM 45

5.2.1.- Nivel de Proceso 45

5.2.2.- Nivel de Máquinas 45

5.2.3.- Nivel de Célula 45

5.2.4.- Nivel de Fábrica 45

5.2.5.- Nivel de Empresa 46

5.3.- Comunicaciones Industriales 47

5.4.- PROFIBUS 48

5.4.1.- Capa física 50
5.4.1.1.- Medio de Transmisión 50
5.4.1.2.- Resistencia terminal 51
5.4.1.3.- Velocidad de comunicación versus distancia 52
5.4.1.4.- Conector 53
5.4.2.- Método de codificación de las señales 53
5.4.3.- Capa de enlace de datos 54
5.4.3.1.- Control de acceso al medio 54
5.4.3.2- Control lógico 57
5.4.3.2.1- Mensaje sin datos 57
5.4.3.2.2- Mensaje con datos de longitud fija 58
5.4.3.2.3- Mensaje con datos de longitud variable 58
5.4.3.3- Servicios de transferencia de datos 58
5.4.4.- Funcionamiento de los procesadores de comunicaciones 59
5.4.4.1.- Procesador subordinado de comunicaciones (esclavo) 59
5.4.4.2.- Procesador principal de comunicaciones (maestro) 60
5.4.5.- Capa de aplicación de la red PROFIBUS-DP 62
5.5.- Telegramas PROFIBUS para Accionamientos 63
5.5.1.- Estructura de datos 64
5.5.1.1.- Área de datos de proceso 64
5.5.1.2.- Área de parámetros 64
5.5.2.- Palabra de mando 65
5.5.3.- Palabra de estado 66

6.- Componentes generales del sistema de control 70
6.1.- Controlador Lógico Programable (PLC) 70
6.2.- Módulos de entradas y salidas 71

6.2.1.- Módulos de entradas digitales 71
6.2.2.- Módulos de salidas digitales 71
6.2.3.- Módulos de entradas analógicas de 13 bits 71
6.2.4.- Módulos de entradas analógicas de 12 bits 72
6.2.5.- Módulos de salidas analógicas de 12 bits 74
6.2.6.- Módulos de entradas analógicas para termopares 75
6.3.- Sistema remoto de entradas y salidas (ET200) 76
6.4.- Interfaces Humano máquina 77
6.4.1.- Pantalla principal de 19” 77
6.4.2.- Pantalla secundaria 78
6.5.- Motores 78
6.5.1.- Motor de corriente continua 78
6.5.2.- Motor de corriente alterna 78
6.6.- Accionamientos de velocidad variable 79
6.6.1.- Micromaster 79
6.6.2.- Sinamics DC Master 79
6.7.- Instrumentación 79
6.7.1.- Pulsador 80
6.7.2.- Selector 80
6.7.3.- Sensor de nivel 81
6.7.4.- Potenciómetros 81
6.7.5.- Sensor de presión 82
6.7.6.- Termopar 82
6.7.7.- Calefactores 83
6.7.8.- Ventiladores 83
6.7.9.- Electroválvula 83
6.7.10.- Válvula proporcional 84

6.7.11.- Salidas a relé 84

6.7.12.- Relé de estado sólido 84

7.- Filosofía de control 85

7.1.- TIA Portal 85

7.2.- Dispositivos conectados a la red PROFIBUS 85

7.3.- Lectura y escritura de variables 86

7.3.1.- E/S conectadas directamente al PLC 87

7.3.2.- E/S conectadas a la periferia descentralizada (ET200) 89

7.3.3.- Telegramas para los accionamientos 89

7.3.4.- Variables ingresadas desde la interfaz humano máquina 89

7.3.5.- Variables del cuenta metros 91

7.4.- Representación de valores analógicos 91

7.5.- Escalamiento de variables 95

7.5.1.- Presión 95

7.5.2.- Temperaturas 96

7.6.- Función “Banda Muerta” 100

7.7.- Generador de rampa 101

7.8.- Tolva 103

7.9.- Control de temperatura 106

7.9.1.- Control PID 107

7.9.2.- PWM 108

7.10.- Sikora 114

7.11.- Extrusoras 116

7.12.- Control de nivel de agua en el tubo 117

7.13.- Control de posición en el tubo 118

7.14.- Diagramas de bloques 121

7.15.- Gráficas en tiempo real 125

8.- Conclusiones y resultados 126

9.- Bibliografía 128

10.- Acrónimos 129

11.- Glosario de términos 131

ANEXOS 133

LISTADO DE FIGURAS

3.1	Extrusora genérica	24
3.2	Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas	26
3.3	Extrusora principal de 4 ½”	28
3.4	Extrusora secundaria de 2 ½”. Vista frontal y posterior	28
3.5	Extrusora móvil de 2 ½”	29
3.6	Extrusora móvil de 2 ½”. Motor del tornillo y llaves de paso	29
3.7	Capstan de entrada	30
3.8	Pistón neumático del tubo de vulcanizado	32
3.9	Cuerpo del tubo de vulcanizado	32
3.10	Capstan de salida	33
3.11	Cámara infrarroja del sistema Scholz	33
3.12	Controlador del sistema Scholz	34
3.13	Oruga de salida	34
3.14	Enrollador	35
3.15	Pellets que luego conforman el polímero de recubrimiento	36
3.16	Extrusora con tolva de forma piramidal	36
3.17	Medidor infrarrojo de diámetro	37
4.1	PLC que controlaba el sistema de tolvas	38
4.2	Accionamiento de corriente continua para la oruga	39
4.3	Panel de los controladores de temperatura	40
4.4	Lugar de control de la máquina	41
4.5	Detalle del panel de operador	41
5.1	Pirámide CIM	46

5.2	Pirámide CIM y su relación con una implementación real	46
5.3	Cable PROFIBUS	51
5.4	Esquema de red de conexión del bus para una línea tipo A según EN 50170	52
5.5	Velocidad de comunicación de la red PROFIBUS	52
5.6	Asignación de terminales del conector DB9 y apariencia física	53
5.7	Transmisión de bits mediante *"Non return to zero"*	54
5.8	Estructura de la unidad mínima de información en PROFIBUS: carácter	57
5.9	Estructura de un mensaje sin datos	57
5.10	Estructura de un mensaje con datos de longitud fija	58
5.11	Estructura de un mensaje con datos de longitud variable	58
5.12	Diagrama de estados de un esclavo PROFIBUS	60
5.13	Canales de datos PROFIBUS DP del MICROMASTER 4	64
5.14	Estructura básica de un telegrama PPO	65
5.15	Estructura del telegrama de los accionamientos	69
6.1	Esquemático resumen sistema CV11	70
6.2	PLC y sus módulos de E/S	71
6.3	Diferentes alternativas de medición disponibles para una entrada analógica	72
6.4	Rangos de medición disponibles para lectura de voltaje	72
6.5	Rangos de medición disponibles para lectura de corriente	72
6.6	Rangos de medición disponibles	72
6.7	Rangos de medición disponibles para lectura de termo resistencia	72
6.8	Diferentes alternativas de medición disponibles para una entrada analógica	73
6.9	Rangos de medición disponibles para lectura de voltaje	73
6.10	Rangos de medición disponibles para lectura de corriente	74
6.11	Rangos de medición disponibles para lectura de resistencia	74
6.12	Rangos de medición disponibles para lectura de termo resistencia	74

6.13 Rangos de medición disponibles para lectura de termopar 74
6.14 Alternativas de configuración de la salida analógica en corriente 75
6.15 Selección de canales y filtro para entrada tipo termopar 75
6.16 Selección de tipo de termopar y su compensación 75
6.17 Diferentes tipos de termopar seleccionables 76
6.18 Configuración final del termopar con rebase por exceso 76
6.19 ET200 y sus módulos de E/S 77
6.20 Interfaz Humano Maquina táctil de 19 pulgadas. Modelo MP377 77
6.21 Pulsadores 80
6.22 Selector 80
6.23 Sensor capacitivo 81
6.24 Potenciómetro 82
6.25 Termopar tipo J 83

7.1 Red PROFIBUS y sus nodos 86
7.2 Bloque de Datos (DB) de la tolva 87
7.3 Configuración de las direcciones de entrada digitales 88
7.4 Lectura y traspaso de variables 88
7.5 Lectura y traspaso de variables desde periferia 89
7.6 Descomposición del telegrama PROFIBUS para los accionamientos 90
7.7 Tabla de variables de la HMI 90
7.8 Asignación de direcciones de E/S 91
7.9 Conversión de una variable desde su valor leído en formato entero, a un valor real 96
7.10 Escalamiento de la variable “Presión” 96
7.11 Curvas características de diferentes termopares 97
7.12 Tratamiento aplicado a las variables de temperatura 98

7.13	Llamado reiterativo al bloque de función “Lectura Termocupla”	99
7.14	Código de programación para generar la función “Banda Muerta”	100
7.15	Diagrama de bloques de la función “Banda Muerta”	100
7.16	Variables de entrada y salida de la función “Generador de rampa”	101
7.17	Código de programación para generar la función “Generador de rampa”	102
7.18	Variables de entrada y salida para la función “Tolva”	103
7.19	Código de programación en escalera para el llenado de las tolvas	104
7.20	Funcionamiento de llenado de las tolvas	104
7.21	Funcionamiento de llenado de las tolvas comenzando desde vacío	105
7.22	Funcionamiento de llenado de las tres tolvas comenzando desde vacío	105
7.23	Activación de la alarma mediante los sensores de nivel crítico	106
7.24	Diagrama de bloques del controlador CONT_C	108
7.25	Variables de entrada y salida para la función CONT_C	109
7.26	Funcionamiento en cascada del CONT_C y PULSEGEN	109
7.27	Valores asignados a QPOS_P para diferentes valores de la salida LMN	110
7.28	Diagrama de bloques de la función PULSEGEN	110
7.29	Característica simétrica del regulador junto a una pequeña banda muerta	112
7.30	Variables de entrada y salida para la función PULSEGEN	113
7.31	Diagrama de bloques del control de temperatura	113
7.32	Modelo simplificado del control de temperatura	113
7.33	Variables de entrada y salida para la función “Sikora”	114
7.34	Código de programación de la función “Sikora”	115
7.35	Diagrama de bloques del control de espesor mediante “Sikora”	116
7.36	Esquemático del tubo	117
7.37	Diagrama de bloques del control de nivel de agua en el tubo	118
7.38	Esquemático de la línea	119
7.39	Configuración de PID dinámico para diferentes cajas reguladoras	120

7.40 Configuración de Kp como función de la velocidad 120

7.41 Control de posición del tubo 121

7.42 Modelo simplificado de control de posición del tubo 121

7.43 Diagrama unilineal de la línea completa 122

7.44 Diagrama de bloques de la línea completa 124

7.45 Comportamiento de las temperaturas 125

LISTADO DE TABLAS

5.1	Asignación de pines en la interfaz del bus de campo	53
5.2	Longitud máxima de los segmentos PROFIBUS-DP según la velocidad de transmisión	55
5.3	Tipos de telegrama PPO	65
5.4	Palabra de mando	67
5.5	Palabra de estado	68
7.1	Representación de valores analógicos	92
7.2	Rangos de entrada bipolares	93
7.3	Rangos de entrada unipolares	93
7.4	Rangos de salida bipolares	94
7.5	Rangos de salida unipolares	94
7.6	Rangos de medición de tensión	95
7.7	Rangos numéricos para termopar tipo J	98
7.8	Valor lógico de las variables para configurar el modo de operación	111
7.9	Método de comportamiento de las salidas para aplicación de temperatura	111

1.- INTRODUCCION

Chile ha sido una de las economías de más rápido crecimiento en Latinoamérica en la última década [1], sin embargo, según algunos autores esto aún no es suficiente para considerarlo un país desarrollado, otros autores afirman que está en vías de desarrollo, según otros, si comparamos a Chile sólo con América Latina, el escenario es un poco mejor, y según los más pesimistas ser de los mejores de Latinoamérica en realidad no asegura ser de los mejores del mundo, en fin, las opiniones son variadas. No obstante, hay algo en lo que todos están de acuerdo; en nuestro país aún existen muchas cosas que están lejos de la vanguardia, aspectos estructurales, sociales, industriales y energéticos, por nombrar solo algunos. En este contexto en Chile aún existen organizaciones y empresas industriales con diversas unidades que todavía funcionan a pesar del paso del tiempo.

El presente documento se enfoca en un aspecto en particular sobre este tema, los activos fijos en empresas industriales, basta con una simple visita a cualquier industria chilena y rápidamente nos encontraremos con equipos antiquísimos que datan incluso de la década del 80, lamentablemente existe un problema de idiosincrasia en las políticas de reinversión, en donde los directivos que toman las decisiones son reticentes a implementar tecnología de punta, pues, a pesar de los grandes beneficios que esto presenta (eficiencia, responsabilidad social, versatilidad, precisión, etc.), el hecho de que dicha tecnología no ha sido probada genera muchísima inseguridad y desincentiva la inversión provocando que esta tecnología vieja permanezca durante largos periodos en funcionamiento hasta el punto en que las fallas hacen insostenible su operación.

A pesar de que la mayoría de las organizaciones están acostumbradas a realizar la práctica anteriormente descrita, existe un puñado de empresas dispuestas a romper el molde. Dichas empresas presentan un modelo de negocio más innovador, más eficiente, socialmente responsable, con mayor valor agregado y dispuestas a correr más riesgos para conseguir mayores beneficios. Estas empresas gastan más en inversiones y en reinversiones, buscando tecnología de punta para sus activos.

Sin embargo, no es necesario reemplazar toda la maquinaria, si bien, cuando se evalúa un nuevo proyecto la primera opción es comprar activos nuevos, el presente documento se centra en una variante a esto: la reinversión y el re-potenciamiento. Esto se basa en la

realidad chilena, la cual posee tecnología antigua pero aún utilizable. Este proceso se llama modernización (conocido en la industria por su nombre en inglés: “retrofit”).

1.1.- Objetivos

En el contexto de las modernizaciones y su constante crecimiento en Chile, el presente documento analiza un caso particular de la empresa Nexans S.A., la cual se encuentra modernizando los activos fijos más importantes de su línea de producción.

Nexans S.A. es una compañía francesa que manufactura cobre para el negocio inmobiliario, venta minorista en el área de la construcción y para la industria (principalmente para barcos, aviones y el sector petrolero). En Chile comenzó sus actividades el año 2008 tras adquirir la unidad de cables de la compañía chilena Madeco [2]. Luego de la adquisición se comienza a modernizar la maquinaria adquirida, pues ésta es antigua y no se adecúa a los estándares de calidad internacional a los que obedece Nexans S.A.

Existen diversas máquinas que componen los activos fijos de Nexans S.A., una de ellas es “La Máquina Extrusora de Cables”. **El presente documento tiene por objetivo mostrar el completo desarrollo e implementación de un sistema de automatización para realizar la modernización de una máquina extrusora de cables.**

Dicha modernización contempla la renovación de todos los accionamientos eléctricos, los sistemas de control, los cables de alimentación, los cables de fuerza y algunos sensores. Las piezas mecánicas serán conservadas en su gran mayoría, a excepción de algunos pistones y algunas correas. Además de la renovación de la etapa eléctrica y electrónica, la empresa proveedora de servicios debe también suministrar los tableros eléctricos y programar los autómatas, los accionamientos eléctricos y las HMI (interfaces humano máquina).

1.2.- Contexto general

1.2.1- Nexans

Nexans S.A. es una empresa global, de origen francés, que trabaja en la manufactura de cables de cobre y fibra óptica para diferentes sectores industriales. En el año 2008 adquirieron la unidad de cables de la compañía chilena MADECO. Después de la adquisición, en su afán de cumplir los más altos estándares mundiales, decidió repotenciar los

activos recién comprados. En este sentido Nexans buscó alternativas entre diferentes proveedores tanto del área nacional como internacional.

Es aquí donde aparece MAGASOL (empresa chilena de automatización y accionamientos eléctricos donde trabaja el autor de este documento) que llevaba varios años trabajando con MADECO y desarrollando una estrecha relación cliente-proveedor. Nexans entre todas sus alternativas decidió escoger a MAGASOL para realizar la modernización de sus activos eléctricos.

1.2.2- Retrofit

En el sector industrial la palabra *"retrofit"* es ampliamente utilizada para referirse a la modernización de máquinas. Este concepto consiste en aprovechar gran parte de los elementos existentes para re potenciar una máquina mediante la sustitución o incorporación de elementos nuevos con el objetivo de mejorar el **rendimiento**.

Sin embargo, el concepto de rendimiento es amplio en su significado, y cada persona puede otorgarle diferente importancia a cada uno de sus componentes, en particular en el área industrial es ampliamente aceptado el concepto de rendimiento asociado a **disponibilidad de la máquina**.

Los ciclos de vida de los activos siempre se tratan de alargar mediante diversos métodos, p.ej. mantenimientos, evitando los sobre esfuerzos y otras técnicas, sin embargo, es inevitable llegar a un punto de caducidad, ya sea por deterioro, porque los fabricantes ya no producen repuestos o incluso, porque desaparece el fabricante. Esto fue lo que le pasó a la empresa MADECO S.A., sus activos seguían funcionando, pero no existían repuestos, no había técnicos capacitados ni había planos actualizados, tampoco existía un proveedor que se hiciera cargo ni que brindara apoyo. Todo esto se traducía en la imposibilidad de realizar mantenciones preventivas y lo único posible era realizar mantenciones correctivas cuando sucedían problemas. Ocasionando pausas inesperadas, poca eficiencia, poca eficacia, tiempos inciertos de reparación y, en definitiva: BAJA CONFIABILIDAD. En este escenario Nexans se enfocó enérgicamente en modernizar sus activos, pues los estándares de los activos recién adquiridos están muy por debajo de los deseables.

Las ventajas de la modernización son múltiples, pero son por sobre todo económicas. Se busca evitar las paradas inesperadas, aumentar la confiabilidad en la máquina (para poder comprometerse con los clientes), aumentar la disponibilidad de la máquina, reducir gastos de reparación, mejorar la precisión (calidad del producto) y estandarizar los repuestos. Además, la planta completa apunta en el largo plazo a tener una automatización completa, con sistemas centralizados y control desde un nivel superior (gerencia) y, eventualmente, remoto.

2.- ESTADO DEL ARTE

La presente memoria de título busca aplicar los conocimientos aprendidos por el estudiante a lo largo de los años de estudio en un problema particular, a diferencia de una tesis de grado, no tiene por objetivo realizar un aporte a la vanguardia del área en cuestión. En consecuencia, este documento no busca ser una contribución al estado del arte.

Sin embargo, el autor de todas formas debe recopilar información para recabar los antecedentes que existen en relación al tema elegido. Este tema consiste en el "Diseño y desarrollo de un sistema de automatización de una maquina extrusora de cables basado en PLC".

Existe poca información respecto al tema en sí, pues es un nicho bastante acotado que, en base a la información recabada, pertenece al *"know how"* de cada industria y por motivos competitivos éstas no desean compartir dicha información. En este escenario el autor del documento decide realizar un enfoque diferente para confeccionar el estado del arte. Dado que la información del conjunto no está al alcance, se realiza una investigación de las partes que componen el todo: "Sistemas de automatización basado en PLC" y "Máquina extrusora de cables"

El tema extrusión es ampliamente estudiado por las academias de ingeniería Química y Mecánica [3]. Su uso comenzó en el año 1800 para realizar tubos de plomo, era manual en un principio, se calentaba el material y después pasaba a un embolo, a finales de ese siglo su aplicación se expandió al cobre y aleaciones de bronce.

La extrusión es un proceso muy utilizado en la industria para temas de diferente índole hoy en día: metales, plásticos, alimentos, polímeros, cerámicas y muchos otros. El proceso utiliza sistemas auxiliares que además abarcan estudios térmicos y de medición de temperatura [9].

Sin embargo, la aplicación de un sistema basado en PLC SIEMENS para automatizar esta máquina no posee referencias conocidas, más aun, el hecho de que este proyecto posea exclusivamente 3 extrusoras mono tornillo, dos cabestrantes, una oruga y un tubo de vulcanizado vuelve particularmente compleja la tarea de encontrar referencias específicas. Por este motivo, el autor se limitará a referirse al estado del arte en la automatización usando equipos SIEMENS, el alcance de los PLC y de los accionamientos.

Hablar de automatización en el año 1950 era algo absurdo, la tecnología de la época solo alcanzaba para realizar "Sistemas de control", estos eran basados en relés e interruptores. Los circuitos eléctricos se utilizaban para generar lógica combinacional, tenían limitaciones de tamaño y su alcance era solo local. Si bien era posible escalar estos sistemas, su eficiencia disminuía drásticamente al intentar resolver problemáticas mayores. A finales de la década de 1960, y gracias a la aparición del transistor, la industria busco nuevas tecnologías electrónicas para obtener una solución más eficiente para los sistemas de control.

Nacen así los primeros Controladores Lógicos Programables (llamados PLC por las siglas en inglés de *"Programmable Logic Controller")* a finales de la década de 1970. El primer PLC diseñado fue llamado 084, los creadores de este quipo luego crearon una empresa dedicada al desarrollo, fabricación, venta y mantenimiento de un nuevo producto llamado "*Modicon" ("Modular Digital Controller").* Con el paso de algunos años, como es de esperarse, otros fabricantes diseñaron sus propios PLC. Esto originó que en una misma industria podía haber decenas de PLC de diferentes marcas y modelos, todos trabajando de manera independiente.

Para interconectar los equipos era necesario enviar señales por cable entre ellos, nuevamente al aumentar la complejidad de los sistemas este mecanismo de cableado se vuelve ineficiente cuando los volúmenes son grandes. Esto motivo interés por conferir a los sistemas electrónicos la capacidad de transmitir y recibir información entre ellos y entre su entorno, dando origen a las "Comunicaciones Industriales", luego en el año 1987 nace PROFIBUS.

Y así la tecnología en PLC y en comunicaciones industriales ha ido avanzando hasta llegar al punto actual en donde un PLC es mucho más que un sistema de control, es una plataforma de automatización, compatible con diferentes equipos, capaz de realizar complejas tareas de automatización, comunicación, diagnóstico, seguridad e ingeniería. Útil para aplicaciones de manufactura, procesos, comunicaciones industriales, sistemas de control, sistemas de movimiento, control numérico y periferias descentralizadas. También en su construcción y uso los fabricantes se preocupan de temas como eficiencia energética, transparencia, confiabilidad, innovación, flexibilidad, escalabilidad modular, optimización, fácil integración, regulaciones y estándares internacionales.

Por otro lado, tenemos los motores y los accionamientos eléctricos, quienes al igual que el resto de la electrónica han ido mejorando con el paso de los años y hoy en día son fundamentales en el área industrial.

Un accionamiento de velocidad variable está constituido por un motor y algún tipo de controlador. Los primeros accionamientos eléctricos consistían en combinaciones de motores de corriente alterna (AC) y de corriente continua (DC) que eran utilizados como controladores rotatorios. A su vez, los primeros controladores eléctricos empleaban rectificadores SCR para controlar el voltaje y, por consiguiente, la velocidad de los motores de DC. Esta clase de accionamiento de velocidad variable de corriente continua tiene todavía un extenso uso, sin embargo, el motor DC es costoso, de gran tamaño y su sistema de alimentación eléctrico (escobillas) requiere de mantenimiento periódico.

El motor de inducción de corriente alterna, por el contrario, es más económico, compacto y su sistema de alimentación eléctrico prácticamente no requiere de mantenimiento. Para realizar el control preciso de velocidad de este tipo de motores, Siemens ofrece hoy en día los productos de la línea Sinamics, debido al avance tecnológico estos equipos ofrecen increíbles mejoras en el proceso operativo, ahorro de energía eléctrica, sistemas modulares, alta eficiencia, seguros y con conectividad.

3.- LINEA DE EXTRUSION

Tal como fue mencionado anteriormente, Nexans posee numerosos activos, entre los cuales se encuentra la máquina extrusora, de la cual posee aproximadamente una docena (año 2013). Una de ellas en particular es la "Maquina Extrusora CV11", el tema central del presente documento. Pero antes de abordar el contenido de fondo, se explicará brevemente el concepto de extrusión en su forma más pura, para luego pasar a explicar el caso particular de esta memoria de título.

3.1.- Extrusión

La extrusión tratada en el presente documento es la llamada "Extrusión de un Polímero". Se trata de un proceso mecánico en donde el material comienza en estado sólido, generalmente en forma de pellets, para luego ser fundido siguiendo una determinada curva gradiente de temperatura hasta alcanzar un estado visco-elástico para ser forzado a pasar por un molde y así producir artículos de sección transversal constante y de longitud indefinida. Además de los plásticos, existen muchos otros materiales que se pueden procesar mediante extrusión, como metales, pvc, alimentos, etc. El material a extrusar ingresa en estado sólido por medio de una tolva a un husillo (tornillo sin fin) que calienta el material a medida que lo obliga a avanzar a través de él, mediante el giro del mismo se funde, fluye y mezcla debido a la presión y al empuje generado por éste. Finalmente llega al molde encargado de darle la forma deseada (llamado dado o cabezal).

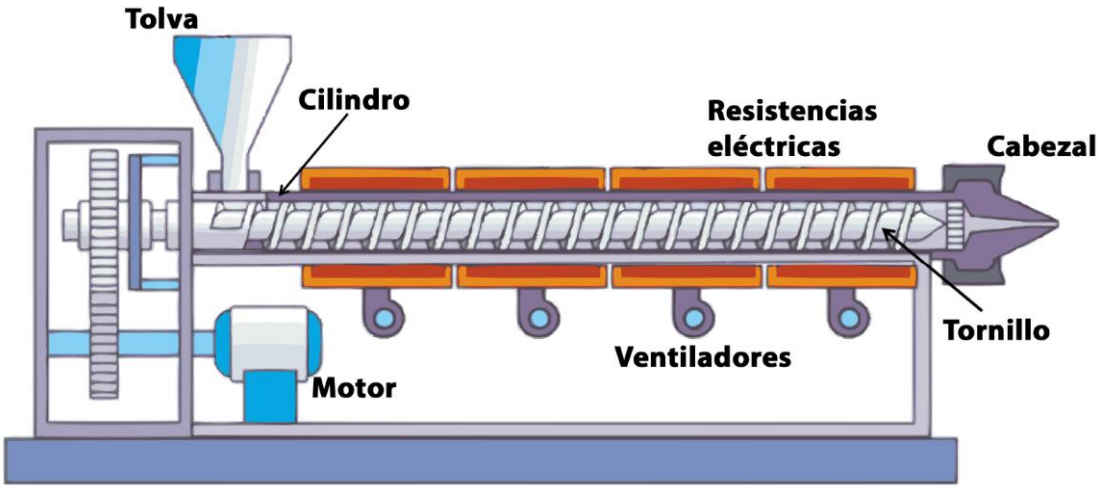


Figura 3.1: Extrusora genérica

El sistema de alimentación del material se llama “Tolva”, es aquí por donde ingresa el polímero al Cilindro, generalmente el material simplemente cae por gravedad ya que viene en forma de pellets. Existen dos sensores de nivel en las tolvas que le indican al sistema de control cuando es necesario realizar el llenado.

Luego, el material pasa a la etapa de fusión y mezclado, esto sucede en el interior del cilindro a medida que avanza a través del tornillo sin fin, el cual es un cilindro rodeado de un espesor helicoidal de grosor decreciente.

El giro del husillo genera un efecto de bombeo que obliga al material a avanzar a través de él, mientras avanza el compuesto, las termo resistencias entregan energía térmica para elevar su temperatura, lo que sumado al giro, compacta el polímero, dando lugar a la fusión y presurización del material mientras se traslada hasta llegar al cabezal.

En términos de presión el sistema Tornillo-Cilindro se divide en tres grandes secciones: Alimentación, Transición y Dosificado (esto es independiente de la cantidad de termo resistencias que posea). Tal como se aprecia en la figura 3.2 la profundidad del canal del tornillo va decreciendo conforme se avanza a través de las zonas. La zona de alimentación tiene por objetivo compactar el material y precalentarlo para llevarlo a la zona de transición en donde el material comienza a mezclarse, además, el aire que pudiera quedar atrapado escapa del cilindro viajando a través del tornillo de vuelta hacia la tolva. Finalmente el compuesto llega a la zona de dosificado, lugar en el cual el tornillo tiene una profundidad de canal muy pequeña para así asegurar una mezcla homogénea en la fusión y también evitar las burbujas de aire. Aquí, no solo las termo resistencias suben la temperatura del compuesto, la alta presión también contribuye al aumento térmico, pues alcanza valores del orden de los 1000 [psi].

Las extrusoras pueden girar entre 10 y 500 rpm y según sean sus dimensiones, pueden generar caudales de hasta 2000 Kg/hora de material. Existen también extrusoras con más de 1 tornillo [3], pero su explicación se escapa del objetivo de este documento.

Los materiales que se trabajan Nexans S.A. son cuidadosamente diseñados para otorgar cualidades específicas a los cables, dependiendo del tipo de producto estos pueden ser resistentes a los rayos UV, resistentes al peso de los camiones mineros, reflectantes, repelentes a las mordidas de animales salvajes, pueden ser submarinos y, naturalmente,

resistir diferentes niveles de voltaje y corriente, entre muchas otras características. Por este motivo es que el gradiente de temperatura debe ser cuidadosamente elaborado, ya que cualquier choque térmico puede arruinar las propiedades deseadas. Las resistencias eléctricas son las encargadas de subir la temperatura hasta el valor de consigna deseado, sin embargo, debido a la escaza profundidad de canal en la zona de dosificado se producen fuerzas de cizalla que provocan altas presiones, ocasionando generación interna de calor, la cual sobrepasa los valores nominales deseados. Por este motivo también se instalan ventiladores para enfriar el cilindro, existen ocasiones en donde se recurre a enfriamiento por agua, en este caso se habla de válvulas de agua.

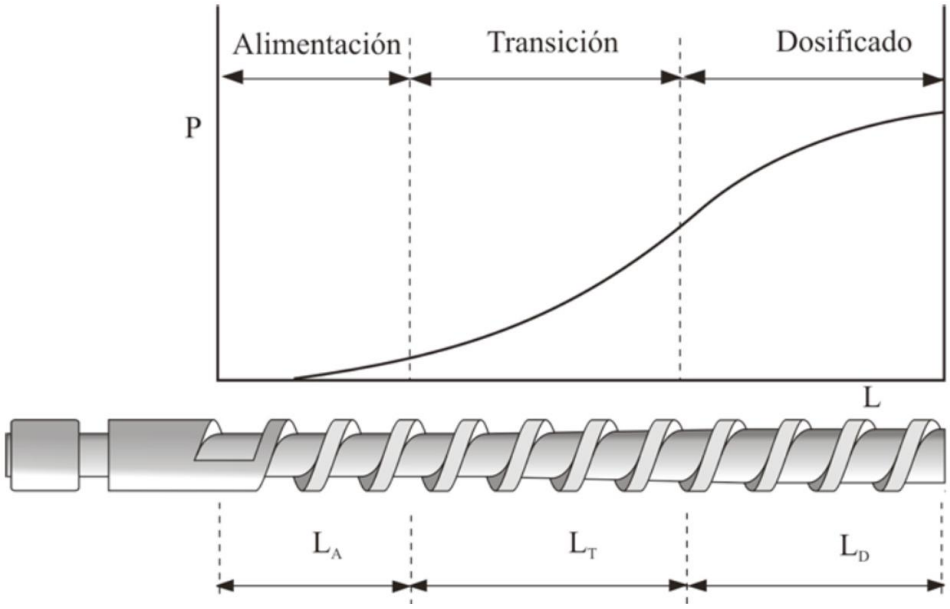


Figura 3.2: Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas

La descripción anterior corresponde al proceso de extrusión más simple posible. El presente documento muestra cómo, a partir de este simple concepto, se consiguen resultados más complejos a medida que se incorporan elementos.

3.2.- CV11. Componentes principales

Nexans S.A. tiene como giro principal la producción de cables, es por este motivo que la máquina extrusora CV11 produce, justamente, cable de cobre, sin embargo, las máquinas

extrusoras de esta empresa se diferencian entre ellas mediante dos grandes conceptos: el diámetro máximo del cable y el sistema de refrigeración, en este caso estamos hablando de un diámetro de 4½ pulgadas y un sistema de refrigeración por agua dentro de un tubo de vulcanizado (explicado más adelante).

Además, esta máquina no posee sólo una extrusora, sino que posee 3: una de 2½", otra de 4½" y una móvil de 2½". Para alimentar cada una de estas extrusoras existe una línea de vacío que permite el llenado de las tolvas con el polímero correspondiente.

Por otro lado, para llevar el cable a la línea de producción están los desenrrolladores, estos son los encargados de sacar el cable desde los rodillos (o carretes) para ponerlos en fabricación. Luego viene una máquina rotatoria usada para controlar la tensión del cable, llamada "*capstan"*. A continuación es donde se involucran las 3 extrusoras en una configuración variable, (se pueden utilizar tanto las 3 como sólo una de ellas) esto es posible gracias a los cabezales adaptables, que permiten una versátil conexión de las extrusoras. Las extrusoras se encargan de recubrir el cable con el polímero deseado. El sistema de refrigeración está compuesto por un tubo con un sistema neumático y enfría el cable al sumergirlo en agua. Posteriormente el cable llega a un "*capstan"* de salida, para luego pasar a una oruga de salida y finalmente el producto final es enrollado en el enrollador de salida.

A continuación se presenta en detalle el funcionamiento original (antes de la modernización) de cada una de las partes anteriormente mencionadas. Las fotos presentadas en este capítulo corresponden al levantamiento realizado el año 2013.

3.2.1.- Extrusora de 4½"

Es la extrusora principal de esta máquina, es del tipo de tornillo único, accionado por un motor de corriente continua de 50 HP (37kW), posee 4 zonas, cada una de las cuales está equipada con resistencias eléctricas de 10.6kW y ventiladores eléctricos que soplan aire.

