



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil Electrónica

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DOSIFICADOR DE PIGMENTOS

Tesis para optar al título de:
Ingeniero Electrónico.

Profesor Patrocinante:
Sr. Daniel Vicente Lühr Sierra.
Ingeniero Civil Electricista.

JAVIER HERIBERTO MARIÓ LEGUE
VALDIVIA CHILE
2009

Profesor Patrocinante

Ing. Daniel V. Lühr Sierra.

Profesores Informantes

Ing. Pedro Rey Clericus

Ing. Franklin Castro Rojas

Fecha Examen de Titulación

AGRADECIMIENTOS

Dar las gracias, a veces, suele ser muy fácil, pero en esta oportunidad no lo es porque tengo un nudo en la garganta al recordar porqué y por quiénes estoy agradeciendo.

En la vida de cada uno siempre existen personas que nos marcan, que nos dan lecciones de vida y que nos guían con sus palabras y consejos.

Quiero darle las gracias a Sandra Pérez, una amiga que sin ningún interés, sin ningún prejuicio me dio la oportunidad de estudiar, gracias a ella llegué a Valdivia, gracias, Sandra, de todo corazón.

Johnny Cabezas, un buen amigo que fue parte de este sueño hecho realidad, tu apoyo y consejos me ayudaron a ser mejor y a esforzarme, el camino es duro, pero el final siempre trae recompensas, gracias amigo.

A mi tía Luz María quiero decirle muchas gracias por todo, por aquellas charlas donde me aconsejaba que lo mejor para mí futuro era estudiar y sacar mi título, gracias por entregarme su cálido amor y su sabiduría. También le agradezco al tío Fernando, a Felipe, Hans, Nicolás y a mi buen amigo Fernando. Gracias a la familia Holmberg Peter por todo su apoyo y cariño.

He pensado cientos de formas de agradecerle a la mujer que me dio la vida, pero no encuentro las palabras que puedan decir lo agradecido que estoy de ser su hijo. Mi madre, María Legue, la mujer que se esforzó y dio todo por ser quien soy hoy. Mamá, siempre me diste las fuerzas para poder seguir, siempre dejaste de lado tus propios intereses y nos diste todo cuánto estaba a tu alcance. Este logro te lo dedico a ti, con toda mi alma y con todo mi amor, te amo. También darte gracias a ti, Papá, que con tu ejemplo me enseñaste que la vida es difícil, pero con esfuerzo, sencillez y dedicación todo se puede lograr, gracias viejo, te amo.

A Christian, mi hermano, darle las gracias porque me ayudó cuando lo necesitaba y siempre estuvo presente su ejemplo, la vida no nos tocó fácil, pero pudimos, con esfuerzo, lograrlo. Te amo hermanito.

La vida es dulce y amarga. En la universidad pasé momentos difíciles y momentos alegres, en todos ellos tuve compañía de una persona que me enseñó que el amor existe, gracias a ella me sentí amado y siempre tuve alguien con quien contar, que me apoyó, me dio alegrías y siempre me robó una sonrisa en momentos difíciles, Sylvana, gracias por todo lo que me diste.

No me he olvidado de aquellas personas que con su desinteresada ayuda hicieron posible cumplir una de mis metas, por esta razón quiero agradecer a:

Tío Pepe y tía Marta.

Helmut Toirkens.

Tíos Carmen Murúa y Francisco Budinich.

Raúl Oyanedel.

Felipe Chacón.

Felipe Bastidas.

José Ili.

Marcelo Barría.

Alejandra Báez.

Alex Rebolledo.

A mis profesores y profesoras.

A mis amigos de la universidad.

A mis compañeros de fútbol.

Gracias a todos.

Son mis más sinceros agradecimientos a todos ustedes por hacer de mí una mejor persona, gracias por todo.

Javier Heriberto Marió Legue.

INDICE

RESUMEN_____	XII
ABSTRACT_____	XIII
INTRODUCCIÓN_____	XIV
OBJETIVOS_____	XV

CAPÍTULO I

CIM, MANUFACTURA INTEGRADA POR COMPUTADORA

1. Capítulo I: CIM, Manufactura Integrada por Computadora _____	16
1.1. Introducción_____	16
1.2. CIM, Definición_____	16
1.3. Herramientas del CIM_____	18
1.4. Niveles CIM_____	23
1.4.1. Nivel 5, Nivel de Empresa_____	23
1.4.2. Nivel 4, Nivel de Control de Factoría_____	23
1.4.3. Nivel 3, Nivel de Control de Célula_____	24
1.4.4. Nivel 2, Nivel de Control de Máquina_____	24
1.4.5. Nivel 1, Nivel de Sensor y Actuador_____	24
1.5.El Problema de la Integración de los Niveles CIM_____	25
1.6. Tipos de Procesos Industriales_____	26
1.6.1. Operaciones Continuas_____	26
1.6.2. Operaciones Discontinuas_____	26
1.6.3. Operaciones por Lotes_____	26
1.6.4. Operaciones Discretas_____	27
1.7. Modelos CIM Existentes_____	28
1.7.1. Concepto CIM de IBM _____	28
1.7.2. Modelo Jerárquico NIST-AMRF_____	29
1.7.3. Modelo CIM de Siemens_____	30

CAPÍTULO II

ESTUDIO DE SOFTWARE Y HARDWARE

2. Capítulo II: Estudio de Software y Hardware_____	32
2.1. Introducción_____	32
2.2. Técnicas de Diseño_____	33

2.2.1. Grafcet	33
2.2.2. Características del Grafcet	34
2.2.3. Elementos del Grafcet	35
2.2.4. Etapas	36
2.2.5. Acciones Asociadas a las Etapas	37
2.2.6. Descripciones detalladas de acciones	37
2.2.7. Acciones Continuas	38
2.2.8. Acciones Condicionales	38
2.2.9. Acciones Temporizadora	38
2.2.10. Efecto mantenido, sin memoria	39
2.2.11. Efecto mantenido, con memoria	40
2.2.12. Enlaces orientados	40
2.3. Elementos de Programación	41
2.3.1. Básculas	41
2.3.2. Temporizadores y contadores	42
2.3.2.1. Temporizadores programables (timers)	42
2.3.3. Contadores	45
2.3.4. Registro de desplazamientos	46
2.4. Cálculo Aritmético Y Lógico	46
2.5. Control De Secuencia	47
2.6. Lenguajes de programación	48
2.6.1. El código de la operación	49
2.6.2. Operandos asociados	49
2.6.3. Sistemas Operativos	49
2.6.4. Software de edición y depuración de programas	49
2.6.5. Lenguaje de programación	50
2.6.6. Lenguaje de explotación	50
2.7. Estandarización en la Programación del Control Industrial	50
2.8. Softwares Comerciales	54
2.8.1. Allen Bradley	54
2.9. Hardware, el PLC	57

2.9.1. Qué es un Controlador Lógico Programable, PLC	58
2.9.2. Terminología del PLC, Input/Output	60
2.9.3. Bit, Byte, Digit, Word	60

CAPITULO III

TECNOLOGÍA DE SISTEMAS DE CONTROL

3. Capítulo III: Tecnología De Sistemas De Control	62
3.1. Introducción	62
3.2. Del Microordenador al miniordenador	62
3.3. Principios básicos de la teoría de control	63
3.4. Definiciones básicas	63
3.4.1. Proceso $G(s)$	63
3.4.2. Controlador $G_c(s)$	64
3.4.3. Sensor $H(s)$	64
3.4.4. Actuador	64
3.4.5. Transmisor	65
3.5. Función de Transferencia	65
3.6. Señales Principales	66
3.6.1. Variable de proceso $y(t)$	67
3.6.2. Variable Medida $y_m(t)$	67
3.6.3. Señal de Control $u(t)$	67
3.6.4. Consigna $y_{sp}(t)$	67
3.6.5. Error $e(t)$	67
3.6.6. Perturbación $p(t)$	67
3.7. Sistema de Control de Lazo Abierto	68
3.8. Sistema de Control de Lazo Cerrado o Realimentado	68
3.9. Elementos Lineales de Control	69
3.9.1. Control PID analógico	70
3.9.1.1. Acción proporcional	72
3.9.1.2. Acción Integral	75
3.9.1.3. Interpretación Frecuencial	78

3.9.1.4. Acción Derivativa_____	79
---------------------------------	----

CAPITO IV

CELDA DE CARGA

4. Capítulo IV: Celdas de Carga_____	82
4.1. Introducción_____	82
4.2. Principios Básicos de la Celda de Carga_____	82
4.3. Galga Extensométrica_____	83
4.3.1. Fundamento: Efecto Piezorresistivo_____	83
4.3.2. Descripción constructiva_____	89
4.3.3. Influencia de la temperatura_____	98

CAPITULO V

VARIADORES DE FRECUENCIA (VF)

5. Capítulo V: Variadores de Frecuencia (VF)_____	117
5.1. Introducción_____	117
5.2. Partes que Componen un VF_____	118
5.2.1. Etapa Rectificadora_____	119
5.2.2. Etapa intermedia_____	119
5.2.3. Inversor o "Inverter"_____	119
5.2.4. Etapa de control_____	119
5.3. Rectificador_____	121
5.4. Inversor_____	121
5.5. Parámetros de Rendimiento_____	123
5.5.1. Factor armónico de la n-ésima armónica (HFn)_____	123
5.5.2. Distorsión armónica total (THD-Total Harmonic Distortion)_____	123
5.5.3. Factor de distorsión (DF-Distortion Factor)_____	123
5.6. Inversor PWM_____	125
5.7. Variadores de Tipo Flujo Vectorial _____	126
5.8. Tipos de Cargas_____	127
5.9. Cargas de Par Variable_____	128
5.10. Cargas de Par Constante_____	129

5.11. Cargas de Potencia Constante_____	130
5.12. Cargas de Impacto_____	131
5.13. Utilización en la industria_____	132
5.14. Control de Flujo en Ventiladores_____	133
5.15. Métodos De Regulación _____	135
5.15.1. Compuertas en la descarga_____	135
5.15.2. Aletas regulables en la entrada_____	137
5.15.3. Accionamientos de velocidad variable_____	137
5.15.4. Comparación De Potencia Entre los Tres Métodos_____	139
5.16. Ahorro de Energía_____	140

CAPITULO VI

CONFIGURACION DE LOS SISTEMAS INDIVIDUALIZADOS

6. Capítulo VI: Configuración de los Sistemas Individualizados_____	141
6.1. Introducción_____	141
6.2. Primera Plataforma_____	142
6.2.1. Estanque de Acopio_____	142
6.3. Celdas de Carga_____	144
6.4. Estanque de mezclado_____	148
6.5. Sistema de Comunicación_____	149

CAPITULO VII

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DOSIFICADOR DE PIGMENTOS

7. Capítulo VII: Configuración del sistema Dosificador de Pigmentos____	150
7.1. Introducción_____	150
7.2. Configuración mecánica del sistema_____	151
7.2.1. Motorreductor_____	152
7.2.1.1. Características del reductor o motorreductor_____	152
7.2.1.1.1. Tamaño_____	152
7.2.1.2. Características del trabajo a realizar_____	152
7.2.1.3. Guía para la elección de tamaño de reductor o motorreductor____	152
7.2.1.3.1. Características de operación_____	152

7.2.1.4. Ventajas del Reductor Ciclo	154
7.2.1.4.1. Baja Generación de Calor y Fricción	154
7.2.1.5. Reductores de corona o tornillo sin fin	155
7.2.1.5.1. Tipos de engranajes	155
7.2.1.5.2. Engranajes rectos	157
7.2.1.5.3. Engranajes cónicos	158
7.2.1.5.3.1. Engranaje cónico recto $\delta = 90^\circ$	158
7.2.1.5.3.2. Engranaje cónico recto con ángulos de ejes $\delta < 90^\circ$	159
7.2.1.5.3.3. Engranaje cónico recto, con ángulo de ejes $\delta > 90^\circ$	159
7.2.1.5.4. Engranaje Helicoidal	160
7.2.2. Actuadores	161
7.2.2.1. Actuadores Lineales	162
7.2.2.1.1. Cilindros de simple efecto	162
7.2.2.1.2. Cilindros de doble efecto	164
7.2.2.1.3. Desfase fuerza/velocidad	166
7.2.2.1.4. Cilindros de doble vástago	168
7.2.3. Ejemplos de uso de actuadores	170
7.3. Agitadores	171
7.4. Configuración en terreno entre el PLC, la red y los periféricos	174

CAPITULO VIII

PROTOSLOS DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL

8. Capítulo VIII: Protocolos de Comunicación Industrial	176
8.1. Introducción	176
8.2. Buses de Campo	177
8.2.1. Hart	178
8.2.2. Profibus	179
8.2.2.1. Capa Física	181
8.2.2.2. Capa de Enlace	184
8.2.2.3. RS 485 (H2)	196
8.2.2.4. IEC 1158-2 (H1)	196
8.2.2.5. Fibra Óptica	197

8.2.3. Foundation Fieldbus	198
8.2.4. Modbus	198
8.2.5. Devicenet	198
8.3. Aplicación de redes Industriales	204

CAPITULO IX MOTO-BOMBAS

9. Capítulo IX: Moto-Bombas	207
9.1. Introducción	207
9.2. Bombas de Agua	208
9.3. Tipos de Bombas	209
9.3.1. Según el principio de funcionamiento	209
9.3.1.1. Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas	209
9.3.1.1.1. Bombas de émbolo alternativo	209
9.3.1.1.2. Bombas volumétricas rotativas o roto estáticas	209
9.3.1.2. Bombas roto dinámicas	210
9.3.1.3. Según el tipo de accionamiento	212
9.3.1.4. Tipos de bombas de émbolo	212
9.3.1.4.1. Bomba aspirante	212
9.3.1.4.2. Bomba impelente	213
9.3.1.4.3. Bomba Centrifuga	213
9.3.1.5. Cebado de bombas roto dinámicas	216
9.3.1.6. Sellado de bombas	218

CAPITULO X CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

10. Capítulo X: Conclusiones y Comentarios	220
--	-----

CAPITULO XI REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

11. Capítulo XI: Referencia Bibliográfica	222
---	-----

RESUMEN

El trabajo que a continuación se presenta nos muestra el estudio de los dispositivos y tecnologías que están disponibles en el mercado en nuestros tiempos.

A modo general, el equipo tiene por función controlar el peso del producto de tal manera que sea lo más exacto, con porcentajes de error cercanos al 1 ó 2%, esto es muy importante ya que los productos son trabajados a niveles de gramos, debido a su elevado costo.

La idea de realizar el estudio es para poder tener conocimientos de los principios de funcionamiento de las tecnologías que están involucradas para así, una vez estudiados, poder tener claridad de cuáles son las más apropiadas y poder implementarlas en el equipo.

Dentro de las tecnologías que se estudiarán en este trabajo se encuentran las siguientes: las celdas de carga o galgas extensiométricas, los cilindros neumáticos, buses de campo, bombas de agua, agitadores, PLCs y se estudiará el sistema que hace posible la interacción de todo lo mencionado anteriormente, el CIM, Manufactura Integrada por Computadora. Este sistema tiene por finalidad integrar todos los dispositivos y elementos. En el mercado todas las compañías abocadas al control de procesos y/o la automatización tienen sus CIM, el cual integra a cada uno de sus instrumentos, lo que implica que, en algunos casos, nos encontremos con problemas de compatibilidad entre un equipo de una marca y, por ejemplo, un software de otra.

Para finalizar este trabajo se darán a conocer las conclusiones a las cuales se llegó, luego de revisar y estudiar los distintos componentes y tecnologías.

ABSTRACT

The following investigation is a study that shows us the devices and technologies that are currently available in our markets.

Generally, the equipment we will study's function is to control the weight of the product in the most precise fashion, with a margin of error close to the one or two percent. This is very important since the products are measured in grams due to their high costs.

The purpose of this study is to be able to have the knowledge of the basic functions of the technologies that are involved in this investigation. Once this has been established, we would like to have a clear idea of which are the most appropriate technologies to use and be able to integrate them within the equipment.

Among the technologies that will be studied in this investigation are the following: load cells or strain gauges, the pneumatic cylinders, fieldbuses, water bombs, agitators, PLCs and finally we will study the system which enables the previously mentioned interaction, the CIM or Computer Integrated Manufacturing.

The purpose of this system is to integrate all the devices and elements. In the market, all of the companies who specialize in processing and/or the automation have a CIM. This CIM integrates each one of the instruments, which means that, at times, we are faced with compatibility problems due to the equipment of a certain brand or the software of another.

To finalize this work we will shed light on the conclusions of the investigation, revise our work and study the different components and technologies.

INTRODUCCIÓN

Para el diseño de cualquier equipo o sistema es necesario estudiar los requerimientos del equipo propiamente tal, además del medio en el cual trabajará.

Este trabajo estudia los instrumentos, equipos y tecnologías existentes en el mercado. Una vez encontrados los equipos, estos serán estudiados, es decir, se profundizará en cada uno de ellos para así entender su funcionamiento.

Los equipos e instrumentos por si solos, aunque estén energizados, no son capaces de realizar un trabajo satisfactorio para el proceso. Es por tal motivo que estos deben comunicarse entre sí, para tales efectos existen sistemas de comunicación industrial donde se pueden controlar equipos individualizados y unirlos a un proceso completo, esto se puede realizar a través de CIM, Manufactura Integrada por Computadora, este sistema, como su nombre lo indica, integra todos los procesos o maquinarias individualizadas en un equipo.

Por otro lado todos los instrumentos, celdas de carga, actuadores, PLC, HMI, etc., deben estar comunicados, para tales efectos existen los protocolos de comunicación, para esto se estudiarán algunos de los existentes en el mercado, tales como Devicenet, Hart, Field Foundation, Modbus, Profibus, etc.

Para el traslado de líquidos, se darán a conocer los distintos tipos de bombas utilizados para el movimiento de aceites, por ejemplo. Además se hablará sobre los actuadores, elementos necesarios para realizar movimientos controlados de los dosificadores, estos se pueden mover de 0° a 90°, por ejemplo, pero también se puede controlar su movimiento grado a grado.

Finalmente se darán a conocer las conclusiones a las cuales se llegó después de haber realizado este trabajo.

OBJETIVOS

Objetivos Generales.

- ❖ Realizar el estudio y el diseño de un dosificador de pigmentos, donde se analizarán los distintos elementos que pueden ser incorporados al sistema para luego estudiarlos individualmente.
- ❖ Indagar en el mercado cuáles son las empresas que manejan las diferentes tecnologías y cuáles son los productos y servicios que entregan a los consumidores.

Objetivos Específicos.

- ❖ Realizar el análisis técnico para la implementación del Sistema Dosificador.
- ❖ Analizar las distintas variables involucradas en el Sistema Dosificador.
- ❖ Realizar el estudio de elementos y equipos que se utilizarán en el Sistema Dosificador.
- ❖ Estudiar el funcionamiento y la teoría implícita en las Celdas de Cargas.
- ❖ Estudiar el funcionamiento de los Variadores de Frecuencia.
- ❖ Estudiar el tipo de Hardware y Software a utilizar.
- ❖ Conocer los distintos tipos de motobombas utilizado para el transporte de líquidos.
- ❖ Estudiar los distintos tipos de comunicación industrial existentes en el mercado.