3.2.2.- Extrusora de 2½"

Es la extrusora secundaria de esta máquina, físicamente se encuentra antes de la de 4½", sirve para producir el primer recubrimiento, puesto que en su disposición se encuentran cerca ambas extrusoras, los bordes del polímero que recubre se funden con los bordes del polímero siguiente. Al igual que todas las extrusoras en Nexans S.A. es del tipo de tornillo único, accionado por un motor de corriente continua de 30 HP (22kW), posee 3 zonas, cada una de

las cuales está equipada con resistencias eléctricas de 5kW y ventiladores eléctricos que soplan aire.

Figura 3.3: Extrusora principal de 4 ½”

Figura 3.4: Extrusora secundaria de 2 ½”. Vista frontal y posterior

3.2.3.- Extrusora de 2½” móvil

Por último, tenemos la Extrusora móvil de 2½”, se le llama así porque está montada sobre unos rieles paralelos (como un portón corredizo) que le permiten desplazarse, y así conseguir

una versátil conexión al cabezal. Físicamente esta justo en frente de la extrusora principal y se utiliza cuando se requiere recubrimiento múltiple. También es de tornillo único, accionado por un motor de corriente continua de 30 HP (22kW), posee 3 zonas, los calefactores son de 4kW, sin embargo, el enfriamiento en este caso es con agua, motivo por el cual posee llaves de paso.

Figura 3.5: Extrusora móvil de 2 ½”

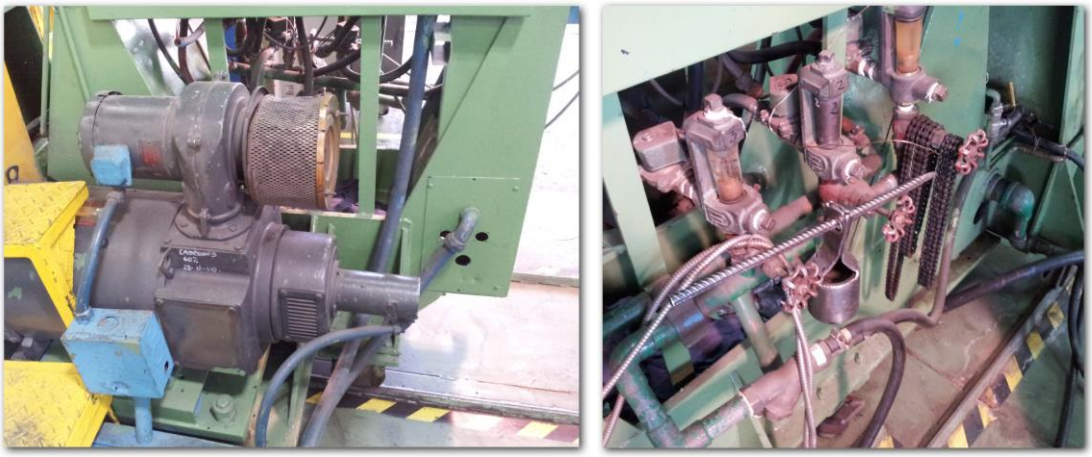


Figura 3.6: Extrusora móvil de 2 ½”. Motor del tornillo y llaves de paso

3.2.4.- Capstan de entrada

Los capstans son máquinas rotativas utilizadas para aplicar tensión en cables, cuerdas y amarras. El origen de la palabra es francés, y proviene de los marineros que utilizaban estos dispositivos para amarrar las cuerdas de sus barcos. Su traducción al español es “cabrestante”, pero en la industria es un término muy poco conocido, un sinónimo bien utilizado es “huinche”. En el caso de las máquinas extrusoras de Nexans S.A. los capstans son fundamentales para la correcta fabricación del cable, pues se trata de un producto cuyas capas deben ser concéntricas, para poder lograr esto son los capstans los encargados de mantener el cable con la tensión adecuada y relativamente estática en su elevación, pues éstos siempre trabajan en duplas; hay un capstan de entrada y uno de salida, y prácticamente nunca realizan el mismo torque, provocando que esta diferencia se traduzca en una tensión en el cable. Más adelante se ahondará en el control que permite realizar esta sensible labor.

Figura 3.7: Capstan de entrada

3.2.5.- Tubo de vulcanizado

Luego de realizarse el proceso de extrusión el cable queda recubierto de polímero caliente, motivo por el cual aún no está listo para su uso. Existen diferentes métodos para enfriar un cable recién extrusado.

- El método más simple consiste en simplemente dejar el cable al aire y dejar que se enfríe por convección, lo cual requiere de bastantes minutos, haciendo que el tiempo de producción se extienda (o que la velocidad baje).
- Una alternativa más rápida que la anterior es utilizar líquidos refrigerantes (o simplemente agua) para así realizar la transferencia de calor pasando el cable por bandejas llenas de este líquido hasta alcanzar la temperatura deseada. Sin embargo, esta estrategia también presenta un problema pues el choque térmico es muy alto, lo cual provoca consecuencias no deseadas en las propiedades del cable.
- Finalmente llegamos a una solución que utiliza lo mejor de ambas estrategias: El tubo de vulcanizado. Para evitar el choque térmico inicial el cabezal mismo se conecta a un tubo aislado, de esta forma el cable inmediatamente después de ser extrusado entra en una cámara de vapor, la cual tiene una temperatura mucho más alta que el agua (y que el aire) y levemente menor que el material, posteriormente el cable baja a través del vapor encontrándose con temperaturas cada vez menores, pues el vapor está más frio a medida que desciende la altura. Para finalmente llegar al nivel donde está el agua, en donde se termina de enfriar completamente el polímero. De esta forma el material es sometido a una curva suave de descenso en su temperatura evitando el estrés térmico sin comprometer tiempo ni distancia en su fabricación. Cabe mencionar que el tubo de vulcanizado de la máquina CV11 es de aproximadamente 50 metros.

Figura 3.8: Pistón neumático del tubo de vulcanizado

Figura 3.9: Cuerpo del tubo de vulcanizado

3.2.6.- Capstan de salida

Como se vio anteriormente el tubo de vulcanizado cumple la delicada labor de enfriar el material a través de sus 50 metros de longitud, sin embargo como se puede apreciar en las fotos previas, este tubo comienza en un segundo piso y luego baja al primero formando una curvatura en su ruta. Esto origina un problema en el proceso cuando el cable toca las paredes del tubo, pues éste tiene un diferente factor de conductividad térmica que el fluido, tiene una diferente capacidad calórica y puede eventualmente deformar el recubrimiento del cable. Para solucionar este problema está el capstan de salida, que trabaja en conjunto con el capstan de

entrada. Si el cable se pandea, el capstan de salida aumenta su velocidad para estirar el cable, en caso contrario baja su velocidad para quitar tensión al cable. El instrumento que cierra este lazo de control se llama “Scholz”, es quien monitorea la posición del cable.

Figura 3.10: Capstan de salida

3.2.7.- Scholz

Es un sistema compuesto por sensores y actuadores para controlar la posición del cable en el tubo. Busca evitar que el cable se curve más de lo debido para que nunca entre en contacto con las paredes del tubo de vulcanizado. Posee una cámara infrarroja y un sistema de control con diferentes opciones ajustables.

Figura 3.11: Cámara infrarroja del sistema Scholz

Figura 3.12: Controlador del sistema Scholz

3.2.8.- Oruga de salida

Luego del capstan de salida viene la “Oruga de salida”, la cual, al igual que los capstans son capaces de aplicar tensión al cable, no obstante la función principal de la oruga es más bien de desacoplar segmentos de tensión. Es decir, la tensión antes y después de la oruga puede ser considerablemente diferente, permitiendo separar la línea y así evitar (o corregir) problemas de tensión antes y después de esta etapa. Particularmente en este caso, desacopla la línea del enrollador, permitiéndole a éste realizar su trabajo de manera independiente.

Figura 3.13: Oruga de salida

3.2.9.- Enrollador

Si bien esta máquina no es considerada en el sistema centralizado, es pertinente mencionarla, pues es la encargada de almacenar el producto terminado. Trabaja de manera independiente y no está contemplado que tenga comunicación con el sistema de control.

Así como en la mayoría de las plantas se trabaja con "*pallets"* para manipular los productos, en Nexans S.A. son los carretes los encargados de realizar el almacenaje y traslado, tanto para producto terminado como para producto en proceso. Para configurar el enrollador el operador debe montar un carrete vacío y ajustar su velocidad de acuerdo a la velocidad de la línea, luego el carrete comienza a girar enrollando el cable y siguiendo una guía perpendicular para que el llenado de éste sea parejo a lo largo de toda su amplitud.

Figura 3.14: Enrollador

3.2.10.- Control de Nivel de Tolva

Volviendo a las extrusoras, recuerde que éstas funden un polímero para recubrir el cobre y así formar un cable con nuevas propiedades. Este polímero entra a la extrusora a través de una tolva, la cual siempre debe tener material para alimentar, ya que si, eventualmente, la extrusora sigue calentando el tornillo en ausencia de material, la temperatura llegará a niveles demasiado altos que podrían deformas las piezas de acero de la máquina. Debido a esto es que las tolvas poseen un sistema automático de llenado, el cual consiste en una línea de vacío (común para las tres extrusoras) y dos sensores de nivel por tolva, uno de nivel bajo y otro de

nivel crítico. A un costado de cada tolva se encuentra un depósito de alto almacenaje que contiene el polímero a utilizar, éste no posee ningún sensor y debe ser monitoreado diariamente por el operador.

Figura 3.15: Pellets que luego conformaran el polímero de recubrimiento

Figura 3.16: Extrusora con tolva de forma piramidal.

3.2.11.- Sikora

Es un escáner de medición infrarroja que permite obtener una lectura en tiempo real del diámetro del producto (permite medir también el grosor del recubrimiento, la posición del cobre en el eje “x” e “y”, y detección de bultos y estrechamientos). Actúa en conjunto con la

extrusora; si el diámetro está bajo la consigna, aumenta la velocidad del tornillo de la extrusora para que ésta entregue más material y así el diámetro llegue al valor esperado. Si el diámetro es mayor que el requerido entonces baja la velocidad del tornillo.

Figura 3.17: Medidor infrarrojo de diámetro.

4.- DESCRIPCION DE LA MODIFICACION

El apartado anterior mostró el funcionamiento de la máquina en su estado original, previo a la modernización. El presente capítulo explica qué es lo que se hará para realizar la modernización, muestra dónde se realizarán intervenciones, qué equipos serán sustituidos y qué equipos se retirarán, también explica la disposición física de los nuevos gabinetes y cómo estos organizan a los equipos.

4.1.- Cambio de equipos electrónicos, incluidos los gabinetes

En primer lugar se retirará todo lo que es electrónico, este es el punto medular del proyecto, pues es la electrónica antigua (en mayor medida) la que motivó al cliente a realizar esta modernización. Las fotos mostradas a continuación muestran en qué condiciones se encontraban algunos tableros.

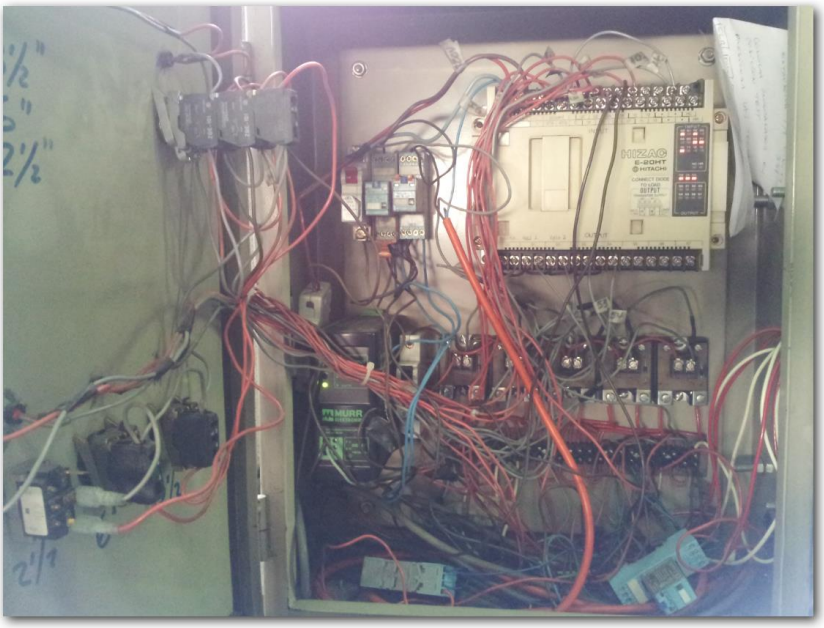


Figura 4.1: PLC que controlaba el sistema de Tolvas

Como se aprecia, debido al paso del tiempo, a la solución urgente de fallas, a la desorganización y a muchos otros motivos estos equipos llegaron a condiciones insostenibles para su correcta operación. Si bien es cierto que estos equipos seguían funcionando, cuando

presentaban una falla era prácticamente imposible seguir un protocolo para solucionarla, pues la documentación no constituía lo que realmente estaba instalado, o sencillamente no había documentación. Con el presente proyecto todo el control quedará implementado en un único PLC centralizado, con nuevos gabinetes y planos *"as built"*.

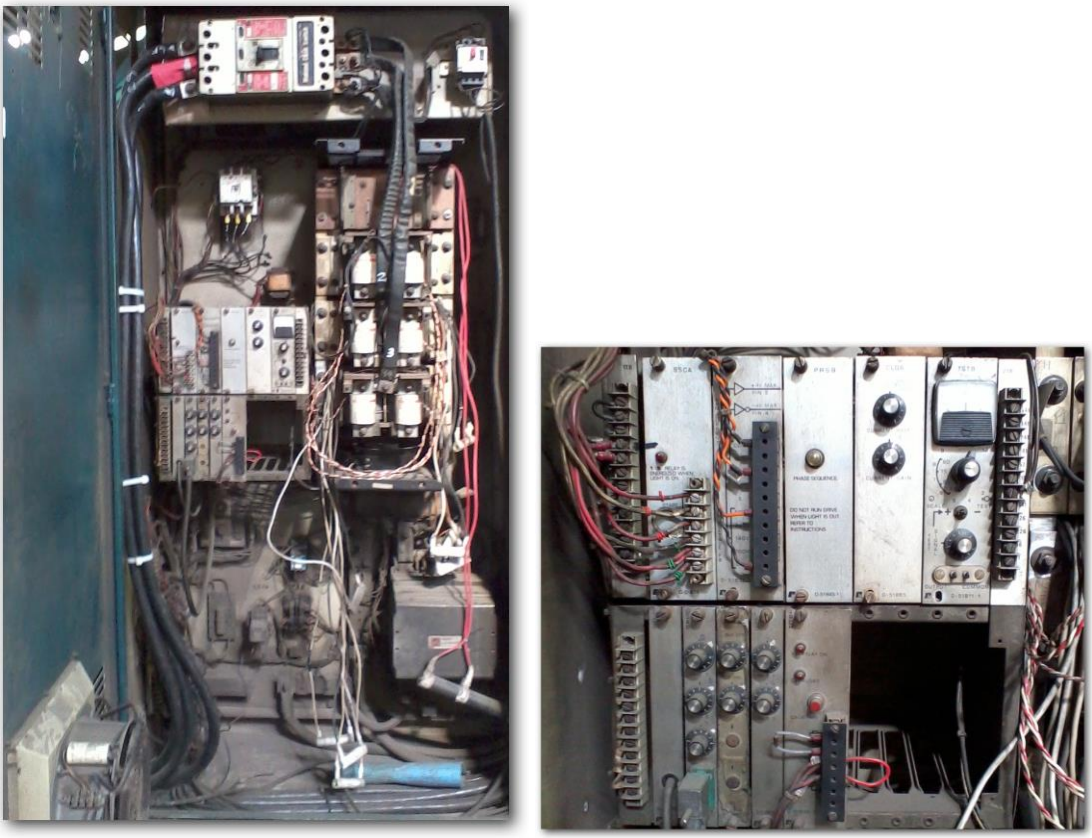


Figura 4.2: Accionamiento de corriente continua para la Oruga

La foto anterior muestra el accionamiento de corriente continua para una oruga, el cual exhibe las mismas dificultades que el caso anterior, pero con un agravante aún mayor: la configuración del accionamiento (limitadores, ganancias, ratios, etc.) está en el mismo gabinete, esto representa problemáticas operativas a la hora de conseguir versatilidad, ya que si se cambia de producto (por ejemplo, un simple cambio de diámetro) esto significará una mayor carga para la oruga y si no se ajustan ciertos parámetros, la dinámica de la oruga variará produciendo problemas en la velocidad. Para poder resolver esto había que abrir el gabinete energizado (con 380 VAC) y modificar los potenciómetros a valores normalmente no conocidos, esto es muy peligroso. La presente modernización contempla accionamientos

de corriente alterna en donde se fijan las consignas de velocidad en lazo cerrado, para que las variables internas se ajusten a las demandas dinámicas. También se incluyen recetas de productos para evitarle al operador tener que cambiar ajustes conocidos.

Figura 4.3: Panel de los controladores de temperatura

Los controladores de temperatura utilizados en esta máquina son dedicados e independientes, se utiliza un bloque por cada zona que se quiere controlar, motivo por el cual hay aproximadamente 20 controladores en total (contando las 3 extrusoras y los cabezales). Los reguladores utilizados son *"Eurotherm"* y *"Honeywell"*, es bien sabido que estos equipos presentan una gran confiablidad y robustez, funcionan muy bien y prácticamente no requieren mantención, sin embargo, no es posible controlarlos a distancia ni permiten comunicación para poder visualizarlos remotamente, de hecho, están instalados en los gabinetes, los cuales se encuentran alejados del lugar de trabajo del operador, lo que dificulta enormemente la lectura en tiempo real de las temperaturas. Todo esto será manejado por el PLC y visualizado en una interfaz táctil de 17 pulgadas, el operador podrá ver la temperatura instantánea y las consignas, también se incluye un gráfico con tendencias.

4.2.- Cambio de tablero de control por PLC

Al igual que los gabinetes, los tableros de control presentan problemas de orden, planos desactualizados, botoneras defectuosas, indicadores confusos y desgaste en general, además, es muy deseable que algunas variables (como la temperatura) aparezcan en este tablero. Por

esto es que se van a retirar estos tableros y se incluirá un panel articulado con una HMI y con nuevos botones y potenciómetros, debidamente tabulados. También se incluye una pantalla principal, que es táctil y de 17 pulgadas.

Figura 4.4: Lugar de control de la máquina

Figura 4.5: Detalle del panel de operador

4.3.- Cambio de motores

En este punto podríamos detenernos a enumerar las diferentes ventajas que existen entre los motores de corriente continua y los de corriente alterna, sin embargo, ése es un tema ya

bastante estudiado, [4] y [5], que no vale la pena repetir. No obstante explicaremos cuales motores serán modificados y porqué.

Es preciso también mencionar que muchos profesionales aún son reticentes a los motores de corriente alterna, generalmente por motivos operacionales, aunque en otras ocasiones es por desconocimiento. El presente proyecto no está exento de esto, razón por la cual el cliente decidió conservar algunos motores de corriente continua: los de las 3 extrusoras (también estos motores mantienen el taco generador 60V/1000RPM). De todas maneras, el resto de los motores sí fueron reemplazados obteniéndose todos los beneficios de control, eficiencia y mantención. Algunos de ellos pasarán a tener control vectorial e incorporación de encoders para trabajo en lazo cerrado

4.4.- Cambio de controladores

Aparte de los controladores dedicados que están en los gabinetes, también existen 2 controladores más: Uno que regula la posición del cable en el tubo de vulcanizado y otro que regula el nivel de agua en el mismo tubo. Ambos controladores serán retirados y todo el control quedara centralizado en el PLC.

4.5.- Gabinetes

Para poder establecer un orden en la disposición de los equipos instalados, estos se montarán en gabinetes eléctricos situados físicamente próximos a las unidades que deben controlar. En total se suministrarán 8 gabinetes, dentro de los cuales están los accionamientos, módulos remotos, borneras, relés, transformadores y otros equipos electrónicos. Estos gabinetes y su división física es lo que más adelante organizará el programa del PLC. A continuación se explica cada uno de los gabinetes instalados.

- Gabinete 100 - PLC. Es el gabinete principal, pues posee en su interior el Controlador Lógico Programable (*"Programmable Logic Controller"*). Además de numerosas entradas y salidas tanto analógicas como digitales, pues el panel de control principal llega acá (el cual tiene una HMI conectada por PROFIBUS), así

como los sensores de nivel de las tolvas, las presiones del cabezal, las referencias del Sikora y del Scholtz, las paradas de emergencia y las entradas y salidas de los sensores del tubo de vulcanizado.

- Gabinete 200 - Capstan de entrada. Contiene la fuerza y el control del accionamiento de corriente alterna.
- Gabinete 300 - Extrusora 2½" móvil. Contiene la fuerza (armadura y campo) y el control del accionamiento de corriente continua. Además, posee un módulo remoto ET200 que es parte de la red PROFIBUS, en él se encuentran entradas y salidas digitales y 1 módulo de entradas análogas para medir 8 puntos de temperatura. En este gabinete se controla el motor de la extrusora, sus termo resistencias, las válvulas de agua y se chequea el estado de los automáticos.
- Gabinete 400 - Extrusora 4½". Contiene la fuerza (armadura y campo) y el control del accionamiento de corriente continua. También posee un módulo remoto ET200 con 32 DI y 32 DO y un módulo de 8 AI. Al igual que el gabinete anterior, aquí se controla el motor de la extrusora, sus termo resistencias, los enfriadores, presión y se chequea el estado de los automáticos.
- Gabinete 500 - Extrusora 2½" fija. Nuevamente se repite la estructura ya mencionada, tal como en las otras dos.
- Gabinete 600 - Enrollador. Contiene la fuerza y el control de los accionamientos que componen al enrollador: enrollador, repartidor, sube-baja y abre-cierra.
- Gabinete 1200 - Capstan y Oruga de salida. Posee dos accionamientos de corriente alterna y sus encoder.

5.- SISTEMA DE TRANSMISION DE DATOS

Antes de continuar con la explicación de la modernización es imperativo detenerse un momento a hablar de la transmisión de datos. Recordemos que la máquina tiene una extensión lineal de 50 metros de largo, instalada en 2 pisos diferentes y manejando centenares de entradas y salidas. Con este escenario hay que realizar un control centralizado en un solo punto y que sea de una alta confiabilidad. Las alternativas de transmisión son muchísimas, pero el cliente, por motivos de confianza y estandarización siempre solicitó sólo una: PROFIBUS. El presente capítulo muestra una pequeña reseña histórica y luego una breve descripción de este profundísimo tema [6], el cual es de vital importancia para el desarrollo de la modernización, pues es aquí donde se sustentan todos los equipos instalados, y son las características distintivas de PROFIBUS las que establecerán los alcances del proyecto.

5.1.- ¿Por qué usar sistemas de transmisión de datos?

Después de la revolución industrial los procesos productivos fueron volviéndose cada vez más complejos, hasta que llegó un punto en el cual éstos ya no podían ser controlados y gestionados de forma manual y fue necesario recurrir a un procesador digital.

Durante la década de 1960 se comenzaron a comercializar los primeros autómatas programables para realizar el control de una máquina o de un proceso productivo simple. En aquel entonces la mayoría de las variables utilizadas eran del tipo todo/nada (*on/off*) y eran además, conectadas de forma independiente unas de otras. Con el paso del tiempo, se elevó la complejidad de los procesos industriales lo cual obligó a utilizar un mayor número de máquinas. Además, los fabricantes de estas máquinas no siempre son los mismos y, en consecuencia, el autómata tampoco lo es, lo que dificulta el diálogo entre ellos, generando las llamadas “Islas de Automatización” y provocando de esta manera serios problemas de gestión en el proceso productivo.

Esta situación motivó interés por conferir a los sistemas electrónicos la capacidad de transmitir y recibir información entre ellos y entre su entorno, dando origen a las “Comunicaciones Industriales” (año 1970).

Por otro lado, las altas exigencias competitivas demandadas en una economía vertiginosa y acelerada obligan a las organizaciones a desarrollar ventajas no solo técnicas en sus productos, sino que también es imperativo poseer elaborados planes de producción y una alta eficiencia en el uso, manejo y gestión de los recursos materiales y humanos. De este problema se deduce la necesidad de integrar los procesos de producción (diseño, ingeniería y fabricación) con los de gestión de la empresa, dando origen a la fabricación integrada por computador (CIM, acrónimo de *Computer Integrated Manufacturing*), la cual forma parte de la estrategia de una empresa para integrar (en mayor o menor medida) todas las áreas, mediante la utilización adecuada de los computadores.

5.2.- Manufactura Integrada por Computador, CIM

Las áreas de la estrategia CIM son (en términos generales): ordenes de entrada, control de inventarios, planificación de necesidades de materiales, diseño del producto y del proceso, simulación, planificación de la fabricación, automatización de la producción, control de calidad, ensamblado automático y control de ventas. Las áreas anteriormente descritas dan origen a una estructura funcional descrita en los siguientes niveles organizacionales (ver figura 5.1).

5.2.1.- Nivel de Proceso: Es donde se encuentra la línea de producción propiamente tal, en este nivel se adquieren datos del proceso y se actúa sobre él. Es el campo de operaciones.

5.2.2.- Nivel de Máquinas: Es aquí donde se decide qué hacer con los datos obtenidos en el nivel anterior, para luego enviar órdenes a los actuadores. En este nivel se encuentran los controladores, motores, etc. También se debe informar al nivel superior las decisiones tomadas.

5.2.3.- Nivel de célula: Se realiza la coordinación del nivel inferior por áreas de fabricación para satisfacer las necesidades del nivel superior (Fábrica), ya sean de almacenamiento y transporte, fabricación, ensamblado, control de calidad, etc.

5.2.4.- Nivel de Fábrica: Se realiza la administración de la producción, el secuenciamiento de tareas, la administración de recursos, planificación, localización, distribución, diseños, transporte, mantenimiento, control de calidad, entre otros.

5.2.5.- Nivel de Empresa: Este nivel aplica a empresas que necesitan gestionar e integrar diferentes fábricas, y así, los niveles inferiores. Considera aspectos estratégicos y de macro gestión.

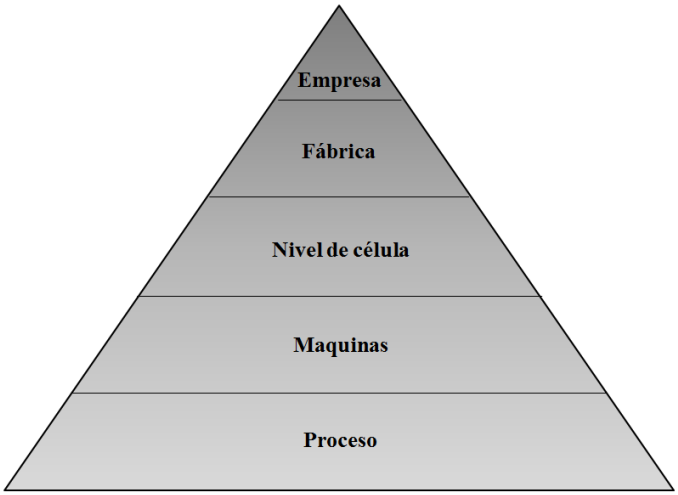


Figura 5.1: Pirámide CIM

Sin embargo, cuando se está presente en una industria real las divisiones de ésta no obedecen al modelo previamente descrito, sino que más bien obedecen a una estructura práctica definida por la implementación física de los equipos, maquinarias y oficinas. Dando origen a una implementación que tiene su análogo en la pirámide teórica.

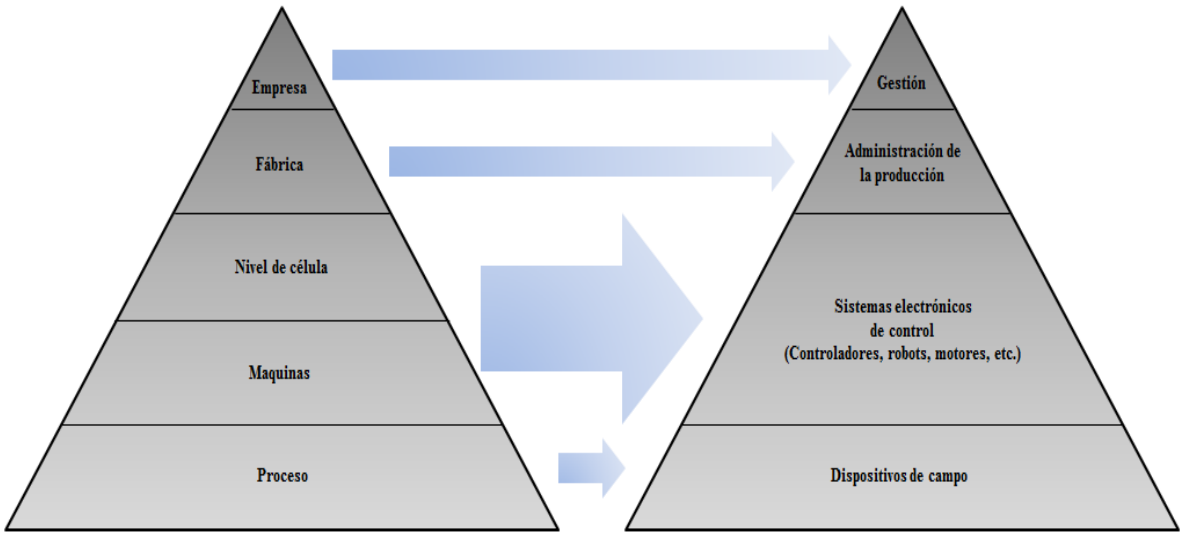


Figura 5.2: Pirámide CIM y su relación con una implementación real.

Los dispositivos de campo son los sensores y actuadores que interactúan directamente con el proceso productivo. Estos dispositivos de campo son leídos y comandados por los sistemas electrónicos de control y es de suma importancia que el sistema de transmisión de datos sea de alta confiabilidad para así asegurar un correcto desempeño de las tareas ordenadas por la Administración de la Producción, nivel en el cual recientemente se ha comenzado a utilizar herramientas informáticas que tienen por objetivo contribuir a ejecutar eficientemente el plan de fabricación. Estas herramientas cada vez se vuelven más populares y requieren un buen sistema de comunicación con el nivel inferior.

Vemos entonces, que los procesos productivos elevan permanentemente sus requerimientos tanto en capacidad como en dificultad y además se incrementan los niveles que requieren diálogo entre sí, ascendiendo considerablemente la cantidad de información a transmitir. En consecuencia, y por todo lo anteriormente expuesto, se llega a la conclusión de que existe la imperante necesidad de poseer un sistema de transmisión de datos que permita satisfacer cabalmente las necesidades de cada uno de los niveles de la pirámide CIM y entre los diferentes niveles para lograr la integración de los procesos mediante la información.

5.3.- Comunicaciones Industriales

Es el área de la tecnología que estudia la transmisión de información entre circuitos y sistemas electrónicos utilizados para llevar a cabo tareas de control y gestión del ciclo de vida de los productos industriales. Las comunicaciones industriales deben, por lo tanto, resolver la problemática de la transferencia de información entre los equipos de control del mismo nivel y entre los correspondientes a los niveles contiguos de la pirámide CIM.

En la década de 1980, las comunicaciones industriales comenzaron a realizarse mediante conexiones punto a punto, pero conforme fueron creciendo las industrias, también fue creciendo la complejidad en los procesos, la cantidad de datos transmitidos y los niveles que requieren comunicación, dando lugar a múltiples canales de comunicación, volviéndose engorrosos los sistemas. Por ello, para llevar a cabo dicha transferencia de información de la manera más eficaz posible, los equipos deben compartir canales de comunicación, lo cual incentivó el desarrollo de redes de comunicaciones que posean las características adecuadas.

El universo de las comunicaciones industriales es enorme y su explicación detallada escapa al objetivo de la presente memoria de título, sólo basta saber que se clasifican en múltiples clases diferentes y que su evolución a través de los años ha ido de la mano con la tecnología. A continuación, se explica un tipo particular de comunicación industrial: los buses de campo de la categoría PROFIBUS.

5.4.- PROFIBUS

PROFIBUS, que es la abreviatura de "Bus de Campo de Proceso" en inglés (*Process Field Bus*) es un conjunto de buses de campo diseñado en el año 1987 en Alemania por 13 empresas y 15 institutos. En el año 1991, PROFIBUS se convirtió en norma alemana y, posteriormente, en norma europea para así garantizar la independencia de PROFIBUS con respecto a los fabricantes de sistemas electrónicos de control, así como la interoperabilidad de los sistemas fabricados por diferentes empresas.

El objetivo principal de PROFIBUS es proporcionar una solución adecuada, mediante una única norma, para los requerimientos comunicacionales en los niveles de proceso, máquina y célula (e incluso para el nivel de fábrica).

Actualmente existen tres miembros que componen lo que se conoce como PROFIBUS, los cuales son: PROFIBUS-DP, PROFIBUS-PA y PROFIBUS-FMS, cada uno de los cuales satisface necesidades específicas de los diferentes niveles de la pirámide productiva. El presente documento se enfoca principalmente en PROFIBUS-DP, pues es el bus de campo escogido por el cliente (Nexans S.A.) debido a su alta velocidad, bajo costo y al campo de aplicación.

- PROFIBUS-DP. Las letras "DP" vienen de "Periferia Descentralizada" (*Decentralised Periphery* en inglés). Tiene un protocolo optimizado para realizar las transferencias de información en el nivel de proceso de la pirámide, el cual requiere un bajo costo y buena velocidad. Su filosofía fue inicialmente concebida para comunicar un sistema electrónico de control (generalmente un PLC) con la denominada "Periferia Descentralizada", constituida por los sensores y actuadores (dispositivos de campo) que se deben conectar a él.

- PROFIBUS-PA. Automatización de Procesos (del inglés *Process Automation*). Está optimizado para la industria de los procesos continuos (reguladores de caudal, temperatura, presión, válvulas proporcionales, etc.).
  Está pensado para ser utilizado en zonas de seguridad intrínseca, por ello tiene menos prestaciones que PROFIBUS-DP, pero garantiza una mayor confiabilidad al transmitir datos a velocidades menores y llevar la alimentación de los procesadores de comunicación a través de un único par de hilos mediante fuentes de alimentación especiales.
- PROFIBUS FMS. (*Fielbus Message Specification*). Especializado para transferir información en los niveles de célula e incluso de fábrica.

La presente red tiene conectado un maestro, que es un PLC, y 11 esclavos, entre ellos, paneles de operación, variadores de frecuencia y sensores de campo. Pudiendo conectarse en el futuro hasta 32 nodos sin repetidor.

Cada uno de los anteriores nodos implica diferentes necesidades de comunicación, que dan lugar a tres tipos de procesadores de comunicaciones, DPM1 (acrónimo de *DP Master class 1*), DPM2 (acrónimo de *DP Master class 2*) y DPS (acrónimo de *DP Slave*). En este proyecto solo se usa DPM1 y DPS.

El procesador principal de comunicaciones DPM1 está asociado a un sistema electrónico de control y realiza el intercambio de información (estado de variables de entrada y salida digitales y análogas, valores de consigna, parámetros de configuración que proporcionan información de su estado interno, variables de diagnóstico de funcionamiento, etc.) con cada uno de los dispositivos de campo (instrumentos, reguladores de variables, etc.) a través de un procesador subordinado de comunicaciones DPS.

En el presente proyecto de modernización, la red PROFIBUS-DP está configurada en un entorno de SIEMENS llamado TIA PORTAL, por requerimiento explícito del cliente, además, esto es particularmente ventajosos pues la mayoría de los objetos tecnológicos son de esta marca.

El maestro PROFIBUS-DP asociado a este sistema de control realiza cíclicamente la lectura de información de entrada y la actualización de los datos de salida de los dispositivos de

campo. El tiempo de ciclo de este proceso de lectura ha de ser menor que el tiempo de ciclo del programa ejecutado en el sistema electrónico de control de proceso (PLC), cuyo valor en este proyecto es en promedio de 6,8 [ms] (típicamente en la mayoría de las aplicaciones es del orden de los 10 [ms], varía con las interrupciones acíclicas, por ejemplo).

5.4.1.- Capa física

La capa física (PHY por *physical layer*) establece las características de las señales y de los elementos asociados con ellas que permiten la implementación del canal de comunicaciones y el método de codificación de las señales.

5.4.1.1.- Medio de Transmisión

La transmisión de datos se realiza mediante señales eléctricas a través de un cable de dos hilos trenzado, doble apantallado y con recubrimiento mecánico de color morado [7], de acuerdo con la norma EIA RS-485. También existe la posibilidad de realizar esta transmisión mediante señales ópticas a través de fibra óptica.

La topología utilizada es un bus lineal con resistencias terminales en ambos extremos, para minimizar las reflexiones.

En la norma EIA RS-485, la información se representa mediante la polaridad de la tensión entre los dos hilos del cable de conexión (señales diferenciales). Estos dos canales independientes, A y B, transmiten niveles de voltaje iguales, pero con polaridades opuestas. Por este motivo es de suma importancia que la red esté conectada con la polaridad correcta. Aunque las señales estén opuestas, no sirven de retorno entre ellas, por consiguiente no existe un circuito de corriente. Cada señal tiene su retorno por tierra o por un tercer conductor de retorno, aunque la señal deba leerse por el receptor de manera diferencial sin referirse a la tierra o al conductor de retorno. El conductor a tierra de este sistema de comunicación es la gran ventaja de la señal diferencial, pues la señal enviada transita con las fases invertidas en los conductores, mientras que el ruido transita con la misma fase. En los terminales de entrada del amplificador diferencial, la señal de comunicación de la red PROFIBUS (la información) llega en modo diferencial y el ruido en modo común, rechazándolo. Por lo tanto, la mayoría del ruido inducido en el cable, en general de origen electromagnético, será descartado.

Esto hace que la velocidad de transmisión pueda ser elevada, incluso en ambientes con un alto nivel de interferencias electromagnéticas.

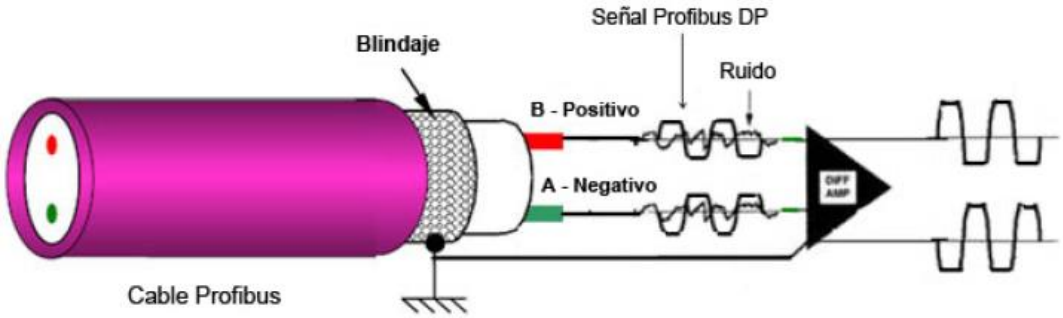


Figura 5.3: Cable PROFIBUS

La velocidad de transmisión predeterminada es de 1,5 Mbits/segundo. Sin embargo, puede estar comprendida entre 9,6 kbits/segundo y 12 Mbits/segundo, en función de la distancia máxima existente entre los procesadores de comunicación y la capacidad de los mismos (muchos de ellos sólo permiten trabajar hasta 1,5Mbits/s). Esta velocidad es única en todo el sistema, el maestro la establece y usualmente el resto de los procesadores de comunicaciones la detecta y se auto configura, aunque en algunos esclavos hay que configurarla, en general aquellos que podrían se maestros.

5.4.1.2.- Resistencia terminal

Se trata de una impedancia que se agrega a la red con la función de armonizar la impedancia de la red. Mientras mayor sea la longitud de la red, más grande puede ser la distorsión de las señales, esta resistencia elimina errores de comunicación causados por la distorsión. Si dicha resistencia no es instalada, el par trenzado actuará como antena, propiciando la distorsión de señales y aumentando la propensión a ruidos. La resistencia característica es el valor de carga que, instalada en el final de la línea, no refleja energía alguna, en otras palabras, es el valor de carga que posibilita un coeficiente de reflexión cero, o aún, una relación de ondas estacionarias igual a uno.

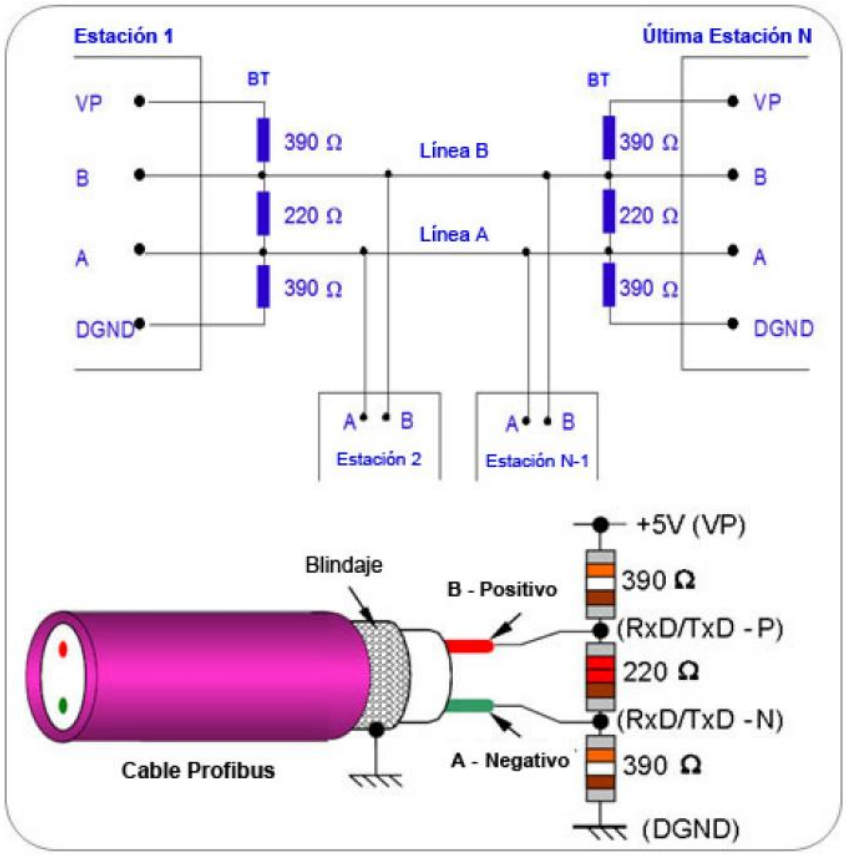


Figura 5.4: Esquema de red de conexión del bus para una línea tipo A según EN 50170

5.4.1.3.- Velocidad de comunicación versus distancia

La distancia máxima alcanzable en un bus lineal (sin repetidores) es de 1200 metros a 9.6 kbits/segundo (si se baja la velocidad se puede llegar a 100 metros a 12 Mbits/segundo). La línea completa de la máquina CV11 es menor a 100 metros, por lo cual se encuentra holgadamente dentro de los márgenes recomendados, La velocidad de comunicación se establece en 1,5[Mbit/s].

Figura 5.5: Velocidad de comunicación de la red PROFIBUS

El número de estaciones (nodos) presentes en esta red es de 11 esclavos y 1 maestro, motivo por el cual no es necesario utilizar repetidores.

5.4.1.4.- Conector

La norma recomienda el empleo del conector sub-D de nueve terminales. Todos los nodos están conectados mediante un conector PROFIBUS SIEMENS.

Tabla 5.1: Asignación de pines en la interfaz del bus de campo

Pin	PROFIBUS-DP	Denominacion
1	n.c.	no conectado
2	n.c.	no conectado
3	**Profibus D+**	**Recibir/Tansmitir datos (POSITIVO)**
4	RTS	Señal de control repetidor (TTL)
5	Señal comun	Potencial de referencia de datos (M5V)
6	VP	Positivo de la alimentacion (5V)
7	n.c.	no conectado
8	**Profibus D-**	**Recibir/Tansmitir datos (NEGATIVO)**
9	n.c.	no conectado
Cuerpo	Apantallado	Conexión a tierra funcional

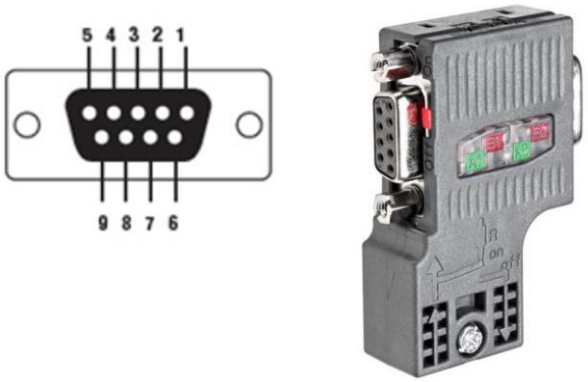


Figura 5.6: Asignación de terminales del conector DB9 y apariencia física.

5.4.2.- Método de codificación de las señales

La codificación utilizada para la transmisión de los bits de información es la denominada NRZ (acrónimo de *Non return to zero*), utilizada en el modo de sincronización asíncrono. En ella, el bit está determinado por el nivel “0” ó “1” de la señal durante un tiempo que coincide con el periodo del reloj utilizado para realizar la comunicación.

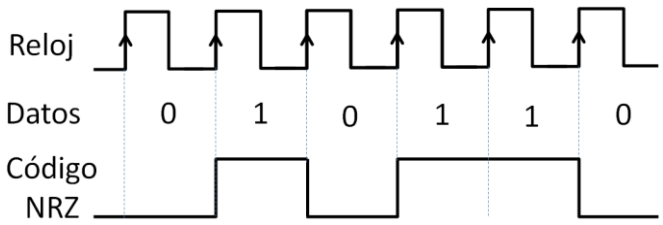


Figura 5.7: Transmisión de bits mediante *"Non Return to Zero"*

5.4.3.- Capa de enlace de datos

Normalmente conocida simplemente como FDL (*Field Data link layer*), se divide en dos subcapas: control de acceso al medio y control lógico.

5.4.3.1.- Control de acceso al medio. PROFIBUS usa control del tipo maestro/esclavo y los procesadores de comunicaciones pueden ser maestros o esclavos, en donde los maestros pueden enviar y solicitar datos, por iniciativa propia, a las estaciones restantes, y los esclavos sólo pueden enviar datos a través de la red cuando lo autoriza un maestro activo.

Los procesadores de comunicaciones principales (del tipo maestro) habitualmente se conectan a sistemas electrónicos que tienen cierto nivel de capacidad de procesar información (corrientemente se trata de PLC, CNC, robots, etc.). Por otro lado, tanto los dispositivos de campo sencillos (sensores y actuadores) como otros más "inteligentes" (variadores de frecuencia, codificadores de posición, módulos de control de motores, etc.,) se conectan mediante procesadores subordinados. En contados casos, se usan procesadores de comunicaciones que pueden configurarse para ser maestro o esclavo.

PROFIBUS permite la existencia de varios maestros en una red, para garantizar que sólo uno de ellos acceda al medio en un determinado instante, se utiliza un mecanismo de control de acceso al medio conocido como paso de testigo ("*token bus*") en donde cada maestro sólo puede enviar información cuando recibe el testigo, que es simplemente un mensaje, en el intervalo de tiempo que un maestro tenga el testigo, dicho maestro está activo como procesador principal. Luego debe pasar el testigo al maestro que tenga la dirección inmediatamente superior, hasta que el maestro con la dirección más alta reenvía el testigo a aquel que tenga la dirección más baja, formando lo que se conoce como un "Anillo lógico". Este mecanismo de paso de testigo posee muchísimas características que no serán

mencionadas en este documento, pues el proyecto sólo posee un maestro, por lo cual es irrelevante entrar en mayores detalles.

La capa de enlace FDL posee además otros parámetros que requieren ser configurados obligatoriamente al diseñar una red de comunicaciones PROFIBUS para que pueda operar con toda su funcionalidad.

- Dirección de los procesadores de comunicaciones. Abreviado como TS (por "*this station*" en inglés) es un parámetro específico de cada procesador de comunicaciones, ya sea maestro o esclavo y sirve para identificarlo y distinguirlo de los demás. Su valor está comprendido entre 0 y 126, y se reserva el valor 127 para mensajes de difusión a todos los procesadores de la red mediante difusión total ("*broadcast"*) o parcial ("*multicast*").

- Velocidad de transmisión. ("*Baudrate*") se mide en Kbits/segundo y su valor es único para toda la red, se configura en el maestro y en el caso de este proyecto es de 1500 [Kbits/seg]. Su valor puede estar comprendido entre 9.6 Kbits/s y 12000 Kbits/s. El tiempo necesario para transmitir un bit de información es el inverso de ésta velocidad.

Tabla 5.2: Longitud máxima de los segmentos PROFIBUS-DP según la velocidad de transmisión

Velocidad de transmisión en [Kbaud/s]	Longitud maxima del segmento en [m]
9,6; 19,2; 93,75	1200
187,5	1000
500	400
1500	200
3000 … 12000	100

- Redundancia del medio de comunicación. La redundancia del medio es un parámetro que se utiliza cuando se dispone de un medio de comunicación adicional.

- Intervalo de confirmación de recepción. T_{SL} por "*slot time*" es el intervalo de tiempo durante el cual el procesador principal activo espera que el procesador al que le envió un mensaje le confirme su recepción. Cuando se sobrepasa este tiempo, el maestro activo reintenta la transmisión del mensaje obedeciendo al parámetro "numero máximos de reintentos" ("*max retry limit*"). Su valor es el mismo para todos los maestros de la red y puede estar comprendido entre 1 y 67.5535 intervalos de bit ("*bit time*").

- Mínimo tiempo de retardo. “mín T_{SDR}” (“*minimun station delay time*”) es el mínimo tiempo que debe esperar el procesador de comunicaciones destinatario de un mensaje para enviar la confirmación de recepción al procesador principal. Su valor es el mismo para todos los procesadores principales de la red y puede estar comprendido entre 1 y 65.535 intervalos de bit.

- Máximo tiempo de retardo. “max T_{SDR}” (“*máximum station delay time*”) es el máximo tiempo que debe esperar cada procesador de comunicaciones que emite un mensaje antes de enviar otro nuevo. Este parámetro debe ser igual en todos los procesadores de comunicaciones y su valor puede estar comprendido entre 1 y 65.535 intervalos de bit.

- Tiempo de espera de recepción. T_{QUI} (abreviatura de “*quiet time*”) es el tiempo que un procesador de comunicaciones debe esperar, tras enviar un mensaje, para desinhibir su circuito receptor. Su valor es el mismo para todos los procesadores de la red y puede estar comprendido entre 0 y 255 intervalos de bit.

- Tiempo de espera de transmisión. T_{SET} (“*setup time*”) es el mínimo tiempo que debe transcurrir entre la confirmación de la recepción de un mensaje y el envío de otro nuevo por parte del procesador de comunicaciones. Su valor es el mismo para todos los procesadores principales de la red y está comprendido entre 1 y 255 intervalos de bit.

- Tipo de procesador de comunicaciones. El tipo de procesador de comunicaciones (*“in ring desired”*) es una variable binaria que indica si es principal o subordinado. Este parámetro es específico de cada procesador de comunicaciones y su valor puede ser 0 o 1.

- Número máximo de reintentos. (*“max retry limit”*). Especifica el número máximo de veces que un procesador principal de comunicaciones vuelve a enviar un mensaje cuando no recibe la confirmación de recepción por parte del destinatario. Su valor es el mismo para todos los procesadores principales de comunicaciones y está comprendido entre 1 (valor recomendado) y 8.

Como vemos, la capa de enlace es sumamente compleja en términos funcionales, pues tiene numerosos parámetros para diseñar una red de comunicaciones, sin embargo, los parámetros mencionados previamente son solo algunos de ellos, existen muchísimos más y dependiendo de los requerimientos de diseño hay que especificar con cuidado algunos de ellos.

5.4.3.2- Control lógico

PROFIBUS-DP utiliza el modo de sincronización asíncrono, el emisor y el receptor poseen relojes independientes. Debido a esto el procesador de comunicaciones que lo implementa se lo denomina UART (*"universal asychronous receiver transmitter"*).

La unidad mínima de información que puede ser transmitida se denomina carácter (ver figura 5.7), está formado por 1 bit de inicio (ST, *"start bit"*) que tiene nivel bajo, 8 bits de datos (1 Byte), 1 de paridad y 1 bit de fin de transmisión SP (*"stop bit"*) que tiene nivel alto, dando en total 11 bits por carácter.

Figura 5.8: Estructura de la unidad mínima de información en PROFIBUS: Carácter

Los caracteres se agrupan para formar paquetes de información, denominados mensajes, que comienzan con un octeto de inicio SD (*"start delimiter"*) y acaban con un octeto de finalización ED (*"end delimiter"*). Todos los mensajes poseen los siguientes campos:

- Dirección del destinatario DA (*"destination address"*).

- Dirección del emisor SA (*"source address"*).

- Carácter de control del mensaje FC (*"frame control"*).

- Estructura de comprobación del mensaje FCS (*"frame check structure"*).

Sin embargo, no todos los mensajes son iguales, existen tres tipos de mensajes, que se diferencian por el valor del octeto SD:

5.4.3.2.1- Mensaje sin datos. Es el mensaje más corto posible, porque carece de campo reservado para envió de datos.

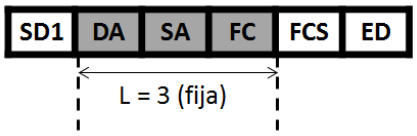


Figura 5.9: Estructura de un mensaje sin datos

5.4.3.2.2- Mensaje con datos de longitud fija. Este tipo de mensaje permite el envío de 8 caracteres de datos entre el carácter FC y el FCS.

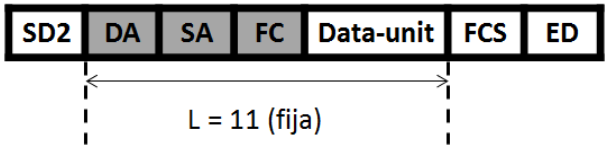


Figura 5.10: Estructura de un mensaje con datos de longitud fija

5.4.3.2.3- Mensaje con datos de longitud variable. Este tipo de mensaje se caracteriza por poseer los campos LE y LEr (*"length byte"*) con los que se especifica el número de caracteres de datos incluidos en el mensaje que puede variar entre 1 y 246 caracteres.

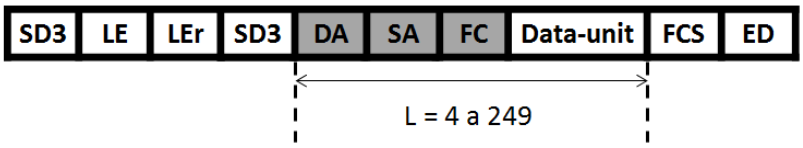


Figura 5.11: Estructura de un mensaje con datos de longitud variable

Entre dos mensajes consecutivos, es necesario respetar un tiempo de espera, definido en la norma como *"idle time"*. Dicho tiempo se caracteriza por la presencia de un "1" lógico en la red de comunicaciones, y como mínimo ha de durar 3 caracteres, que equivalen a 11 bits.

5.4.3.3- Servicios de transferencia de datos

Además de controlar el acceso al medio y el tiempo de rotación del testigo, la capa FDL proporciona un conjunto de servicios de transferencia de datos que son utilizados por la capa de aplicación. Estos servicios de transferencia de datos pueden ser acíclicos (no periódicos) o cíclicos (periódicos).

Servicios acíclicos

- Servicio SDA (*"send data with acknowledge"*). Es un servicio básico en donde el maestro envía un mensaje a otro procesador de comunicaciones y debe recibir inmediatamente la

confirmación, que puede ir acompañada de un conjunto de datos adicionales que este último desea enviar al maestro.

- Servicio SDN (*"send data with no acknowledge"*). Se utiliza principalmente en mensajes de difusión que un maestro envía a varios o a todos los demás procesadores de comunicaciones de la red, razón por la cual no recibe confirmación.

- Servicio SRD (*"send and request data"*). Lo utiliza un maestro PROFIBUS para enviar y solicitar datos de un esclavo.

Servicios cíclicos.

Es el servicio más utilizado en el presente proyecto, pues se utiliza cuando se debe transmitir información periódicamente, ya que en cada ciclo de entrada/salida debe recibir información de los distintos sensores y enviar información a los actuadores.

- Servicio CSRD (*"cyclic send and request data with reply"*). Este servicio proporciona la posibilidad de almacenar una lista de consulta (*"poll list"*) en el maestro y utilizar el servicio acíclico para llevar a cabo una consulta cíclica de los procesadores incluidos en la misma, Esto hace que el sistema electrónico de control quede descargado de las tareas de comunicación cíclica y que el proceso de comunicación se realice de forma más eficiente.

5.4.4.- Funcionamiento de los procesadores de comunicaciones

5.4.4.1.- Procesador subordinado de comunicaciones (esclavo). Para realizar todas las tareas descritas anteriormente, cada esclavo debe seguir un diagrama de estados como se indica en la figura 5.11.

Después del encendido o de una orden de inicialización los esclavos pasan a una etapa de inicialización fuera de línea, en la que realizan una autocomprobación interna y a través de los recursos de configuración disponibles reciben la información correspondiente a los distintos parámetros de la comunicación para conectarse al medio de transmisión, luego quedan a la espera de ordenes (*"passive idle"*), en donde escuchan el canal de comunicaciones.

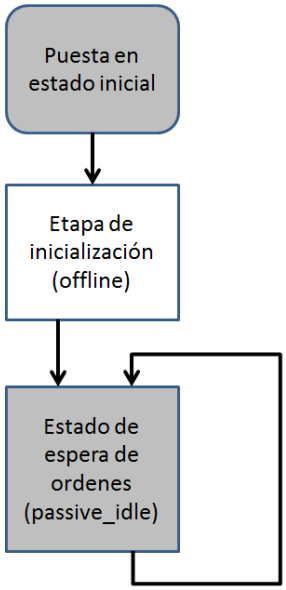


Figura 5.12: Diagrama de estados de un esclavo PROFIBUS

5.4.4.2.- Procesador principal de comunicaciones (maestro). El diagrama de estados de un procesador principal de comunicaciones describe cabalmente las tareas de traspaso, espera, uso y petición de testigo (entre muchas otras [6]), sin embargo, estas labores no son relevantes en este caso de estudio, pues este proyecto contempla sólo un maestro PROFIBUS, por lo tanto no existe rotación de testigo, en consecuencia no hay ningún anillo lógico y el maestro (PLC SIEMENS) siempre posee el testigo. En este escenario existen sólo tres estados:

- Estado de paro (*"stop"*). No existe flujo de información entre el maestro y los esclavos.

- Estado inicial ("*clear*"). El maestro lee la información de las entradas de los esclavos y mantiene las salidas en el estado predeterminado en la fase de configuración, que es conocido como estado seguro ante fallos (generalmente un cero lógico).

- Estado operativo (*"operate"*). Es aquí donde se transfieren todos los datos y se realiza la comunicación cíclica, en la que se recibe el valor de las variables de entrada y transmiten el nivel que deben tener las variables de salida. Asimismo, el maestro envía de forma cíclica información de su propio estado a todos los esclavos a su cargo.

La transmisión de datos entre el maestro y los esclavos se divide, a su vez, en tres fases: parametrización, configuración y el intercambio de datos. Durante las fases de configuración y parametrización, cada subordinado compara su configuración real con la que fue configurada en el principal. Solo se incluye de manera exitosa a un esclavo, durante la transferencia de datos, si el tipo de dispositivo, el formato y la especificación de la información, así como el número de entradas y salidas corresponden a la configuración programada.

Además de la transferencia de datos relacionados con cada esclavo, el maestro puede enviar órdenes de control de manera específica a un subordinado, a un grupo o a todos ellos de forma simultánea. En este grupo se encuentran funciones que permiten la utilización de modos de sincronismo y congelación para sincronizar eventos producidos en los procesadores subordinados.

Los esclavos comienzan el modo de sincronismo para las salidas cuando reciben la orden de sincronismo (*"sync"*) enviada por el maestro. En ese instante, mantienen fijas en su estado actual las salidas de todos los módulos de salida. En las transferencias de datos posteriores, los datos de salida se almacenan en los procesadores subordinados, pero los estados de las salidas permanecen inalterados hasta que se recibe una nueva orden de sincronismo, instante en el que las salidas se ponen en los valores establecidos en la última transferencia de información. Este modo de funcionamiento puede ser anulado mediante la orden de anulación de la sincronización *("unsync"*).

De forma similar, una orden de congelación (*"freeze"*) hace que los procesadores subordinados direccionados asuman este modo de operación síncrona en el que el estado de las entradas se mantiene fija en el valor que tienen en el instante en el que la reciben. Los datos de entrada no se actualizan hasta que el maestro envía una nueva orden de congelación. Este modo de funcionamiento puede ser anulado mediante la orden de descongelación (*"unfreeze"*).

En lo que respecta a la seguridad y fiabilidad del sistema, los maestros clase 1 (DPM1) controlan, de forma permanente, la transmisión cíclica de datos mediante un temporizador denominado temporizador de control de datos (*"data control timer"*), cuya salida se activa cuando la transmisión de datos no se produce durante el intervalo de tiempo predeterminado. Si en ese instante está activada la variable de reacción automática ante la presencia de un

error (*"auto clear"*), el sistema principal abandona el estado operativo, pone las salidas de todos los módulos en el estado seguro y pasa al estado inicial (*"clear"*), en caso contrario el maestro permanece en estado operativo (*"operate"*) y ha de ser el operador o el programa de aplicación del sistema de control los que establezcan la forma en que debe reaccionar el sistema.

Los esclavos deben disponer, por su parte, de un circuito de vigilancia (*"watchdog"*) encargado de detectar los fallos que se produzcan en su maestro y de tomar las decisiones oportunas. En general, cuando un procesador subordinado de comunicaciones no recibe información procedente del maestro durante un periodo de tiempo predeterminado, pone en el estado seguro, automáticamente y de forma autónoma, las salidas de los módulos conectados a él.

Las características principales de cada procesador subordinado de comunicaciones y de cada procesador principal de comunicaciones tienen que ser documentadas por el fabricante en forma de una hoja de datos y un archivo de base de datos, denominado GSD (acrónimo del alemán *"device data base"*), cuya estructura, contenido y codificación están normalizados. Esto permite configurar cualquier sistema de control distribuido basado en PROFIBUS, de una manera sencilla, mediante los programas de configuración puestos a disposición del diseñador por el fabricante. La organización internacional de usuarios (*"profibus user organization"*) establece y proporciona la información que debe aportar el fabricante de todo dispositivo certificado. En el presente proyecto, prácticamente todo el hardware es SIEMENS, a excepción de un periférico que pertenece a otro fabricante (el cuentametros), en este caso se utiliza el archivo GSD para realizar su configuración en la red. Más adelante se verá en detalle este tratamiento.

5.4.5.- Capa de aplicación de la red PROFIBUS-DP

La capa de aplicación utiliza los servicios proporcionados por las capas física y de enlace. La mayor parte de las transferencias de información entre el maestro y los esclavos se hacen de forma cíclica, aunque también existen funciones de comunicación acíclica que permiten el intercambio de mensajes de alarma, configuración, diagnóstico, entre otros.

Las funciones de diagnóstico permiten la rápida localización de fallos del sistema a través de la red se envían los mensajes de diagnóstico desde los esclavos hacia el maestro divididos en tres categorías:

- Mensajes de diagnóstico relacionados con los procesadores subordinados de comunicaciones. Son mensajes que hacen referencia al estado operativo general de los módulos asociados con los procesadores subordinados de comunicaciones, como, por ejemplo, exceso de temperatura, caída del voltaje de alimentación, etc.

- Mensajes de diagnóstico relacionados con módulos de interfaz. Indican un fallo en una determinada gama de módulos de entrada/salida asociados a un esclavo.

- Mensajes de diagnóstico relacionados con los canales. Indican errores producidos en un determinado canal de entrada/salida de un esclavo.

5.5.- Telegramas PROFIBUS para Accionamientos

Todo lo anteriormente explicado es sólo una escueta descripción del extenso tema que es PROFIBUS. A pesar de su breve extensión, es suficiente para sentar las bases sobre las cuales se fundamenta el proyecto. No obstante, todavía falta ahondar en cómo se configura específicamente la comunicación con cada uno de los equipos instalados, dado que PROFIBUS es una norma internacional todos los equipos deben seguirla al pie de la letra, pero en la práctica esto no es tan sencillo. Para configurar la red el programador debe utilizar un entorno de trabajo y declararle al maestro qué esclavos se van a instalar, cuáles son sus direcciones y que índices van a tener las entradas y salidas. Esto es suficiente para los módulos remotos de entrada y salida que son de la misma marca que el PLC, pero cuando se trata de accionamientos de velocidad el tratamiento es un poco más complejo porque la conectividad PROFIBUS es un opcional. En los modelos *"Micromaster"* debe instalarse un módulo con una tarjeta adicional y en los modelos *"Sinamics"* se debe utilizar la tarjeta de control que posee esta funcionalidad. La figura 5.12 muestra las características de comunicación PROFIBUS de los accionamientos.

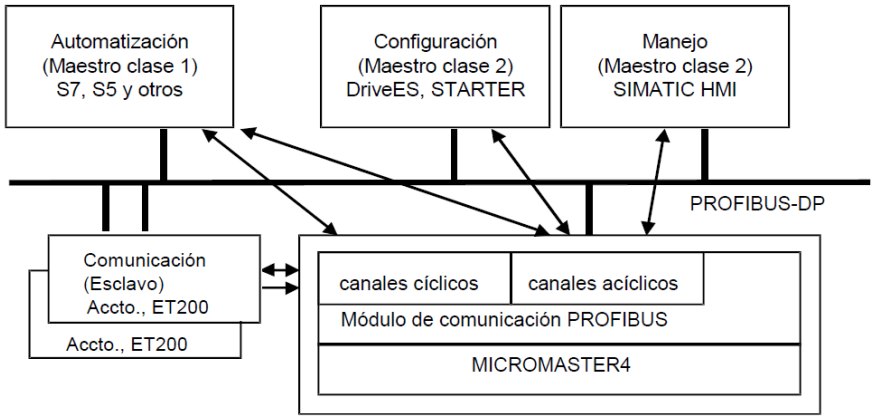


Figura 5.13: Canales de datos PROFIBUS DP del MICROMASTER 4

5.5.1.- Estructura de datos

El control del accionamiento se produce por el canal cíclico, en este canal el mensaje con el cual se realiza la comunicación con el maestro tiene una determinada estructura de datos útiles designada como **PPO** (*"Parameter/Process Data Object"*). Existen diferentes tipos de PPOs dependiendo de los requerimientos de la aplicación, una vez seleccionado el PPO éste debe configurarse tanto en el maestro como en el esclavo. La estructura de datos útiles en la comunicación de datos cíclica se subdivide en dos áreas, que se pueden transmitir en cada telegrama:

5.5.1.1.- Área de datos de proceso (**PZD**, *"Prozeßdaten"*). Consiste en palabras de mando y valores de consigna, así como información de estado y valores reales. Los datos de proceso siempre se transmiten, se procesan en el accionamiento con la prioridad más alta y en los intervalos de tiempo más cortos. Con los datos de proceso se controla el accionamiento dentro del sistema de automatización, p. ej. conectándolo o desconectándolo, fijando valores de consigna, etc.