CAPITULO I

CIM

1. (MANUFACTURA INTEGRADA POR COMPUTADORA)

1.1.Introducción

El desarrollo detallado de diseños específicos de sistemas modernos CIM han llegado a ser una tarea muy compleja. El diseño debe tener en cuenta varias limitaciones (costo, calidad, flexibilidad, tiempo, evolución) y que el sistema resultante con mejor eficiencia. La elección del hardware y el software es una consecuencia directa de este proceso de diseño, lo cual significa que tomar la decisión equivocada puede tener consecuencias dramáticas en la inversión. Entre los varios elementos (experiencias anteriores, objetivos, etc.) que puede influir en el diseño final, es de suma importancia la elección de una técnica de modelamiento.

CIM (Manufactura Integrada por Computadora) es utilizado para describir el proceso de integración de todos los elementos implicados en la fabricación, por medio de técnicas de computadora. Tras los últimos diez años, CIM ha sido limitado a una interpretación puramente técnica. Hoy, las muchas dificultades encontradas en el transcurso de varias implementaciones han mostrado que una vista tan estrecha no es satisfactoria: los aspectos económicos, sociales y humanos deben ser considerados de igual forma que los mencionados anteriormente.

1.2. CIM - Definición

El autor John W. Bernard lo define como "la integración de las computadoras digitales en todos los aspectos del proceso de manufactura". Otro esclarecimiento afirma que se trata de un sistema complejo, de múltiples capas diseñado con el propósito de minimizar los gastos y crear utilidades en todos los aspectos. También se menciona que tiene que ver con proporcionar asistencia computarizada, automatizar, controlar y elevar el nivel de integración en todos los niveles de la manufactura.

Otra tesis hace referencia a CIM de manera global (en un ambiente industrial) que apunta a mejorar los desempeños industriales. Este enfoque es aplicado de forma integral en todas las actividades, desde el diseño, pasando por la entrega y la después por la post-venta, y utilizando varios métodos, medios y técnicas (computadora y técnicas automáticas) mejorando simultáneamente la productividad, disminución de costo, control de fechas de vencimiento, aumento de la calidad de producción, segura flexibilidad en el sistema industrial a nivel local o global, que involucre a cada actor. En tal enfoque, económico, social y aspectos humanos son, por lo menos, tan importantes como los aspectos técnicos.

Este axioma, tan amplio, muestra que una solución de CIM no puede ser aplicada a todas las industrias por igual. Cada empresa debe idear su propio método, lo cual explica qué metodologías deben estar disponibles para que los sistemas CIM puedan ser implementados en cada una de ellas.

Para el diseño de un sistema CIM existen innumerables dificultades, pero en este trabajo se mencionarán las más relevantes:

- ✓ El sistema es extremadamente complejo y no involucra sólo aspectos técnicos, sino también aspectos económicos, sociales y humanos, los cuales deben ser tomados en cuenta al momento de diseñar el sistema. Además puede ser totalmente automatizado o computarizado.
- ✓ Todos los conocimientos que son necesarios aplicar al sistema no deben descansar en una sola persona, sino muy por el contrario en un grupo de trabajo.
- ✓ Durante el diseño del sistema es imposible modelar el proceso: sólo se puede aprender a través de la experiencia y debido a que cada sistema es único.

Se identifican cuatro servicios industriales, los cuales convergen por medio del uso de la Manufactura Integrada por Computadora en una sola "Administración de tipo dinámica", respondiendo de esta manera a las cambiantes necesidades del mercado y permitiendo a las empresas manufactureras convertirse en

"Fabricantes de Clase Mundial" , los cuatro servicios son los siguientes: Tecnologías de automatización, Herramientas de control de calidad, La Operación y Los Procesos, que son nuevas formas de medir el rendimiento de la planta.

Por lo tanto la manufactura integrada por computadora es uno de tantos conceptos avanzados que abarcan tecnologías modernas de manufactura, así como otros conceptos de manufactura como Justo a tiempo, calidad total, teoría de restricciones, etc. Lo realmente importante no es dar una definición al concepto, sino entender que se trata de una forma de trabajo en la cual todas las partes que intervienen para el desarrollo de un producto están enfocadas a lograr la meta de una organización.

1.3.Herramientas del CIM

Sin importar que tan eficientes sean las operaciones de corte, ensamblaje y movimiento de materiales, mientras no exista una buena coordinación y planificación no existirá real eficiencia. La tecnología CIM que mejora la administración de la manufactura son los sistemas MRP II (Manufacturing Resource Planning) o planeación de insumos de manufactura y, más recientemente, JIT (just in time) o justo a tiempo.

El MRP II ha sido llamado el sistema nervioso central de la empresa manufacturera. Contenidos en estos sistemas se encuentran los módulos de software que planean y organizan las operaciones de manufactura, permiten explorar mejores alternativas para la producción y los insumos, monitorean si las operaciones se ajustan al plan previo y permiten proyectar resultados -incluso financieros-. Se dice que ninguno de los sistemas actualmente instalados de CIM que tenga el MRP II lo usa a cabalidad, puesto que su capacidad de manejar información es demasiado elevada. La importancia de estos sistemas es obvia; a través de los datos ellos generan, recolectan y administran, estableciendo y manteniendo contactos con todas las locaciones y oficinas en la empresa.

La producción JIT, relacionada a la anterior, ha hecho que muchas compañías replanteen su estrategia de producción, debido a los grandes beneficios obtenidos tras su implementación. Una de las máximas del JIT es la de producir lo que se

necesita y cuando se necesita, para eso reduce inventarios, particularmente inventarios de productos a medio terminar, y con ello costos de inventario. Partes compradas o materias primas son mandadas directamente a la línea de producción, varias veces al día si es necesario. Esta filosofía convierte el inventario en productos tan pronto como sea posible, y así echa por tierra la filosofía de mantener un buen inventario de partes de recambio "en caso de que se ocupen". Sin embargo, para que este sistema tenga éxito debe existir una estrecha relación con los proveedores, además éstos deben entregar un producto de calidad porque el JIT no permite perder tiempo en revisar las partes entrantes. Si los proveedores poseen una tecnología similar se evitan una serie de burocracias al hacer pedidos, pues las órdenes van de computador a computador. Si este sistema es bien aplicado, el JIT puede significar reducciones de hasta un 75% en el inventario y lograr así mejoras equivalentes en la calidad del producto.

CIM tiene un componente tecnológico penetrante, pero es más que solo una nueva tecnología es una filosofía de operación.

Para entender esta tecnología se requiere de un entendimiento de los conceptos de manufactura, integración y la aplicación de las computadoras.

- ✓ **Manufactura:** Significa fabricar o producir objetos o mercancías manualmente o por medios mecánicos. Sin embargo desde el punto de vista moderno envuelve todas las actividades necesarias para transformar la materia prima en producto terminado, para entregar el producto al cliente y soportar el desempeño del producto en el campo. Este concepto de manufactura empieza con el concepto de la entrega del producto, incluye actividades de diseño y especificaciones y se extiende hasta la entrega y actividades de ventas, por lo tanto involucra la integración de todos los sistemas de información.
- ✓ **Integración:** Este término debe ser visto claramente por los diferentes departamentos de la empresa sin importar la actividad que estén desempeñando, por lo tanto la necesidad de información es básica. Integración significa que la información requerida por cada departamento esté disponible oportunamente, exactamente en el formato requerido y sin

preguntas. Los datos deben venir directamente de su origen, que incluyen a las actividades de cada una de las áreas de la empresa.

- ✓ **Las Computadoras:** son herramientas que se seleccionan para las actividades de automatización y también pueden ser seleccionadas para la integración automatizada. Entonces la manufactura CIM se define como el uso de la tecnología por medio de las computadoras para integrar las actividades de la empresa.

La tecnología computacional es la tecnología que integra todas las otras tecnologías CIM. La tecnología computacional incluye todo el rango de hardware y de software ocupado en el ambiente CIM, incluyendo lo necesario para las telecomunicaciones. Existe una jerarquía de control en los ambientes manufactureros, en la cual hay 5 niveles principales que se detallan a continuación:

- **Empresa.**
- **Control de Factorías.**
- **Control de Células.**
- **Control de Máquinas.**
- **Sensores y Actuadores.**

Las comunicaciones entre los sistemas son vitales en un ambiente moderno de manufactura. Una jerarquía de computadores que se comunican entre ellos implica al menos una estandarización en los protocolos de comunicación. Es así como existen los protocolos MAP y TOP (Manufacturing Automation Protocol y Technical and Office Protocol), los cuales permiten fluidez en la integración de los departamentos. Los protocolos son reglas que gobiernan la interacción entre entidades comunicadas, y deben proveer una serie de servicios:

- ✓ Permitir la transmisión de datos entre programas o procesos en la red interna. Tener mecanismos de control entre hardware y software.
- ✓ Aislar a los programadores del resto, cuando éstos lo necesitan.
- ✓ Ser modular, de tal manera que elegir entre protocolos alternativos tenga el mínimo impacto.
- ✓ Permitir comunicación con otras redes.

Al ser creado, el MAP especificó un protocolo funcional de red para la fábrica misma; en cambio, el TOP lo específico para el procesamiento de información en ambientes técnicos y de negocios. Sin embargo, ambos protocolos cumplen funciones similares y están normalizados por la ISO en conformidad a la referencia de las "siete capas".

Para estudiar si se justifica o no instalar un sistema CIM, deben considerarse preguntas como: ¿Lo están instalando otras empresas del rubro?, ¿Podemos ser nosotros los líderes al incorporarlo?, ¿Vale la pena hacer esta inversión a corto/ mediano/ largo plazo?, entre otras.

La implementación de un sistema CIM debe verse por el valor de ella como una herramienta estratégica y no como una mera inversión de capital. Para aquellas compañías que eligen CIM, los beneficios son reales, y pueden significar la diferencia entre el éxito y el fracaso.

Para las empresas que estén evaluando la implementación de CIM, existe una lista de opciones que deben tomar en cuenta y tener claras:

- ✓ Constatar la estrategia y los fines del negocio.
- ✓ Comprometerse con la integración total.
- ✓ Estudiar la compatibilidad entre los sistemas existentes.
- ✓ Comprometerse a manejar toda la información de manera digital.
- ✓ Estar de acuerdo con las normas y estándares existentes.
- ✓ Tener aptitud para aprender del nuevo hardware y software.
- ✓ Tener aptitud para aprender de la experiencia de otras compañías.
- ✓ Conocer de las tecnologías JIT y de grupo.
- ✓ Ajustar los departamentos y las funciones de cada uno para manejar una organización en red.
- ✓ Usar fuentes externas (Universidades, asociaciones profesionales y consultores).
- ✓ Identificar potenciales beneficios.

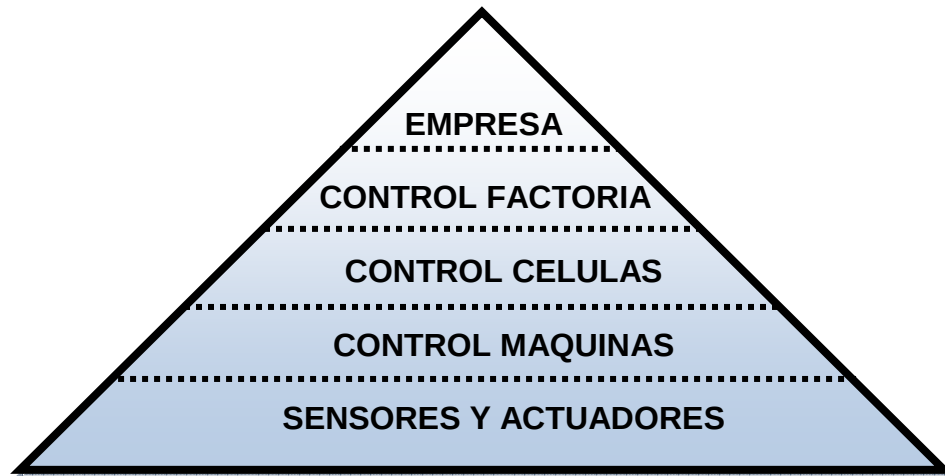
Algunos de los más importantes beneficios estratégicos del CIM están presentados en la siguiente tabla, Tabla nº 1.

Beneficio	Descripción
Flexibilidad	Capacidad de responder de manera más eficiente y rápida a los cambios requeridos por el volumen o composición.
Calidad	Es el resultado de la inspección automática y mayor consistencia en la producción.
Tiempo perdido	Importantes reducciones del tiempo debido a la eficiencia en la integración de información
Inventarios	Disminución del inventario en proceso y del stock de piezas terminadas, debido a la reducción de pérdidas de tiempo y el acceso oportuno de la información
Control Gerencia	Disminución del control, como resultado de la accesibilidad a la información y a la implementación de sistemas computacionales de decisión sobre factores productivos.
Espacio físico	Incremento de la eficiencia en la distribución y la integración de operaciones.
Opciones	Previene riesgos de obsolescencia, manteniendo la opción de explotar nueva tecnología.

Tabla nº 1. Beneficios y descripciones del modelo CIM.

1.4. Niveles CIM

Para poder cumplir con sus objetivos, el modelo CIM está estratificado en niveles de automatización donde cada uno tiene asignadas funciones determinadas. En la figura se muestra el modelo CIM de acuerdo con la definición de la *National Bureau of Standards* (NBS) de los Estados Unidos.



Modelo CIM según la NBS de los EE. UU.

1.4.1. Nivel 5, Nivel de Empresa: Este es el nivel superior y en él se realizan funciones de gestión de la empresa. Se establecen las políticas de producción del conjunto de la empresa en función de los recursos y costes del mercado.

1.4.2. Nivel 4, Nivel de Control de Factoría: A este nivel corresponden las funciones de planificación de la producción del conjunto de la factoría. También se encuentran los elementos de oficina técnica que mediante herramientas como CAD (Diseño Asistido por Computadora) permiten el diseño de productos y elaboración automática de programas para los elementos de fabricación (ingeniería). También, en este nivel se efectúan funciones de control de materiales y recursos. Se generan órdenes de ejecución hacia el nivel de célula en base a las indicaciones del nivel de factoría. Funciones de elaboración de secuencias de producción, secuencia de tareas y coordinación de recursos en la planta.

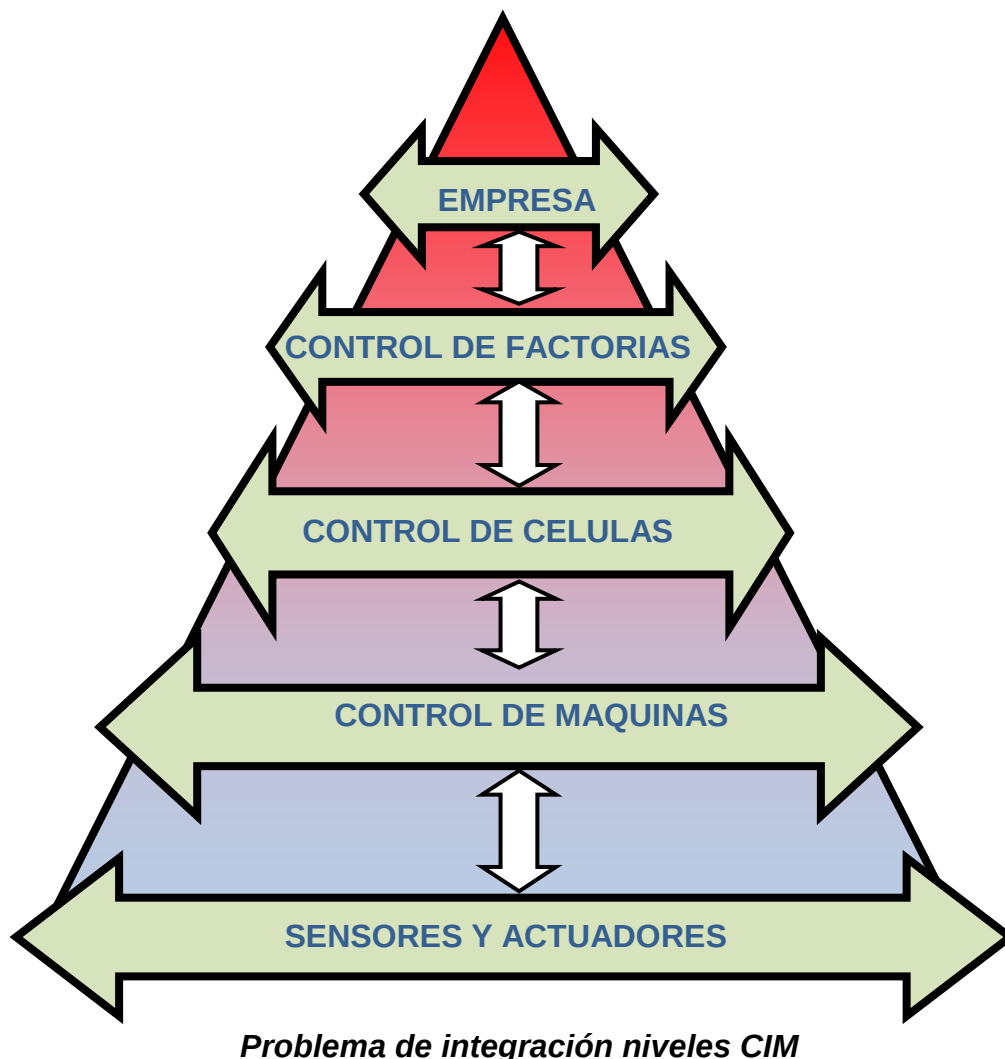
1.4.3. Nivel 3, Nivel de Control de Célula: Se realizan funciones de coordinación de máquinas y operaciones. En él se sitúa el sistema de control que secuencia y controla una tarea específica. Gestiona los recursos y materiales dentro de la propia célula.

1.4.4. Nivel 2, Nivel de Control de Máquina: En este nivel se efectúa el control de operaciones de los dispositivos de fabricación. Se encuentra en este nivel el controlador de cada recurso individual, ej. Máquinas-herramienta, robots, sistemas de medición, sistemas de transporte.

1.4.5. Nivel 1, Nivel de Sensor y Actuador: Es el nivel inferior de la jerarquía CIM. En este nivel se ubican los dispositivos de campo que interactúan con el proceso tales como sensores y actuadores.

1.5.El Problema de la Integración de los Niveles CIM

La estructura jerárquica de los niveles propuestos por el modelo CIM, si bien, conceptualmente es clara, en la práctica se enfrenta al problema de integrar estos niveles. Debido a que cada nivel CIM tiene definidas sus propias necesidades, se utilizan distintas tecnologías que logren satisfacerlas. Estas tecnologías poseen sus propias características de protocolo de comunicación, así como de programación, entre otras. Esto hace que la integración de tecnologías dentro del mismo nivel no sea tan complicada por la similitud y adopción de normas estándar, es decir, por compatibilidad (se habla entonces de integración horizontal), pero no así para integrar tecnologías de distintos niveles que no poseen necesariamente normas de compatibilidad (se habla entonces de integración vertical). En la figura se representa esta situación.