5.5.1.2.- Área de parámetros (**PKW**, *"Parameter-Kennung-Wert"*). Para leer y/o escribir valores de parámetros (por ejemplo, lectura de fallos o de información de diagnóstico detallada), así como lectura de información sobre las características de cualquier parámetro, como p. ej. lectura de tiempos de rampa, etc. Con ayuda del área de parámetros el usuario tiene acceso opcional a todos los parámetros existentes en el convertidor mediante el sistema de bus.

Los telegramas de la transmisión cíclica de datos tienen por consiguiente la siguiente estructura básica:

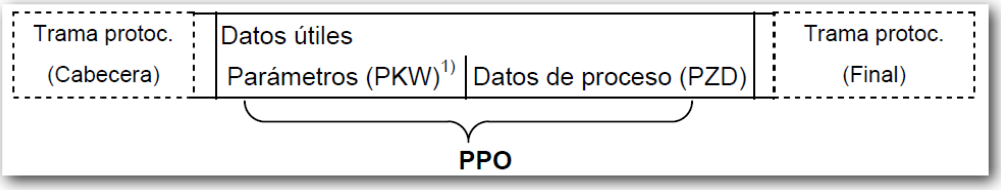


Figura 5.14: Estructura básica de un telegrama PPO

Según las exigencias de la tarea, PROFIdrive define cinco tipos básicos de PPO, ilustrados en la tabla 5.3

Tabla 5.3: Tipos de telegramas PPO

	PKW				PZD									
	PKE	IND	PWE		PZD1	PZD2	PZD3	PZD4	PZD5	PZD6	PZD7	PZD8	PZD9	PZD10
					STW1	HSW								
					ZSW1	HIW								
	Palabra 1	Palabra 2	Palabra 3	Palabra 4	Palabra 1	Palabra 2	Palabra 3	Palabra 4	Palabra 5	Palabra 6	Palabra 7	Palabra 8	Palabra 9	Palabra 10
PPO1														
PPO2														
PPO3														
PPO4														
PPO5														

En donde las siglas son:

PKW: Valor e identificador de parámetro
PZD: Datos de proceso
PKE: Identificador de parámetro
IND: Índice
PWE: Valor de parámetro
STW: Palabra de mando 1
ZSW: Palabra de estado 1
HSW: Valor de consigna principal
HIW: Valor real principal

Además de los PPOs previamente descritos también es posible una configuración libre.

5.5.2.- Palabra de mando

La primera palabra del PZD que el maestro le envía al accionamiento se denomina “Palabra de mando” (STW) y se compone conforme a la tabla 5.4

La palabra de mando es una serie de órdenes que el maestro le envía cíclicamente al accionamiento.

5.5.3.- Palabra de estado

A su vez, el accionamiento le responde al maestro con la “Palabra de estado”, detallada en la tabla 5.5.

Y finalmente es importante mencionar la segunda palabra, el “Valor de consigna principal” que es la velocidad a la cual se le ordena girar al convertidor y el “Valor real de consigna” que es la velocidad a la cual está girando realmente. Con esto se describen los telegramas estándar de la norma, para así poder configurar tanto maestros como esclavos, independiente del fabricante.

Tabla 5.4: Palabra de mando

bit	Valor	Significado	Observaciones
0	1 0	EIN (ON) AUS1 (OFF)	Pasa el convertidor al estado "listo para arrancar", El sentido de giro se debe definir en el bit 11. Parada, desaceleración según rampa, inhibición de pulsos a $f<f_{min}$
1	1 0	En servicio AUS2 (OFF2)	- Inhibición inmediata de pulsos, parada por inercia
2	1 0	En servicio AUS3 (OFF3)	- Parada rápida: parada con el tiemo de desaceleración más corto
3	1 0	Desbloquear servicio Bloquear servicio	Se habilitan la regulación e impulsos del convertidor Se deshabilitan la regulación e impulsos del convertidor
4	1 0	En servicio Bloquear generador de rampa	- La salida del generador de rampa se pone a 0 (frenada lo más rápida posible), el convertidor permanece en estado de servicio (EIN)
5	1 0	Desbloquear generador de rampa Parar generador de rampa	- Se congela el valor actual de consigna predeterminado por el generador de rampa.
6	1 0	Desbloquear valor de consigna Bloquear valor de consigna	Se habilita el valor seleccionado a la entrada del gen. rampa. Se pone a 0 el valor seleccionado a la entrada del gen. rampa.
7	1 0	Acusar fallo Sin significado	Se acusa el mensaje de fallo con un flanco positivo, pasando el convertidor a continuación al estado de "bloqueo de arranque"
8	1 0	Mando por impulsos a dchas.	
9	1 0	Mando por impulsos a izqdas.	
10	1 0	Valores de consigna válidos Valores de consigna no válidos	El maestro transmite valores de consigna válidos
11	1 0	Inversión del valor de consigna Sin inversión del valor de consigna	El motor gira a izquierdas con un valor de consigna positivo El motor gira a derechas con un valor de consigna positivo
12	-	-	No utilizado
13	1 0	Potenciómetro hacia arriba	
14	1 0	Potenciómetro hacia abajo	
15	1 0	Mando directo (BOP/AOP) Mando a distancia	Mando directo activado Mando a distancia activado

Tabla 5.5: Palabra de estado

bit	Valor	Significado	Observaciones
0	1 0	Listo para servicio No listo para servicio	Alimentación de corriente conectada, electrónica inicializada, pulsos bloqueados
1	1 0	Listo para arrancar No listo para arrancar	(véase palabra de mando bit 0) El convertidor está conectado (el comando EIN/ON está activo), no aparecen fallos, el convertidor puede arrancar con el comando „Desbloquear servicio". Causas: ningún comando EIN/ON, fallo, comando AUS2/OFF2 o AUS3/OFF3, bloqueo de arranque
2	1 0	Servicio desbloqueado Servicio bloqueado	Véase palabra de mando bit 3
3	1 0	Fallo -	Fallo véase parámetro de fallo r0947 etc. Mal funcionamiento del convertidor y por ello fuera de servicio, después de una eliminación con éxito del fallo y acuse pasa al estado de bloqueo de arranque.
4	1 0	- Comando AUS2/OFF2 activo	Véase palabra de mando bit 1
5	1 0	- Comando AUS3/OFF3 activo	Véase palabra de mando bit 2
6	1 0	Bloqueo de arranque Sin bloqueo de arranque	Reconexión sólo mediante AUS1 y a continuación EIN
7	1 0	Alarma (aviso) -	Aviso véase parámetro de alarmas r2110. El accionamiento permanece en servicio.
8	1 0	Sin desviación de valor real respecto a consigna Desviación de valor real respecto a consigna	Desviación entre el valor real y la consigna dentro del margen de tolerancia.
9	1 0	Control (remoto) solicitado Servicio in situ (en la unidad)	Se solicita al maestro que tome el control. El maestro no puede tomar el control, éste sólo es posible localmente
10	1 0	f alcanzada f no alcanzada (por debajo)	La frecuencia de salida del convertidor es mayor o igual que la frecuencia máxima
11	1 0	 Alarma: motor al límite de corriente	
12	1 0	 Freno del motor	Señal que puede utilizarse para gobernar un freno.
13	1 0	 Sobrecarga del motor	Sobrecarga según datos de placa del motor y convertidor
14	1 0	Giro a derechas Giro a izquierdas	
15	1 0	 Sobrecarga del convertidor	p. ej. corriente o temperatura

En el caso del presente proyecto, y basados en las demandas dinámicas del sistema, se escoge el PPO4, el cual está compuesto por 6 palabras PZD y sin PKW. Palabra de mando, referencia de velocidad y 4 palabras de control (CW). Luego cuando el esclavo responde, se tiene: palabra de estado, valor real de velocidad, corriente, torque, potencia y número de falla.

A continuación, se presenta el telegrama utilizado (recuerde que su estructura se basa en PPO4).

DRIVE210		
	Nombre	Tipo de datos
1	Static	
2	CW1	Struct
3	REF_VEL	Int
4	CW3	Int
5	CW4	Int
6	CW5	Int
7	CW6	Int
8	SW1	Struct
9	VELOCIDAD	Int
10	CORRIENTE	Int
11	TORQUE	Int
12	POTENCIA	Int
13	NFALLA	Int

Figura 5.15: Estructura del telegrama de los accionamientos

Obs: CW es "*Control Word*" (Palabra de mando) y SW es *"Status Word"* (Palabra de estado)

6.- COMPONENTES GENERALES DEL SISTEMA DE CONTROL

Como ya ha sido mencionado, el sistema de control es centralizado basado en un PLC utilizando protocolo PROFIBUS. Conocidos los fundamentos del sistema de transmisión de datos, es posible explicar cada uno de los elementos que componen la estación de trabajo llamada CV11. Antes de continuar con la explicación detallada se muestra una ilustración que resume algunos componentes fundamentales.

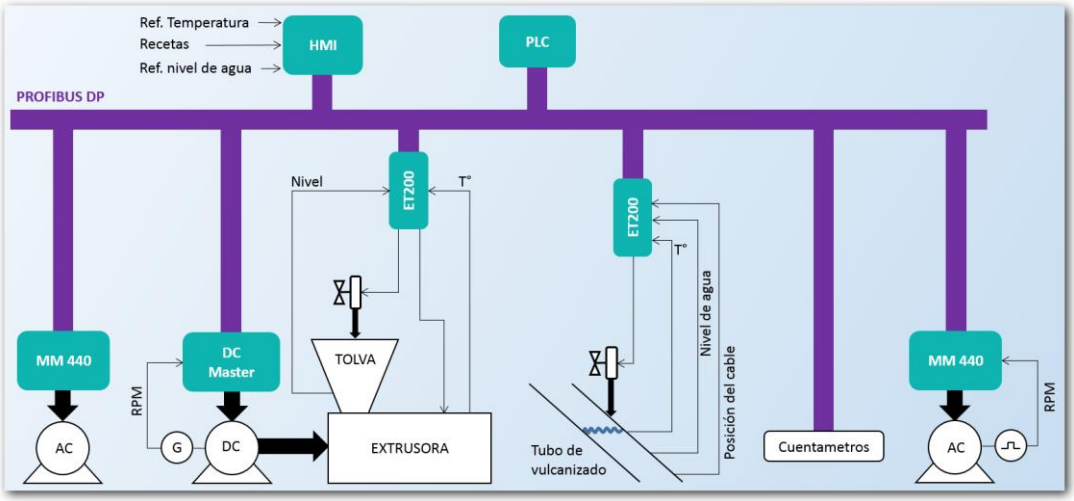


Figura 6.1: Esquemático resumen sistema CV11

6.1.- Controlador Lógico Programable (PLC)

Es el centro medular de la modernización, ejecuta todas las decisiones de control y maneja el bus de transmisión de datos. Para este proyecto se escoge un PLC SIEMENS modelo CPU315-2 PN/DP, el cual tiene una alta capacidad de almacenamiento y proceso (ver anexo A con características técnicas del PLC), además de dos puertos TCP/IP (ethernet) y un puerto PROFIBUS/MPI. No cuenta con entradas y salidas, sin embargo, está provisto de un bus de fondo que le permite expandirse hasta con 8 módulos.

El bus de fondo es una conexión que le permite al PLC añadir dispositivos, estos dispositivos permiten incrementar las funcionalidades del controlador y no requieren de un cableado extra, pues cada uno de ellos posee el mismo bus de fondo, dejando siempre disponible una conexión. Entre los dispositivos que se pueden conectar al bus de fondo encontramos

módulos de comunicación, de entradas y salidas, de termopares, entre muchos otros. Siemens ofrece estos módulos en una estructura estándar (dentro de la línea del producto) para así ofrecer ventajas a la hora de intercambiarlos ya sea por expansión o por reparación de fallas.

En el caso de estaciones con entradas/salidas (E/S) remotas, éstas no deben cablearse directamente al PLC, aquí debe utilizarse la periferia descentralizada para realizar la conexión, y los mismos módulos que se utilizan en el controlador realizan esta labor, solo es necesario utilizar una interfaz de periferia llamada ET200. Por lo tanto, los módulos de E/S pueden ir ya sea en el PLC o en un ET200

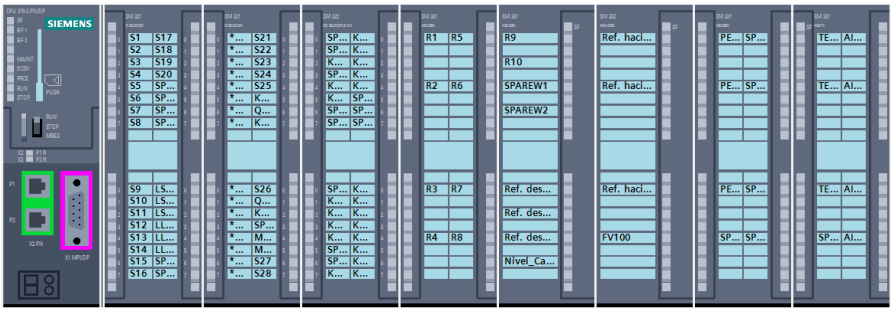


Figura 6.2: PLC y sus módulos de E/S

6.2.- Módulos de entradas y salidas

<u>6.2.1.- Módulo de entradas digitales.</u> Se trata de 32 entradas digitales en 24VDC, alimentadas en dos grupos de 16.

<u>6.2.2.- Módulo de salidas digitales.</u> 32 salidas digitales en 24VDC y 0.5 [A], en cuatro grupos de 8. Corriente de 4 [A] por grupo.

<u>6.2.3.- Módulo de entradas analógicas de 13 bits.</u> Posee 8 entradas analógicas con resolución de 13 bits, precisión aproximada de 0.5%, configurable para voltaje, corriente, resistencia y termo resistencias. Cada uno de los canales puede ser configurado independientemente para ser trabajado según tipo de medición y según el rango, la figura 6.3 muestra las diferentes alternativas para tipo de medición.

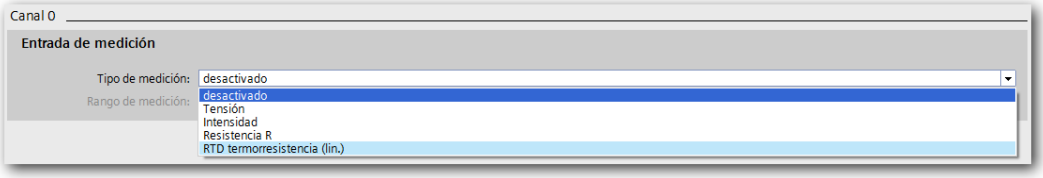


Figura 6.3: Diferentes alternativas de medición disponibles para una entrada analógica

Y en cada uno de estos tipos, tenemos diferentes rangos, presentados a continuación:

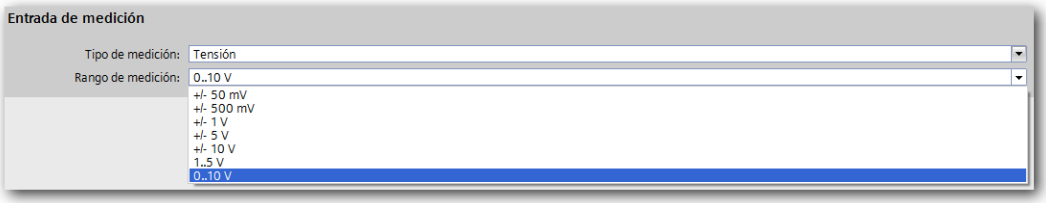


Figura 6.4: Rangos de medición disponibles para lectura de voltaje

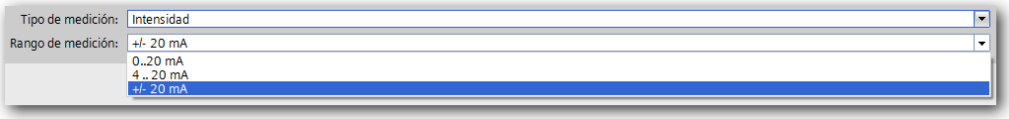


Figura 6.5: Rangos de medición disponibles para lectura de corriente

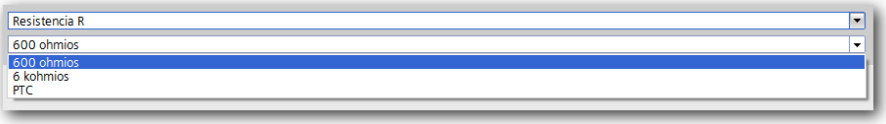


Figura 6.6: Rangos de medición disponibles para lectura de resistencia

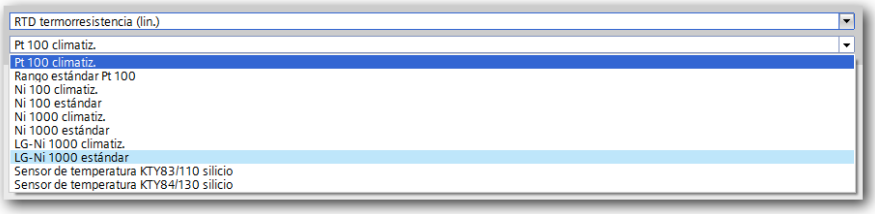


Figura 6.7: Rangos de medición disponibles para lectura de termo resistencia

<u>6.2.4.- Módulo de entradas analógicas de 12 bits.</u> Es muy parecido al módulo anterior, pero con dos grandes diferencias: precio y precisión. Posee 8 entradas, pero con menor resolución,

lo cual va en desmedro de la precisión: 1% app. Los canales están agrupados de a dos, por lo cual la configuración de cada par de entradas debe ser idéntica, la figura 6.8 muestra las diferentes alternativas posibles para tipo de medición.

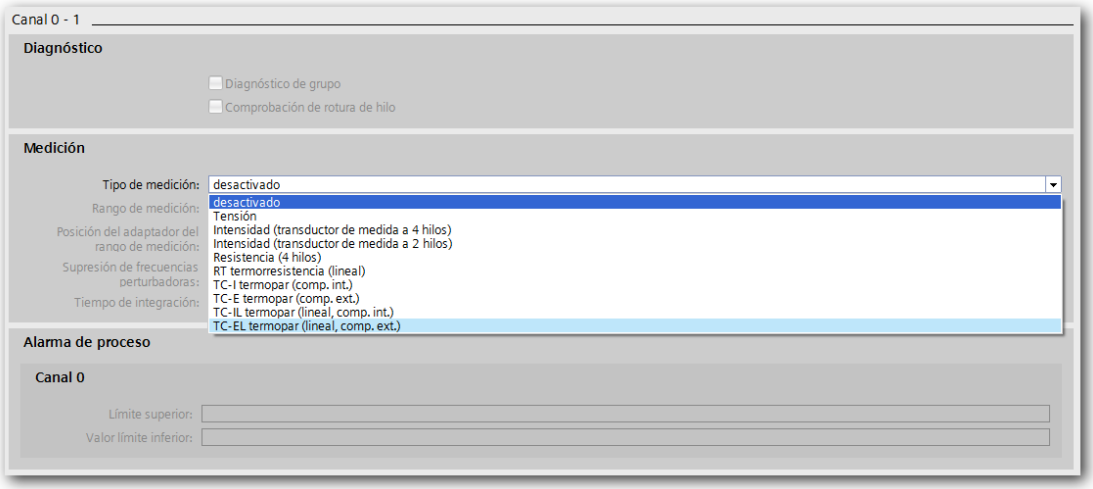


Figura 6.8: Diferentes alternativas de medición disponibles para una entrada analógica

Y, nuevamente, en cada uno de estos tipos, tenemos diferentes rangos, presentados a continuación:

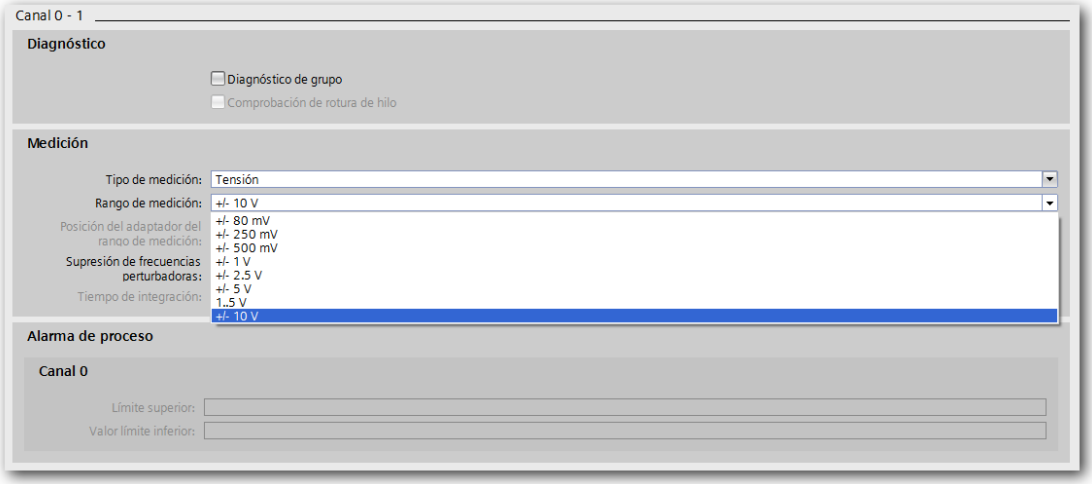


Figura 6.9: Rangos de medición disponibles para lectura de voltaje

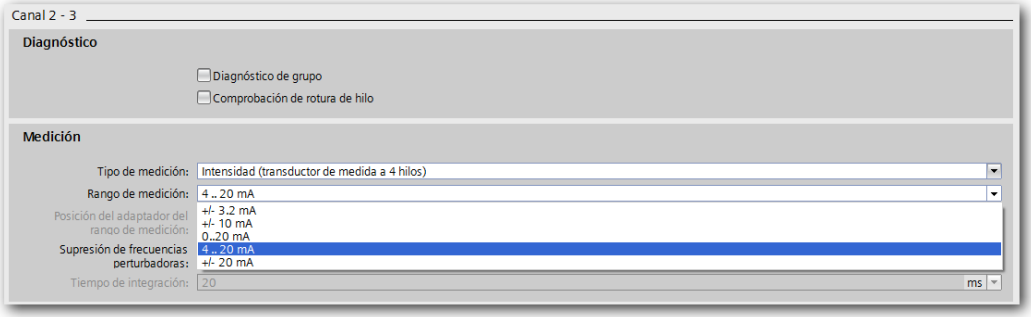


Figura 6.10: Rangos de medición disponibles para lectura de corriente

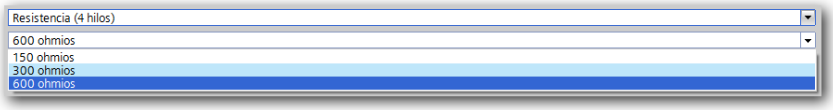


Figura 6.11: Rangos de medición disponibles para lectura de resistencia

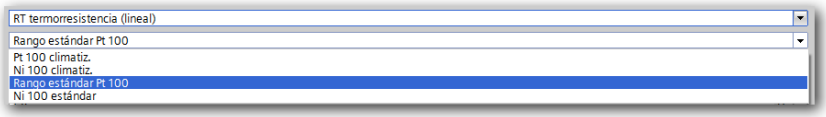


Figura 6.12: Rangos de medición disponibles para lectura de termo resistencia

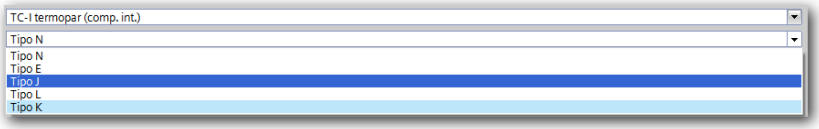


Figura 6.13: Rangos de medición disponibles para lectura de termopar

<u>6.2.5.- Módulo de salidas analógicas de 12 bits</u>. 4 salidas analógicas en tensión y/o corriente, resolución de 12 bits y precisión de 0.6% aproximadamente. En tensión se puede configurar en 0 – 10[V], 1 – 5[V] y +/- 10[V] y en corriente puede ser en 0 – 20[mA], 4 – 20[mA] y +/- 20[mA]. También es capaz de aplicar diferentes alternativas de reacción frente a una detención del PLC, ilustradas la figura 6.14.

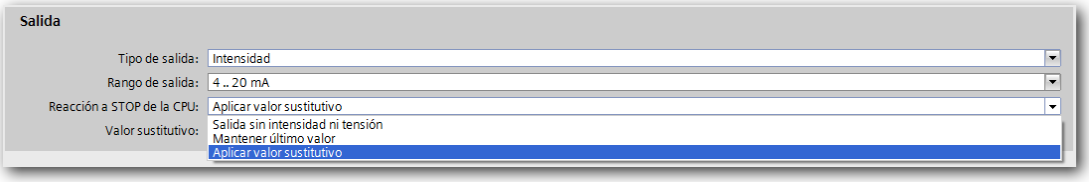


Figura 6.14: Alternativas de configuración de la salida analógica en corriente

<u>6.2.6.- Módulo de entradas analógicas para termopares</u>. Este es un módulo dedicado para medición de temperatura (fundamental en este proyecto). Posee 8 entradas con 16 bits de resolución, lo que se traduce en una precisión de 0.1 [°C], las entradas se configuran pareadas y posee diversas configuraciones parametrizables.

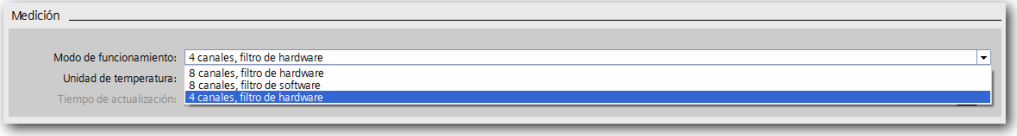


Figura 6.15: Selección de canales y filtro para entrada tipo termopar

Además, por cada par de canales, ofrece las siguientes opciones

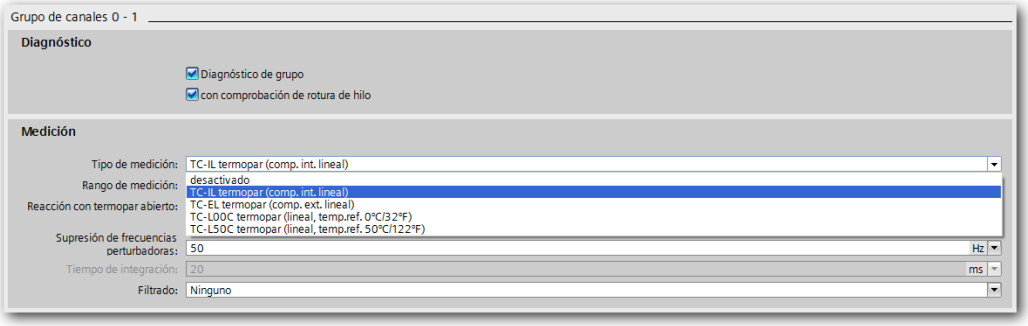


Figura 6.16: Selección de tipo de termopar y su compensación

Y diferentes tipos de termopares

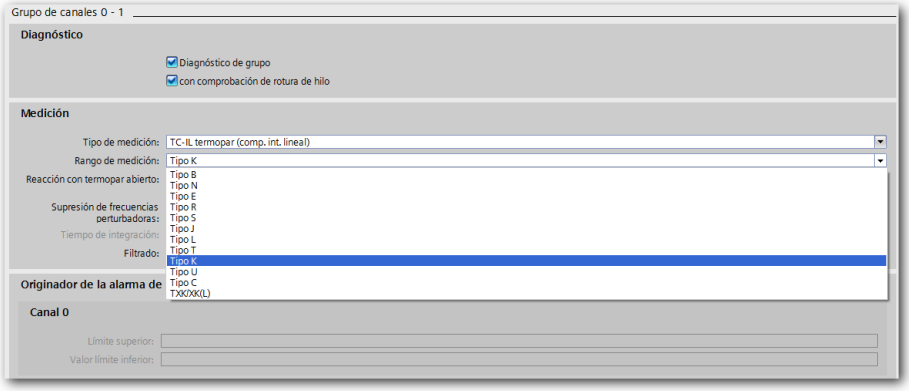


Figura 6.17: Diferentes tipos de termopar seleccionables

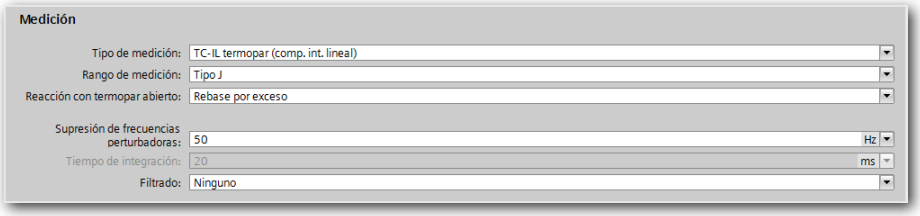


Figura 6.18: Configuración final del termopar con rebase por exceso

6.3.- Sistema remoto de entradas y salidas (ET200)

Es un sistema de periferia des-centralizada que sirve para conectar las diferentes entradas y salidas al bus de campo PROFIBUS. El utilizar estos sistemas es útil principalmente por dos razones: 1) Cuando los elementos de E/S se encuentran físicamente lejanos al PLC este tipo de conexión disminuye la complejidad del cableado eléctrico; y 2) estos sistemas permiten una alternativa de expansión cuando la cantidad de módulos supera la cantidad máxima que soporta el PLC conectados directamente.

Esta interfaz de entradas y salidas remotas está disponible en muchísimas opciones diferentes [8], el presente proyecto contempla el uso del equipo ET200M IM 153-1, compatible con los módulos de S7300. Existen tres ET200 en este proyecto, uno por cada extrusora, en donde cada uno de ellos tiene conectados tres módulos: 32 entradas digitales, 32 salidas digitales y 8 entradas de termopar.

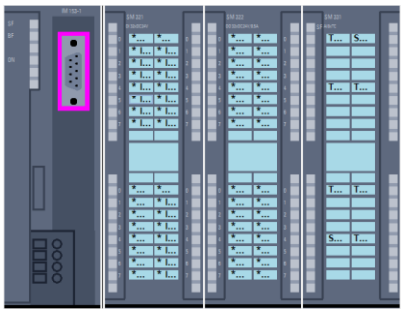


Figura 6.19: ET200 y sus módulos E/S

6.4.- Interfaces Humano Máquina

Un sistema de Interfaz Humano Máquina (HMI por sus siglas en ingles *"Human Machine Interface"*) constituye la conexión entre el usuario y el proceso. Si bien el desarrollo del proceso es controlado básicamente por el PLC, es el panel de operador el medio por el cual el usuario tiene la posibilidad de observar las variables e intervenir en ellas. Es fundamental que esta interfaz sea simple y amigable, pues de esta manera el proceso será óptimo en su desempeño, las fallas serán rápidamente identificadas y, en definitiva, se generarán mayores beneficios. Para cumplir con estos requisitos la estación de trabajo cuenta con dos HMI, una principal que posee acceso a todas las variables, planos y lógicas de control, y una secundaria, que muestra las principales variables que debe manejar el operador.

Figura 6.20: Interfaz Humano Máquina (*"HMI"*) táctil de 19 pulgadas. Modelo MP377

<u>6.4.1.- Pantalla principal de 19".</u> Se trata de una pantalla táctil de 19", de 1280x1024 pixeles, 64k colores, conexión PROFIBUS DP, 2 puertos PROFINET, 1 puerto serie, 2 USB y dos

ranuras para memorias. Es una pantalla muy potente, con una enorme capacidad y excelente resolución (ver anexo B características técnicas), se justifica en este proyecto porque es de vital importancia para el cliente final poder ver en ella los planos *"as-built"*, gráficos de tendencias de las variables, introducir recetas, cuentas de usuario y todas las demás prestaciones principales de una HMI.

6.4.2.- Pantalla secundaria. Esta pantalla va instalada en el panel del operador, junto a todo el conjunto de selectores, pulsadores y potenciómetros. Se trata de una pantalla táctil de 5.7", de 320x240 pixeles, monocromática y con conexión PROFIBUS. Sirve básicamente para desplegar las variables que son de mayor interés para el operador, tales como velocidad de tornillos, velocidad de línea, corriente, torque, estado de equipos.

6.5.- Motores

La presente modernización contempla la renovación de los motores de los *capstans* y la oruga. Inicialmente utilizaban motores de corriente continua y ahora se migrarán a corriente alterna. Sin embargo, para el caso de las extrusoras el cliente decidió no renovar motores (por temas de dinero y repuestos), no obstante, el accionamiento de estos motores si será reemplazado, motivo por el cual se realizará un breve repaso de ambos tipos de motores.

6.5.1.- Motor de corriente continua. Es por historia el primer motor estudiado en la academia, su uso se masificó durante el siglo pasado y en la industria desplazó a los motores de combustión. Se caracteriza por la simplicidad de su modelo y la causalidad directa en el manejo de corriente y torque, no obstante, requiere mantenciones periódicas. A pesar de esto, el cliente decidió mantener este tipo de motores en las tres extrusoras, estos motores son de 37 [kW] y 22 [kW], con ventilación forzada y conectados a un reductor.

6.5.2.- Motor de corriente alterna. Gracias a su menor costo y menor mantención, los motores de inducción han desplazado a los de corriente continua. La industria había sido reticente a su implementación debido a que el control es más complejo, respecto al motor de corriente continua, sin embargo, los crecientes avances en la electrónica y en los circuitos de potencia han permitido que su implementación hoy en día sea muy sencilla. Los equipos que ahora pasaran a tener este tipo de motores son los dos *capstans* y la oruga de salida. Debido a que el

cliente decidió estandarizar las potencias de sus equipos, estos tres componentes utilizan motores de 11 [kW].

6.6.- Accionamientos de velocidad variable

Un accionamiento de velocidad variable está compuesto por un motor y por algún tipo de variador de velocidad, el cual permite variar la velocidad del motor controlando electrónicamente el voltaje y la frecuencia entregada al motor, permitiendo así el ahorro de energía eléctrica y mejoras operativas en el proceso. El presente documento contempla dos tipos de accionamientos: SIEMENS Micromaster (para corriente alterna) y SIEMENS Sinamics DC Master (para corriente continua).

6.6.1.- Micromaster. Es un variador de frecuencia para motores de corriente alterna basado esencialmente en un puente rectificador, un circuito intermedio y una etapa inversora. Tiene microprocesador y opcionalmente puerto PROFIBUS y algunas E/S. En este proyecto encontramos 3 de estos equipos, uno para cada *capstan* y otro para la oruga. Todos son de 11 [kW].

6.6.2.- Sinamics DC Master. Es un convertidor estático para motores de corriente continua, con conexión independiente la armadura y el campo. Posee un puente rectificador que luego conecta dos circuitos *chopper* para el control del voltaje de armadura y campo, además de microprocesador y un puerto de comunicación PROFIBUS. En este proyecto se usan tres, para controlar los motores de las tres extrusoras (37 [kW] y dos de 22 [kW]).

6.7.- Instrumentación

A pesar de que la instrumentación no pertenece propiamente tal al sistema de control, es fundamental su entendimiento, pues son físicamente las entradas y las salidas del proceso, además; el programador debe saber y entender qué instrumentos están instalados para poder configurar los módulos de entradas y salidas (ver Sección 6.2).

El presente proyecto presenta casi 300 entradas y más de 150 salidas, entre análogas y digitales. Lo anterior no considera las entradas ingresadas mediante los paneles táctiles, ni las

variables desplegadas en ellos. Este gran volumen de variables sólo es posible manejarlo gracias al bus de campo, pues es gracias a él, que se ahorra en cableado para así mejorar la simplicidad del sistema, ya que los sistemas remotos solo están conectados físicamente por el cable PROFIBUS y su ubicación se encuentra estratégicamente dispuesta. A pesar de todo esto, en la etapa final del cableado, las E/S deben conectarse inevitablemente una por una, no obstante, gracias a todo lo anterior descrito esto se hace inmediatamente a un costado de la máquina.

A continuación, se presenta una breve descripción de los elementos más importantes en este tema.

6.7.1.- Pulsador. Se encuentran principalmente en el panel del operador y son ampliamente utilizados en las señales de Partir/Parar. Para el caso de las señales Partir se trata de un contacto normalmente abierto y al ser presionado envía un pulso de 24VDC al módulo de entradas digitales, lo que en el PLC se traduce en un cambio a un "1 lógico" (de ahora en adelante llamado TRUE). Por otro lado, para el caso de las señales de Parar, por motivos de seguridad, se utiliza un contacto normalmente cerrado que al ser presionado se transforma en un "0 lógico" (de ahora en adelante llamado FALSE).

Figura 6.21: Pulsadores

6.7.2.- Selector. También es muy recurrente en el panel de operador y a diferencia del pulsador, físicamente no tiene resorte, por lo cual queda fijo en solo una de las posiciones. Se usa básicamente para seleccionar modos de operación. También es en 24VDC.

Figura 6.22: Selector

6.7.3.- Sensor de nivel. Son instrumentos electrónicos que actúan como interruptor sin elementos móviles electromecánicos, su uso es muy extendido en la industria para detectar finales de carrera, presencia/ausencia de material, niveles, etc. Su funcionamiento consiste en un oscilador (con valor conocido de capacitancia) y un circuito detector. Cuando se acerca un elemento con constante dieléctrica diferente a la del aire, cambia el valor capacitivo del circuito y, por ende, cambia la frecuencia de oscilación gatillando un cambio en el sensor. En este proyecto le indican al controlador el nivel del polímero en las tolvas y el nivel de agua en el tubo, se encuentran alimentados en 24VDC y su salida es en este mismo voltaje. Generalmente se usan de a pares, para detectar nivel alto y nivel bajo.

Figura 6.23: Sensor capacitivo

Aparte de los tres tipos de entradas digitales mencionadas anteriormente hay muchas otras involucradas en este proyecto que no fueron modificadas con respecto a su comportamiento original En la mayoría de éstas simplemente se conecta un relé que activa un contacto en 24V para el lado del PLC y de esta forma llega a la entrada digital correspondiente, independiente del comportamiento aguas abajo.

Otras entradas vienen de contactos auxiliares, como, por ejemplo, desde: contactor de ventilador de motor, guardamotores, entre otros. Estos contactos auxiliares deben ser en 24V (si no es así nuevamente se puede utilizar un relé) para así llegar a los módulos de entradas digitales.

6.7.4.- Potenciómetros. Están montados en el panel del operador y son utilizados para generar entradas análogas. Tal como fue visto en la sección 6.2, éstas pueden ser en voltaje, corriente o resistencia. Por motivos de confiabilidad se eligió utilizar el potenciómetro como divisor de tensión y manejar la entrada análoga en tensión de 0 a 10V. Esta entrada analógica es

utilizada para establecer velocidad, tensión y razones de velocidad proporcionales a la velocidad maestra.

Figura 6.24: Potenciómetro

6.7.5.- Sensor de presión. La presión se define como una fuerza en una determinada área, los sensores de presión dejan una pequeña área disponible para que la presión de interés deflecte el volumen contenido en ella, de esta forma un elemento eléctricamente sensible emite una señal proporcional a la presión medida. Estos sensores se utilizan en el cabezal de las extrusoras, en donde es fundamental tener presiones controladas para así mezclar homogéneamente el polímero. Existen 3 sensores de este tipo instalados en el cabezal de la extrusora, se alimentan con 24VDC y van conectados al módulo de entradas análogas de 13 bits, en donde entregan un valor en tensión de +/- 10V.

6.7.6.- Termopar. Popularmente conocido como "termocupla" (dicha palabra es un anglicismo proveniente de la palabra original en inglés *"thermocouple"*), recibe su nombre porque es formado a partir de la unión de dos metales distintos, cuando se aplica temperatura en dicha unión, ésta genera un pequeño voltaje proporcional a la temperatura aplicada (*"Seebeck effect"*). Existen muchísimos tipos de termopares en el mercado, sin embargo, los más utilizados a nivel industrial [9] son los tipo J y los tipo K, ya que son económicos, intercambiables, su conexión es estándar y son amplios en su rango de medición. El presente proyecto utiliza termopares tipo J, con compensación interna lineal y cables compensados. Dada la complejidad de este tema y, gracias a su masivo uso, es que SIEMENS posee un módulo de entradas dedicado para termopares, en donde solo es necesario configurar el tipo de medición, el tipo de termopar y la reacción a la rotura de hilo.

Figura 6.25: Termopar tipo J

6.7.7.- Calefactores. Estos actuadores son los encargados de elevar la temperatura del compuesto. Son resistencias eléctricas que se conectan a los 380VAC (o 220VAC en algunos casos) y su valor resistivo hace que al circular corriente a través de él, éste genere calor ("efecto Joule"). La potencia de éstos varía desde los 500[W] hasta los 20000[W]. Son manejados por salidas digitales, ya que poseen sólo dos estados: encendido o apagado.

6.7.8.- Ventiladores. Así como los calefactores previamente descritos son los encargados de aumentar la temperatura, los ventiladores tienen la función de bajarla. Hacen pasar aire a temperatura ambiente a través de las zonas y por efecto de convección quitan calor del sistema. También son manejados por salidas digitales del PLC.

6.7.9.- Electroválvula. No solo los ventiladores mencionados previamente enfrían el compuesto. Debido a la mayor capacidad calórica del agua, ésta se presenta como una mejor alternativa para reducir la temperatura. Sin embargo, el uso del agua supone la incorporación de un circuito, tratamiento de sedimentos y una bomba, entre otras consideraciones. Una de ellas es un elemento que sea capaz de permitir y bloquear el paso del fluido: esta es la llamada electroválvula. Este sistema consiste en un resorte y una bobina que al ser sometida a una corriente crea un campo magnético que actúa sobre un émbolo que cierra o abre la válvula, permitiendo que el fluido avance. Son utilizadas en las extrusoras que son enfriadas por agua, en cuyo caso controlan el flujo de agua, y también son utilizadas en el sistema que llena las tolvas, en donde controlan una línea de vacío. Para efectos del PLC simplemente son salidas digitales.

6.7.10.- Válvula proporcional. En algunas aplicaciones el simple paso o bloqueo de un fluido en una electroválvula no es suficiente para satisfacer las demandas dinámicas del sistema, en este caso se deben utilizar válvulas proporcionales. Estas utilizan el mismo principio básico que las electroválvulas, con un solenoide que mueve un émbolo, sin embargo, la corriente que circula por la bobina es controlada (en este caso de 4 a 20 [mA]) para así regular la carrera del pistón y, en consecuencia, conseguir un caudal proporcional a la señal de entrada.

6.7.11.- Salidas a relé. En estricto rigor los relés no son instrumentación, pero vale la pena mencionarlos pues son ampliamente utilizados para aislar eléctricamente los módulos de salidas digitales, protegiendo así los módulos de E/S. Los más utilizados son los que están en 24VDC/220VAC, también hay algunos (como los de las electroválvulas de agua) en 110VAC y otros en 24VDC (válvulas de tolvas).

6.7.12.- Relé de estado sólido. Los relés de estado sólido (o SSR por *"solid state relay"*) cumplen una función idéntica que los relés convencionales con la única diferencia que no poseen elementos electromecánicos móviles, lo cual presenta una gran ventaja operativa pues no tienen resortes que se gasten, piezas mecánicas que reapretar ni tampoco generan arco eléctrico por proximidad o rebote. Para operar de esta forma estos equipos están provistos de un circuito de control y una etapa de potencia con semiconductores que permiten o bloquean el paso de la corriente a velocidades muy altas (del orden de los milisegundos), esto encarece su precio y sólo se justifica su utilización cuando la salida a controlar presenta una frecuencia muy alta de ciclos de encendido y apagado. En este proyecto los calefactores son controlados mediante una estrategia de modulación de ancho de pulso (ver Sección 7.9.2), la cual exige un encendido y apagado muy rápido. También se utilizan para activar los ventiladores, pero se les debe limitar el tiempo mínimo de encendido para evitar cambios muy rápidos, ya que la naturaleza inductiva de los ventiladores genera picos de corriente que podrían ser dañinos.

7.- FILOSOFIA DE CONTROL

El presente capítulo explica detalladamente la estrategia que utiliza cada etapa del sistema para lograr satisfacer las necesidades de cada componente y como la interacción de las partes consiguen, en consecuencia, el objetivo general planteado.

Sin embargo, el simple planteamiento por sí solo no es suficiente, pues éste reposa sobre un hardware y un software concreto, el cual define las bases de todo el sistema. En los capítulos anteriores se explicó el hardware utilizado, pero muy poco acerca del software. Explicar acabadamente la capacidad y las funcionalidades del software "*TIA Portal*" es un tema que se escapa de los alcances de este documento. Debido a lo anterior es que en este apartado se ira explicando conjuntamente la filosofía de la máquina y la programación pertinente.

7.1.- *TIA Portal*

Es la plataforma utilizada para realizar la programación. Es propiedad de SIEMENS y fue confeccionada después de décadas de investigación y desarrollo. Permite gestionar y programar procedimientos de procesamiento, operación de máquinas y planificación. Orientada a la industria, pero útil para prácticamente cualquier aplicación, permite programar controladores, redes, aplicaciones de movimiento, accionamientos e interfaces humano máquina, además de poseer múltiples funcionalidades expandibles y diagnósticos en tiempo real. De hecho, su nombre viene del inglés *"Totally Integrated Automation: TIA"* que significa "Automatización Totalmente Integrada".

Toda la programación del PLC, las HMI y la red PROFIBUS están hechas en esta plataforma, solo los accionamientos están programados en otro *software (STARTER)* que también es de SIEMENS.

7.2.- Dispositivos conectados a la red PROFIBUS

Los fundamentos de la red PROFIBUS fueron explicados previamente en el capítulo 5, ahora veremos cómo utilizar la potencialidad de este bus de campo en el entorno de SIEMENS.

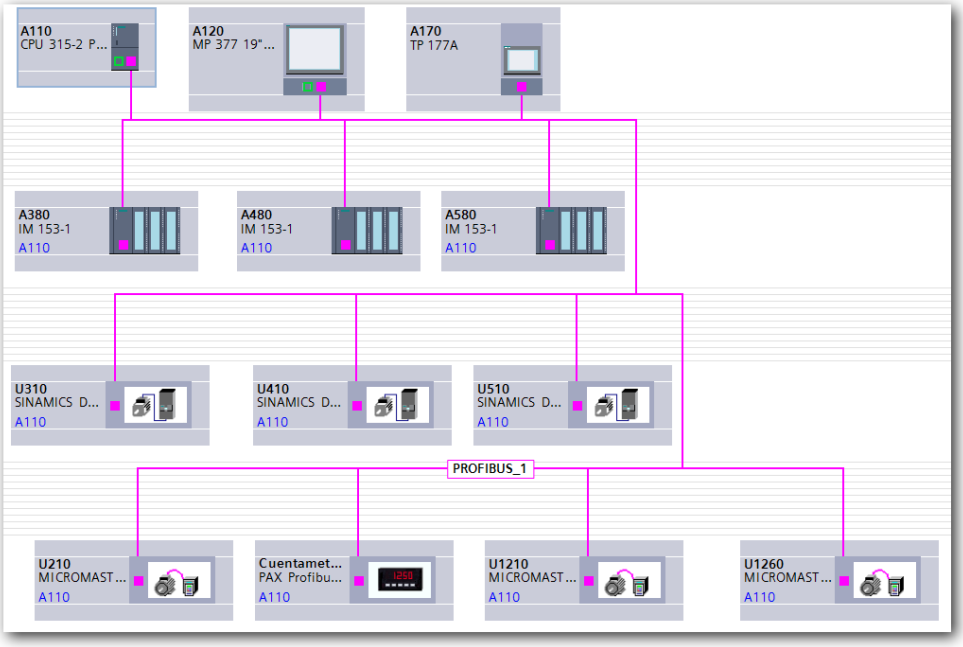


Figura 7.1: Red PROFIBUS y sus nodos

En el área de “Dispositivos y redes” se agregan los nodos PROFIBUS que componen el proyecto, se le agregan los módulos E/S al PLC y a los ET200, luego se establece la velocidad de comunicación de la red, la dirección de cada esclavo y finalmente se asigna la dirección de E/S a los módulos ET200.

7.3.- Lectura y escritura de variables

Este proyecto maneja alrededor de 300 entradas y 150 salidas, sin embargo, este es un número técnicamente incorrecto, pues sólo hace referencia a las variables conectadas físicamente a un terminal, si se consideran todas las variables que viajan a través de la red PROFIBUS, más las variables internas que utiliza el controlador, este número ciertamente superaría los miles de E/S. Recordemos que es precisamente el bus de campo el que permite acotar esta cantidad, pues antes de la modernización existían casi el doble de cables conectados y, peor aún, recorriendo distancias del orden de los cientos de metros.

En este escenario, es claro que se cumple el objetivo de centralizar las variables para tener acceso a ellas desde el controlador, pero como se aprecia, las variables tienen distintos

orígenes y destino, teniendo: 1) E/S conectadas directas al PLC, 2) E/S conectadas a la periferia descentralizada (ET200), 3) telegramas para los accionamientos, 4) variables ingresadas y desplegadas en la interfaz humano máquina, y 5) variables del cuenta metros. Para el programador es de vital importancia saber el origen y el destino de cada variable, pues de esta manera se le puede dar el tratamiento correcto para utilizarla en el programa.

Para simplificar el uso de las variables en el programa, todas ellas, independiente de su origen, se imprimen en un objeto llamado *"Data Block"* (DB), el cual almacena en la memoria interna del sistema datos de cualquier tipo, es decir, como no están en la memoria volátil, estos datos quedan guardados incluso si el PLC se apaga por largos periodos de tiempo. Para estructurar el programa se crean diferentes *"Data block's"* (DB's) organizados por equipos, también se crean DB's constituidos de forma similar, pero utilizados en las salidas. La figura 7.2 muestra el DB que almacena las variables de las tolvas, en él se puede apreciar como el DB es capaz de almacenar datos de diferente tipo, también se observa el valor inicial con que arranca cada dato una vez cargado al programa.

Tolva_param

	Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...
1	Static			
2	Estado_EX1	Bool	...	false
3	Estado_EX2	Bool	...	false
4	Estado_EX3	Bool	...	false
5	Tolva_EN_EX1	Bool	...	false
6	Tolva_EN_EX2	Bool	...	false
7	Tolva_EN_EX3	Bool	...	false
8	TIME_TOLVA_EX1	S5Time	...	s5T#10s
9	TIME_TOLVA_EX2	S5Time	...	s5T#10s
10	TIME_TOLVA_EX3	S5Time	...	s5T#10s
11	TIME_TOLVA_WAIT_EX1	S5Time	...	s5t#5s
12	TIME_TOLVA_WAIT_EX2	S5Time	...	s5t#5s
13	TIME_TOLVA_WAIT_EX3	S5Time	...	s5t#5s

Figura 7.2: Bloque de Datos (DB) de la tolva

A continuación, veremos cómo se deben tratar los diferentes tipos de variables y como todos ellos terminan en su correspondiente DB, para luego usar estos objetos en la programación.

<u>7.3.1.- E/S conectadas directamente al PLC.</u> Son las variables que tienen el tratamiento más sencillo, pues van directo en el PLC, simplemente se les llama con la dirección asignada en "Dispositivos y redes". La mayor parte de estas variables van a parar al DB llamado "PanelDB", las demás requieren un tratamiento previo antes de pasarlas al DB, el cual será explicado más adelante en los escalamientos.

La figura 7.3 muestra el PLC con sus módulos de E/S y como se les asignan las direcciones a las 32 entradas digitales que vienen desde terreno (observación: este número debe ser consecutivo para así almacenar eficientemente los datos de memoria).

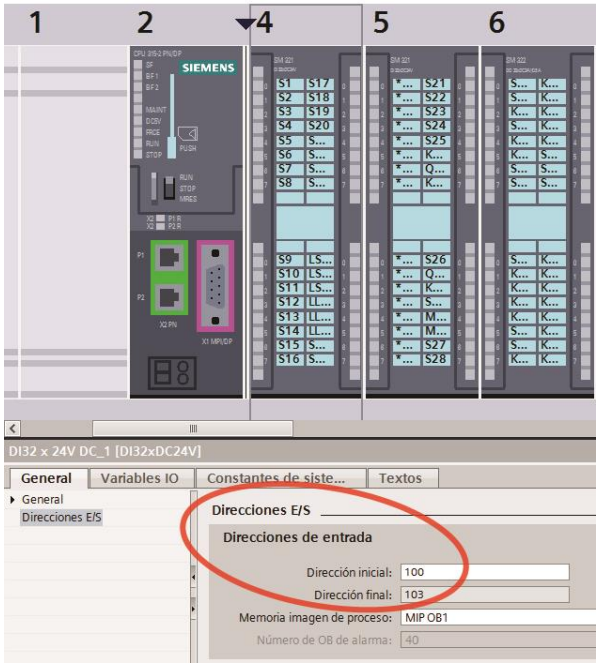


Figura 7.3: Configuración de las direcciones de entrada digitales

Después de definir las direcciones de las variables, estas deben leerse y transferirse a su correspondiente DB para almacenamiento. La figura 7.4 muestra las líneas de código que leen estas entradas y como éstas van a parar al *"Data Block"*.

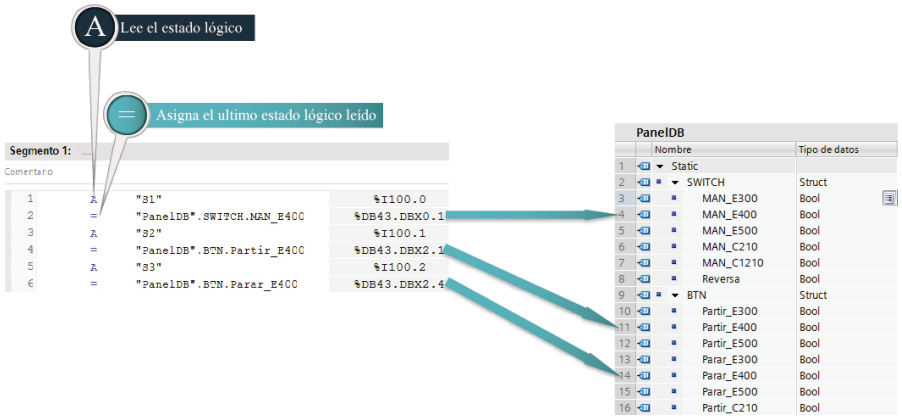


Figura 7.4: Lectura y traspaso de variables

7.3.2.- E/S conectadas a la periferia descentralizada (ET200). El sistema de periferia descentralizada envía un mensaje al controlador cada vez que éste se lo solicita. Para pedir la lectura o escritura de las palabras que transmite el ET200 simplemente hay que llamarlas por paquetes (pueden ser 8, 16 o 32 bits, recuerde que 1 Byte es la unidad mínima de transmisión en PROFIBUS) y teniendo el cuidado de indicar que corresponden a periferia, usando el comando ": P" al final del llamado de dirección.

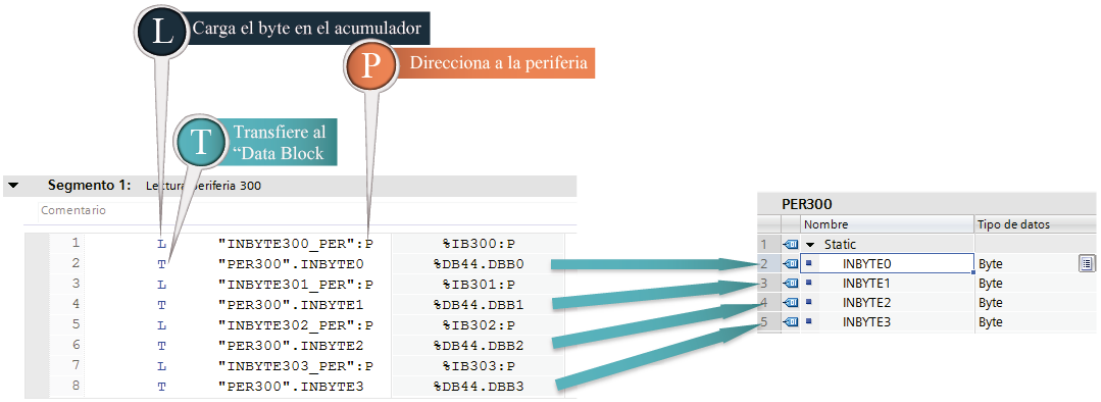


Figura 7.5: Lectura y traspaso de variables desde periferia

7.3.3.- Telegramas para los accionamientos. En el Capítulo 5 se vio como se estructura el telegrama PROFIBUS para los accionamientos. Sin embargo, su lectura y escritura requiere un cuidado adicional, pues las palabras de mando y de control son 16 bits, y se debe recordar que el bus de campo envía los mensajes en paquetes de a 8 bits. Si se envían paquetes binarios con longitud mayor a esa, los bits estarán sujeto a las problemáticas de *"Big Endian"* y "*Little Endian"*. Por dicho motivo el DB se compone de manera cruzada, para que así el accionamiento reciba con el orden correspondiente los datos. La figura 7.6 muestra la estructura del telegrama y el detalle de las palabras de control y de estado. Luego el tratamiento es igual que con los módulos de periferia descentralizada, usando el comando ":P"

7.3.4.- Variables ingresadas desde la interfaz humano máquina. Las HMI utilizadas en este proyecto disponen de un microprocesador que efectúa una lectura y escritura de la imagen del proceso, esto quiere decir que a diferencia de los equipos que se comunican a través de un telegrama, este equipo por el solo hecho de estar en la red no necesita programarse en el PLC para enviar y recibir paquetes de datos, lo hace de manera automática al configurarse la

conexión con el controlador. De hecho, se pueden realizar tablas de variables y agruparlas según categoría. La figura 7.7 muestra algunas tablas de variables y el detalle de una de ellas y como se enlazan las variables de la HMI al PLC. Observe como se sigue la filosofía de trasladar todas las variables a un DB.

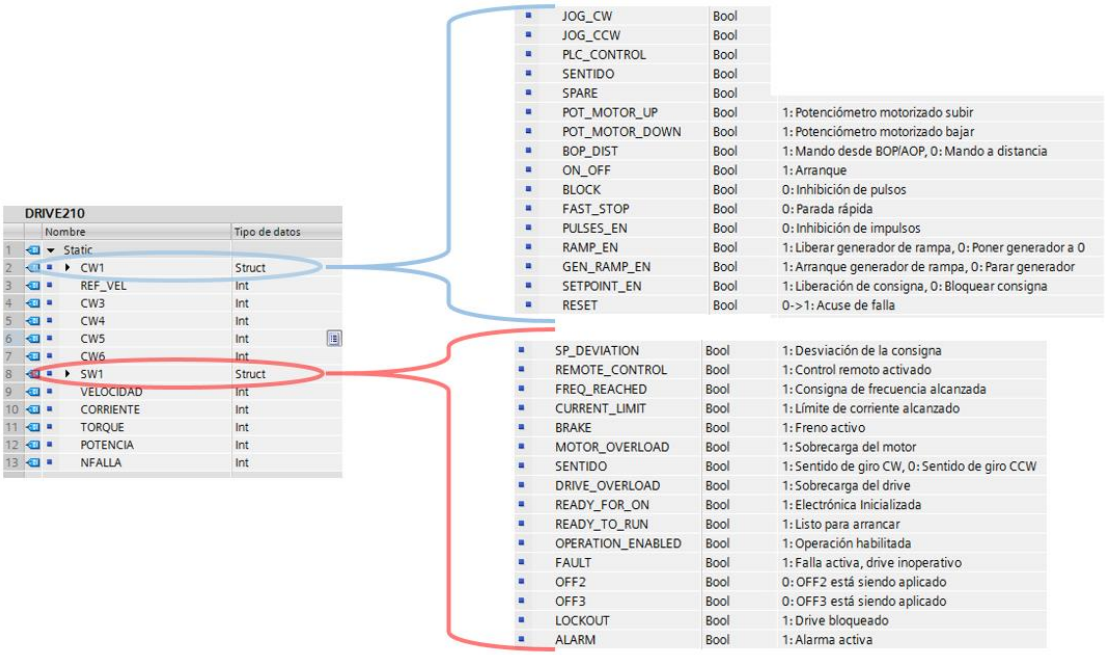


Figura 7.6: Descomposición del telegrama PROFIBUS para los accionamientos

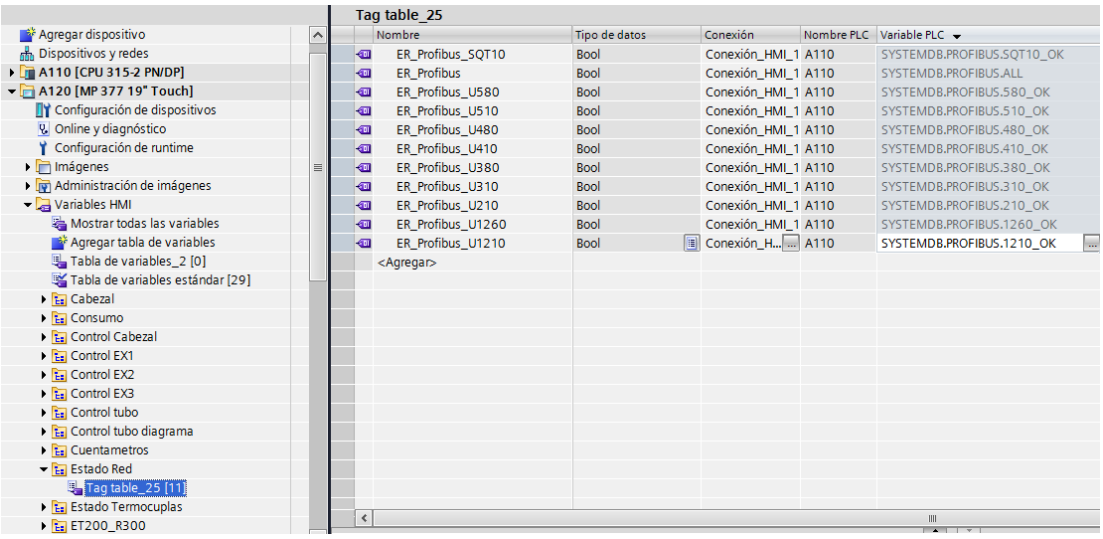


Figura 7.7: Tabla de variables de la HMI

7.3.5.- Variables del cuenta metros. Este proyecto cuenta en su mayoría con equipos de la marca SIEMENS, estos se configuran en la sección de dispositivos y redes, y para agregarlos solo basta arrastrarlos desde la sección "Catálogo" a la red. Cuando un equipo no está en dicho listado se puede actualizar el catálogo para así obtener las versiones nuevas. No obstante lo anterior, PROFIBUS es un protocolo internacional, por lo tanto los equipos conectados a la red no necesariamente deben ser de la misma marca, pero como *"TIA Portal"* es una plataforma de SIEMENS, ésta solo incorpora los hardware de esta marca, en consecuencia; para incorporar un esclavo de otra marca se debe agregar un archivo llamado GSD. Un archivo GSD es un archivo de texto que contiene las características y las opciones de configuración del dispositivo al que representan. Estos archivos generalmente s0e piden al fabricante (o a su página web) y posteriormente se incorporan al dispositivo maestro a través de la plataforma de programación, en otras palabras, éste archivo actúa como "traductor" entre el esclavo y el controlador.

En consecuencia, una vez incorporado el archivo GSD y teniendo claro cuáles son los mensajes que van y vienen, el tratamiento nuevamente se reduce a leer mensajes de periferia y transferirlos a su correspondiente DB. La figura 7.8 muestra cómo establecer las direcciones en el cuentamentros y la derecha se aprecia el archivo GSD ya incorporado al catálogo.

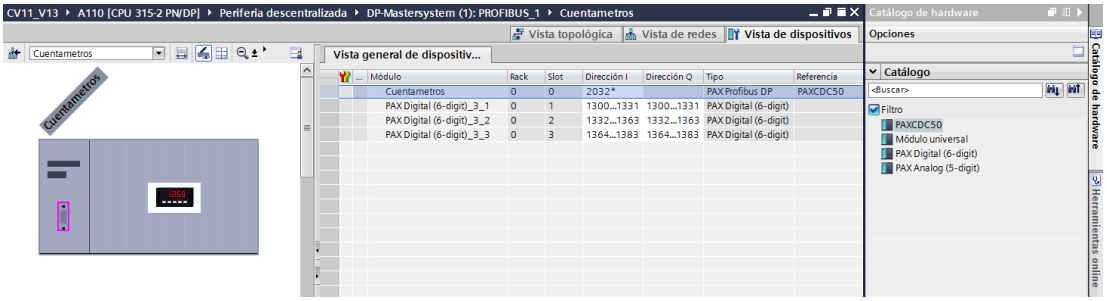


Figura 7.8: Asignación de direcciones de E/S

7.4.- Representación de valores analógicos

Después de transferir todas las variables a sus correspondientes DB, éstas están listas para ser manipuladas en el programa, pero aún carecen de significado físico, pues todos los valores

analógicos son procesados por la CPU únicamente en forma digitalizada. El objetivo de configurar los módulos de entrada es para poder convertir la señal analógica en un valor digital que pueda ser procesado, así como los módulos de salida convierten el valor de salida digital de la CPU en una señal analógica.

Las entradas analógicas reciben datos desde diversas fuentes, se tiene: 1) panel de control, 2) dispositivos de campo y 3) sensores en terreno. A su vez, cada módulo posee diferentes canales, que provienen de 1) potenciómetros, 2) entradas externas en voltaje (0 a 10V, +/- 10V y +/- 5V), 4) en corriente (4 a 20mA), 5) Termopares (en mV), así como muchas otras. Todo esto produce un árbol de opciones muy grande que incurriría en valores desiguales de bits si estos fueran proporcionales a las intensidades de entradas. Para evitar esto, SIEMENS decidió utilizar una representación de los valores analógicos con una resolución de 16 bits. El valor analógico digitalizado es el mismo para los valores de entrada y salida con el mismo rango nominal. Los valores analógicos se representan en el complemento a 2 como número en coma fija. La asignación resultante es la siguiente:

Tabla 7.1: Representación de valores analógicos

Resolución	Valor analógico															
Número de bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Significancia de los bits	sig.	2^{14}	2^{13}	2^{12}	2^{11}	2^{10}	2^{9}	2^{8}	2^{7}	2^{6}	2^{5}	2^{4}	2^{3}	2^{2}	2^{1}	2^{0}

El signo (sig.) del valor analógico figura siempre en el bit 15: y se usa “0” para indicar positivo y “1” para negativo.

Si la resolución de un módulo analógico es inferior a 16 bits, el valor analógico se deposita en el módulo alineado a la izquierda. Las posiciones menos significativas no ocupadas se rellenan con “0”. De este modo se reduce el número de valores medidos representables. Los rangos de valores de módulos ocupan un valor entre +32768 y -32768, con independencia de la resolución. La graduación entre dos valores consecutivos depende de la resolución del módulo.

Las tablas siguientes contienen la representación digitalizada de los rangos de entrada, separados por rangos de entrada bipolares y unipolares. La resolución es de 16 bits.