1.6. Tipos de Procesos Industriales

Existen varios tipos de clasificación, sin embargo la que se utiliza con mayor frecuencia para discutir los tipos de procesos de control y las aplicaciones de comunicaciones es la segmentación de las industrias en unidades de operación continuas, discontinuas, por lotes y discretas.

1.6.1. Operaciones Continuas

Las operaciones continuas son aquellas en las que la materia prima, los productos intermedios y finales son fluidos y son procesados de manera continua por un largo período de tiempo, en ocasiones por años, sin paro alguno. En lugar de la tecnología de productos, la tecnología de procesos regularmente es la llave para el éxito de la economía. Ejemplo de este tipo de operaciones se encuentran en industrias como la química, la petrolera y la energética.

1.6.2. Operaciones discontinuas

Son lo mismo que las operaciones continuas excepto que con frecuencia se cambia de un producto a otro. Esto implica que en ocasiones se realicen paros y arranques en intervalos frecuentes, o cambiar de una condición de operación a otra con el fin de realizar un producto similar. Para que estos procesos sean costeables en su operación, se realiza una automatización adicional para realizar los cambios en las condiciones de operación. Ejemplos de este tipo de operaciones son las industrias que fabrican papel, alimentos y algunos procesos químicos.

1.6.3. Operaciones por lotes

Además de correr de manera discontinuo, son diferentes en el sentido en que el Procesamiento se realiza siguiendo una secuencia específica. La materia prima se mezcla toda junta y luego se procesa en una trayectoria específica bajo ciertas condiciones de operación como temperatura, presión, densidad, viscosidad, etc. En algunas ocasiones se usan aditivos adicionales en diferentes momentos en el ciclo de procesamiento. El producto deseado es separado o condicionado en

unidades de operación por lotes. Las operaciones por lotes son la forma más antigua de operar pero las más frecuentemente usada en industrias como la química, de alimentos, minerales, fármacos, textiles y pieles.

1.6.4. Operaciones discretas

Las operaciones discretas son aquellas en las que se produce un producto a la vez, como los automóviles, refrigeradores, aviones, barcos, etc. Estos procesos utilizan una línea de ensamblaje donde el producto se mueve a través de las diferentes unidades de operación o el producto puede permanecer de manera estacionaria con diferentes procesos en un mismo lugar. Los productos pueden ser fabricados uno a la vez o en grandes cantidades en una línea de producción masiva.

1.7. Modelos CIM Existentes

Existen varios modelos referentes al CIM, y de los que se mencionan a continuación se comentaran, brevemente, los más importantes, el modelo CIM de IBM, el modelo CIM de NIST-AMRF y el modelo CIM de Siemens.

- Concepto CIM de IBM, (E.U., 1973)
- Modelo jerárquico NIST-AMRF, (E.U., 1981)
- Concepto CIM de “Digital Equipment Corporation”, (E.U.,1988)
- Modelo Amherst-Karlsruhe,(E.U. y Alemania,1989)
- Modelo CIM de Siemens, (Alemania,1989)
- Esprit Cim-Osa, (Ce, 1989)

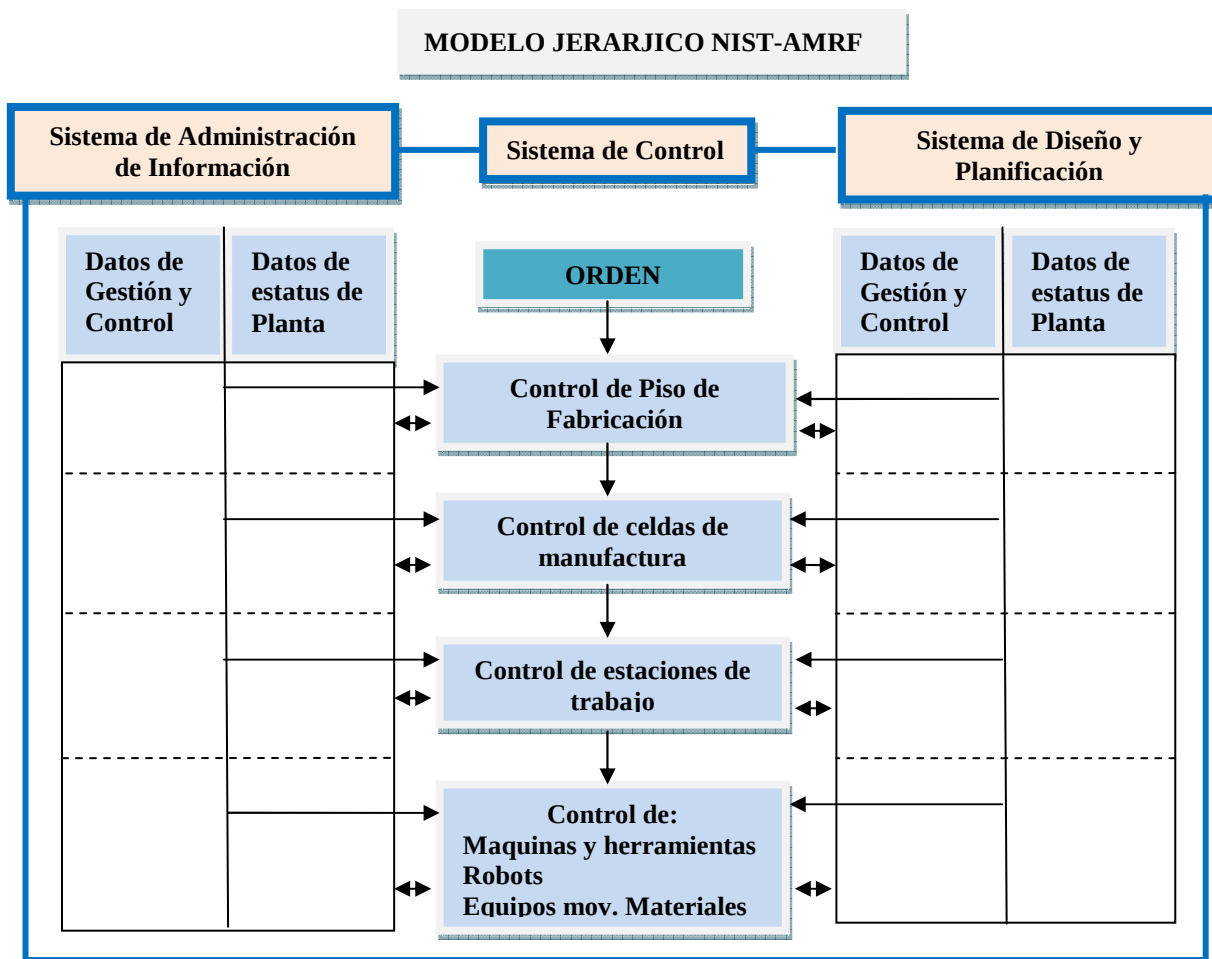
1.7.1. Concepto CIM de IBM

Se inició en los años 70, enmarcándose en una filosofía denominada COPICS (“Communication- Oriented Production Information and Control System”) que involucraba actividades tales como:

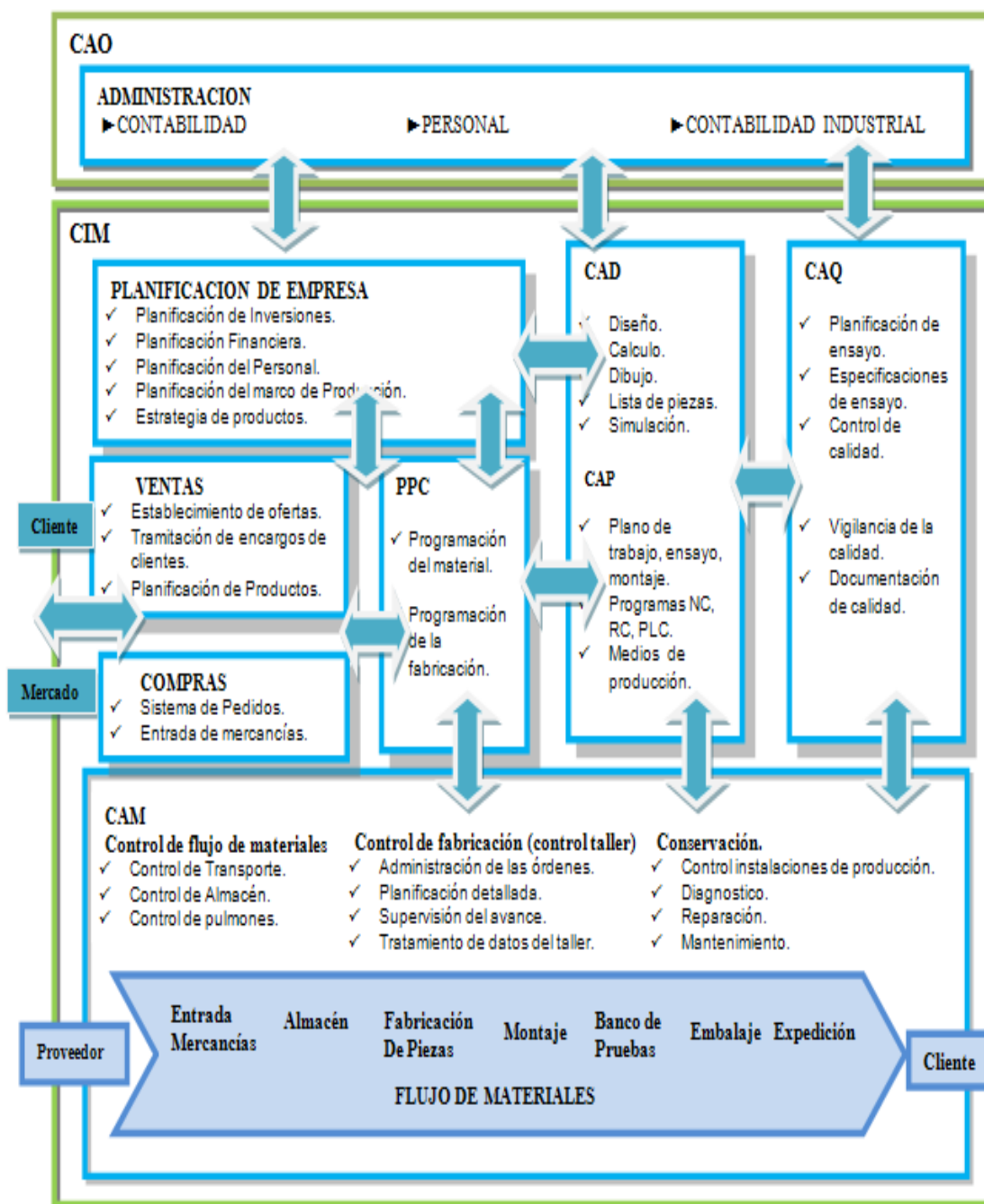
- | | |
|--|--|
| ➤ Control de datos de ingeniería y producción. | ➤ Lanzamiento de órdenes. |
| ➤ Servicio al cliente. | ➤ Monitoreo y Control de Planta. |
| ➤ Pronósticos de demandas. | ➤ Mantenimiento de Planta. |
| ➤ Planificación maestra de la producción. | ➤ Compras y Recepción. |
| ➤ Gestión de inventarios. | ➤ Control de locales (Negocios, almacenes) |
| ➤ Planificación de actividades de manufactura. | ➤ Planificación y control de costos |



1.7.2. Modelo Jerárquico NIST-AMRF



1.7.3. Modelo CIM de Siemens



El modelo CIM identifica un conjunto de funciones principales que son parte de su ambiente: CAD, CAM, CAP, PPC, CAQ, etc., a las que es preciso integrar.

Distingue el ambiente CIM del ambiente CAO ("Computer- Aided Organization"), donde se tratan aspectos meramente administrativos. Modela la interacción entre CIM y CAO.

Introduce los conceptos de integración vertical y horizontal de información.

Plantea el concepto de logística de la información: "Es necesario contar con la información correcta, en cantidad y calidad adecuada a las necesidades, en el momento preciso y en el lugar adecuado".

En el siguiente capítulo se darán a conocer los elementos básicos y fundamentales que hacen posible la implementación de un sistema automatizado y que dan vida a un sistema CIM.

CAPITULO II

2. ESTUDIO DE SOFTWARE Y HARDWARE

2.1. Introducción

La implementación de los hardwares y software viene dada por el afán y, más que todo, la necesidad de automatizar los sistemas actuales y con esto experimentar avances tecnológicos y productivos. El punto de inflexión de dicho avance lo marca la utilización de la *microelectrónica* y de los *microprocesadores* a los elementos que posibilitan la automatización.

La palabra automatismo procede del griego y significa “obrar espontáneamente por sí mismo”; y efectivamente la palabra “automática” se define como el conjunto de los métodos y procedimientos cuya finalidad es la de sustituir al ser humano por un ente artificial, que según sea la aplicación puede ser mecánico, electrónico o un híbrido de ambas ramas, para el desarrollo de alguna tarea física o mental previamente programada.

Es por todo lo anteriormente mencionado que para el diseño del dosificador se requieren estudiar el tipo de hardware y software que este sistema requiere.

En el caso del hardware se considera un PLC, esto para el control del sistema de forma individual como sistémica. Por otro lado también se considera el hardware para la implementación de los sistemas de pesaje, esto a través de las celdas de cargas y su respectivo hardware de control y medida.

Con respecto al software este debe ir de la mano con el hardware, esto quiere decir que ambos deben ser compatibles, tanto a nivel individual como a nivel de sistema integral.

2.2. Técnicas de Diseño

Los autómatas pueden diseñarse, y deben diseñarse, utilizando métodos sistemáticos ampliamente extendidos y contrastados, que permitan al programador ofrecer soluciones de calidad al control de los procesos industriales por medio de herramientas de descripción de los mismos.

En este capítulo se pretende presentar las herramientas de representación de la automatización, basado en dos elementos básicos: el *GEMMA* y el *GRAFCET*.

2.2.1. Grafcet

El GRAFCET (Gráfica de Control de Etapas de Transición) es un diagrama funcional normalizado, que permite hacer un modelo del proceso a automatizar, contemplando entradas, acciones a realizar, y los procesos intermedios que provocan estas acciones. Inicialmente fue propuesto para documentar la etapa secuencial de los sistemas de control de procesos a eventos discretos. No fue concebido como un lenguaje de programación de autómatas, sino un tipo de diagrama para elaborar el modelo pensando en la ejecución directa de la automatización o programa de autómatas. Varios fabricantes en sus autómatas de gama alta hacen este paso directo, lo que ha convertido en un potente lenguaje gráfico de programación para autómatas, adaptado a la resolución de sistemas secuenciales. En la actualidad no tiene una amplia difusión como lenguaje, puesto que la mayoría de los autómatas no pueden programarse directamente en este lenguaje, a diferencia del Lenguaje Ladder. Pero se ha universalizado como herramienta de modelado que permite el paso directo a programación, también con Ladder. La siguiente imagen muestra un cuadro de diseño donde se utiliza el sistema Grafcet, figura 1.

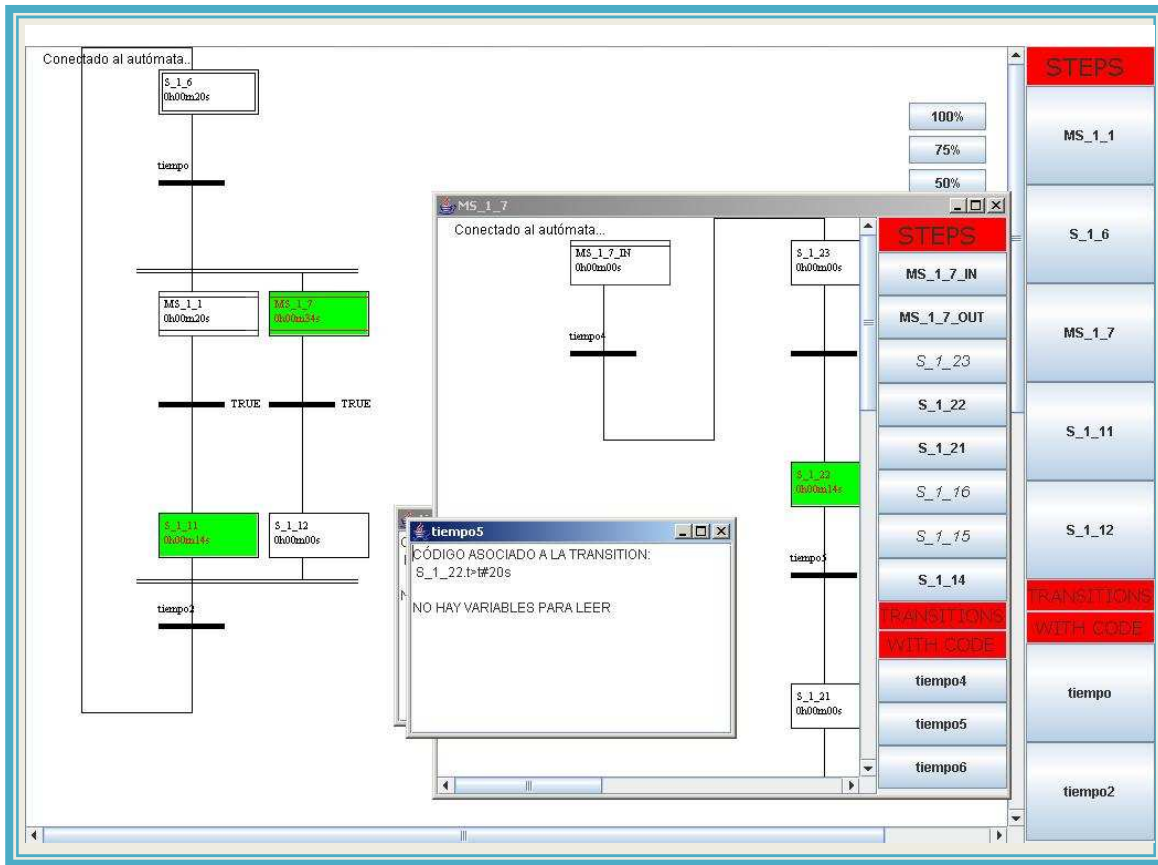


Figura N°1. Diseño con Grafcet.

2.2.2. Características del GRAFCET

El Grafcet tiene como objetivo la descripción y definición funcional de sistemas secuencias de forma global y coherente.

Desde el punto de vista del modelo gráfico, es:

- Conciso.
- Independiente de la tecnología, su uso es indistinto para instalaciones eléctricas, electrónicas, neumáticas, mecánicas, químicas, etc.
- La representación está libre de ambigüedades y paralelismos.
- Su complejidad está relacionada con la naturaleza del programa, no con el tamaño de éste.

Desde el punto de vista del análisis:

- Entrega información respecto de las incoherencias en las especificaciones.
- Admite varios niveles de análisis, por lo mismo, está jerarquizado.
- Es una herramienta rigurosamente definida.
- No posee ambigüedades.
- Es de fácil lectura.

2.2.3. Elementos del GRAFCET

Todo proceso implica por norma general la realización de diversas tareas en forma secuencial o en forma simultánea o lo que es más frecuente, la combinación de ambas formas.

La evolución de las distintas situaciones del proceso no tiene implicación directa con el tipo de proceso que se esté ejecutando, puesto que independientemente de la naturaleza de éste y de la cuantía de las situaciones, los procesos y situaciones se rigen por normas y condiciones del tipo lógico que las hacen independientes.

Para crear diseños de automatización que sean capaces de controlar los diferentes procesos, se han empleado distintos mecanismos para la obtención de ecuaciones lógicas mediante, por ejemplo, el método de Karnaugh, el cual es utilizado en situaciones combinatorias, y el método de Huffmann para secuenciales. Con este método, es posible determinar las ecuaciones que rigen un determinado sistema y pasar a la automatización en sí mediante asociaciones de contactos que formen las funciones booleanas tradicionales.

El método de Huffmann resuelve con un mínimo de variables los problemas secuenciales que intervengan en un proceso dado, pero la aplicación de las ecuaciones obtenidas es, por lo general, compleja y no siempre de interpretación sencilla una vez que han sido simplificadas las ecuaciones mediante postulados y teoremas del álgebra de Boole, las leyes de De Morgan, las tablas de Karnaugh o el método de Quine-McCluskey.

Con la aparición de los elementos electrónicos capaces de interpretar expresiones más complejas y con la utilización de los elementos mencionados

anteriormente, se ve favorecido la aplicación de los sucesos que intervienen en los procesos, a base de una gran facilidad de interpretación de las ecuaciones.

El método Grafcet se supone del resultado de la suma de esfuerzos que han llevado a cabo en común la Asociación Francesa para la Cibernética Económica y Técnica (AFCET) y la agencia para el desarrollo de la producción automatizada (ADEPA).

En 1977, del resultado del trabajo se plasma en una herramienta que, sobre papel, relaciona las diferentes cargas de la automatización lógica y denominan con las siglas GRAFCET, la forma que se le da a este método es para que sea adoptado por las normas de mayor aceptación y difusión en el mundo de la automatización.

A continuación se describirán algunos de los comandos utilizados en este tipo de método.

2.2.4. Etapas

Una etapa se caracteriza por el comportamiento invariable de una parte o de la totalidad del mando, esto supone representar la situación concreta de un elemento.

Se distingue entre las etapas que son *iniciales* y las que son *activas*, las iniciales se representan con el siguiente símbolo (figura 2):

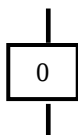


Figura N° 2. Símbolo etapa inicial.

y supone el comportamiento inicial del elemento frene a la parte operativa, antes de que ésta lo accione.

Las etapas activas se representan como, (figura 3):

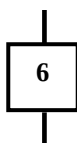


Figura N° 3. Símbolo etapa activa.

y supone la situación del elemento dado dentro del conjunto del mando. Se puede llegar a etapas activas desde distintos sitios y se puede ir a distintos sitios desde las etapas activas (figura 4):

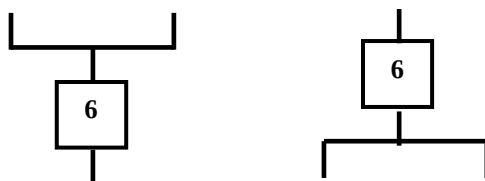


Figura N° 4. Distintas etapas activas.

2.2.5. Acciones asociadas a las etapas

Las acciones suponen aquello que debe hacerse cada vez que la etapa a la que van asociadas sea activa, y señalan las posibilidades de evolución entre etapas.

Las acciones pueden ser externas o internas: las externas implican salidas hacia partes operativas, mientras que las internas son temporizaciones, contadores.

La representación grafica de las acciones depende en gran parte de las tareas que hay que realizar, pero en ningún caso se impone la forma de escribir o describir las acciones.

2.2.6. Descripción detallada de acciones

De la misma forma en que se pueden agrupar diferentes *acciones* en una etapa, la descripción de tales acciones puede llegar a ser todo lo detallada que se desee, como se ilustra en la siguiente figura 5.

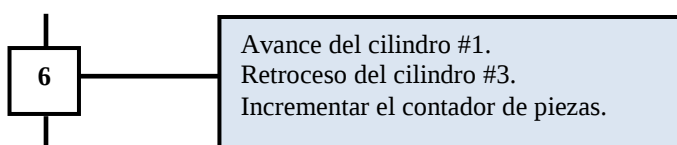


Figura N° 5. Acción detallada.

Así mismo, las acciones pueden ser continuas, condicionales, temporizadas, y de efecto mantenido (con memoria o no).

2.2.7. Acciones Continuas:

Para el caso de una acción continua, se tendría lo mostrado en la figura 6:

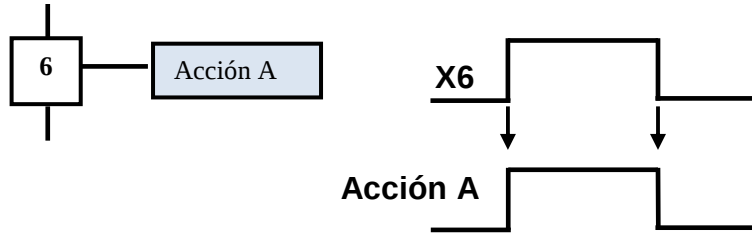


Figura N° 6. Condiciones continuas.

2.2.8. Acciones condicionales

Para el caso de una acción condicional, se obtendría lo mostrado en la figura 7:

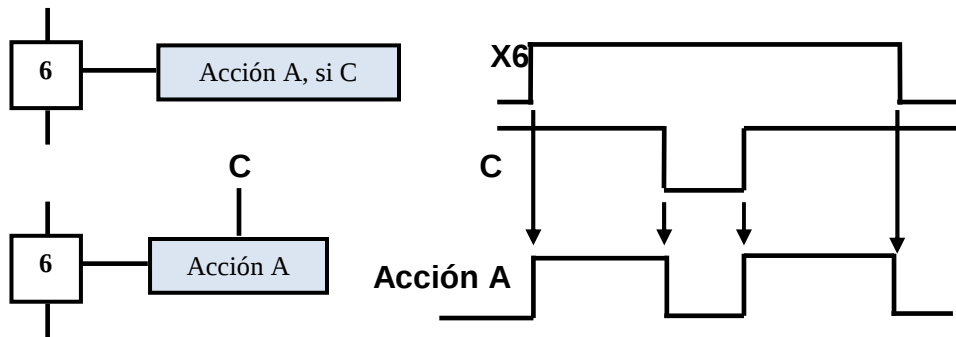


Figura N° 7. Acción condicional.

2.2.9. Acción temporizadora

En el caso de una acción temporizadora, se tendría lo indicado en la figura 8:

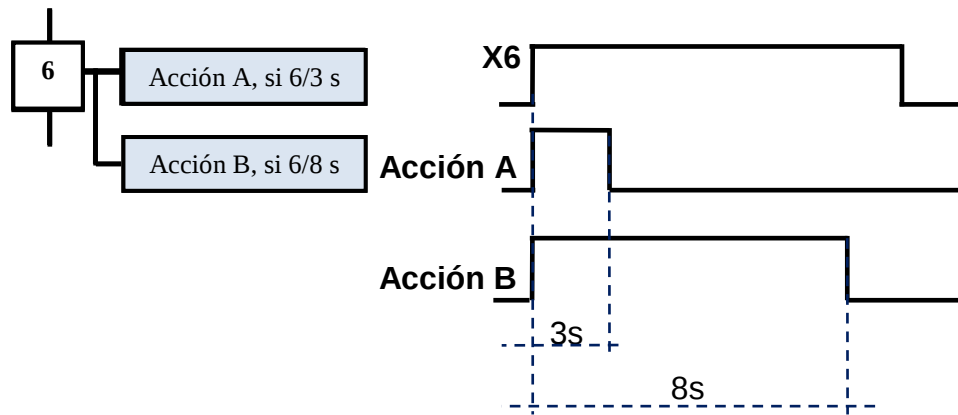


Figura N° 8. Acción temporizada.

2.2.10. Efecto mantenido, sin memoria

Esta acción puede ser por acción continua sin memorizar, tal como se ilustra en la figura 9:

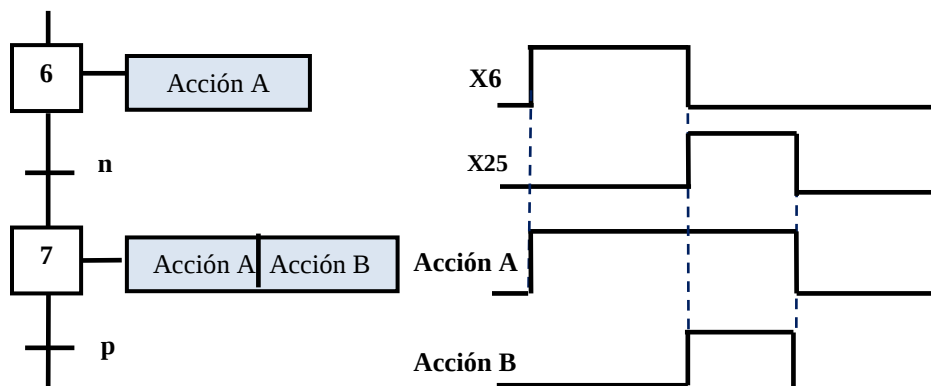


Figura N° 9. Efecto mantenido, sin memoria.

2.2.11. Efecto Mantenido (con memoria)

Para el caso de una acción de efecto mantenido, éste puede ser por acción continua memorizada, según lo indica la figura 10:

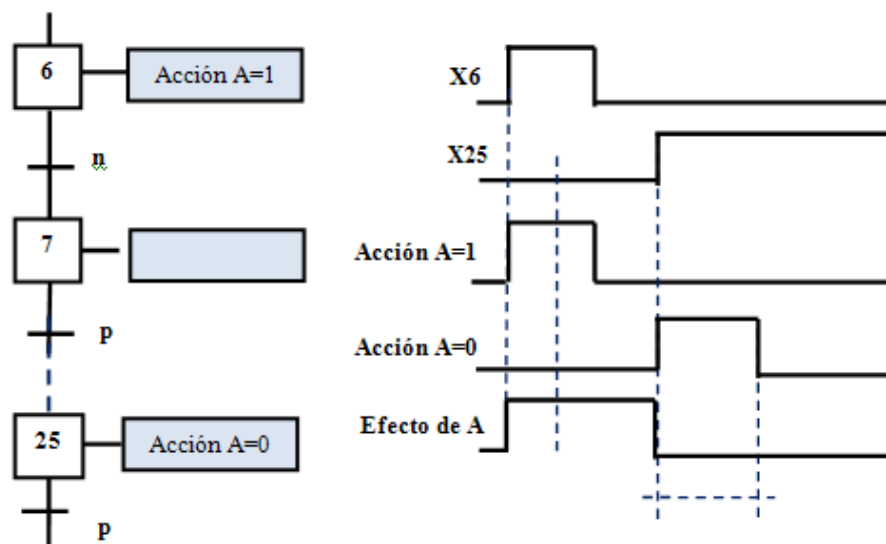


Figura N° 10. Efecto mantenido, con memoria.

2.2.12. Enlaces orientados

Son las líneas que unen grupos de etapas entre sí; son un reenvío de transiciones útiles para la documentación, figura 11:

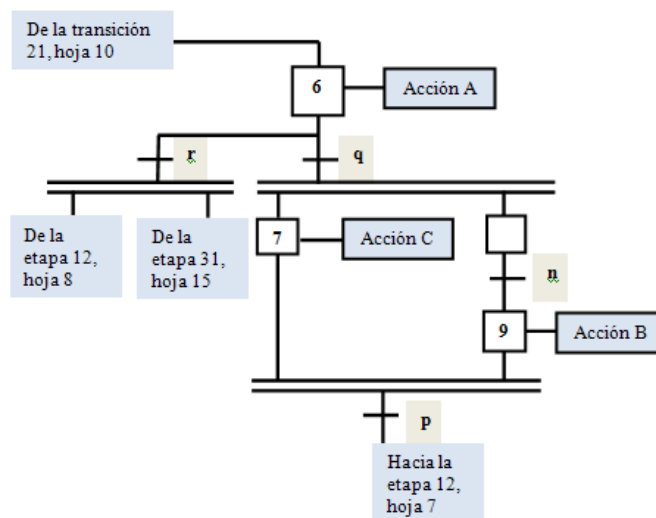


Figura N° 11. Enlaces orientados.

2.3.Elementos de Programación

Debido a la cualidad de que los PLC (programable Logic Controller) pueden llevar a cabo la tarea de control que se les encomiende, deben poder ser programables, más aún, reprogramables.

En este capítulo se intenta dar a conocer los contenidos necesarios para lograr los siguientes objetivos:

- Introducir los actuales lenguajes de programación utilizados en los softwares actuales.
- Presentar las zonas de memoria disponibles y la identificación de variables en un autómata programable.
- Estudiar los diagramas de contactos y las listas de algunas instrucciones como herramientas básicas de programación.

La programación de un PLC se realiza mediante un conjunto de instrucciones que son propias de cada fabricante y, por lo general, de cada modelo de cada fabricante; es muy poco probable tener dos PLC diferentes con un mismo juego de instrucciones.

2.3.1. *Básculas*

Se les denomina Básculas a aquellos elementos que permiten memorizar una acción. Son el elemento secuencial básico y permiten resolver una automatización de manera secuenciada, es decir, de manera ordenada.

Para cumplir con los diferentes pasos previstos por un GRAFCET, hacen falta elementos que permitan mantener un valor lógico sobre una salida incluso cuando las condiciones que la han posibilitado desaparezcan.

El nombre de báscula se utiliza, también, en electrónica digital, donde el elemento báscula es el elemento básico de memoria que permite sintetizar circuitos secuenciales; analógicamente, en automatización la báscula será el elemento a partir del cual poder implementar las secuencias descritas por un GRAFCET.

En la siguiente figura (figura 12) se puede observar el principio de una báscula con un relé; este montaje recibe el nombre de *autoenclavamiento*.

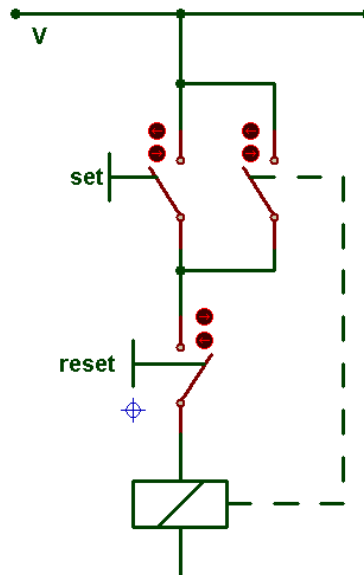


Figura N° 12. Báscula con relé.

En este circuito, cuando se pulsa *set*, se establece un paso de corriente por la bobina que hace que un contacto accionado por ésta cierre en paralelo al pulsador *set*. El circuito memoriza la acción de haber pulsado *set*. Volverá al estado anterior cuando se interrumpa el paso de corriente por la bobina mediante la acción sobre *Reset*.

2.3.2. Temporizadores y contadores

2.3.2.1. Temporizadores programables (timers)

Los temporizadores son elementos imprescindibles en cualquier automatización, gobiernan los tiempos que se han de dar para garantizar cualquier tipo de maniobra o acción.

Los temporizadores que incorporan todos los PLC son digitales, es decir, se basan en circuitos electrónicos de naturaleza digital. Ello hace que tengan que

trabajar con unidades de tiempo mínimas que vienen dadas por las bases de tiempo (señales rectangulares de duración predefinida, generalmente a 1 ms, 10 ms, 100 ms, etc.) y que, por ejemplo, para el caso de los PLC Osrom, son valores fijos de 100 ms de manera que habrá que expresar el tiempo en unidades diez veces mayores (5 segundos serían 50 unidades de 100 ms.).

En el caso de utilizar la línea S-7 de Siemens, los contadores pueden operar con tres bases de tiempo diferentes (1, 10, 100 ms), en función del número de temporizador que se elija.

Por otra parte, tratándose de temporizadores digitales, se infiere que no podrán temporizar cualquier cantidad de tiempo, sino que estarán limitados a cierta cuantía. En Siemens 3276,7 segundos y en Osram 999 segundos.

Dentro de los PLC Siemens, de la serie S-7, existen tres tipos de temporizadores, los TON, TOF y TONR, los cuales se muestran en la figura 12,13 y 14 respectivamente.

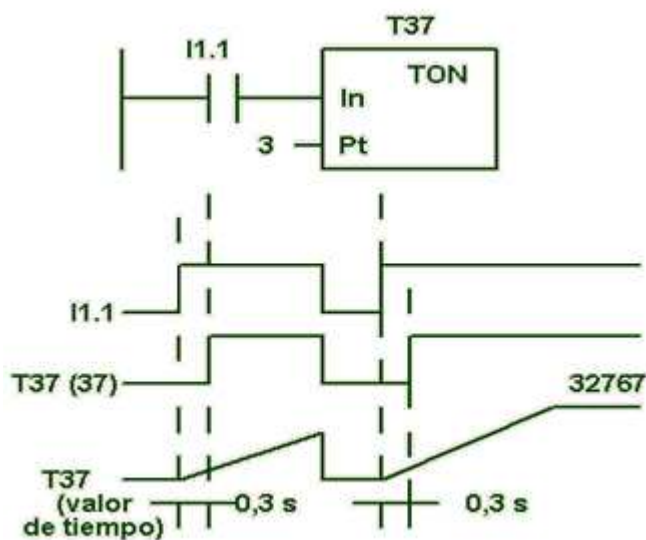


Figura N° 13. temporizador tipo TON.

Los TON son temporizadores de retraso en la conexión, los TONR son también de retraso en la conexión, pero con memoria de conteo, es decir, cuando la entrada no está en 1, en lugar de recuperar su valor de temporización, retienen el valor actual, de manera que cuando vuelven a tener un 1 en la entrada, continúan temporizando a partir de donde lo dejaron la última vez. Los TOF son temporizadores que retrasan la desconexión.

En los TON y los TOF **no** se pueden repetir los números de temporizador, de manera que si existe T32 como TON, T32 no puede existir como TOF y viceversa.