Tabla 7.2: Rangos de entrada bipolares

Valor dec.	Valor medido en %	Palabra de datos																Rango
		2^{15}	2^{14}	2^{13}	2^{12}	2^{11}	2^{10}	2^{9}	2^{8}	2^{7}	2^{6}	2^{5}	2^{4}	2^{3}	2^{2}	2^{1}	2^{0}	
32767	>117,589	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Rebase por exceso
32511	117,589	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	Margen de tolerancia por encima
27649	100,004	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
27648	100,000	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Rango nominal
1	0,003617	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
0	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-1	-0,003617	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
-27648	-100,000	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-27649	-100,004	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Rango de tolerancia por debajo
-32512	-117,593	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
-32768	<-117,593	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Rebase por defecto

Tabla 7.3: Rangos de entrada unipolares

Valor dec.	Valor medido en %	Palabra de datos																Rango
		2^{15}	2^{14}	2^{13}	2^{12}	2^{11}	2^{10}	2^{9}	2^{8}	2^{7}	2^{6}	2^{5}	2^{4}	2^{3}	2^{2}	2^{1}	2^{0}	
32767	>117,589	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Rebase por exceso
32511	117,589	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	Margen de tolerancia por encima
27649	100,004	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
27648	100,000	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Rango nominal
1	0,003617	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
0	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-1	-0,003617	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Rango de tolerancia por debajo
-4864	-17,593	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
-32768	<-17,593	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Rebase por defecto

Y para los rangos de salida se tiene:

Tabla 7.4: Rangos de salida bipolares

Valor dec.	Valor de salida en %	Palabra de datos																Rango
		2^{15}	2^{14}	2^{13}	2^{12}	2^{11}	2^{10}	2^{9}	2^{8}	2^{7}	2^{6}	2^{5}	2^{4}	2^{3}	2^{2}	2^{1}	2^{0}	
32511	117,589	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	Valor de salida máximo*
32511	117,589	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	Margen de tolerancia por encima
27649	100,004	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
27648	100,000	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Rango nominal
1	0,003617	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
0	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-1	-0,003617	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
-27648	-100,000	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-27649	100,004	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Rango de tolerancia por debajo
-32512	-117,593	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
-32512	-117,593	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Valor de salida mínimo**

* Si se especifica un valor mayor a 32511, el valor de salida se limita a 117,589% ó a 0% (0.0V / 0,0mA) en función del módulo empleado.

** Si se especifica un valor menor a -32511, el valor de salida se limita a -117,593% ó a 0% (0.0V / 0,0mA) en función del módulo empleado.

Tabla 7.5: Rangos de salida unipolares

Valor dec.	Valor de salida en %	Palabra de datos																Rango
		2^{15}	2^{14}	2^{13}	2^{12}	2^{11}	2^{10}	2^{9}	2^{8}	2^{7}	2^{6}	2^{5}	2^{4}	2^{3}	2^{2}	2^{1}	2^{0}	
32511	117,589	0	1	1	1	1	1	1	1	x	x	x	x	x	x	x	x	Valor de salida máximo*
32511	117,589	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	Margen de tolerancia por encima
27649	100,004	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
27648	100,000	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Rango nominal
1	0,003617	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
0	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Valor de salida mínimo**

* Si se especifica un valor mayor a 32511, el valor de salida se limita a 117,589% ó a 0% (0.0V / 0,0mA) en función del módulo empleado.

** Si se especifica un valor menor a 0, el valor de salida se limita a 0% (0.0V / 0,0mA).

La asignación de los valores numéricos a los valores medidos físicos de los rangos correspondientes figura en el manual de producto del módulo de entradas analógicas correspondiente, sin embargo, en la tabla 7.6 se muestran los valores típicamente más utilizados.

Tabla 7.6: Rangos de medición de tensión

Valores		Rango de medición de tensión				Rango
dec.	hex.	±10 V	± 5 V	±2,5 V	±1 V	
32767	7FFF	>11,759 V	>5,879 V	>2,940 V	>1,176 V	Rebase por exceso
32511	7EFF	11,759 V	5,879 V	2,940 V	1,176 V	Rango de saturación por exceso
27649	6C01					
27648	6C00	10 V	5 V	2,5 V	1 V	Rango nominal
20736	5100	7,5 V	3,75 V	1,875 V	0,75 V	
1	1	361,7 µV	180,8 µV	90,4 µV	36,17 µV	
0	0	0 V	0 V	0 V	0 V	
-1	FFFF					
-20736	AF00	-7,5 V	-3,75 V	-1,875 V	-0,75 V	
-27648	9400	-10 V	-5 V	-2,5 V	-1 V	
-27649	93FF					Rango de saturación por defecto
-32512	8100	-11,759 V	-5,879 V	-2,940 V	-1,176 V	
-32768	8000	<-11,759 V	<-5,879 V	<-2,940 V	<-1,176 V	Rebase por defecto

Existen muchísimas tablas como las anteriormente descritas, sin embargo, mostrarlas y explicarlas una por una escapa de los alcances del presente documento. No obstante, la idea es la misma para todos los tipos de entrada y salida: definir límites en los escalamientos que sean estándar y permitan programar las líneas de código en el autómata de manera estructurada según los mismos patrones.

7.5.- Escalamiento de variables

A continuación, debe otorgársele sentido físico a las variables: éstas deben ser sometidas a un proceso de escalamiento. Este proceso depende tanto del valor de máquina, así como del proceso físico que corresponda, a continuación, se verá cómo se escalan las variables más importantes de esta máquina.

7.5.1.- Presión. La presión, al igual que las variables explicadas anteriormente, llega a un módulo de entrada, por lo tanto, su valor en el programa será de 0 a 27648 nominal. Según

especificaciones del cliente, este sensor es lineal y representa valores desde 0 a 1000 psi, sin embargo, el mismo cliente decidió dejar disponible el valor del escalamiento (para ingresarlo por pantalla), por lo cual, el valor para escalar este dato es variable. Las siguientes imágenes muestran el tratamiento que se le da a esta variable.

En primer lugar, se leen los datos directamente desde la entrada analógica y se pasan a una variable temporal como doble entero, este valor en doble entero se pasa a valor real (observación: todas las operaciones matemáticas conviene realizarlas en valor real).

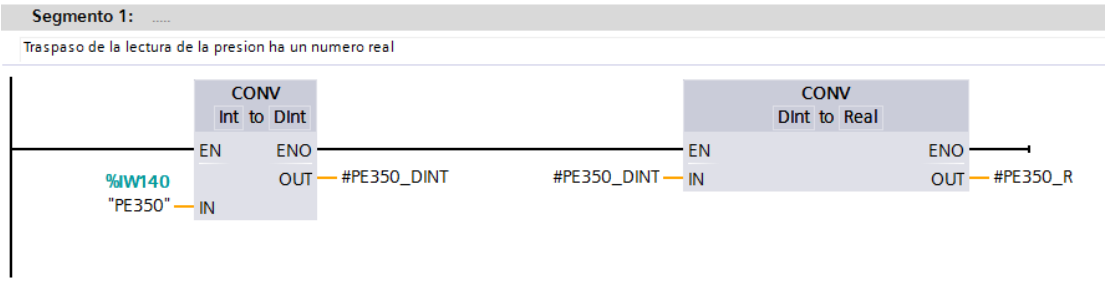


Figura 7.9: Conversión de una variable desde su valor leído en formato entero, a un valor real

Luego este valor real se divide por 27648.0 para así obtener un valor en porcentaje, pero con formato real, luego se multiplica este valor por un valor de escalamiento ingresado por pantalla para finalmente traspasarlo al DB que guarda los valores normalizados

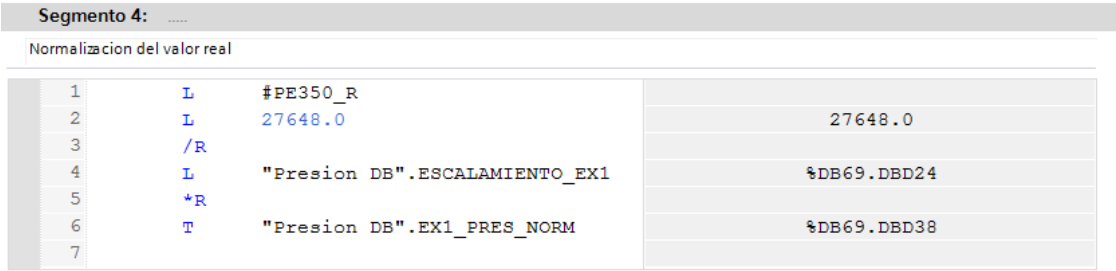


Figura 7.10: Escalamiento de la variable “Presión”

<u>7.5.2.- Temperaturas.</u> Las temperaturas son una variable muy sensible en este proyecto, motivo por el cual merecen una explicación acorde a su importancia. Como ya fue mencionado en secciones previas, esta variable tiene módulos dedicados especialmente para entrada de termopares. Ahora se verá en detalle que función tiene cada una de las configuraciones seleccionadas.

En primer lugar, debe estar muy claro que tipo de termopar será utilizado en cada canal, esto responde directamente al orden de temperatura con el que se debe fundir el polímero. El perfil de temperatura que debe seguir el polímero en la extrusora es del orden de los 100 °C, tenemos, por ejemplo, para *"pvc"* el siguiente perfil: [86, 88, 90, 92]. Y en este orden de magnitud se mantienen todos los compuestos. Con este dato se debe escoger el tipo de termopar a utilizar:

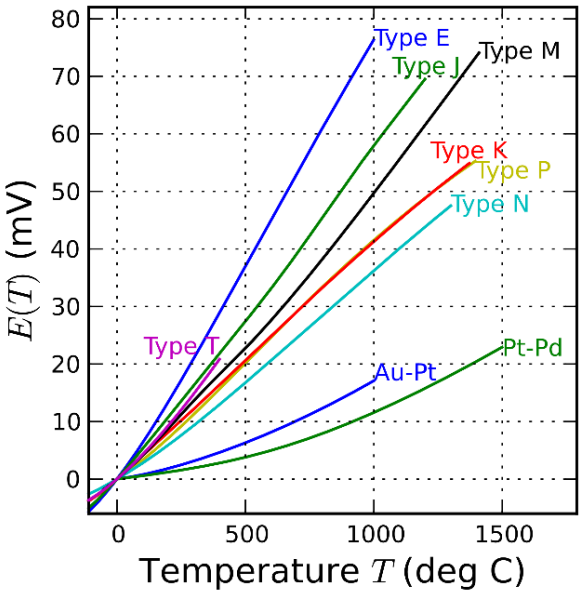


Figura 7.11: Curvas características de diferentes termopares

El cliente ya poseía termopares tipo J, por lo tanto, se decide mantener esos dispositivos, pues responden satisfactoriamente a las necesidades.

Como se aprecia en la figura 7.11, las curvas no son lineales y todas generan distintos valores en [mV] para diferentes temperaturas, motivo por el cual se le debe indicar al módulo de entradas el tipo de termopar, para que así pueda asignar un valor digital a los diferentes voltios de entrada y así cumplir con la normalización establecida. La tabla 7.6 muestra esta conversión para el termopar tipo J.

En este punto el programador está en condiciones de utilizar las variables en formato digital para manipularlas en el programa. La figura 7.12 muestra, en primer lugar, como se le saca provecho a la función de diagnóstico de rotura de hilo, mediante la salida *#BROKEN*, luego

viene la conversión a real, el escalamiento de la variable y finalmente un sesgo que viene a resolver las problemáticas de la compensación del hilo.

Tabla 7.7: Rangos numéricos para termopar tipo J

Tipo J en °C	Valores		Tipo J en °F	Valores		Tipo J en K	Valores		Rango
	dec.	hex.		dec.	hex.		dec.	hex.	
> 1450,0	32767	7FFF	> 2642,0	32767	7FFF	> 1723,2	32767	7FFF	Rebase por exceso
1450,0 : 1200,1	14500 : 12001	38A4 : 2EE1	2642,0 : 2192,2	26420 : 21922	6734 : 55A2	1723,2 : 1473,3	17232 : 14733	4350 : 398D	Rango de saturación por exceso
1200,0 : -210,0	12000 : -2100	2EE0 : F7CC	2192,0 : -346,0	21920 : -3460	55A0 : F27C	1473,2 : 63,2	14732 : 632	398C : 0278	Rango nomi-nal
< -210,0	-32768	8000	< -346,0	-32768	8000	< 63,2	-32768	8000	Rebase por defecto

Título del bloque: Lectura de temperatura

Devuelve la temperatura en Celsius para una lectura mediante termocupla de tipo J. También indica si hay rotura de hilo

Segmento 1: Indicación de rotura de hilo

Para que este bloque funcione, el módulo de entradas analógicas de termocupla debe configurarse para mostrar mediante rebalse numérico una rotura de hilo

```
1   L     #PER_IN
2   L     32700          32700
3   >=I
4   =     #BROKEN
```

Segmento 2: Cálculo de temperatura

La temperatura en celsius con el valor entregado en formato digital cumplen una relación lineal

```
1   L     #PER_IN
2   ITD
3   DTR
4   L     0.1            0.1
5   *R
6   L     1.2277e+1      1.2277e+1
7   -R
8   T     #CELSIUS
9
```

Figura 7.12: Tratamiento aplicado a las variables de temperatura

Debido a que esta función es reiterativamente utilizada en el programa, se decide encapsularla como un Bloque de Función (FB) para invocarlo cada vez que se requiera, la figura 7.13 muestra cómo se le llama repetidamente para escalar las diferentes zonas de temperatura.

Los escalamientos descritos son los principales del proyecto y representan la estrategia utilizada mayormente por el programador, cabe mencionar que el uso de funciones permite la

escalabilidad del sistema, por lo tanto, éstas se pueden encontrar en numerosas ocasiones dentro del programa. Teniendo claro el tema de la lectura y escritura, y ahora el tema de los escalamientos se puede avanzar a la estrategia de control, las siguientes secciones se centrarán en mostrar el funcionamiento de las etapas del proceso y como éstas interactúan entre sí, sin necesidad de detenerse en el tratamiento de las variables.

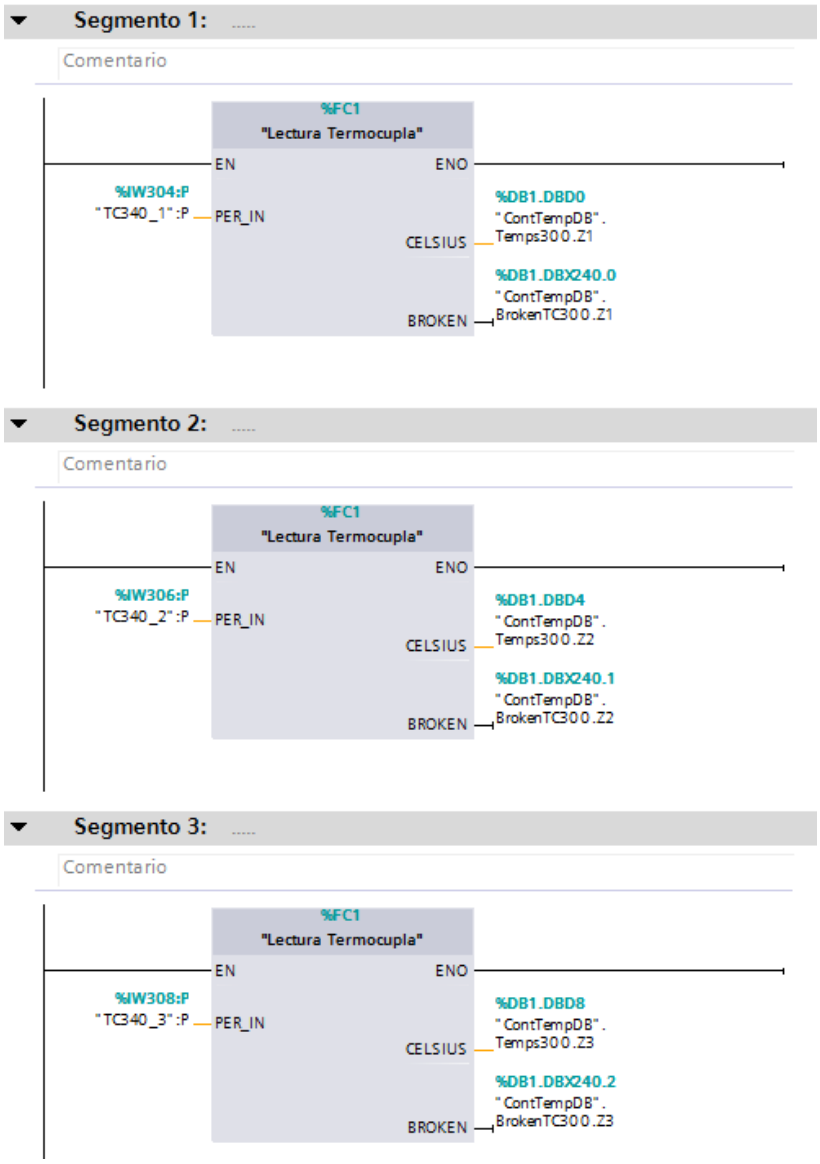


Figura 7.13: Llamado reiterativo al bloque de función “Lectura Termocupla”

Se comienza con las funciones más simples, para luego ir incorporando en cascada cada una de ellas hasta conseguir abarcar la estrategia general.

7.6.- Función Banda Muerta (*"Dead Band"*)

Esta función es utilizada principalmente para tratar las variables que vienen desde el panel de control. Para entender su utilidad considere a un operador trabajando en una máquina y moviendo perillas para configurar el equipo, si este operador quiere llevar a cero una determinada velocidad, sencillamente girara el potenciómetro hasta su valor límite sin preocuparse de si esta posición es exactamente el nivel cero. Lamentablemente este valor debe ser exactamente cero para que la entrada analógica lea esto, y como su resolución es de, al menos 12 bits, el valor cero absoluto significa un punto muy específico en una perilla industrial. Sumado a esto, tenemos posibles oscilaciones en torno a cero debido a problemas de rebote de señal en el potenciómetro, contaminación electromagnética y posible inducción en el cable. Por estos motivos el programador agrega una pequeña banda muerta (generalmente de 0.2%) que suprime estas peculiaridades del *hardware* sin comprometer desempeño en el funcionamiento.

```
1          L      #In_Signal
2          ITD
3          DTR
4          L      #Deadband_Width
5          -I
6          T      #TEMP1
7          L      0                  0
8          <=I
9          JCN    cero
10         L      0                  0
11         JU     always
12  cero:  L      #TEMP1
13  always : T    #Out_Signal
```

Figura 7.14: Código de programación para generar la función "Banda muerta"

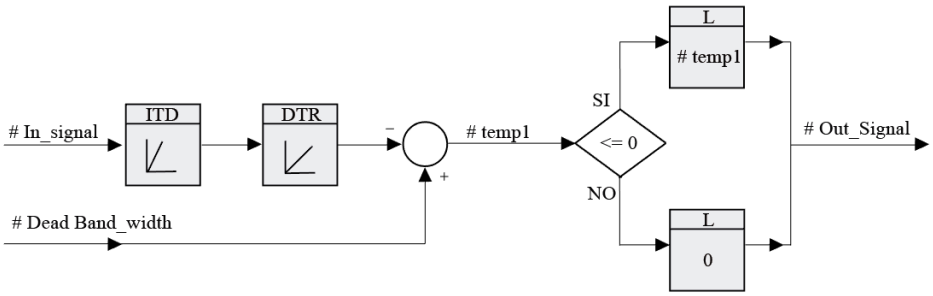


Figura 7.15: Diagrama de bloques de la función "Banda Muerta"

7.7.- Generador de rampa

La función generadora de rampa fue solicitada por el cliente para evitar cambios bruscos en las consignas de velocidad hacia los accionamientos. Esta función limita la rapidez con la que se cambia la referencia de velocidad de los motores, vale decir, si se solicita un escalón en la entrada, a la salida de esta función se tendrá una recta cuyos valores se configuran por pantalla. La función es utilizada para restringir las consignas de las extrusoras, los capstans y la oruga. Tiene los siguientes parámetros:

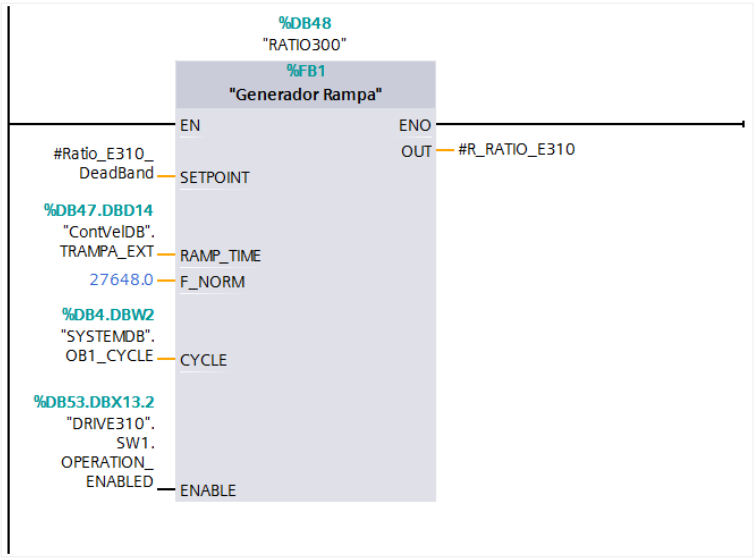


Figura 7.16: Variables de entrada y salida de la función “Generador de rampa”

La consigna de esta función es la salida de la función anterior (*DeadBand*) y es el valor máximo que busca alcanzar la función. El tiempo de rampa se ingresa por pantalla en [ms], F_NORM es el valor para normalizar a valores de salida analógica, CYCLE lee el valor del tiempo de ciclo del PLC en milisegundos, para así calcular el tiempo real y ENABLE le dice al bloque si está habilitada la operación del equipo. La salida entrega la rampa.

La figura 7.17 muestra las líneas de código que componen el bloque.

Segmento 1: Cálculo de diferencial de salida para la rampa

Comentario

```
1        L      #RAMP_TIME
2        ITD
3        DTR
4        T      #TIME_R
5        L      #CYCLE
6        ITD
7        DTR
8        L      #TIME_R
9        /R
10       L      #F_NORM
11       *R
12       T      #delta
```

Segmento 2: Conversión de entero a real

Comentario

```
1        L      #SETPOINT
2        ITD
3        DTR
4        T      #SETPOINT_R
5
```

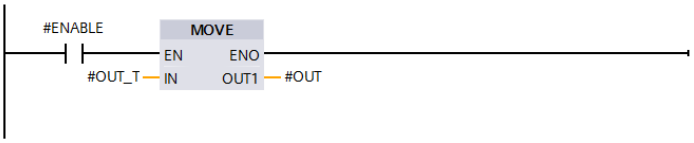
Segmento 3: .....

IF (SETPOINT > (OUT+DELTA)) OUT = OUT + DELTA;
ELSE IF (SETPOINT < (OUT-DELTA)) OUT = OUT - DELTA;
ELSE OUT = SETPOINT;

```
1        L      #OUT_TR
2        L      #delta
3        +R
4        T      #Temp_1
5        L      #SETPOINT_R
6        <R
7        JC     ver1
8        L      #OUT_TR
9        L      #delta
10       -R
11       T      #Temp_2
12       L      #SETPOINT_R
13       >R
14       JC     ver2
15       L      #SETPOINT_R
16       T      #OUT_TR
17       JU     fin
18 ver1: L      #Temp_1
19       T      #OUT_TR
20       JU     fin
21 ver2: L      #Temp_2
22       T      #OUT_TR
23 fin:  L      #OUT_TR
24       TRUNC
25       T      #OUT_T
26
27
```

Segmento 4: .....

Comentario



Segmento 5: .....

Comentario

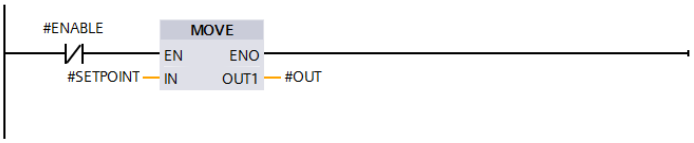


Figura 7.17: Código de programación para generar la función “Generador de rampa”

7.8.- Tolva

Las tolvas son los alimentadores de las extrusoras, permiten el ingreso del polímero que será derretido para luego cubrir el cable a producir. Estos equipos están provistos de un sistema automático de llenado compuesto por diferentes sensores y actuadores en una determinada estrategia que optimiza el uso de recursos y permite llenar las tres extrusoras a la vez. El bloque que realiza esto se ve así:

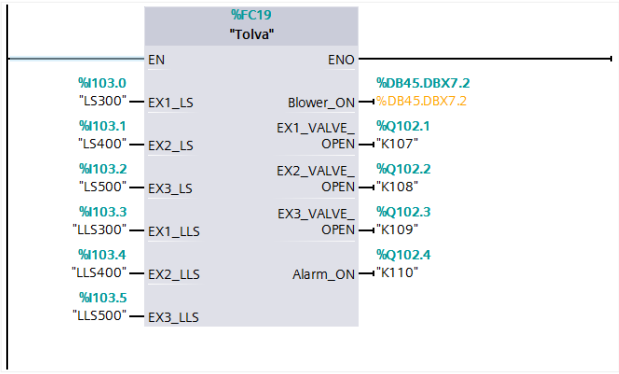


Figura 7.18: Variables de entrada y salida para la función “Tolva”

A continuación, se explica el funcionamiento con sólo una extrusora y después se detalla cómo funcionan las tres en conjunto.

El control utilizado en este equipo es de tipo *“ON/OFF”*. Posee solo un sensor (que indica nivel bajo), el cual actúa por un determinado tiempo cuando se gatilla el indicador, esto solicita el llenado de la tolva durante un tiempo establecido por pantalla.

Físicamente el sistema de llenado consiste en un circuito neumático, electroválvulas, un *“manitol”* y una bomba de vacío (que es común para las 3). Para llenar la tolva se abre la electroválvula correspondiente y arranca la bomba de vacío, esto genera un efecto de succión, que saca material desde un gran depósito y lo lleva a un filtro ubicado en la parte alta y central de la tolva. En este filtro se acumula material durante el tiempo de llenado (si este tiempo es muy grande se satura la succión) para luego dejarlo caer por gravedad durante el tiempo de espera, que también es ingresado por pantalla. Por lo tanto, un ciclo de llenado consiste en el tiempo que efectivamente está llenando más un tiempo de espera. Si después de haberse completado el tiempo de llenado, el sensor sigue indicando nivel bajo, la tolva no seguirá llenándose hasta que no se complete el tiempo de espera.

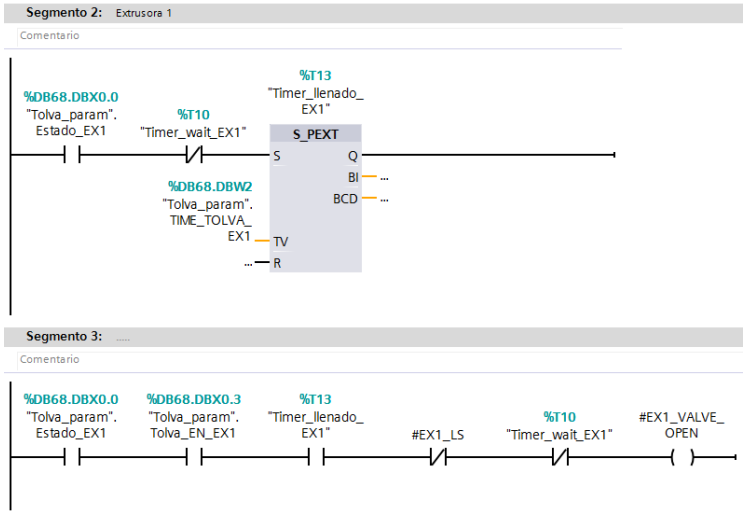


Figura 7.19: Código de programación en escalera para el llenado de las tolvas

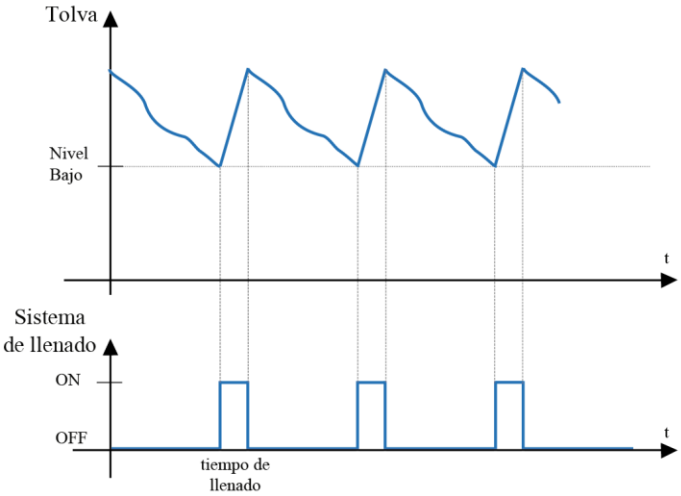


Figura 7.20: Funcionamiento de llenado de las tolvas

Ahora considere las tres tolvas vacías y solicitando llenado. En este escenario, el sistema debe atender a las tres a la vez, pues ninguna tiene prioridad sobre las demás, pero el circuito es solo uno y no se pueden llenar en paralelo, por lo tanto, ocurre lo siguiente: se le dedica tiempo de llenado a una, luego a la siguiente y finalmente a la tercera (los tiempos de espera en este caso avanzan mientras se llenan las demás), en cada traspaso se evalúa el estado de los sensores para ver si existe un pedido, una vez hecho el pedido se comprueba que ya espero el tiempo de espera y así sigue iterando. En otras palabras, el sistema llena un poco de cada tolva sin otorgarle prioridad a ninguna.

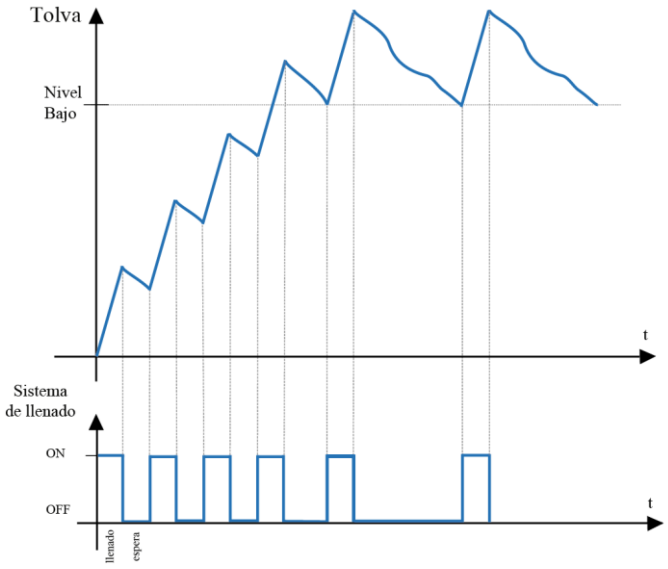


Figura 7.21: Funcionamiento de llenado de las tolvas comenzando desde vacío

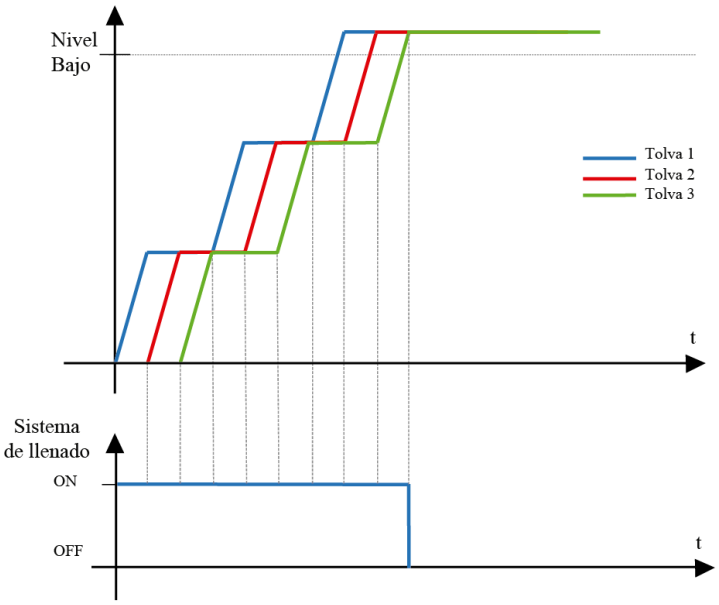


Figura 7.22: Funcionamiento de llenado de las tres tolvas comenzando desde vacío

Además, el sistema posee una alarma sonora y en cada tolva un sensor de nivel crítico, éste acusa cuando el nivel esta inadmisiblemente bajo y su única función es activar una alarma sonora para que el operador decida qué acciones debe tomar, pues aquí el abanico de opciones es amplio y el cliente decidió no dejar esto programado, sino que sea el operador quien resuelva.

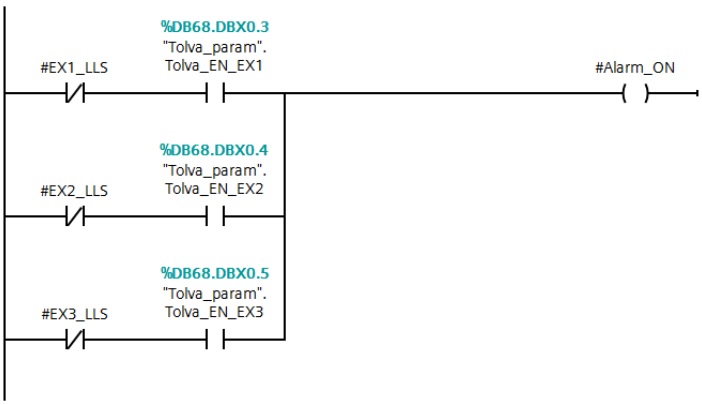


Figura 7.23: Activación de la alarma mediante los sensores de nivel critico

Para finalizar este tema, vale la pena detenerse y hacer una pequeña reflexión. El autor de este documento cree que es muy importante considerar las variables físicas a la hora de determinar las estrategias de control, pues si un ingeniero se aboca de lleno a programar sin conocer a cabalidad el proceso físico se puede incurrir en redundancias o errores. Este es un punto susceptible a esto, pues la estrategia de control ON/OFF parece ser muy burda y probablemente se tienda a pensar que otro tipo de control más elaborado pueda obtener mejores resultados. Sin embargo, si se observa el proceso físico aparecen importantes detalles, pues el proceso de llenado mediante succión con una bomba de vacío en la tolva se comporta de manera singular: a medida que se llena la tolva, el polímero se amontona de forma piramidal y cuando llega a tapar el sensor de nivel, la parte alta del apilado está muy por encima del nivel del sensor. Luego, cuando comienza a entregar material, éste desciende por la parte baja de la tolva, provocando que el material que esta al centro baje antes que el material pegado a las paredes (imagine un reloj de arena) formando una concavidad en donde la parte baja del polímero está muy por debajo del nivel del sensor cuando éste detecta que no tiene material. En consecuencia, se tiene un control ON/OFF engañoso, pues al observar el proceso físico, es fácil darse cuenta que, en realidad, se trata de un control con histéresis, ahorrando en la programación y ahorrándole 3 sensores capacitivos al cliente.