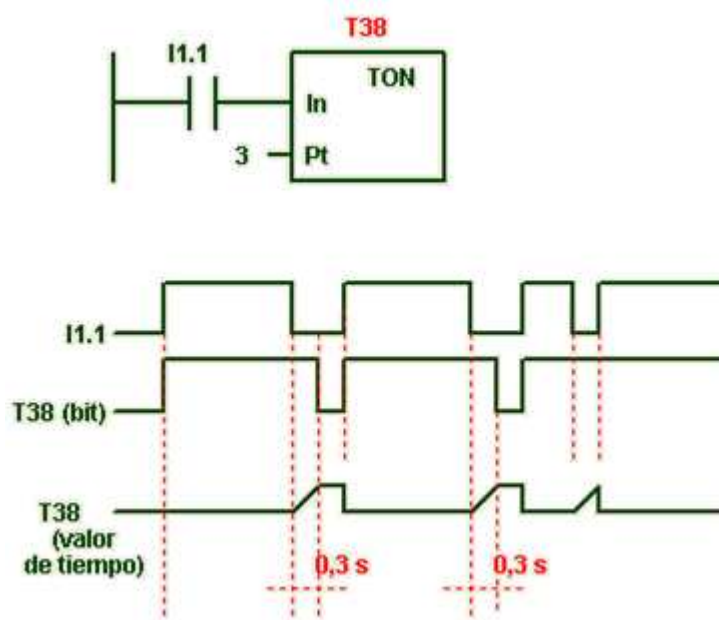


Figura N° 14. Temporizador tipo TOF.

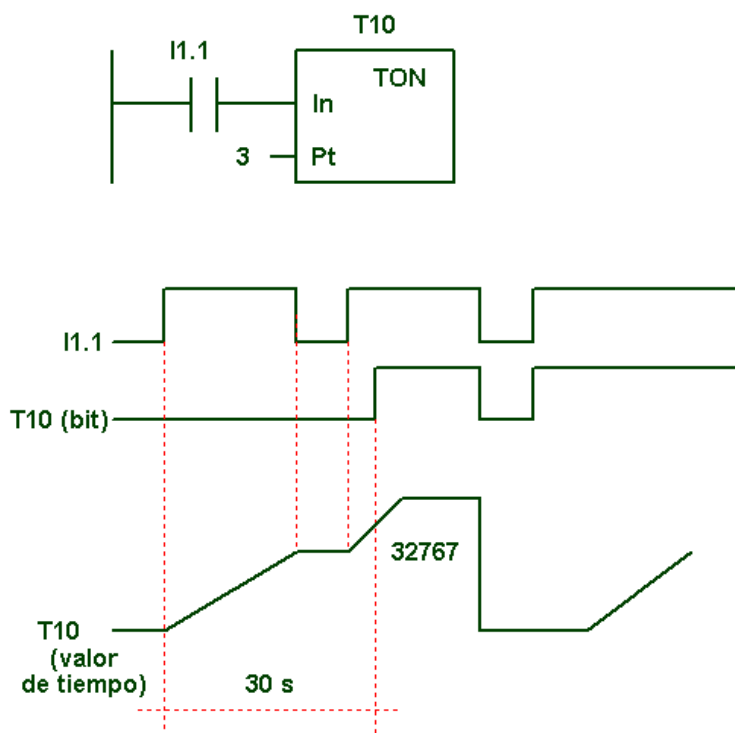


Figura N° 15. Temporizador tipo TONR.

2.3.3. Contadores (counters)

Los PLC llevan incorporadas instrucciones de contador que permiten contar, valga la redundancia, un determinado número de eventos presentes en sus entradas o saber cuántas veces se ejecuta un programa o se da una determinada situación.

Al igual que en los circuitos electrónicos, los contadores de los PLC incorporan una entrada de reloj que le permiten incrementar y/o disminuir cierta cantidad preseleccionada.

Las empresas que desarrollan hardware y software industriales, como los PLC cuenta no contadores y estos difieren en funciones y comandos dependiendo de la empresa que los fabrique. A continuación se nombran algunas de estas empresas con sus dispositivos.

Los PLC Osrom poseen diferentes modelos de contadores, por ejemplo, en el caso del C20K, estos contadores una vez se programan a través de algún software no se podrán utilizar por ningún otro contador ni temporizador.

En el caso de los PLS siemens, serie S7, se dispone de tres tipos de contadores: Ascendentes, descendentes y reversibles.

El contador ascendente (CTU) cuenta hacia delante desde el valor actual hasta al prefijado (PV) al producirse un flanco de subida en la entrada de reloj (CU).

El contador descendente (CTD) cuenta hacia atrás desde el valor prefijado hasta el actual al producirse un flanco de subida en la entrada de reloj (CD).

El contador reversible (CTUD) cuenta hacia delante o atrás desde el valor prefijado hasta el actual al producirse un flanco de subida en la entrada del reloj (CU) o (CD).

2.3.4. Registro de desplazamientos

En los PLC se utilizan los registros de desplazamientos como un elemento de programación, en este caso, de un circuito que permite ir desplazando sobre un grupo de bits ordenados (un byte o una palabra o longitudes superiores) la información (sean “1” ò “0”) presente en una entrada de datos a la cadencia señalada por la señal pulsante presente en otra entrada.

La primera entrada se conoce, tradicionalmente, por *data* mientras que la segunda se conoce como *clock*. Una última entrada, *reset*, permite poner a cero todos los bits de salida del registro de desplazamiento.

Se utilizan en los PLC para poder seguir el historial de una entrada o para suplir árboles de levas que accionan microrruptores.

2.4. Cálculo Aritmético Y Lógico

A un PLC se le puede pedir que resuelva operaciones de naturaleza aritmética y lógica, dado que internamente está basado en arquitecturas de microprocesadores, normalmente esto lo ofrecen todos los PLC como consecuencia de esta arquitectura interna.

Las distintas funciones que se implementan en los autómatas más característicos son:

- ❖ Comparación.
- ❖ Movimiento.
- ❖ Inversión.
- ❖ Conversiones de tipo.
- ❖ Suma.
- ❖ Resta.
- ❖ Producto.
- ❖ División.
- ❖ Incremento.
- ❖ Disminución.
- ❖ Otras funciones.

2.5. Control De Secuencia

El PLC es un controlador lógica programable. Su propio nombre indica que la tarea de control la llevará a cabo a partir de la ejecución de un programa. Un programa es una lista ordena de órdenes (instrucciones) que ejecuta el microprocesador que contiene el PLC. Esta lista ordena de instrucciones contiene las acciones que debe realizar el PLC ante cada situación de control que se le presente y que conoce basándose, esencialmente, en el valor de las magnitudes del proceso controlado que recoge para sus entradas.

Las acciones de control, a menudo, requieren alterar la secuencia ordena de instrucciones (ejecutarlas una tras otra siguiendo la lista) para saltarse algunas e ir directamente a otro lugar de la lista, más abajo o más arriba.

Las instrucciones siempre están disponibles para ser “llamadas” para ejecutarse cuando el sistema lo requiera.

Un programa contiene todas las acciones (en forma de listas de instrucciones) que debe ejecutar el procesador, lo cual no implica que cada vez que ejecuta el programa tenga que ejecutar todas las instrucciones. Por otro lado, el programa se ejecuta de manera cíclica, es decir, tal como se escribe, se debe garantizar que, al

terminar, exista un enlace al principio, de manera que el programa, continuamente de vueltas. Esta ejecución constante hace que, según el valor de las entradas leídas por el PLC, algunas veces sea necesario ejecutar algunas partes de todo el programa (algunos conjuntos de instrucciones) y, otras veces, otras partes del programa (otros conjuntos de instrucciones), y aún existe otro grupo de instrucciones que se ejecutará siempre (por ejemplo, el grupo de instrucciones que lee el valor de las entradas del PLC y escribe valores en sus salidas)

Existe un tipo de instrucciones que despliegan la capacidad de mover la información residente en la memoria del PLC de una situación a otra (instrucciones de movimiento), otras explotan la capacidad aritmética de calcular (las aritméticas y lógicas); existe un grupo específico de instrucciones que permiten decidir en qué lugar de un programa y por qué razón un conjunto de instrucciones debe ejecutarse o no y de qué modo debe ejecutarse. Estas instrucciones forman parte de las que se denominan *instrucciones de control de secuencia*, dado de que son las encargadas de decidir (controlar) qué instrucciones debe seguir un programa; alteran el orden secuencial ordenado de ejecución del programa.

Las funciones más representativas del control de secuencia son las siguientes:

- ❖ Salto condicional.
- ❖ Finalización.
- ❖ Subrutinas.
- ❖ For-next.
- ❖ Control dual man/auto.

2.6. Lenguajes de programación

La programación está compuesta por un grupo de instrucciones ordenadas de una forma determinada o en una secuencia de órdenes, que permiten al autómatas, a través de su ejecución, realizar la secuencia de control deseada por el programador o usuario del mismo.

La instrucción es la tarea u operación más elemental de cualquier programa. Estas instrucciones pueden ser diferentes, desde instrucciones de acceso a módulos de

entrada y salida hasta operaciones aritméticas y lógicas, pasando por movimiento y transferencia de bits y datos.

Las instrucciones constan básicamente de dos campos:

2.6.1. *El código de la operación.* Indica a la CPU la tarea u operación que se ha de realizar. Estas operaciones pueden ser aritméticas (sumas, restas, productos, etc.), lógicas (OR, AND, NOT, etc.), movimiento de datos, etc.

2.6.2. *Operandos asociados.* Pueden ser un dato o dirección algún elemento, es el complemento al código de operación e indican donde o sobre qué elementos se debe realizar dicha operación.

Para que un hardware funcione de forma adecuada, deben existir en el autómata una serie de herramientas software que además faciliten al usuario y programador la *comunicación* entre él y la maquina, también como conocido como HMI (Human Interface Machine, interface hombre máquina). Dicho software se puede dividir en dos grandes grupos:

2.6.3. *Sistemas Operativos.* Aunque dependiendo del fabricante y tipo de autómata, puede ser más o menos sencillo, siempre existirá en cualquier autómata. Están compuestos por una serie de programas, rutinas y aplicaciones, muchas de ellas transparentes al usuario, muchas de ellas transparentes al usuario, encargadas del correcto funcionamiento de todo el equipo y de tareas como inicialización adecuada de la máquina al conectar la alimentación, auto diagnóstico del sistema, etc.

2.6.4. *Software de edición y depuración de programas.* Permiten que el usuario introduzca el programa en algún sistema de memoria (discos, memoria de semiconductor, etc.) y su posterior modificación, puesta a punto y depuración. Este software puede estar instalado en el propio autómata programable o, como es más común hoy en día, en otro

equipo con un funcionamiento autónomo del primero, como puede ser un PC.

2.6.5. Lenguaje de programación. Para un autómata programable es aquel conjunto de elementos (generalmente, caracteres textuales o símbolos), perfectamente inteligibles para el equipo de programación del PLC, con el cual el programador codifica aquellas leyes de control que quiere implementar sobre un determinado PLC.

2.6.6. Lenguaje de explotación. Es aquel conjunto de órdenes y comandos que el programador y/o usuario puede enviar al autómata desde el mismo equipo o unidad de programación o desde un determinado terminal adecuado para tal propósito. Con estos comandos la persona puede recoger estados del proceso o modificar ciertas variables o parámetros del mismo.

2.7. Estandarización en la Programación del Control Industrial, Estándar IEC 61131-3.

En la actualidad aún siguen persistiendo sistemas de control específicos del fabricante, con programación dependiente y conexión compleja entre distintos sistemas de control. Esto significa para el usuario costos elevados, escasa flexibilidad y falta de normalización en las soluciones al control industrial.

La finalidad de esta Norma IEC-61131 es:

- ✓ Definir e identificar las características principales que se refieren a la selección y aplicación de los PLCs y sus periféricos.
- ✓ Especificar los requisitos mínimos para las características funcionales, las condiciones de servicio, los aspectos constructivos, la seguridad general y los ensayos aplicables a los PLCs y sus periféricos.
- ✓ Definir los lenguajes de programación de uso más corriente, las reglas sintácticas y semánticas, el juego de instrucciones fundamental, los ensayos y los medios de ampliación y adaptación de los equipos.

- ✓ Dar a los usuarios una información de carácter general y unas directrices de aplicación.
- ✓ Definir las comunicaciones entre los PLCs y otros sistemas.

El estándar internacional IEC 61131-3 está dirigido a los lenguajes de programación de los PLC y sus periféricos, esta norma se divide en cinco partes:

- ✓ Parte 1: Vista general.
- ✓ Parte 2: Hardware.
- ✓ Parte 3: Lenguaje de programación.
- ✓ Parte 4: Guías de usuario.
- ✓ Parte 5: Comunicación.

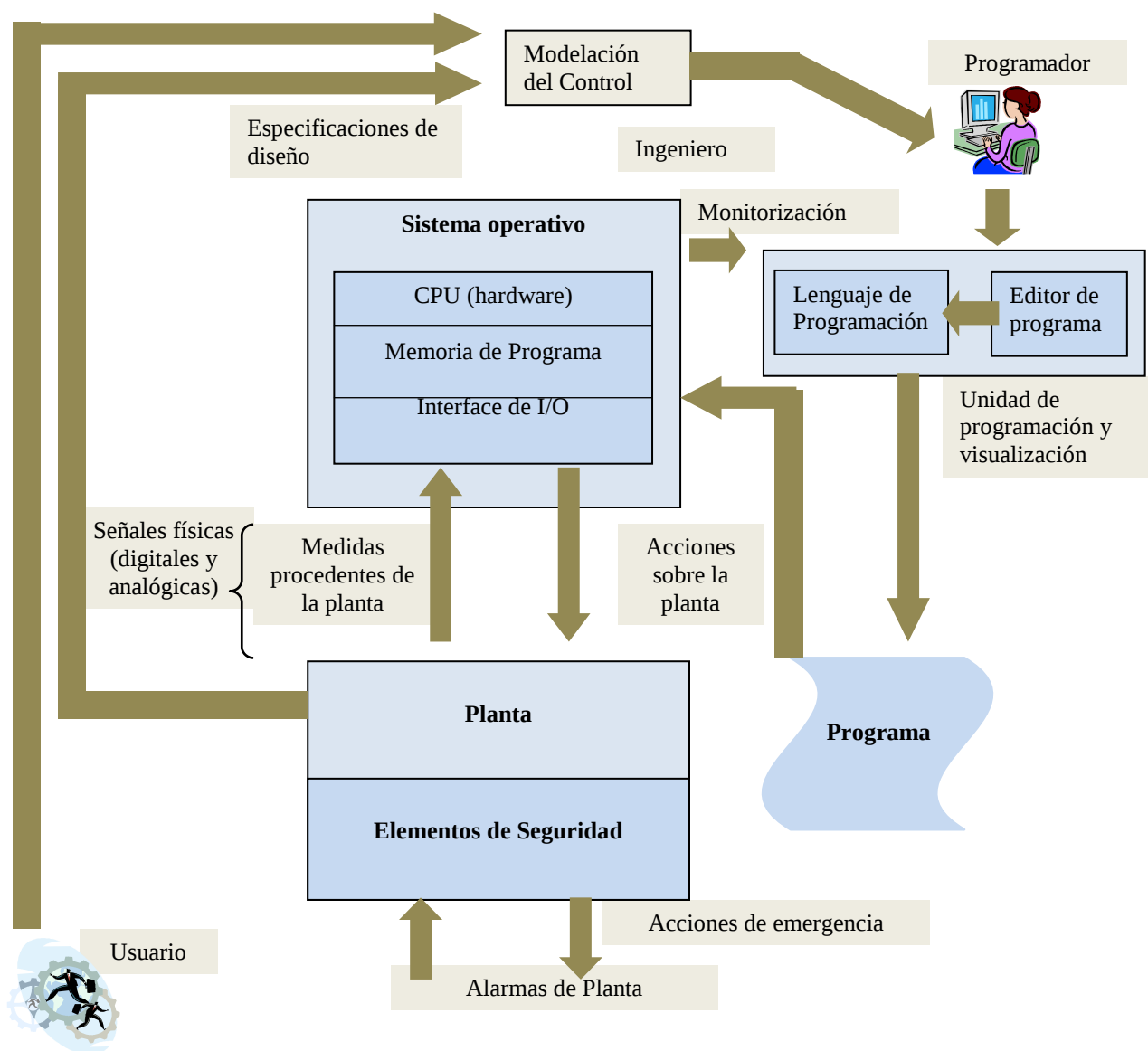


Figura Nº 16. Interrelación entre los diferentes elementos que forman parte y rodean al autómeta.

Los lenguajes de programación para autómatas programables pueden ser de dos tipos, dependiendo de la forma en que el programador genere el programa en cuestión:

1. Lenguajes algebraicos.
 - a. Lenguajes booleanos.
 - b. Lista de instrucciones.
 - c. Lenguaje de alto nivel.
2. Lenguajes gráficos.
3. Diagrama de contactos (Ladder diagram).
4. Diagrama de funciones.
5. Intérprete de GRAFCET.

Sin embargo, para la programación de PLC hoy en día se están imponiendo dentro de los lenguajes algebraicos los de **alto nivel** y las listas de instrucciones (por lo general basadas en lenguaje Booleano), y el diagrama de contactos de funciones como lenguajes gráficos, muy asociados a su vez a la lista de instrucciones.

Los lenguajes de alto nivel utilizados, son soportados por autómatas de gama alta y de última generación y esto incurre que sus costos de adquisición sean muy elevados con respecto de los de gama baja.

2.8. Softwares Comerciales

En el mercado se encuentra una gran variedad de softwares que están destinados a controlar de manera parcial o completa los procesos en donde son instalados.

En este apartado se intenta dar a conocer las distintas marcas de PLCs y sus softwares relacionados, donde cada empresa incorpora su propia tecnología.

El mercado actual posee una gran variedad de proveedores, donde cada uno de ellos posee sus propios equipos y estos están siendo implementados con sus propios softwares. Dentro de las principales empresas que fabrican y distribuyen los PLCs y Software, tenemos:

- ❖ Allen Bradley.
- ❖ Bailey Controls.
- ❖ Control Solutions Inc.
- ❖ GE Fanuc.
- ❖ Mitsubishi.
- ❖ Modicom.
- ❖ Omron.
- ❖ Siemens.
- ❖ Square D.
- ❖ Texas Instruments.
- ❖ Westinghouse.
- ❖ Emerson.

A continuación se describirán los distintos softwares, los más importantes, relacionados a los distintos proveedores mencionados anteriormente y sus distintas estructuras y arquitecturas de diseño.

2.8.1. Allen Bradley

Esta línea trabaja sobre su arquitectura llamada ControlLogix, donde se subdivide dependiendo de la serie a implementar, la cual está distribuida dependiendo de la capacidad del PLC, es decir, del número de entradas, salidas, tipos de entradas, tipos de salidas, etc.

Allan Bradley posee el software denominado RSLogix el cual trabaja, dependiendo de la versión del PLC, sobre las versiones Logix5550/55/61/63. Estas versiones son actualizadas y van mejorando sus características de su arquitectura.

Un ejemplo a llamar es el software RSLogix5000, el incluye las siguientes funcionalidades:

- ✓ Organizador del Controlador que es como una ventana de explorador que muestra las diferentes partes del programa. La configuración del controlador, tareas, grupos en movimientos, datos tendientes, configuración del tipo de entradas/salidas.
- ✓ Manipulación de datos sofisticados, tales como matrices, estructura que es definida por el usuario, la cual aporta una gran flexibilidad a la manipulación del trabajo.
- ✓ Direccionamiento sencillo de las I/O especialmente cuando se utilizan etiquetas para conectar las señales de entrada y salidas.
- ✓ El editor de esta versión es compatible con otras versiones, lo cual hace que la migración sea muy fácil y de forma natural.
- ✓ Capacidad de supervisión de diagnostico, incluyendo el estatus de visualización del controlador, verificador de programa y un robusto monitoreo de los datos procesados.

Como se mencionó anteriormente el RSLogix posee un organizador del controlador el cual muestra el proyecto de manera íntegra, utilizando el sistema de interface como “árbol”, este muestra información acerca del programa, datos y configuración de I/O del proyecto. Esto hace que sea muy fácil navegar por el programa del proyecto, tareas de rutina, datos, etc. El organizador del controlador organizará el proyecto en carpetas estilo árbol. Cada carpeta se agrupara junto a las funciones comunes. En medio de estas también se incluyen sub carpetas. En la imagen siguiente se ilustra la distribución de organizador del controlador:

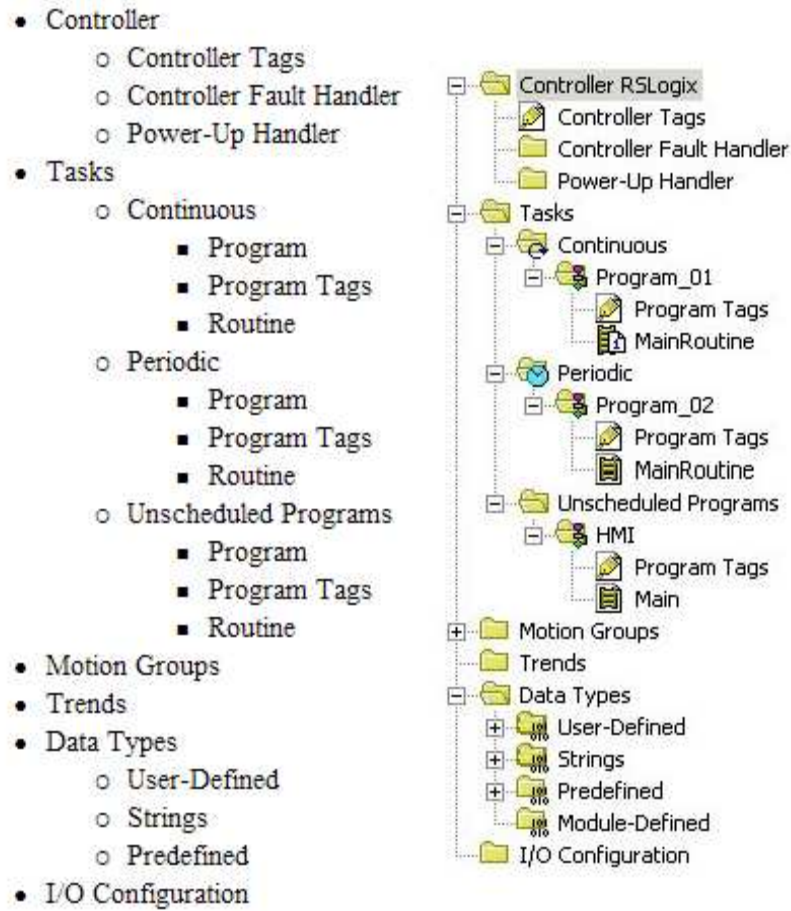


Figura N° 17. Organizador del controlador tipo árbol.

2.9. Hardware, el PLC

En la actualidad, cuando se piensa en implementar un sistema autónomo, este debe contar con un hardware que almacene las instrucciones y ejecute los accionamientos que lo rodean, es decir; activar, desactivar y leer las actividades que se están ejecutando mientras el sistema esté o no en operación.

Para los procesos industriales o algún proceso en particular hoy en día se está utilizando el PLC, este Hardware posee una infinidad de cualidades y es capaz de realizar la supervisión del proceso, siempre y cuando este proceso posea una retroalimentación la cual está dada por los sensores o actuadores instalados en el sistema, de lo contrario el PLC sería incapaz de chequear la ejecución de las instrucciones impartidas por él.

En el siguiente cuadro (figura 18) se muestran algunos de los hardwares existentes en el mercado:



Figura nº 18. PLCs de la marca Allan Bradley existentes en el mercado.

El trabajo con estos equipos también ha acarreado problemas en la industria y estos son explicados de manera general a continuación.

- Dificultades en la programación causadas por la no estandarización y homologación, además de las diferentes técnicas de programación.
- Dificultades causadas por el uso de diversos nombres de los elementos y de la lógica de la descripción de los componentes de hardware y software en el controlador.
- Problemas en las empresas por los equipos eléctricos y mecánicos debido al control de potencia por parte del personal eléctrico y mecánico.
- La escasez de personal capacitado que pueda operar el PLC a nivel de software y hardware, además de las interfaces.

2.9.1. Qué es un Controlador Lógico Programable, PLC

- Los PLCs están contruido como ordenadores. Un PLC típico tiene cuatro componentes que están separados, pero interrelacionados. Estos son:
- Una sección de entradas y salidas (input/output), que conecta el PLC con el mundo exterior, (la máquina con sus sensores, válvulas solenoides y cambiar, lámparas, calentadores eléctricos y motores).
- Una unidad central de procesamiento (CPU), que está basado en un microprocesador. Esto puede ser un microprocesador octal o hexadecimal.
- Un dispositivo de programación, que puede ser una consola portátil de programación, un programador especial de PLC del tipo escritorio, similar a un ordenador portátil o escritorio.
- Procesos internos comunes, tales como reajustar el dispositivo de vigilancia (watchdog) del ciclo de exploración con temporizador y control de la memoria del programa de usuario.

Por otro lado también existen algunos procesos que son integrales y que son realizados en el hardware mediante el software utilizando instrucciones externas, como por ejemplo:

- Reinicio de datos de entradas y salidas (input/output).
- Ejecución de instrucciones.
- Comando de servicio de elementos periféricos.

De estas instrucciones nombradas, sólo es visible la de ejecución de instrucciones, ya que es esta quien realiza el accionado de motores, válvulas, actuadores, etc. Las otras operaciones están desarrolladas en orden cíclico, donde cada ciclo es parte de la configuración de trabajo del software instalado en el hardware. En la figura 19 se muestra el ciclo de trabajo que realiza un PLC.

Ciclo de Operación del Procesador

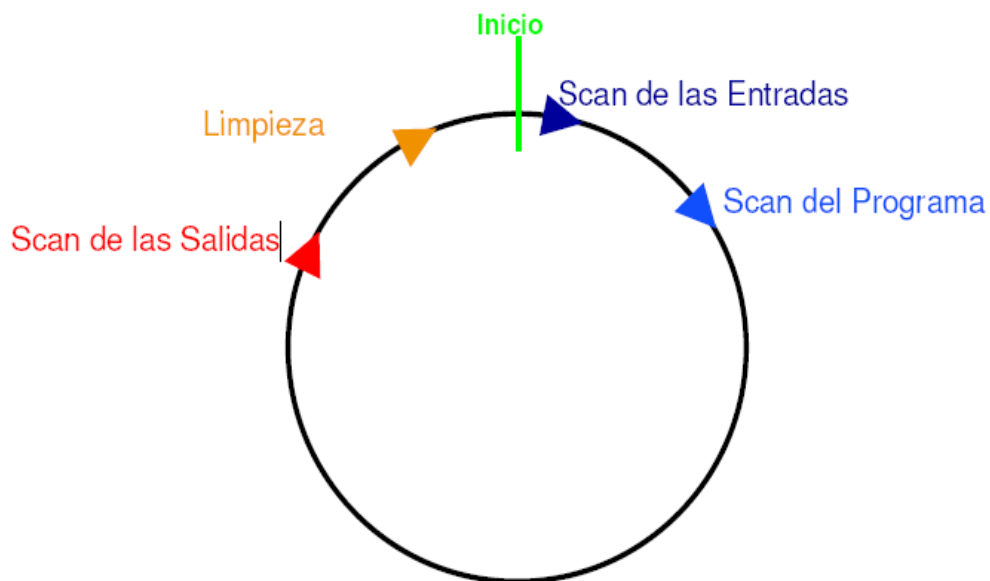


Figura N° 19. Ciclo de trabajo de un PLC.

2.9.2. Terminología del PLC, Input/Output

Los PLCs están diseñados para recibir señales en sus entradas (terminales de entrada). Por lo tanto, un dispositivo conectado al PLC envía una señal que se llama "elemento de entrada" (conmutador o el sensor). Este elemento envía una señal llamada señal de entrada. Una señal de entrada entra el PLC a través de terminales o patillas del conector multi-punto desmontable. El punto exacto donde este tipo de señal entra en el PLC se suele denominar un punto de entrada. Este punto de entrada se le asigna un lugar determinado en estatus de memoria, lo que refleja la señal de lógica de estado, ya sea ON (verdadero) u OFF (no verdadero).

Esta ubicación de la señal de entrada es registrada en la memoria con el nombre de bit de entrada. En consecuencia, la CPU (unidad central de procesamiento) en su ciclo normal de monitoreo de la lógica del sistema, procesa todos los bits de entrada y los convierte en "ON u "OFF" bits de entrada correspondiente a la señal que envía cada elemento externo del sistema.

Dentro de la CPU del PLC, se están tomando decisiones lógicas, basada en el programa escrito en su memoria de usuario (UM). Para este tipo de acciones que se llevarán a cabo, es necesario que se traduzcan las señales de entrada. Para cumplir y poner en marcha esas medidas, el PLC manipula "bits de salida", por convertir estos bits de salida o "ON" o "OFF". Estos bits de salida en el PLC se asignan en la memoria y conectado a "puntos de salida" en un conector multi-punto o varios puntos de terminal. Las señales, cuando son enviadas a través del cableado, van a accionar los elementos de salida, tales como, solenoides, lámparas, motores, relés, etc.

2.9.3. Bit, Byte, Digit, Word

La información de programación o las instrucciones de programación son almacenadas en la memoria de datos de los PLCs, también llamada memoria de usuario.

La CPU realiza conclusiones lógicas, comparaciones, manipulación de datos y computación aritmética basada únicamente en el programa cargado y almacenado en la memoria. Los resultados del proceso son usados, luego, para dirigir y controlar las maquinas que el PLC desee. Los datos a usar en la memoria son organizados y depositados en “palabras”. Una palabra tiene 16 bits o 2 bytes o 4 dígitos.

El bit es el dato más pequeño en la memoria. Un bit puede asumir el estado lógico de 1 ó “ON” o el estado lógico 0 “OFF”. Algunos PLC operan con un microprocesador “octal”, en el cual una palabra consta de 8 bits. Omron y algunas otras empresas operan con en sus PLC con microprocesador “hexadecimal”, el cual tiene 16 bits en una palabra. Según las estandarizaciones internacionales, el bit 00 es el menos significativo.

Las instrucciones de los programas son ingresadas al PLC usando una maquina de lenguaje alfanumérico. Esta forma de ingresar los datos es también conocida como listado de instrucciones o programa nemotécnico de instrucciones. Una línea de instrucciones simple consiste usualmente de tres pasos:

- a) La ubicación de las instrucciones en la memoria del PLC. Esta ubicación es llamada la “dirección”. Ésta es donde el PLC facilita la búsqueda de las instrucciones programadas, luego de la construcción del programa y la instalación de este en el PLC.
- b) La relación de la instrucción a las otras instrucciones, la cual es llamada el “nemotécnico”. Un nemotécnico podría ser LD, OR, AND, ID, NOT, AND NOT, OR NOT, OUT, etc.
- c) Definir la palabra de instrucción y definir el bit, el cual es llamado “operando”. Un operando, por lo tanto, consiste de un numero de palabra y un numero de bit dentro de cada palabra u otro operando definido. El operando siempre designa donde el bit es encontrado o archivado dentro del área de datos.

CAPITULO III

3. TECNOLOGÍA DE SISTEMAS DE CONTROL

3.1. Introducción

La necesidad de utilizar computadores para el control de los procesos industriales surgió en el año 1950, al ser establecido por el profesor John R. Ragazzini, de la universidad de New York, la teoría de sistemas de datos muestreados y ratificó con las investigaciones de otros autores, como Lofti A. Zadeh o Benjamín C. Kuo. Debido a la construcción de los reactores nucleares y la obligación de la industria en mejorar sus procesos, fueron los principales motivos que llevaron a explorar y crear el control de procesos industriales y la instrumentación.

El primer trabajo desarrollado de manera seria fue implementado en el año 1956 en un proyecto de colaboración entre la compañía aeronáutica TRW y la petrolera Texaco, que dio como resultado un sistema controlado por un ordenador instalado en la refinería de Port Arthur, Texas, en 1959. Este sistema controlaba 26 caudales, 72 temperaturas, 3 presiones y 3 composiciones de polímeros.

El primer caso de reemplazo total de un sistema analógico por un sistema digital se produjo en las industrias químicas ICI, en el Reino Unido.

3.2. Del microordenador al miniordenador

Desde la invención del microprocesador (Gro02), en 1969 por Marcían “Ted” Hoff, hasta la introducción del PC en 1983, el proceso de creación de sistemas de control ha ido simplificándose, y se ha creado una gran cantidad de Software para facilitar su accesibilidad.

Uno de los factores más importantes que han llevado a las industrias a invertir en la automatización es la reducción de los costos de estos elementos, además de de nuevas estrategias de control.

3.3. Principios básicos de la teoría de control

El principal objetivo de un sistema de control y de la automatización es, a partir de un estudio previo del proceso, determinar la arquitectura y los valores de los parámetros de un regulador de forma que, ante un cambio deseado o de un imprevisto en su funcionamiento, sea capaz de adaptarse automáticamente a la forma más óptima posible.

Desde el punto de vista de la teoría de control, un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí para alcanzar una determinada función y al mismo tiempo entregar señales de salida en función de las señales o de los datos de entrada.

Al estudiar el comportamiento de la señal de salida respecto a una variación en la señal de entrada permite seleccionar la acción de control idónea para obtener las mejoras en las respuestas requeridas por el sistema.

La regulación y el control de procesos industriales permiten la automatización de la producción, la mejora de la calidad del producto, el incremento de la seguridad, la disminución del consumo energético, la optimización del costo de producción y del mantenimiento de los equipos, etc.

3.4. Definiciones básicas

Lo que caracteriza a un sistema es la interacción entre sus elementos. Por ende, se denomina sistema de control a aquel sistema constituido por un conjunto de elementos conectados de una manera que logren regular o comandar otro sistema, denominado planta o proceso.

3.4.1. Proceso $G(s)$

Son los componentes del sistema que se deben controlar. También se denomina proceso. En la planta se produce la transformación de la

energía suministrada que se desea controlar. En general, la energía eléctrica suministrada al actuador se transforma en energía mecánica (motor), en energía potencial (depósitos de líquidos), cinética (caudal impulsado por una tubería), etc.

3.4.2. Controlador $G_c(s)$

Proporciona la excitación al proceso para alcanzar la salida deseada. Este sistema es diseñado para controlar el comportamiento global del proceso y este sistema también lleva por nombre de regulador, corrector o compensador.

3.4.3. Sensor $H(s)$

Este es el elemento que por defecto tiene la misión de sensar la salida de la planta o del proceso. En el lazo de control se suele situar en la realimentación. En ocasiones, su función de transferencia se incluye en la transmisión del proceso $G(s)$. La característica principal de los sensores es transformar una fuerza física (nivel, caudal, velocidad, temperatura) en una señal eléctrica. Estos constan de dos partes, el detector y un transductor o transmisor. El detector transforma la medida física en una señal eléctrica, por lo general en miliamperios (mA).

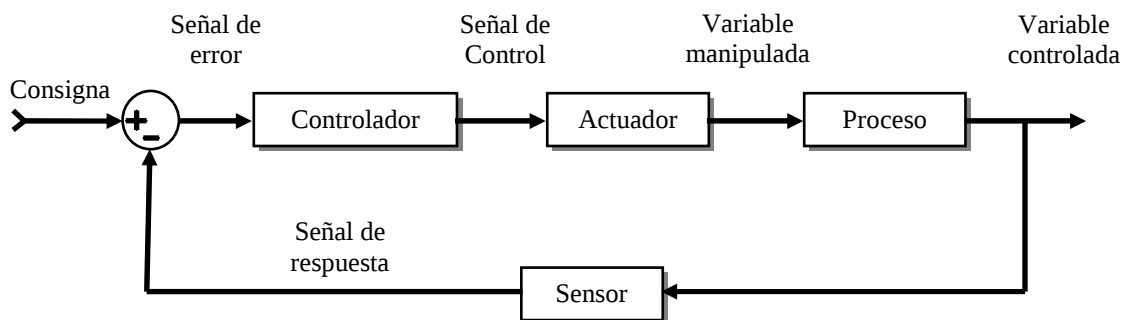


Figura N° 20. Un Sistema de control a Lazo Cerrado.

3.4.4. Actuador

Este elemento se encuentra en el final del control, la parte del proceso que provoca físicamente la dinámica de todo el sistema. Su transmisión se incluye generalmente en la función de transferencia del proceso, $G(s)$, aunque en ocasiones se integra en la función de transferencia del controlador, $G_c(s)$. Habitualmente consta de un adaptador de potencia y del elemento de actuación. La adaptación de potencia es necesaria porque el generador de consignas suele ser de baja potencia y, por lo tanto, insuficiente para alimentar directamente al actuador.

3.4.5. Transmisor

Es la parte del sistema que está encargada de recoger la señal del sensor, acondicionarla y compararla con la señal de consigna para producir una señal de error que significará la entrada al regulador. En general, son elementos que no aportan dinámica al proceso, ni alteran la ganancia estática. Sólo se tendrá en consideración de forma independiente en el caso de sistemas digitales, para calcular el periodo de muestreo, o en sistemas analógicos, cuando la transmisión introduzca un retardo puro en el sistema.

En la suma, tal como se observa en la figura 20, cualquier sistema de control en realimentación contiene cinco elementos básicos, cuyo estudio contribuye a mejorar las prestaciones del proceso a controlar: sensor, transmisor, controlador, actuador y planta o proceso.

3.5. Función de Transferencia

Para el estudio formal del sistema, es necesaria una representación matemática del mismo. En el caso de sistemas lineales, la simplicidad del modelado entrada-salida por *función de transferencia* o *transmitancia* lo convierten en el más usual.

La transferencia de un sistema se define como la relación entre las transformadas de Laplace de salida y la de entrada del sistema. En sistemas físicos, esta relación puede obtenerse a partir de ecuaciones diferenciales que relacionan entrada y salida del sistema, suponiendo

condiciones iniciales nulas. En general, es un cociente de dos polinomios complejos de variable compleja s .

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots a_1 s + a_0}$$

con $m < n$

Ecuación nº 1.

Se denomina:

- ❖ Polinomio característico de la transferencia al denominador de $G(s)$;
- ❖ Ecuación característica al polinomio característico igualado a cero (0);
- ❖ Ceros de la transferencia a las raíces del numerador de $G(s)$;
- ❖ Polos a las raíces del denominador;
- ❖ Integradores a los polos nulos;
- ❖ Orden del sistema representado por $G(s)$ al numerador, y
- ❖ Tipo del sistema al numerador de integradores.