7.9.- Control de temperatura

Este tema tan importante se encuentra presente en todas las extrusoras, en el cabezal y en el tubo de vulcanizado. Ya se presentaron las bases que explican las variables involucradas y su

tratamiento, así como el *hardware* implicado. Ahora se explicará el control para sólo una zona, pues esto es replicable para todas las demás.

7.9.1.- Control PID. El controlador PID utilizado (CONT_C) regula procesos con magnitudes continuas de entrada y salida. En este caso la magnitud de entrada (temperatura) cumple con dicha condición, pero la de salida no, motivo por el cual más adelante se explica cómo se complementa con una etapa de formación de impulsos para generar señales de salida PWM. Dada la complejidad de este bloque, los valores de entrada y salida solo pueden regularse correctamente si el bloque se llama en intervalos regulares de tiempo. Para conseguir esto, el programador debe utilizar una funcionalidad del autómata llamada interrupción de alarma cíclica (OB35), dicho "Bloque de Organización" se ejecuta inalterablemente cada 100 [ms] y el controlador de temperatura se ejecuta cada 100 ciclos de esta interrupción, es decir; cada 10 [s].

La figura 7.24 muestra el Diagrama de Bloques que describe el funcionamiento del controlador.

En donde las variables son:

SP_INT indica el valor de la consigna (*"Set Point"*) en formato real. PV es Valor de Proceso (*"Process Value"*) y puede ser ingresado como periferia o como número real. La resta de estos dos valores es el Error de Regulación. Para suprimir una pequeña oscilación permanente provocada por la cuantificación de las magnitudes manipuladas (p. ej. en caso de una modulación de ancho de impulsos con PULSEGEN), el error de regulación se deriva a través de una zona muerta. Luego se aplica efectivamente el algoritmo PID, las acciones proporcional, integral y derivativa están conectadas en paralelo y pueden conectarse y desconectarse individualmente. De esta forma puede parametrizarse reguladores P, PI, PD y PID (Incluso sólo I). Los valores de estas ganancias se ingresan a través de la HMI. También a través de ésta es posible forzar las salidas de manera manual. La entrada INT_HOLD congela la salida del integrador para evitar enrollamiento, esto opera cada vez que se satura la salida del controlador (LMN). En la entrada DISV se puede aplicar una magnitud anticipativa. Para terminar, en la parte baja del diagrama se ve un limitador a valores especificables, luego una normalización y finalmente la variable manipulada también está en formato de periferia. En el programa la función se ve como en la figura 7.25.

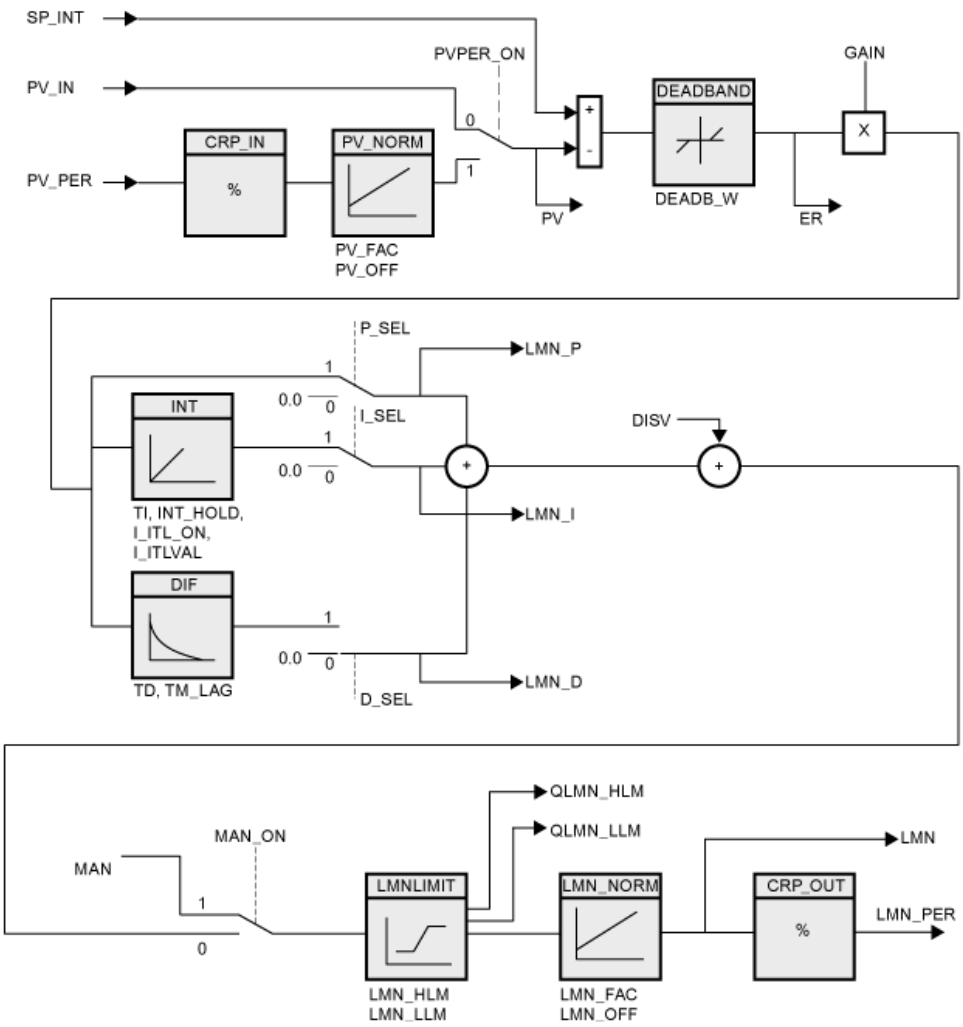


Figura 7.24: Diagrama de bloques del controlador CONT_C

7.9.2.- PWM. El controlador previamente descrito genera una salida proporcional para dispositivos analógicos, sin embargo, en las extrusoras, los elementos que enfrían y que calientan las zonas no son de este tipo, solo son ON/OFF. La función PULSEGEN resuelve este problema, pues permite establecer un regulador PID con salida de impulsos. PULSEGEN transforma la magnitud de entrada (que debe ser la salida del CONT_C) mediante modulación de ancho de impulsos en una secuencia de impulsos con duración de periodo constante, que corresponde al tiempo de ciclo con el que se actualiza la magnitud de entrada (10 segundos). Esta instrucción permite generar reguladores PID de dos o tres puntos con modulación de ancho de impulsos. El cálculo se realiza correctamente si el bloque se

llama en intervalos regulares. Por ello, este bloque también se invoca en la interrupción cíclica (OB35).

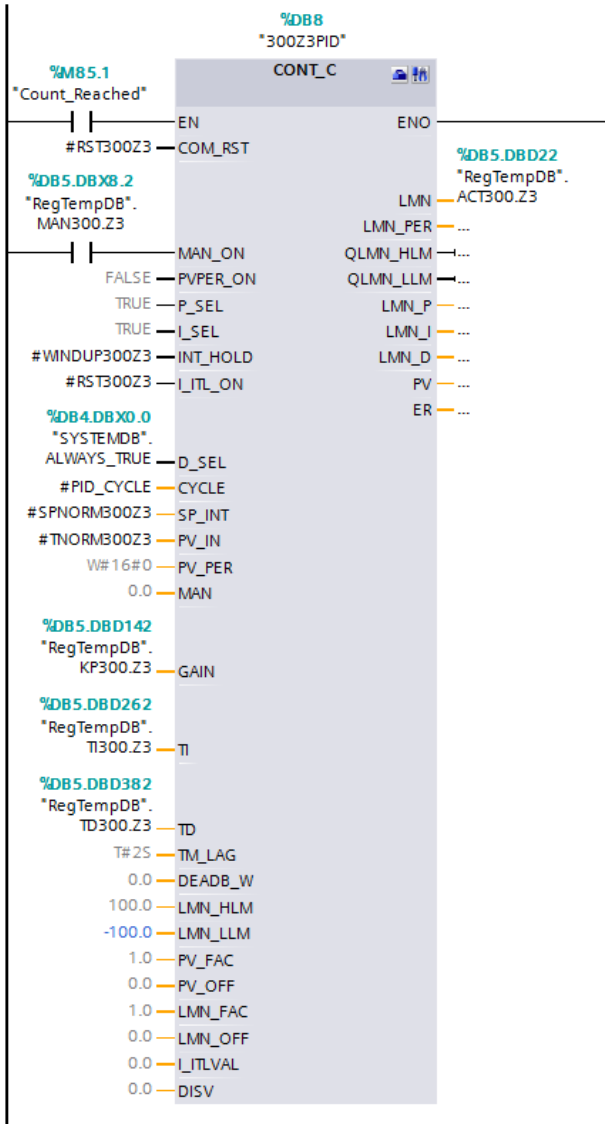


Figura 7.25: Variables de entrada y salida para la función CONT_C

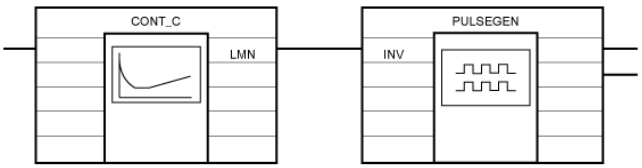


Figura 7.26: Funcionamiento en cascada del CONT_C y PULSEGEN

La duración de un impulso por duración de periodo es proporcional a la magnitud de entrada (INV). No obstante, el ciclo del CONT_C y el ciclo del PULSEGEN son diferentes, el primero es de 10 [s] y el segundo es de 100 [ms]. Es decir, un ciclo del CONT_C equivale a 100 ciclos de PULSEGEN. La cantidad de llamadas de PULSEGEN por ciclo de CONT_C representa una medida para la precisión del ancho de impulso. Así, una magnitud de entrada del 30% y 100 llamadas de PULSEGEN significan:

- ➔ TRUE en la salida QPOS_P para las primeras 30 llamadas
- ➔ FALSE en la salida QPOS_P para las otras 70 llamadas restantes

Por lo tanto, la precisión de la variable manipulada es de 1%, debido a la relación 1:100. Además, la variable manipulada ya viene con un decimal en grados Celsius, por lo que la máxima resolución de este controlador llega a 0,1 [°C].

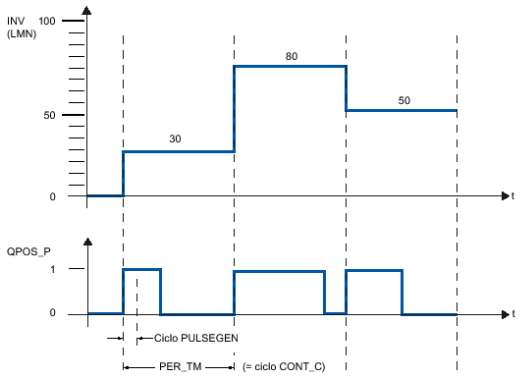


Figura 7.27: Valores asignados a QPOS_P para diferentes valores de la salida LMN

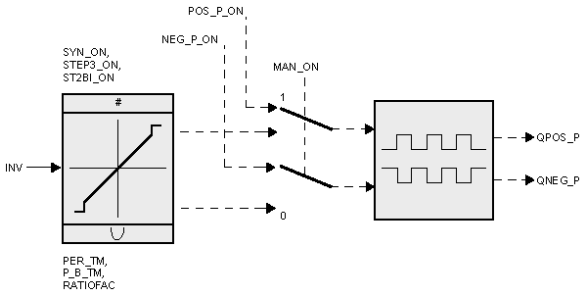


Figura 7.28: Diagrama de bloques de la función PULSEGEN

Dependiendo de la parametrización del formador de impulsos, el regulador se puede configurar con comportamiento de tres puntos o con salida de dos puntos bipolar o unipolar. La tabla 7.8 contiene los ajustes de las combinaciones de conmutadores para los modos de operación posibles.

Tabla 7.8: Valor lógico de las variables para configurar el modo de operación

Modo de operación	MAN_ON	STEP3_ON	ST2BI_ON
Regulación de tres puntos	FALSE	TRUE	cualquiera
Regulación de dos puntos con rango de valores manipulados bipolar (-100 % ... 100 %)	FALSE	FALSE	TRUE
Regulación de dos puntos con rango de valores manipulados unipolar (0 % ... 100 %)	FALSE	FALSE	FALSE
Modo manual	TRUE	cualquiera	cualquiera

El presente proyecto tiene los reguladores configurados en el modo de regulación de 3 puntos (también posee posibilidad de modo manual). En este modo de operación se pueden generar tres estados para cada señal de salida. Para ello se asignan los valores de estado de las señales binarias de salida QPOS_P y QNEG_P a los correspondientes estados operativos del actuador, según la tabla 7.9.

Tabla 7.9: Método de comportamiento de las salidas para aplicación de temperatura

Señales de salida	Calentar	OFF	Enfriar
QPOS_P	TRUE	FALSE	FALSE
QNEG_P	FALSE	FALSE	TRUE

A partir de la magnitud de entrada se calcula la duración del impulso mediante una característica. La forma de esta característica está definida por la duración mínima de impulso o de pausa y por el factor de relación. El valor normal del factor de relación es 1. Los puntos escalonados de la característica son originados por la duración mínima de impulso o de pausa. Para parametrizar correctamente la duración mínima de impulso o de pausa (P_B_TM) hay que considerar los elementos conectados al regulador, pues tiempos de conexión o desconexión breves, merman la vida útil de los elementos de contacto y de los elementos de control final, en este caso se trata de relés que activan un ventilador o una electroválvula, si este tiempo es muy bajo, se generaran rebotes eléctricos que dañan estos equipos y además, no alcanzarán a producir un efecto térmico. Se suprimen valores absolutos pequeños de la magnitud de entrada (INV) que generarían una duración de impulso inferior a P_B_TM. Los valores de entrada grandes que generarían una duración de impulso superior a PER_TM -

P_B_TM se ajustan a 100 % o a -100 %. La duración de los impulsos positivos o negativos se calcula multiplicando la magnitud de entrada (en %) por la duración del período:

$$\text{Duración del impulso} = (\text{INV}/100) * \text{PER_TM}$$

La figura 7.29 muestra una característica simétrica del regulador de tres puntos (factor de relación = 1).

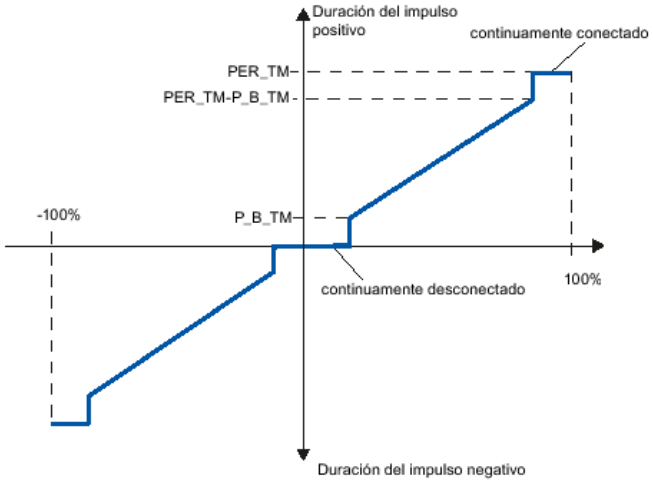


Figura 7.29: Característica simétrica del regulador junto a una pequeña banda muerta

Considere ahora la siguiente problemática. El pulso positivo enciende un calefactor de una determinada potencia, mientras que el pulso negativo apaga dicho calefactor y enciende un ventilador (o una electrobomba). Esto desde el punto de vista de programación es simétrico, pero en términos físicos son extremadamente diferente. La potencia del equipo que enfría no es la misma que la potencia del equipo que calienta e incluso si fuesen iguales, las capacidades calóricas y los coeficientes de transferencia no son los mismos. Entonces, ¿vale la pena igualar los equipos termodinámicamente? Realizar esto es un gran desafío, y costoso por lo demás, además, está sujeto a condiciones ambientales y desgaste de los equipos. Por este motivo es que existe el factor de relación. El factor de relación (RATIOFAC) modifica la relación de la duración de impulsos positivos respecto a los negativos, para obtener constantes temporales de proceso diferentes para calentar y para enfriar. Esta variable también se ingresa por pantalla.

Finalmente se muestra como se ve el bloque en el programa.

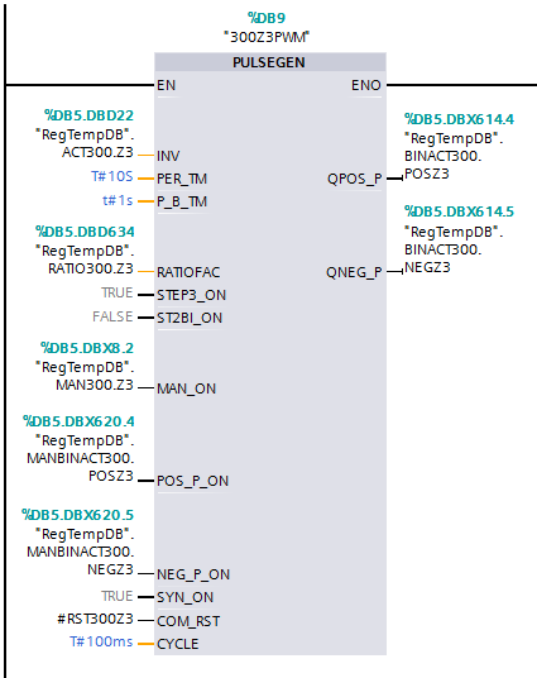


Figura 7.30: Variables de entrada y salida para la función PULSEGEN

En consecuencia, el diagrama de bloques del control de temperatura queda:

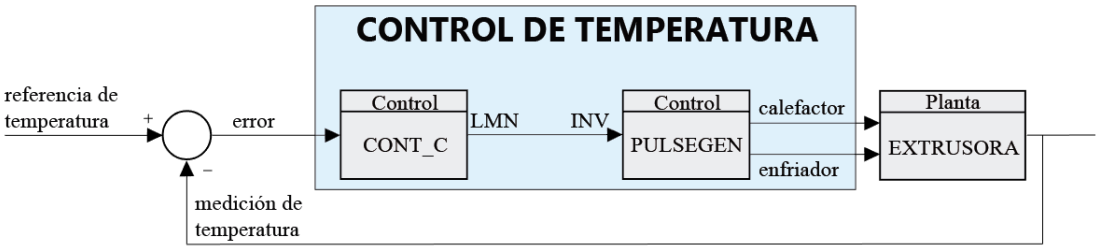


Figura 7.31: Diagrama de bloques del control de temperatura

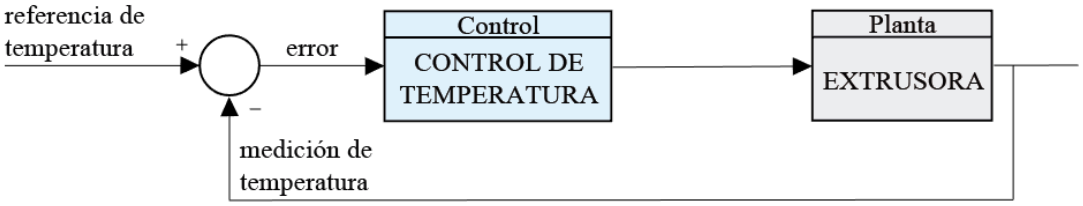


Figura 7.32: Modelo simplificado del control de temperatura

7.10.- Sikora

Sikora es una empresa que fabrica equipamiento para realizar precisas mediciones que permiten optimizar los procesos de calidad en lo que se refiere al grosor del recubrimiento del cable. Utiliza cámaras con tecnología infrarroja para medir en tiempo real los cables sin necesidad de detener la maquina ni intervenir el producto. Esta empresa posee variados instrumentos, para diferentes aplicaciones y con diferentes modelos. En particular, en esta máquina se usa un modelo que mide el grosor del polímero y el desfase con respecto al eje central. El modo de funcionamiento y la explicación de todas sus prestaciones se escapan del alcance de este documento, motivo por el cual se simplifica su explicación a lo siguiente: El sikora es un equipo que mide el grosor del cable y tiene dos modos de funcionamiento:

1) *Only Input:* Recibe una señal analógica (que es la referencia de velocidad a la extrusora, que, a su vez, viene del generador de rampa) y la transfiere a la salida sumándole un factor de corrección. Este factor de corrección lo calcula a partir del error producido entre el grosor esperado y el grosor medido.

2) Bidireccional: En este modo recibe la misma señal de entrada, pero no actúa directamente sobre el motor, sino que simplemente calcula el error y devuelve como salida un factor de corrección. El cual debe ser tratado adecuadamente en el programa.

El bloque se ve así:

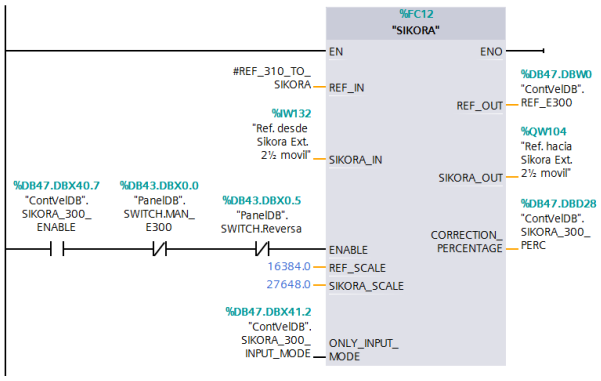


Figura 7.33: Variables de entrada y salida para la función “Sikora”

Y a continuación, las líneas de código que lo programan:

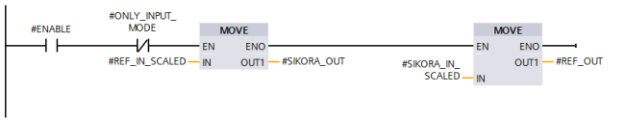
Segmento 1: Escalamiento de la señal de referencia y señal hacia/desde SIKORA

Las señales pueden tener distintos rangos numéricos.e.g. PROFIBUS: 0-16384 ANALOG: 0-27648

```
1        L      #REF_IN
2        ITD
3        DTR
4        L      #REF_SCALE
5        /R
6        L      #SIKORA_SCALE
7        *R
8        RND
9        T      #REF_IN_SCALED
10
11       L      #SIKORA_IN
12       ITD
13       DTR
14       L      #SIKORA_SCALE
15       /R
16       L      #REF_SCALE
17       *R
18       RND
19       T      #SIKORA_IN_SCALED
20
```

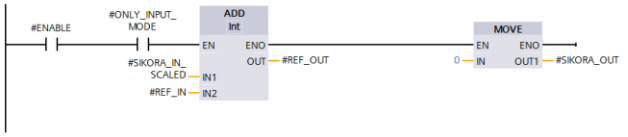
Segmento 2:

Comentario



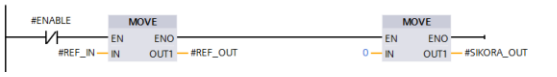
Segmento 3:

Comentario



Segmento 4:

Comentario



Segmento 5:

Comentario

```
1          A      #ONLY_INPUT_MODE
2          JCN    normal
3          L      #SIKORA_IN_SCALED
4          ITD
5          DTR
6          L      #REF_SCALE
7          /R
8          L      100.0                    100.0
9          *R
10         JU     fin
11   normal : L   #REF_IN
12         ITD
13         DTR
14         T      #AUX
15         L      #SIKORA_IN
16         ITD
17         DTR
18         L      #SIKORA_SCALE
19         /R
20         L      #REF_SCALE
21         *R
22         L      #AUX
23         /R
24         L      1.0                      1.0
25         -R
26         L      100.0                    100.0
27         *R
28   fin:  T      #CORRECTION_PERCENTAGE
29
```

Figura 7.34: Código de programación de la función “Sikora”

En consecuencia, el diagrama de bloques del control de la velocidad del tornillo mediante sikora queda de la siguiente manera:

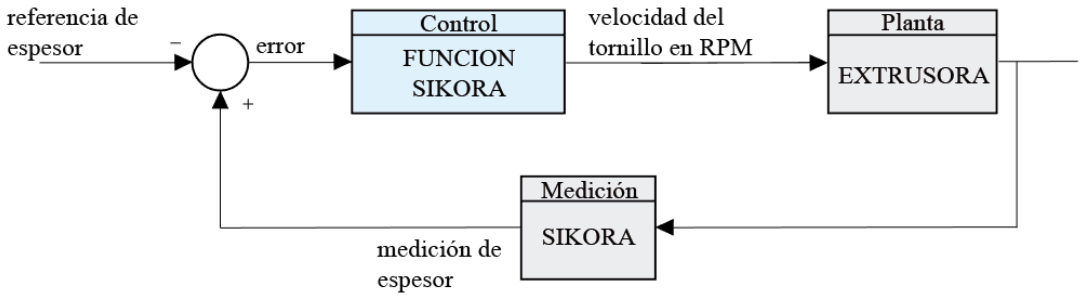


Figura 7.35: Diagrama de bloques del control de espesor mediante Sikora

7.11.- Extrusoras

Las extrusoras son un complejo sistema que engloba diferentes componentes. La idea de explicar estos componentes en los capítulos anteriores es poder ahora desvincularnos de ellos para poder centrarse en la función principal de la extrusora, que es trasladar material derretido al cable que necesita recubrirse. Este proceso lo lleva a cabo un tornillo helicoidal, éste genera un efecto de bombeo sobre el polímero y lo transporte al cabezal. En el cabezal hay una matriz que otorga la forma y finalmente le da el acho al cable.

Para hacer funcionar esta máquina, los operadores deben tener particular cuidado con el compromiso que existe entre la velocidad de la línea, la velocidad de la extrusora y el grosor del cable. Pues mientras más rápido avance el cable, mas material necesita para recubrir el mismo grosor. Debido a la filosofía de control, la variable dependiente es la velocidad de la extrusora, por lo tanto, es ésta la que debe adecuarse a la velocidad del alambre, para así mantener el grosor en la consigna deseada. Para llevar al punto de operación esta velocidad, los operadores arrancan el sistema y hacen funcionar la extrusora en modo individual, hacen avanzar el cable y estiman la razón de velocidad hasta que logran el grosor deseado, en ese momento devuelven hacia atrás la línea, pelan el cable, pasan a coordinado y encienden el sistema completo para funcionar automáticamente. En ese momento se incorpora el SIKORA, que es quien realiza el ajuste fino frente a perturbaciones.

Cabe mencionar que mientas funciona la extrusora en conjunto con el SIKORA, también siguen funcionando los controles de temperatura y la tolva, por lo tanto, si hay perturbaciones, estos dos sistemas también reaccionaran frente a esto, para que las temperaturas se mantengan en el perfil solicitado y para que la tolva nunca deje de alimentar material.

7.12.- Control de nivel de agua en el tubo

Para enfriar correctamente el cable después de ser recubierto, éste entra en un tubo que posee vapor de agua en su primera sección y sólo agua en su segunda mitad. Por motivos de seguridad la temperatura del vapor no debe ser mayor a 80 °C al momento de realizar la apertura del tubo, y es este mismo elemento medidor (termopar) el que cierra el lazo para controlar el nivel de agua en el tubo.

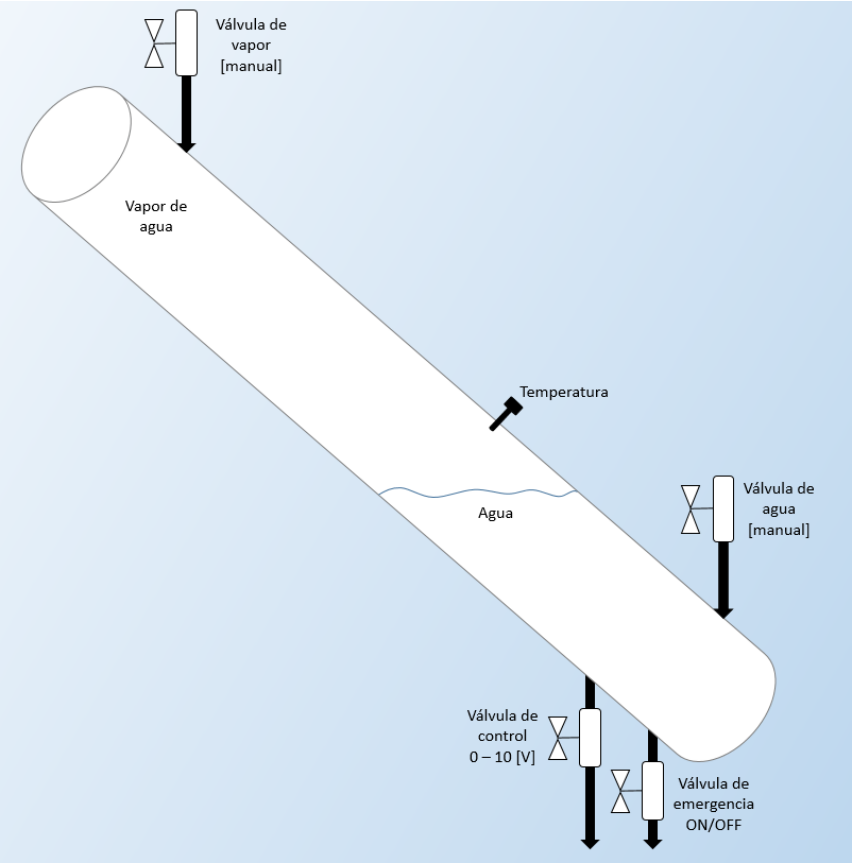


Figura 7.36: Esquemático del tubo

El sistema es ajustado manualmente por los operadores para su uso. En primer lugar se abre una válvula de agua (manual) para incorporar agua a temperatura ambiente y llenar el tubo hasta la mitad, luego se cierra el émbolo neumático ubicado en la parte superior para sellar el tubo y así poder incorporar mediante una válvula de vapor (que también es manual) desde 210 hasta 250 PSI de vapor de agua, este pistón no volverá a ser abierto hasta que la temperatura no baje de los 80°C. Esta temperatura es medida con un termopar ubicado levemente por sobre el nivel de agua. El lazo de control debe mantener esta temperatura en la referencia solicitada (la cual es típicamente desde 100 a 130°C) mediante el manejo de una válvula proporcional de despiche. Si el sistema sufre algún desperfecto y la temperatura baja de los 80°C debido al efecto de rebalse de agua, existe un sistema de emergencia que bota el agua rápidamente, gracias a una electroválvula. La figura 7.37 muestra el diagrama de bloques del control de nivel de agua mediante medición de temperatura.

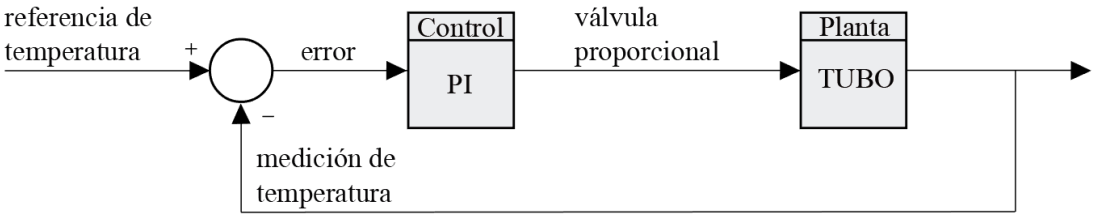


Figura 7.37: Diagrama de bloques del control de nivel de agua en el tubo

7.13.- Control de posición en el tubo

Finalmente, para terminar de unir todos los componentes del sistema solo resta hablar del control del tubo. Es aquí donde se determina la velocidad efectiva del cable, teniendo claro todos los demás puntos anteriores se puede simplificar el sistema a un simple cable que es entregado por un capstan de entrada y va avanzando a través de etapas que lo van recubriendo. En este punto dejaremos de lado las intervenciones de las demás etapas, y la explicación se abocará solo en el control del tubo.

El tubo de vulcanizado es una etapa que enfría el polímero con el mejor perfil de temperaturas que se puede realizar en planta. Entra a un espacio cerrado que contiene vapor de agua y luego pasa a la sección del tubo que está inundada en agua, tanto el vapor como el

agua tienen temperatura controlada por PID. A la salida del tubo está el capstan de salida. La figura 7.38 muestra un esquemático de la línea.

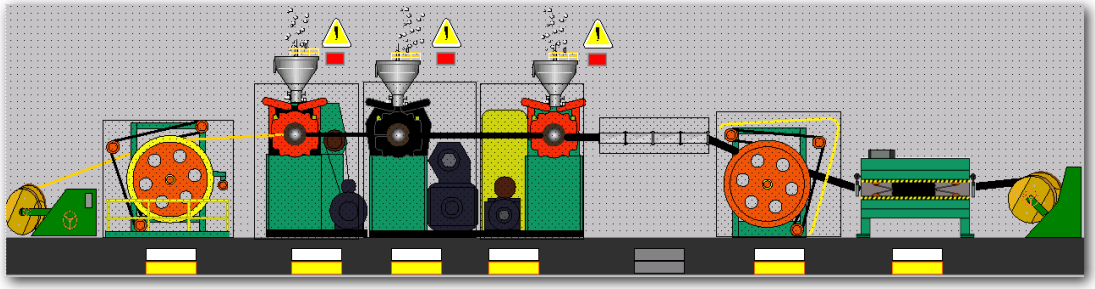


Figura 7.38: Esquemático de la línea

El capstan de salida y el capstan de entrada no sólo entregan y reciben el cable, sino que cumplen la sensible función de mantener el cable en una determinada posición en el tubo. Puesto que el tubo mide 50 metros de longitud y tiene un desnivel de más de 3 metros, se forma una curvatura en el cable, que debe ser cuidadosamente controlada para asegurar el correcto funcionamiento del tubo.