Por conveniencia, se utiliza en lo posible una forma normalizada de la ecuación nº 2, la función de transferencia canónica, con los términos independientes de numerador y denominador unitarios, y con los integradores puros aislados,

$$G(s) = \frac{k \times (c_m s^m + c_{m-1} s^{m-1} + \dots c_1 s + 1)}{s^r \times (d_q s^q + d_{q-1} s^{q-1} + \dots d_1 s + 1)}$$

Ecuación nº 2.

de forma que resultan los valores de ganancia canónica del sistema, k , y su tipo, r .

3.6. Señales Principales

Las señales de entrada y salida de los componentes básicos de un sistema, suelen recibir un nombre estandarizado en el ámbito de la automatización. Para realizar las normalizaciones se denominan, siempre que sea factible, los componentes y señales de actuación principales del diagrama de bloques de un

lazo cerrado simple de control, conforme a la nomenclatura indicada en la siguiente lista:

- 3.6.1.** Variable de proceso $y(t)$. Es la señal de salida del proceso. Otros nombres utilizados son *Process Variable (PV)*, o sencillamente *salida*. Si el sensor de medida se considera dentro del proceso, esta señal es igual a la *señal de salida medida*.
- 3.6.2.** Variable Medida $y_m(t)$. es la señal enviada por el sensor al medir la variable de proceso. También recibe el nombre de señal de salida medida (MV, por measured variable).
- 3.6.3.** Señal de Control $u(t)$. Indica la acción de corrección determinada por el elemento controlador. También recibe el nombre industrial de variable de control, controller output (CO), o variable manipulada (MV, por manipulated variable).
- 3.6.4.** Consigna $y_{sp}(t)$. Es la señal de referencia de la variable de proceso. También conocida como variable de referencia $-r(t)$ -, Setpoint (SP), variable de proceso deseada $-c(t)$, o set value (SV).
- 3.6.5.** Error $e(t)$. Indica la discrepancia existente entre la consigna que se requiere alcanzar o mantener y la variable de proceso. En el ámbito industrial se representa por E.

$$E = e(t) = y_{sp}(t) - y(t)$$

Ecuación nº 3.

- 3.6.6.** Perturbación $p(t)$. Es una señal no propia del comportamiento normal del proceso. Se suele distinguir entre perturbación, ruido ($n(t)$, por noise), o error de medida, y su inserción como señal en un diagrama de bloques puede realizarse en diversos puntos, pero siempre alterando el comportamiento genuino del sistema. En general se trata de un cambio de carga en el proceso, load change.

3.7. Sistema de Control de Lazo Abierto

Este esquema de control en el que la salida del proceso a controlar no afecta a la acción de control, por lo que el control en *Lazo Abierto* es muy sensible a perturbaciones y variaciones. Requiere un conocimiento preciso del proceso a controlar y la garantía del correcto funcionamiento del controlador, que no tiene acceso a la salida del proceso, *PV*. En la figura nº 21 se puede observar un diagrama de bloques simple representativo de este tipo de control.

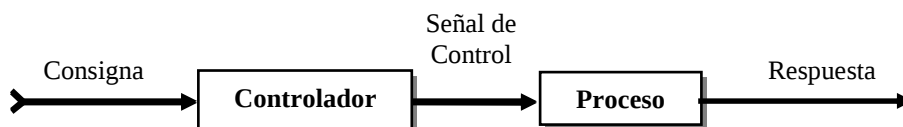


Figura Nº 21. Sistema de lazo abierto.

3.8. Sistema de Control de Lazo Cerrado o Realimentado

El control en *lazo cerrado, realimentado o feedback* es el mecanismo básico que se utiliza en los procesos, ya sean estos mecánicos, eléctricos o biológicos, para mantener su equilibrio. Puede definirse como el uso de una diferencia de señales, determinada comparando el valor real de la variable de proceso y el deseado, como medio para controlar un sistema. La salida del proceso es utilizada para regular la amplitud de su entrada, razón por la que se denomina *sistema de control en lazo cerrado*.

A nivel físico, entre el controlador y el proceso ha de existir un elemento actuador, por ejemplo, una válvula que ejecute la tarea indicada por el controlador sobre el proceso. Este tipo de accionadores están restringidos a cierto tipo de control dentro del proceso al cual se quiere implementar, debido a su margen de actuación, que limitarán la acción de control en forma de no linealidades. Por lo general estos elementos actuadores forman parte del proceso a controlar, pero en el análisis fino de los sistemas de control habrá que tratarlos por separado o incluso suponer que son parte integral del controlador. Nótese que ello implica

realizar una identificación entre la señal de control emitida por el controlador y la variable manipulada que incide sobre el proceso, lo que provoca un cierto grado de confusión.

Normalmente el sensor o elemento de medida es parte del proceso, de forma que se considera que la respuesta del sistema o variable controlada es idéntica a la variable medida. Aunque esta suposición no es del todo realista sobre sistemas físicos, ayudará a centrar la discusión sobre la materia de estudio.

El conjunto formado por el controlador, el amplificador más el actuador y el proceso se denomina *cadena directa*. Mientras que el conjunto formado por el sensor y el acondicionador o transmisor recibe el nombre de *cadena de realimentación*. La función de transferencia de lazo comprende la *cadena directa* y la *cadena de realimentación*.

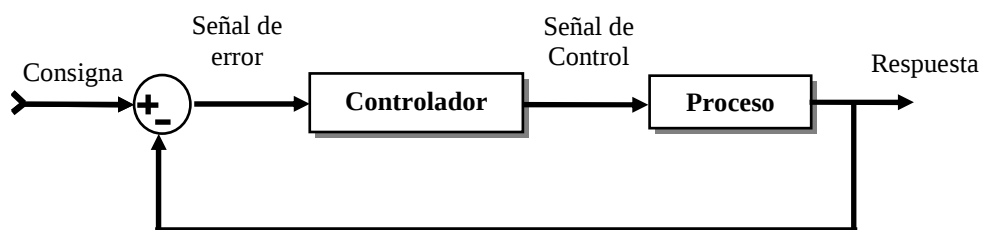


Figura Nº 22. Sistema de lazo abierto.

3.9. Elementos Lineales de Control

Pese al incremento en nuevos algoritmos de control, más del 90% de los reguladores sobre procesos continuos que hallan en funcionamiento en el mercado continúan utilizando una ley de control básica del tipo *PID*. Su implementación dentro de un sistema de control puede desarrollarse de diversas formas:

- Como un controlador en solitario;
- Como parte de un control digital directo, DDC;
- Como parte de un sistema de control distribuido jerárquico.

3.9.1. Control PID analógico

Desde el punto de vista matemático y considerando un sistema SISO, para aproximar un sistema dinámico lineal mediante una ecuación diferencial, e.d.o, lineal, el controlador situado en el lazo cerrado basado en la señal de error debería regirse por una *ley de control* de la forma

$$u(t) = C + P(t) + I(t) + D(t) = C + K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

Ecuación nº 4.

Donde,

- **Offset (C)**, constante que siempre puede suponerse nula si se consideran condiciones iniciales nulas. Representa el nivel de energía de suministro al sistema para que éste se mantenga estable en un valor definido;
- **Acción Proporcional P(t)**, amplifica o atenúa el error de regulación a través de una ganancia de proporcionalidad, K_p .
- **Acción derivativa D(t)**, considera de forma puntual el incremento del error de regulación, ponderado a través del término K_d .
- **Acción Integral I(t)**, acumula a lo largo del tiempo el error de regulación, que pondera a través de un parámetro K_i .
- **Ganancia Proporcional K_p** , ponderación de la acción proporcional.
- **Ganancia Integral K_i** , ponderación de la acción integral.
- **Ganancia Derivativa K_d** , ponderación de la acción derivativa.

Dado que el elemento de *Offset* siempre puede eliminarse mediante una traslación adecuada de las variables del problema, la ley de control en formato paralelo o no interactivo resultaría:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

Ecuación nº 5.

de manera que la función de transferencia del controlador es:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s$$

Ecuación nº 6.

Para la forma en paralelo del algoritmo *PID*, el correspondiente diagrama de bloques del sistema de control básico en lazo cerrado es el que se presenta en la figura nº 23.

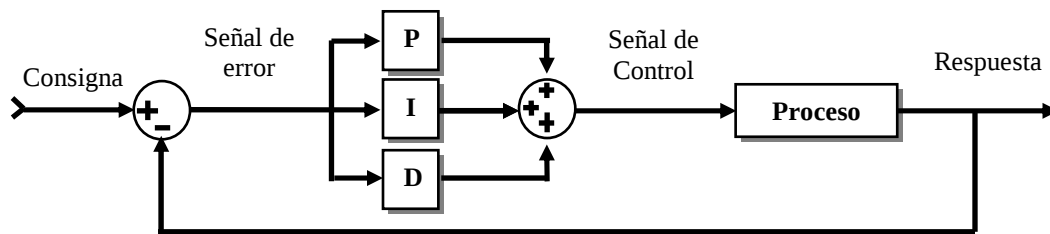


Figura Nº 23. Sistema de control con controlador PID en formato no interactivo paralelo.

En la práctica no es utilizable el sistema donde sólo se utilice el sistema derivativo, éste sistema sólo se utiliza en el ámbito académico, debido a su simplicidad para explicar el sistema, ya que se consideran $K_p = 0$, $K_i = 0$ y $K_d \neq 0$. Por este motivo, es importante que la acción proporcional aparezca siempre, ya que es una acción inmediata de control. El *formato estándar*, o *formato ISA*, también conocido como *no interactivo*, de definición de la ley de control *PID* es:

$$u(t) = K \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) \right)$$

Ecuación nº 7.

Donde:

Ganancia Proporcional, K no tiene unidades.

Tiempo Integral T_i , se expresa en tiempo por repetición (s/rep. ó min/rep.).

Tiempo Derivativo T_d , se expresa en unidades de tiempo (segundos o minutos).

A la expresión inversa del tiempo integral también se le denomina **reset** y se expresa en repeticiones por tiempo (rep./s o rep./min). La ganancia derivativa recibe también los nombres de **rate o pre-act**.

Existen algunas nomenclaturas dependiendo del formato que se utilice, en este trabajo se mencionan algunas:

PARALELO	ISA
K_p	K
K_i	$\frac{K}{T_i}$
K_d	$K \cdot T_d$

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right)$$

Ecuación nº 8.

Existen sistemas donde los controladores utilizan el tiempo integral como inversa de la ganancia integral y el tiempo derivativo como ganancia derivativa, de forma que al implementar el sistema queda de la siguiente manera:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

Ecuación nº 9.

3.9.1.1. Acción proporcional

La ley de control de un controlador proporcional está definida por:

$$u(t) = u_b + K \cdot e(t)$$

Ecuación nº 10.

Donde μ_b se denomina *sesgo o reset*, y se relaciona con el offset considerado en la ley de control de la ecuación nº 11, se suele fijar como:

$$u_b = \frac{u_{max} + u_{min}}{2}$$

Ecuación nº 11.

Y generalmente toma en valor cero. Así, en el dominio de Laplace, en condiciones iniciales nulas, la función de transferencia del controlador proporcional da:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K$$

Ecuación nº 12.

Su representación normativa dentro del diagrama de procesos se ilustra en la figura nº 24.

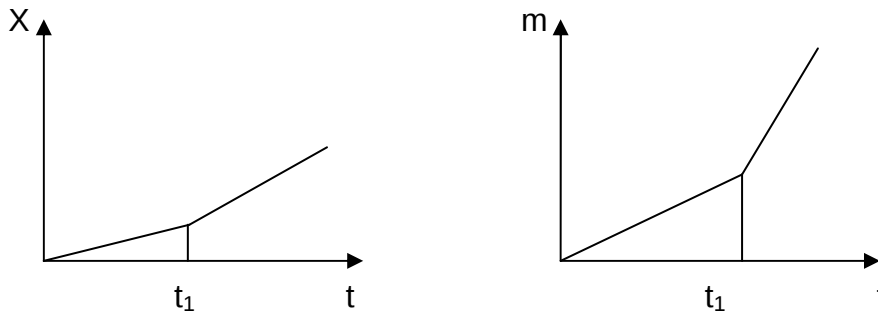


Figura Nº 24. representación en un diagrama de procesos de una acción proporcional.

El aumento en el valor fijado de ganancia proporcional, K_p , conllevará los siguientes efectos sobre el lazo de realimentación:

- Reducción del tiempo de crecimiento, t_r , de la respuesta hacia la consigna:

$$K \uparrow \Rightarrow u(t) = K \cdot e(t) \uparrow \Rightarrow y(t) \uparrow$$

Ecuación nº 13.

si el proceso es lineal con ganancia canónica positiva.

- Reducción del error en estado estable, e_{ξ} , u offset, ya que aplicando la ecuación nº 12 para una señal de control determinada, cuanto mayor es la ganancia proporcional, menos será la señal de error que actúa.
- Sobre un proceso sin integradores puros, nunca se elimina completamente el error en estado estable; para poder eliminar un error estacionario, se necesitaría que la función de transferencia en lazo abierto contuviese algún

elemento integrador. Un control proporcional no añade ningún polo a la función de transferencia.

- En sistemas de orden 2 ó superior, se observa, en la evolución de sus polos dominantes, que en el aumento de la ganancia proporcional provoca un deterioro de la respuesta transitoria del sistema en lazo cerrado; aumento del sobre nivel, M_p , disminución del tiempo de pico, t_p , y un aumento del tiempo de establecimiento, t_s . se puede llegar a conducir el sistema a la inestabilidad.

En ocasiones, se sustituye el parámetro de ganancia, K o K_p , en las diferentes expresiones de la ley de control por su inversa

$$BP = \frac{1}{K}$$

Ecuación nº 14.

Este parámetro se denomina *banda proporcional* y se cuantifica en tanto por uno o, más a menudo, en %, multiplicando por cien, de forma que se cumple las relaciones:

$$K_p = \frac{1}{BP}$$

Ecuación nº 15.

$$K_i = \frac{1}{BP \cdot T_i}$$

Ecuación nº 16.

$$K_p = \frac{T_d}{BP}$$

Ecuación nº 17.

La banda proporcional tiene el siguiente significado: si se toma la precaución de normalizar la señal de control en el intervalo $[0,1]$ o $[-1,1]$, en un regulador puramente proporcional, un 20% de BP, $BP=0,2$, indica que un error de proceso del 20% provocará una acción sobre la variable de control de un 100%.

Puesto que sobre un proceso sin integradores puros, un controlador proporcional en un lazo simple de control realimentado no consigue eliminar el error en estado estable, antiguamente se reajustaba manualmente la señal de control por medio de una acción conocida como *natural reset*, hasta obtener la anulación del offset, la desviación respecto a la consigna. Esta actuación puede llevarse a cabo, o bien añadiendo un cierto nivel a la consigna, o bien introduciendo una cierta ganancia en el sensor de medida.

Por último, se evidencia la necesidad de disponer de una señal de error nula en la entrada del controlador para obtener una señal de control igual a cero:

$$e(t) \neq 0 \Rightarrow u(t) \neq 0$$

Ecuación nº 18.

Expresado a la inversa, significa que es necesario contar con un cierto nivel de error en la entrada del regulador para que éste pueda mantener un cierto grado de actuación sobre el proceso. Esta realidad pone de manifiesto la necesidad de añadir algún tipo de acción de control que sea capaz de eliminar este nivel de error en estado estable y que evite tener que falsear la medida del sensor o añadir consigna artificial para conseguir un error nulo en estado estacionario.

3.9.1.2. Acción Integral

La acción de control integral genera una señal de control proporcional a la integral de la señal de error:

$$u(t) = I(t) = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau = \frac{K}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Ecuación nº 19.

que en términos de la variable compleja implica una función de transferencia, tal como se indica en la ecuación nº 20:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} = \frac{K}{T_i \cdot s}$$

Ecuación n° 20.

La representación grafica normativa dentro de un diagrama de procesos se ilustra en la figura n° 25:

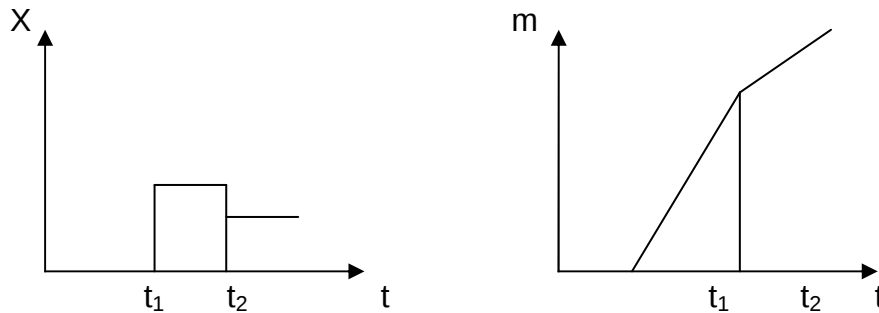


Figura N° 25. Representación diagrama de procesos de una acción proporcional.

La principal actuación de la acción integral es conseguir que la salida de proceso, PV , coincida con la señal de consigna, SP , en el estado estable, $e_{ss}=0$, pese a que ello provoque un cierto deterioro del transitorio de la variable de proceso. De ahí su nombre de *automatic reset*, en contraposición con el *manual reset* necesario cuando sólo se disponía de un control proporcional para conseguir error nulo en un estado estable.

La constante de tiempo integral, parámetro T_i (identificada con una flecha en la figura n° 26), se expresa en unidades de tiempo por repetición e indica el tiempo que tarda la acción integral en suministrar una señal de control equivalente a la obtenida con la acción proporcional si el error se mantiene a valor constante $e(t)=e$:

$$I(T)_i = K_i \cdot \int_0^{T_i} e(\tau) d\tau = \frac{K}{T_i} \cdot \int_0^{T_i} e d\tau = \frac{K \cdot e \cdot T_i}{T_i} = K \cdot e = P(T_i)$$

Ecuación n° 21.

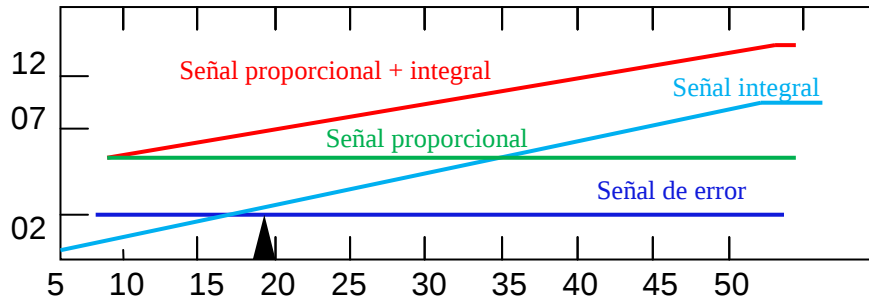


Figura N° 26. Respuesta de las acciones P y P+I ante una entrada de error constante.

la acción correctora permite obtener una señal de control distinta a cero, aunque la señal de error sea nula,

$$e(t) = 0 \neq I(t)$$

Ecuación n° 22.

$$I(t) = \text{constante} \Rightarrow e(t) = 0$$

Ecuación n° 23.