El instrumento que mide la posición en el tubo se llama SCHOLTZ, y consiste en dispositivo con una cámara que a la salida envía un valor en porcentaje desde -100% hasta +100%, en donde 0 significa que el cable está en la posición correcta. Para corregir esta posición ambos capstan funcionan coordinadamente de la siguiente manera: El error de posición entra a un PID que genera una actuación que luego es limitada por una ganancia. Esta actuación se suma a una corrección manual y a la velocidad del capstan de entrada, generando la referencia al capstan de salida.

En otras palabras, cuando arranca el sistema desde la posición 0, ambos capstan giran a la misma velocidad, manteniendo el cable en esa posición. Ante la aparición de perturbaciones si el cable baja de su posición, entonces el capstan de salida aumenta su velocidad para subirlo y, por otro lado, si se sube entonces el capstan de salida se frena para quitarle tensión.

Este sistema, como es de esperarse, no es lineal en todo su rango de operación, sólo lo es por tramos. Estos tramos vienen dados por caja en la cual se encuentre el reductor. En consecuencia, se implementa un PID dinámico, en donde el tiempo integral, el tiempo derivativo y la ganancia dependen de la caja en la cual se encuentre el reductor del capstan.

El operador debe seleccionar en que caja está trabajando para que el sistema sepa que parámetros debe utilizar, esto se hace por pantalla.

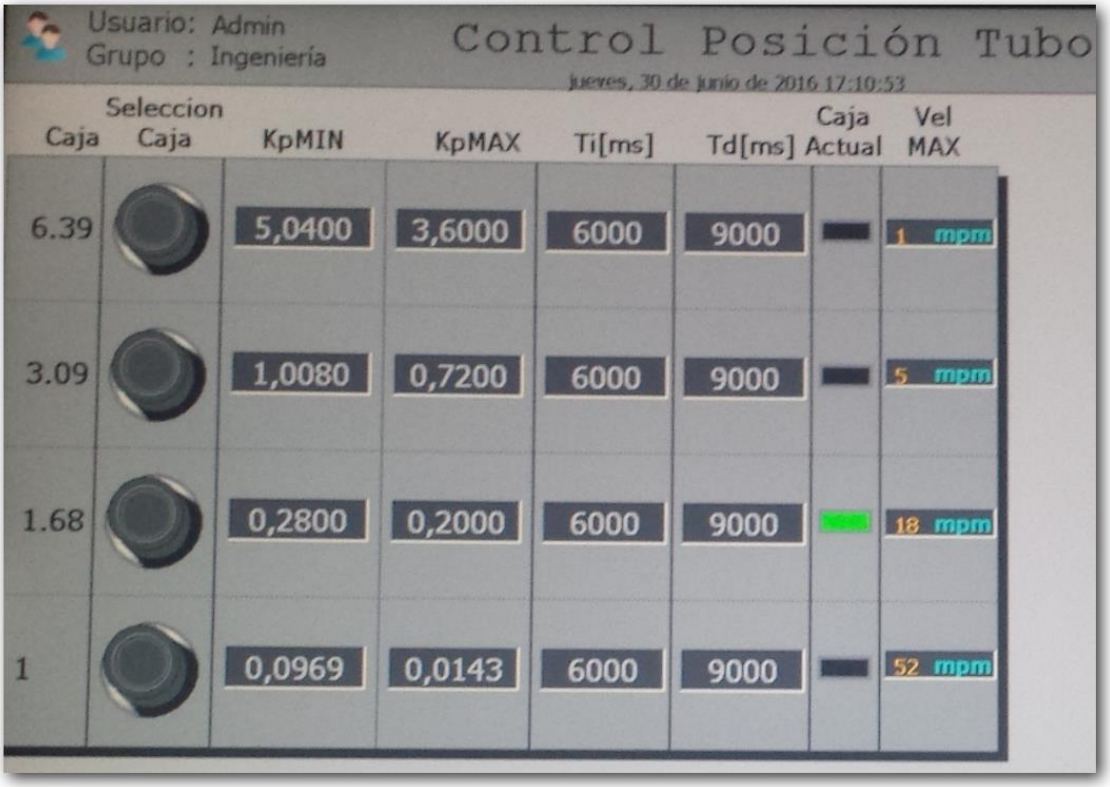


Figura 7.39: Configuración de PID dinámico para diferentes cajas reguladoras

Además, la ganancia es dependiente de la velocidad del capstan de entrada, así que, usando los valores máximos y mínimos se describe una curva que calcula el Kp.

Figura 7.40: Configuración de Kp como función de la velocidad

Finalmente, el diagrama de bloques que describe el control de posición en el tubo queda así:

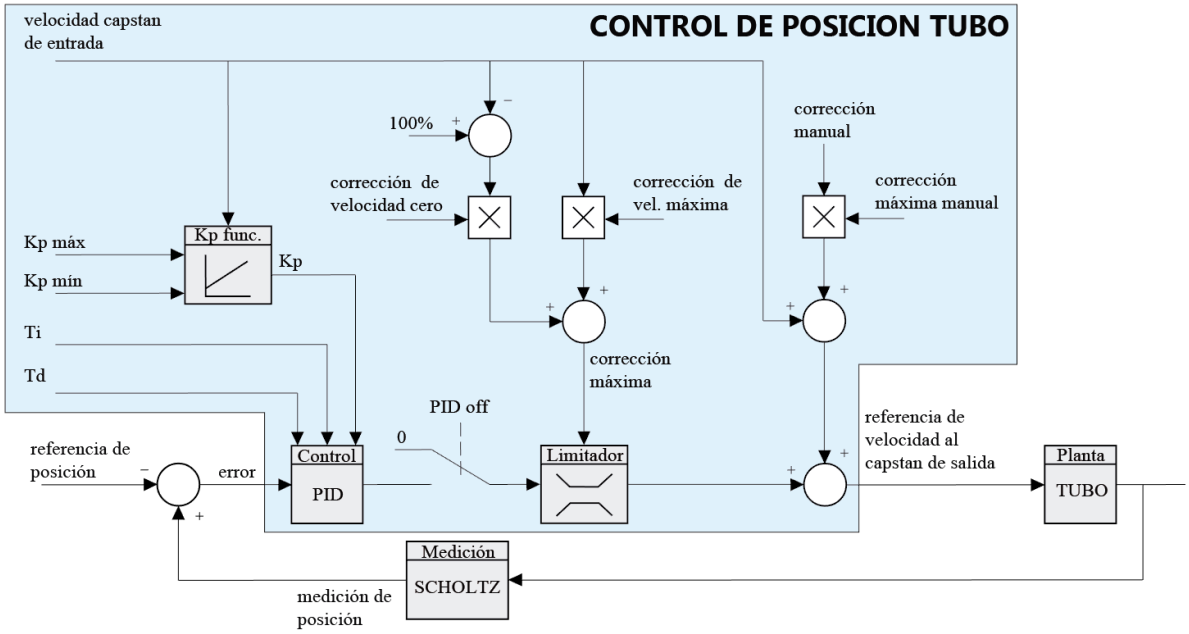


Figura 7.41: Control de posición del tubo

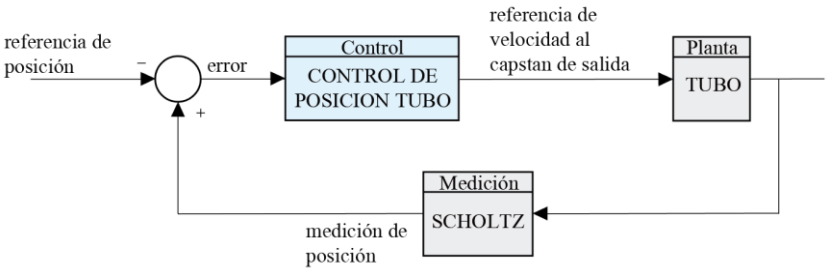


Figura 7.42: Modelo simplificado de control de posición del tubo

7.14.- Diagramas de bloques

Finalmente están dadas las condiciones para presentar mediante diagramas de bloques la filosofía de control de la máquina completa. En primer lugar, se muestra un diagrama unilineal de cómo están dispuestos los equipos secuencialmente (ver figura 7.43).

Para entender claramente la figura 7.43 es preciso comprender el funcionamiento de esta máquina desde su concepto más simple: **FABRICACION DE CABLE**. En su esencia, el

objetivo de esta estación es sencillamente tomar un cable desnudo y recubrirlo con un polímero. La máquina se alimenta de cable desnudo y lo hace avanzar a través de estaciones que lo van recubriendo, para luego ser enfriado, medido y finalmente enrollado.

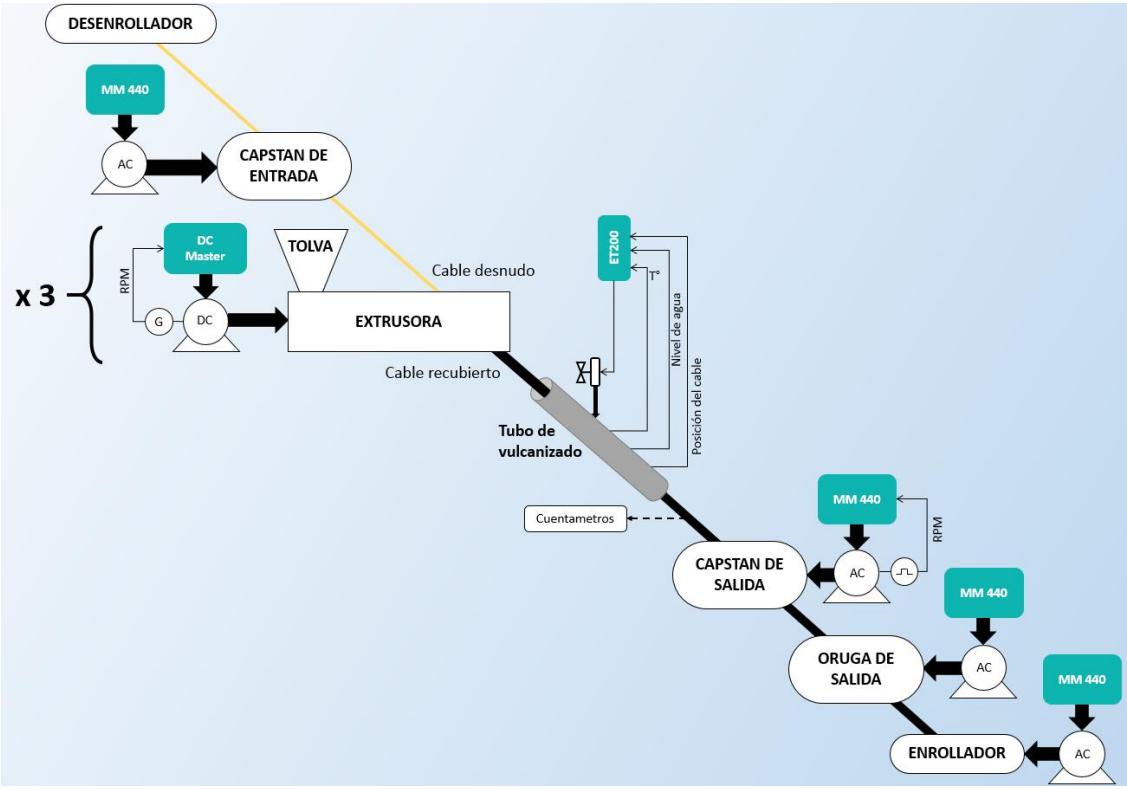


Figura 7.43: Diagrama unilineal de la línea completa

El lazo de control principal es el control de la posición del tubo. Se encarga de controlar la posición del cable dentro del tubo mediante la regulación de la velocidad del capstan de salida en base a la velocidad del capstan de entrada. El diagrama de bloques se puede apreciar en la figura 7.41, sin embargo, dicha figura no contempla la interacción de este lazo con el resto de los equipos. A continuación se presenta un diagrama de bloques en donde se considera la interacción de los lazos. Para el caso del control de posición del tubo, veremos que el espesor del cable se manifiesta como una perturbación al modelo de la planta a controlar, pues mientras mayor sea el espesor, mas inercia tendrá el cable, también la velocidad de línea se presenta como una perturbación a la planta, pues esta velocidad

determina la velocidad angular con la que gira el carrete desenrollador, provocando nuevamente una inercia perturbadora

Otro lazo de suma importancia es el control de temperatura en las zonas, éste también fue explicado previamente y su detalle puede apreciarse en la figura 7.31. Cabe mencionar que a pesar de que este lazo parece independiente, esto no es así, pues la velocidad de línea afecta directamente a la actuación de este control. Esto es debido a que si la velocidad de línea sube abruptamente, la extrusora se encontrará con menos material dentro de ella obligando a aumentar las RPM del tornillo, haciendo pasar más material a través de éste y, en consecuencia, demandando mayor capacidad calórica a los calefactores para que así puedan elevar correctamente la temperatura de un material que pasa más rápido y permanece menos tiempo en contacto con los elementos. A la inversa, si la velocidad de línea disminuye, el polímero estará más tiempo dentro del cilindro provocando que su temperatura suba demasiado, en este caso el control de temperatura reaccionará bajando la actuación. Esto pudo haber sido programado mediante una pre alimentación de sistema, sin embargo, se decidió no hacerlo y considerar estos movimientos como perturbaciones, puesto que la variable temperatura es lenta, es capaz de compensar sin problemas. En el diagrama de bloques del control de temperatura la velocidad de línea se presenta como una perturbación a la planta.

La tolva, a su vez, se ve perturbada por la velocidad del tornillo, pues ésta provocara que el ciclo de trabajo aumente.

Y finalmente el control de nivel de agua sufrirá perturbaciones, nuevamente, debido a la velocidad de la línea y también debido a la temperatura con la cual salga el cable desde la extrusora.

Finalmente, y con todos los antecedentes recabados, se puede elaborar un diagrama de bloques general.

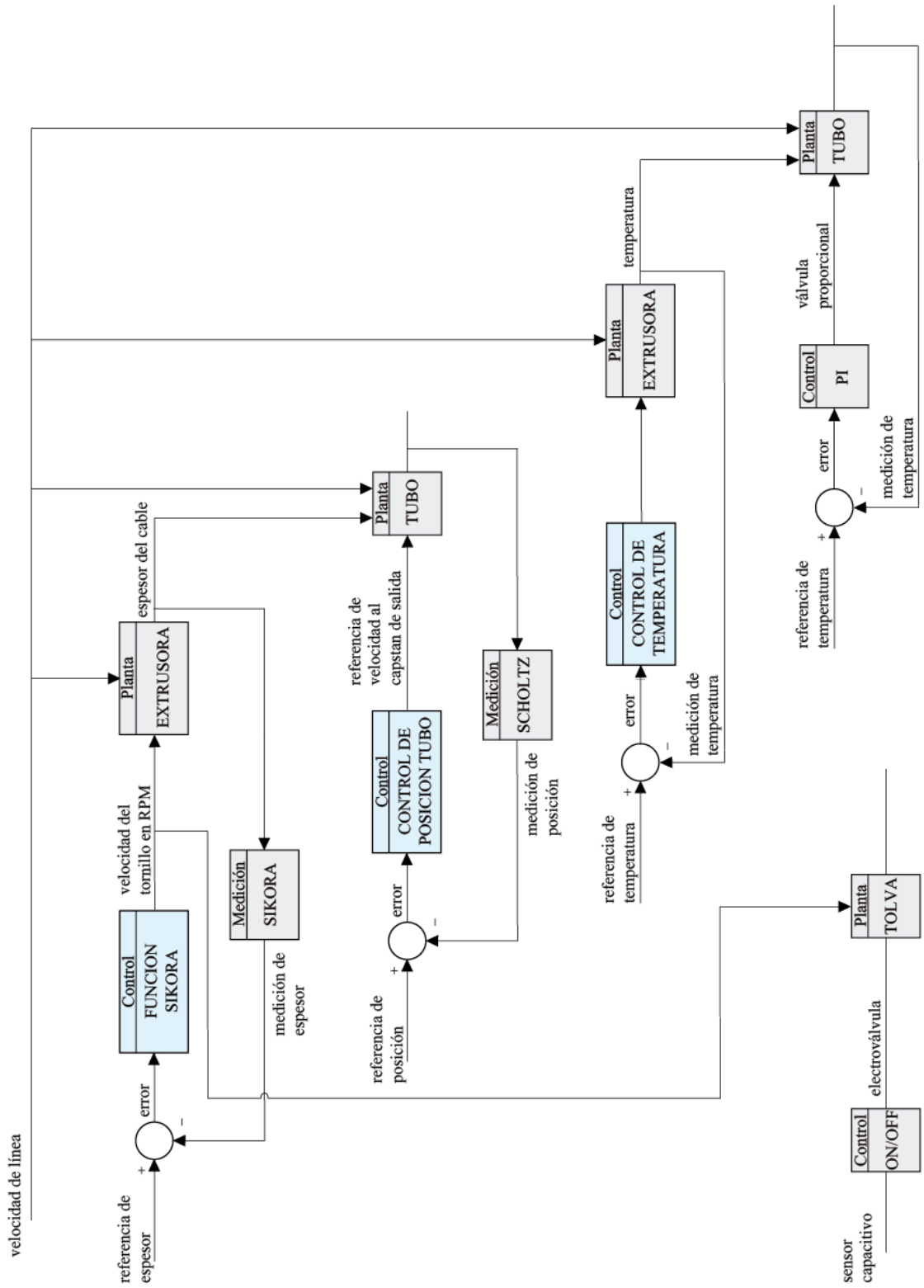


Figura 7.44: Diagrama de bloques de la línea completa

7.15.- Gráficas en tiempo real

Con los diagramas de bloques previamente descritos es posible ahora rescatar gráficos en tiempo real del comportamiento de la máquina. La figura 7.45 muestra el comportamiento de las variables controladas mediante la filosofía previamente descrita. Note el comportamiento subamortiguado de las temperaturas de las zonas 4 y 5, así como en la extrusora de 4 pulgadas se ve el *"overshot"*, luego una oscilación y finalmente error estacionario cero.

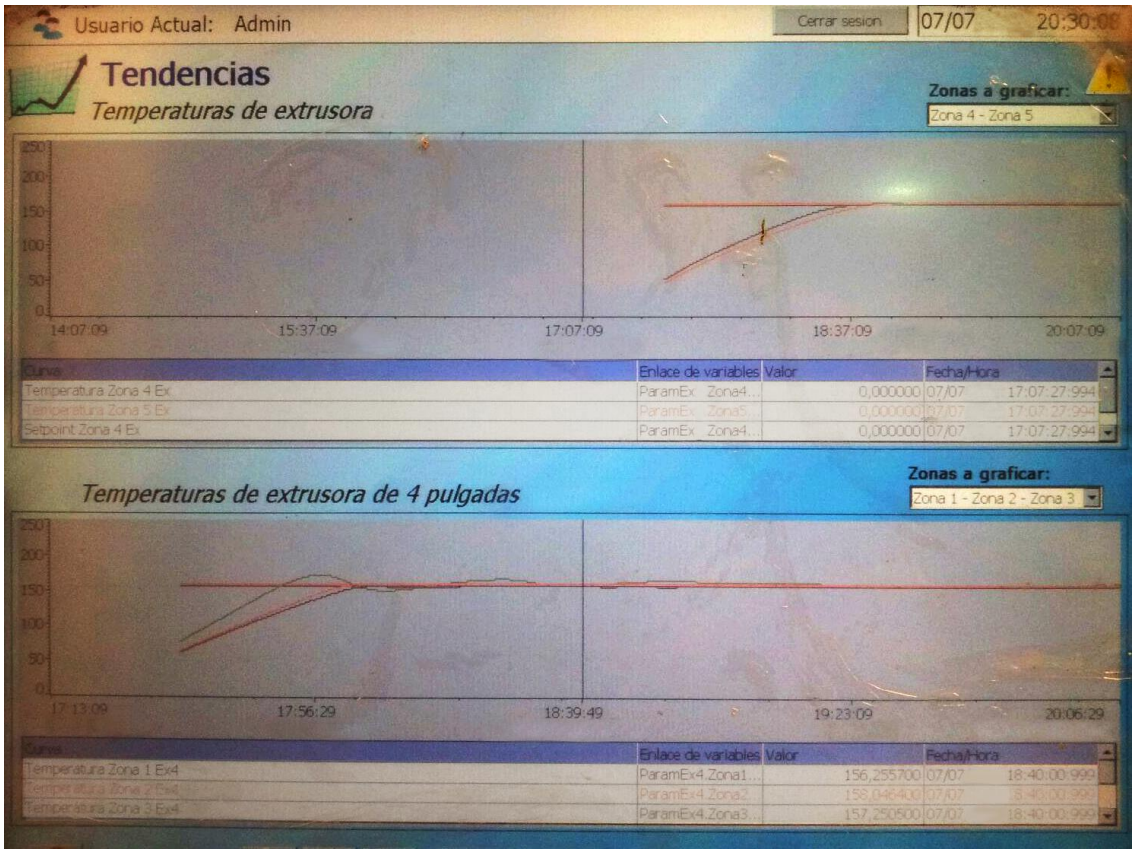


Figura 7.45: Comportamiento de las temperaturas

8.- CONCLUSIONES Y RESULTADOS

En el año 2008 la empresa francesa Nexans S.A. adquirió la unidad de cables de la compañía chilena Madeco S.A. Fundada en el año 1944, Madeco aún conservaba entre sus activos maquinarias y herramientas obsoletas. Esto va en contra de los estándares de calidad internacional a los que obedece Nexans, motivo por el cual en el año 2010 desarrolla una política de reinversión, en donde destina gran cantidad de recursos a la renovación de sus activos.

Entre los activos de interés se encuentran las máquinas extrusoras, que son las encargadas de recubrir los alambres de cobre con un determinado polímero y así construir cables, principal giro de la empresa.

El presente documento muestra como el autor desarrolló e implementó un sistema de automatización para la máquina extrusora de cables. Se renovaron todos los accionamientos eléctricos, los sistemas de control, los cables de alimentación, los cables de fuerza y algunos sensores. Las piezas mecánicas fueron conservadas en su gran mayoría, a excepción de algunos pistones y algunas correas. Se suministraron los tableros eléctricos y se programaron los autómatas, los accionamientos eléctricos y las interfaces humano máquina.

A 2 años de implementada la solución, Nexans S.A. se encuentra más que satisfecha con el resultado obtenido. Se logró un estándar de calidad internacional en la máquina, ésta ahora tiene repuestos, planos actualizados, protocolo de uso, protocolo de detección de fallas y soporte técnico. Todo el hardware y software que la componen permiten que la máquina funcione según lo planeado por el operador, mejorando así la precisión de las variables, lo que se traduce en una mejora en la calidad del producto.

Antes de la modernización esta máquina sólo era sometida a mantenciones correctivas cuando presentaba una falla. Tenía una disponibilidad del 55%, después de la intervención la disponibilidad subió a un 95%, reduciendo drásticamente los tiempos muertos, ahora es posible realizar mantenciones preventivas (las cuales además son más rápidas para los mecánicos gracias al menor desgaste mecánico y también más rápidas para los eléctricos porque hay menos motores DC). Además, se comenzaron a lograr las metas de producción, lo cual significa bonos para los empleados. También mejoró el rendimiento, lo que se traduce en mayor eficiencia energética y, por ende, menor costo de energía.

Finalmente uno de los indicadores más importantes para Nexans es la confiabilidad, éste se calcula en base a la facilidad de conseguir insumos para la máquina, la disponibilidad de ésta y la calidad del producto terminado, este número subió de 32% a un 88%.

Vemos entonces que las ventajas de la modernización son múltiples, pero son por sobre todo económicas, lo cual es, generalmente, el principal motor de la industria. De hecho, además de ésta, también se modernizaron otras 5 extrusoras y una máquina trefiladora, quedando cabalmente demostrado que el cliente final consiguió los resultados que esperaba.

Como nota aparte, el autor de este documento también quisiera exponer sus conclusiones personales. El documento muestra cómo se desarrolló la técnica para conseguir los objetivos planteados, desde un punto de vista académico estos objetivos corresponden básicamente a la mejora en el desempeño de los equipos, estas mejoras se consiguen mediante la sumatoria de elementos muy técnicos entre los que podemos nombrar: robustez de comunicación frente a EMI (*"Electromagnetic Interference"*), mejoras en la velocidad gracias a tiempos de asentamientos más cortos, error estacionario cero en los controles PI, modulación por ancho de pulsos, control por histéresis, control vectorial y muchos otros ya mencionados. Todos estos desafíos se resuelven gracias a los conocimientos aprendidos en la academia y en la práctica, fue muy gratificante poder resolver estos desafíos de manera contundente. No obstante, al momento de escribir este documento sentí que no podía tomar a la ligera la explicación de los conceptos, y en cada tema decidí entender la base que sustenta la aplicación de la técnica, fue allí donde dedique la mayor cantidad de energía, pues me di cuenta que muchos conceptos solo los conocía en su punto de aplicación, no comprendía la esencia misma del argumento, y así siguió ocurriendo con diferente tópicos, y en cada uno de ellos cuando lograba aclarar el panorama desde su parte más medular, todo me hacía aún más sentido y se volvía más claro y lógico. Este es el verdadero aporte de este documento para mi persona, volver a la esencia del teorema, entender desde cero cada una de las partes, para así comprender realmente el todo.

9.- BIBLIOGRAFIA

[1] http://www.bancomundial.org/es/country/chile/overview

[2] http://www.nexans.co/eservice/Colombia-es_CO/navigatepub_240757_-18195/Cierre_de_la_adquisici_n_de_Madeco.html

[3] "Extrusión", Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Alicante, 1999.

[4] Basics_of_DC_Drives_en. SIEMENS

[5] Basics_of_General_Motion_control_en. SIEMENS

[6] E. Mandado, J. Marcos, S. Pérez, C. Fernández e I. Armesto, "Autómatas Programables. Entorno y aplicaciones", Universidad de Vigo y SIEMENS, 2005.

[7] "bs_profibus_sp". Soluciones de red para PROFIBUS según IEC 61158 y EN 50170. Folleto técnico, abril 2008

[8] "brochure_simatic-et200_es". SIMATIC Distributed I/O Para soluciones de automatización descentralizadas, noviembre 2012

[9] "nt-002_termocupla". Que es y cómo funcionan las termocuplas. Nota técnica 2, rev b, http://www.arian.cl

10.- ACRONIMOS

Acrónimo	Significado	Significado en español
AC	Alternate Current	Corriente alterna
AI	Analog Input	Entrada analógica
AO	Analog Output	Salida analógica
AOP	Advanced Operator Panel	Panel de operador avanzado
BOP	Basic Operator Panel	Panel de operador básico
CIM	Computer Integrated Manufacturing	Manufactura Integrada por computador
CPU	Central Processing Unit	Unidad Central de procesamiento
CSRD	Cyclic Send and Request Data with reply	Envío y solicitud de información cíclica con respuesta
CW	Control Word	Palabra de Control
DA	Destination Address	Dirección del destinatario
DB	Data Block	Bloque de datos
DC	Direct Current	Corriente continua
DI	Digital Input	Entrada digital
DINT	Double Integer	Doble entero
DO	Digital Output	Salida digital
DPM1	Decentralised Periphery Master Class 1	Maestro clase 1 de Periferia Descentralizada
DPM2	Decentralised Periphery Master Class 2	Maestro clase 2 de Periferia Descentralizada
DPS	Decentralised Periphery Slave	Esclavo de Periferia Descentralizada
DTR	Double to Real	Doble entero a real
ED	End Delimiter	Delimitador de final
EIA	Electronics Industries Alliance	Alianza de industrias electrónicas
EMI	Electromagnetic Interference	Interferencia Electromagnética
FB	Function Block	Bloque de función
FC	Frame control	Carácter de control del mensaje
FCS	Frame check structure	Estructura de comprobación del mensaje
FDL	Field Data Link Layer	Capa de enlace de datos
GND	Ground	Tierra
GSD	"Device Data Base" en Aleman	Base de datos del dispositivo
HIW		Valor real principal
HMI	Human Machine Interface	Interfaz Humano Máquina
HP	Horse Power	Caballo de fuerza
HSW		Valor de consigna principal
IND	Index	Índice
INT	Integer	Entero
IO	Input Output	E/S: Entrada Salida
LE	Length byte	Longitud del byte
MODICON	Modular Digital Controller	Controlador digital modular

MPI	Multi-Point Interface	Interfaz Multi Punto
NRZ	Non Return to Zero	Sin paso por cero
OB	Organization Block	Bloque de Organización
PHY	Physical layer	Capa física
PID	Proportional Integral Derivative	Control proporciona, integral y derivativo
PKE		Identificador de parámetro
PKW	*"Parameter-Kennung-Wert" (Aleman)*	Área de Parámetros
PLC	Programmable Logic Controller	Controlador lógico programable
PPI	Pixels Per Inch	Pixeles por pulgada
PPO	Parameter Process Data Object	Estructura de datos útiles
PROFIBUS	Process Field Bus	Bus de campo de proceso
PSI	Pounds-force per Square Inch	Libra-fuerza por pulgada cuadrada
PV	Process Value	Valor de proceso
PVC	Polyvinyl Chloride	Poli cloruro de vinilo
PWE		Valor de parámetro
PWM	Pulse Width Modulation	Modulación por ancho de pulsos
PZD	*"Prozeßdaten" (en Aleman)*	Área de datos de proceso
RTD	Resistance Temperature Detector	Detector de temperatura resistivo
SA	Source Adress	Dirección del emisor
SCR	Silicon Controlled Rectifier	Rectificador controlado de silicio
SD	Start Delimiter	Octeto de inicio
SDA	Send Data with Acknowledge	Enviar mensaje con confirmación
SDN	Send Data with No acknowledge	Enviar mensaje sin confirmación
SP	Stop bit	Bit de fin de transmisión
SRD	Send and Request Data	Enviar y solicitar datos
SSR	Solid State Relay	Relé de estado solido
ST	Start Bit	Bit de inicio
STW		Palabra de mando 1
SW	Status Word	Palabra de estado
TC	ThermoCouple	Termopar
TIA	Totally Integrated Automation	Automatización Totalmente Integrada
TQUI	Quiet Time	Tiempo de espera de recepción
TS	This Station	Dirección de los procesadores de comunicaciones
TSET	Setup Time	Tiempo de espera de transmisión
TSL	Slot Time	Intervalo de confirmación de recepción
TTL	Transistor Transistor Logic	Tecnología transistor a transistor
UART	Universal Asyncronous Receiver-Transmitter	Transmisor-Receptor asíncrono universal
USB	Universal Serial Bus	Bus serie Universal
UV	Ultra Violet	Ultra violeta
ZSW		Palabra de estado 1

11.- GLOSARIO DE TERMINOS

Término	**Definición**
Accionamiento	Equipo electrónico destinado a controlar un motor
As built	"Construido". Planos finales de una obra
Autómata	Máquina que contiene un mecanismo que le permite realizar determinados movimientos
Baudrate	Velocidad de bytes en [bytes/s]
Broadcast	Mensaje enviado a todos
Capstan	Cabestrante, dispositivo giratorio que aplica tensión
Chopper	Dispositivo que conectada y desconecta la tensión reiteradamente
CNC	Computer numerical control
Consigna	Valor deseado
Convección	Transmisión de calor en un fluido
Dead Band	Banda muerta
Encoder	Dispositivo generador de pulsos para medir giros de un eje
Escobillas	Bloques de carbón con resortes que realizan contacto eléctrico
Extrusión	Proceso que crea objetos de sección transversal constante mediante presión
Extrusora	Máquina que realiza el proceso de extrusión
False	Valor lógico 0
Fuerza	En el contexto de cables eléctricos se refiere a los cables que transmiten la energía para realizar movimiento
Gabinete	Armario o caja destinada a contener equipos eléctricos
Husillo	Tornillo de acero con una rosca en su superficie
Know how	Saber cómo. Se refiere a conocimiento de uso reservado, pero no patentado
linealizar	Buscar un polinomio en torno a un punto de operación
Manifold	En neumática se refiere a un circuito que posee varias entradas y salidas, y éstas se pueden configurar
Multicast	Mensaje enviado a algunos destinatarios
Oruga	Equipo mecánico que posee una correa que gira y es más larga que ancha
Polímero	Macro moléculas unidas por grandes cadenas
Ratio	Razón, división de
Receta	En automatización se refiere a una serie de datos consistentes con un tipo de producto
Relé	Dispositivo electromagnético que mediante una corriente abre o cierra un circuito
Retrofit	Modernización, utilizar elementos existentes y mediante combinación con elementos nuevos, repotenciar un equipo
Scholtz	Equipo utilizado para medir posición
Sesgo	Brecha, informalmente conocido en electrónica como "offset"
Sikora	Equipo utilizado para medir grosor
Tacogenerador	Dispositivo electrónico que genera un voltaje continuo proporcional a las RPM de un eje
Termocupla	Termino coloquial para referirse a termopares

Termopar	Dispositivo sensible a la temperatura, genera mili voltios proporcionales a diferentes grados centígrados
Token Bus	Paso de testigo
Tolva	Elemento almacenador y proveedor de material
True	Valor lógico 1
VDF	Variador de frecuencia

ANEXOS