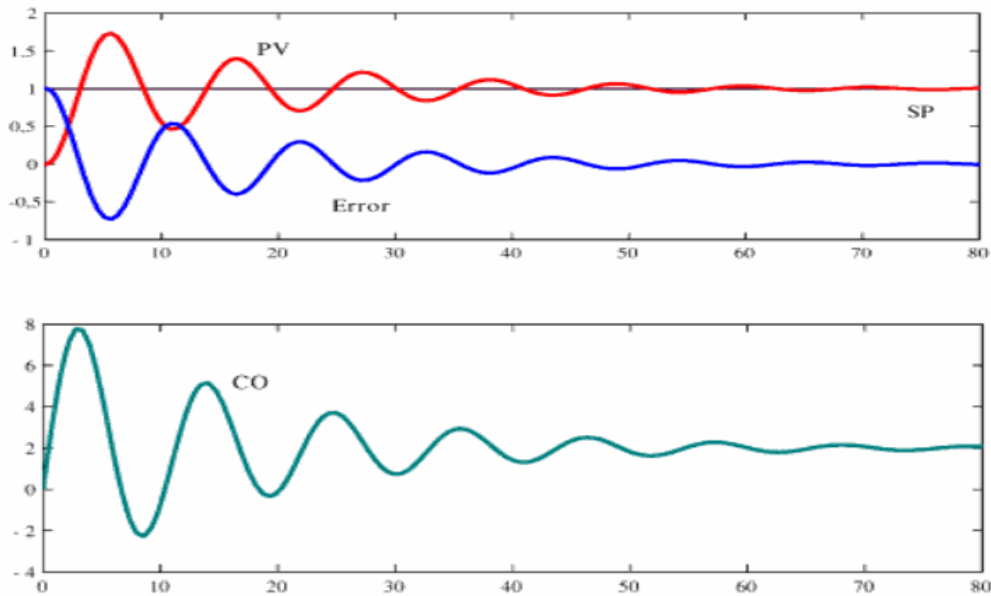


Figura N° 27. Evolución de las señales variables de proceso (PV), error y variable de control (CO) en un sistema realimentado con regulación sólo integral ante entrada escalón.

Una vez simulado el diagrama de bloques de un lazo simple de control realimentado sobre un proceso de segundo orden regulado por medio de un

controlador sólo integral, en la figura nº 27 pueden observarse graficadas las señales medidas durante la simulación. Efectivamente, se cumplen las características antes mencionadas de la acción correctora integral: la acción de control integral empeora la estabilidad relativa del sistema, aumentando el sobre nivel de la respuesta transitoria hasta el punto de poder convertirse en un sistema inestable, debido a que la incorporación de un polo en el origen en el lazo abierto provoca un desplazamiento de las raíces del sistema hacia el semiplano derecho.

La actuación conjunta de un control integral con uno proporcional implica introducir un cero real en $-\frac{1}{T_i}$ y un polo en el origen a la función de transferencia en lazo abierto del sistema. Un buen criterio de diseño para evitar este tipo de inestabilidades consiste en reducir en lo posible la razón entre las ganancias integral y proporcional, por ejemplo, $K_i=10\%$ de K . así el cero permite minimizar el efecto del polo al colocarse próximo a él.

3.9.1.3. Interpretación Frecuencial

La interpretación de una acción integral implica, observando su magnitud en el diagrama de Bode de la figura nº 28, que las frecuencias más bajas se verán amplificadas, mientras que las frecuencias elevadas se verán anuladas. Es de esta forma, amplificando hasta un nivel infinito una frecuencia de entrada nula, como la acción integral es capaz de eliminar un error constante. Por otra parte, las frecuencias altas, asociadas a ruido, se verán atenuadas. Estudiando el desfase, se observa que la acción integral provoca un retardo en la fase, lo que conlleva un decremento de la estabilidad relativa del sistema global.

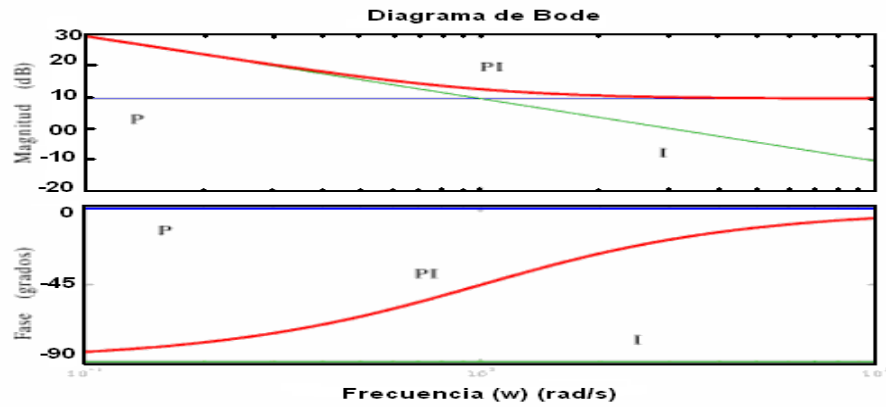


Figura N° 28. Representación del diagrama de Bode para una acción proporcional, $K=3$; una acción integral $K_i=3$, y una acción proporcional-integral combinada.

3.9.1.4. Acción Derivativa

La acción de control derivativa genera una señal de control proporcional a la derivada de la señal de error:

$$u(t) = D(t) = K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) = K \cdot T_d \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

Ecuación n° 24.

Que en términos de la variable compleja implica una función de transferencia:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_d \cdot s = K \cdot T_d \cdot s$$

Ecuación n° 25.

Su representación grafica dentro de un diagrama de procesos se ilustra en la figura n° 28:

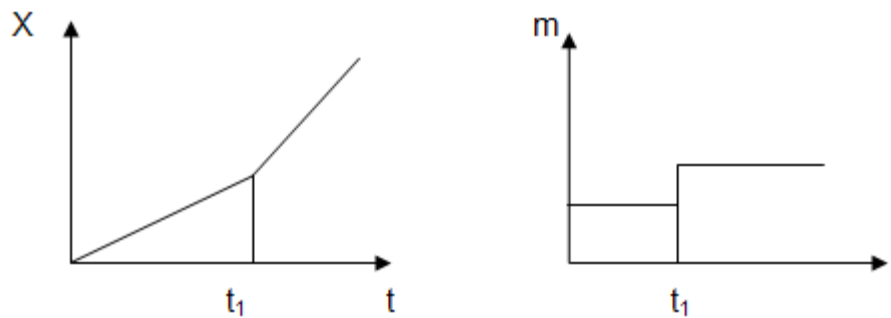


Figura N° 29. Representación en un diagrama de procesos de una acción proporcional.

La acción de control derivativa tiene el efecto de incrementar la estabilidad relativa del sistema, al reducir el sobre impulso u *overshoot* y mejorar la respuesta transitoria, pero en cambio no actúa en régimen permanente ya que la derivada de una señal de error constante es nula. Si tiene demasiada influencia sobre la acción global de regulación, entonces la respuesta del sistema puede ser excesivamente lenta.

La constante de tiempo derivativa, parámetro T_d , se cuantifica en unidades de tiempo y expresa el tiempo de anticipación del controlador en la respuesta. Si el error de regulación fuese una rampa de pendiente constante, $e(t) = m \cdot t$ la acción proporcional tardaría un tiempo T_d en igualar a la acción derivativa que está produciendo desde el primer momento, figura nº 29:

$$D(T_d) = K \cdot T_d \cdot \frac{d}{dt} e(t)|_{t=T_d} = K \cdot T_d \cdot m|_{t=T_d} = K \cdot m \cdot T_d = K \cdot m \cdot t|_{t=T_d} = K \cdot e(T_d) = P(T_d)$$

Ecuación nº 26.

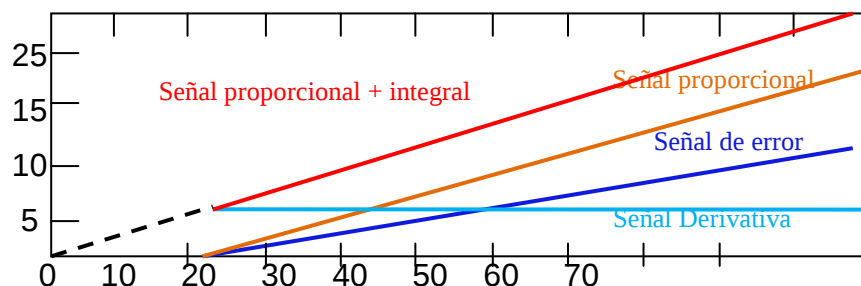


Figura Nº 30. Respuesta de las acciones P y P+D ante una entrada de error rampa.

La acción derivativa aporta sensibilidad al sistema y estabilidad relativa, pero no puede utilizarse en solitario porque no actúa ante un error que se mantenga constante:

$$e(t) = \text{constante} \Rightarrow D(t) = 0$$

Ecuación nº 27.

La acción derivativa trabaja sobre la razón de cambio en el error, normalmente debido a una alteración en la salida del proceso, *PV*. Si el cambio en *PV* es causado por ruido, ya sea en la medida, en la señal o en el proceso, la

acción derivativa puede ocasionar una sobre corrección en la regulación del proceso. Como regla general, nunca se debe utilizar una acción derivativa sobre un proceso con un ancho de banda de ruido superior al 2,5 %. Los lazos de control que suelen tener un nivel de ruido significativo son los de presión y los de caudal. El control de nivel puede también ser ruidoso si existe la posibilidad de agitación del líquido.

La tabla nº 2 que se ilustra a continuación muestra, de manera de síntesis del capítulo, los efectos de las acciones correctoras sobre el comportamiento de un proceso en un lazo simple de control realimentado.

Incr.	Tiempo de Crecimiento, t_r	Sobre nivel, M_p	Tiempo de Estabilización, t_s	Error en estado estable, e_{ss}
K_p	Disminución	Aumento	Pequeña variación	Disminución
K_i	Disminución	Aumento	Aumento	Eliminación
K_d	Pequeña variación	Disminución	Disminución	Pequeña variación

Tabla nº 2. Efectos de acciones correctoras de un proceso PID

CAPITULO IV

4. CELDAS DE CARGA

4.1. Introducción

En la industria de fabricación de alimentos, ya sean estos para humanos o animales, se debe controlar el peso de las materias primas y del producto final, es por esto que existen sistemas de pesaje donde se utilizan elementos que se encargan de medir las cantidades elaboradas, estos elementos son las celdas de carga con sus respectivos transductores y visualizadores.

En el área técnica las celdas de carga están compuestas por varias piezas, siendo las más importantes las galgas. La medición con galgas extensométricas es el procedimiento más importante para la determinación de la deformación longitudinal. Las magnitudes mecánicas se miden a través de métodos eléctricos.

La técnica de medición con galgas extensométricas es de aplicación relativamente sencilla, posee una alta resolución y se puede emplear directamente en el punto de interés. Ahora bien, una galga extensométrica no es un instrumento de medición en sí mismo. La galga extensométrica tiene que ser puesta por el propio usuario en un estado operativo tras la instalación. La calidad de esta técnica de medición no depende sólo de la galga extensométrica, sino también, y fundamentalmente, de la forma de aplicación y su ejecución. Las galgas extensométricas trabajan con una gran fiabilidad si se domina el manejo teórico y práctico de estos sensibles elementos sensores.

4.2. Principios Básicos de la Celda de Carga

Las celdas de carga están catalogadas dentro del grupo de transductores de fuerza. Este artefacto convierte la fuerza que se aplica sobre ella en una señal eléctrica. Las galgas están desarrolladas de una película metálica ultra delgada tratada térmicamente y son químicamente depositados a un delgado sustrato dieléctrico. “Los parches de galga” o galgas extensométricas, son entonces montadas al elemento deformador con adhesivos especialmente formulados. La

posición precisa de la galga, el procedimiento de montaje, y todos los materiales utilizados tiene un efecto medible para el desempeño total de la celda de carga.

El principio básico de una celda de carga está basado en el funcionamiento de cuatro galgas extensométricas (strain gauge), dispuestos en una configuración especial.

Una galga extensométrica es un sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga y producirá una variación en su resistencia eléctrica, por lo tanto la galga extensométrica es básicamente una resistencia eléctrica. El parámetro variable y sujeto a medida es la resistencia de dicha galga. Esta variación de resistencia depende de la deformación que sufre la galga.

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son aleaciones metálicas, como por ejemplo constantán, nicrón o elementos semiconductores como por ejemplo el silicio y el germanio. Es por ello que podemos clasificar las galgas en dos tipos: las metálicas y las semiconductoras.

4.3. Galga Extensométrica

4.3.1. Fundamento: Efecto Piezorresistivo

Las galgas extensométricas se basan en la variación de la resistencia de un conductor o un semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico. Este efecto fue descubierto por Lord Kelvin en 1856.

Básicamente el método consiste en “pegar” un elemento llamado galga a la pieza y conectarla a un circuito electrónico adecuado. Al deformarse la pieza y, por lo tanto la galga, este verá su resistencia eléctrica alterada proporcionalmente a la deformación y provoca un cambio en la diferencia de potencial proporcional al cambio de la resistencia, es decir, a la deformación de la pieza. Desde el punto de vista metodológico, es conveniente describir la galga como un elemento lineal que recibe en la entrada una deformación longitudinal unitaria y produce en la salida superpuesta a su resistencia original. Posteriormente se describirá el circuito electrónico que transforma esta señal, recibida por la resistencia, en una diferencia de potencial medible.

En la figura nº 31 se muestra un conductor recto de longitud L , resistividad ρ y sección transversal A .

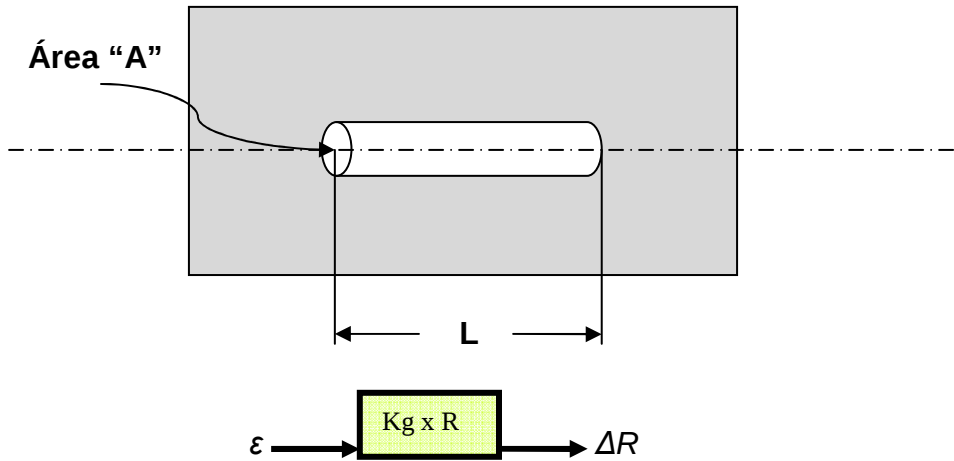


Figura Nº 31. Conductor lineal sometido a deformaciones longitudinales.

El conductor se ha pegado a la superficie a través de un material base. El pegamiento debe tener una alta aislación dieléctrica. Así, aunque la pieza sea metálica, la resistencia entre el conductor y la pieza es de más de 100 MΩ. La resistencia de conductor, dada por la ecuación nº1.

Si se considera un hilo metálico de longitud “ L ”, sección “ A ” y resistividad “ ρ ”, su resistencia eléctrica “ R ” estaría dada por:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} = \rho \cdot \frac{L}{\pi \cdot r^2} [\Omega]$$

Ecuación nº 28.

Si se somete un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes (ρ , L y A) que intervienen en el valor de “ R ” experimenta un cambio y, por lo tanto, “ R ” también cambia de forma:

$$dR = \frac{d\rho}{d\rho} d\rho + \frac{dR}{dL} dL + \frac{dR}{dA} dA$$

Ecuación nº 29

Donde:

$$\frac{dR}{d\rho} = \frac{L}{A}; \frac{dR}{dL} = \frac{\rho}{A}; \frac{dR}{dA} = -\frac{\rho L}{A^2}$$

Ecuación nº30.

Luego, al reemplazar tenemos:

$$dR = \frac{A(\rho dL + Ld\rho) - \rho LdA}{A^2}$$

Ecuación nº 31.

La sección transversal se puede reducir a una sección de diámetro equivalente d_e , por lo tanto:

$$A = Q \cdot d_e^2$$

Ecuación nº 32.

Pero si el conductor es circular,

$$Q = \pi/4$$

Ecuación nº 33.

Por lo tanto, derivando la ecuación nº 5, tenemos:

$$dA = 2 \cdot Q \cdot d_e \cdot d(d_e)$$

Ecuación nº 34.

Dentro de lo que se debe tener en cuenta está el coeficiente de Poisson, donde para el material de la galga, tenemos:

$$\frac{d(d_e)}{d_e} = \frac{dL}{L} \mu_t$$

Ecuación nº 35.

Resultando, de lo anterior:

$$dA = 2 \cdot Q \cdot d_e \cdot \left(-\mu_t \cdot \frac{dL}{L}\right) \cdot d_e = -2 \cdot Q \cdot d_e^2 \cdot \mu_t \cdot \frac{dL}{L} = -2 \cdot A \cdot \mu_t \cdot \frac{dL}{L}$$

Ecuación nº 36.

Luego, sustituyendo la ecuación nº 36 en la ecuación nº 31, tenemos:

$$dR = \frac{\rho dL(1 + 2\mu_t) + Ld\rho}{A}$$

$$dR = \frac{\rho dL(1 + 2\mu_t) + Ld\rho}{\frac{\rho L}{R}} = R \left[\frac{dL}{L} (1 + 2\mu_t) + \frac{d\rho}{\rho} \right]$$

$$dR = \left[(1 + 2\mu_t) + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}} \right] \cdot \frac{dL}{L}$$

Ecuación nº 37.

Ahora se toma en cuenta que la deformación longitudinal unitaria es:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Ecuación nº 38.

Entonces:

$$\frac{dR}{R} = K_g \cdot \varepsilon; \quad K_g = 1 + 2\mu_t + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$$

Ecuación nº 39.

Se puede observar que K_g depende aparentemente de ε , pero el término $\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$ es una propiedad física del material del conductor y se denomina *Piezorresistividad Longitudinal*, de forma tal que:

$$\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} = \pi_1 E_t$$

Ecuación nº 40.

En las ecuaciones donde aparece el término E_t , este es el modulo de elasticidad del material del conductor y π_1 es el coeficiente de piezorresistividad longitudinal, pudiendo ser positivo o negativo, finalmente tenemos:

$$\frac{dR}{R} = K_g \cdot \varepsilon$$

Ecuación nº 41.

$$K_g = 1 + 2\mu_t + \pi_1 E_t$$

Ecuación nº 42.

K_g es el *coeficiente de la galga extensiométrica* y relaciona la deformación longitudinal unitaria (cambio relativo de longitud) con el cambio relativo de la resistencia del conductor. La sensibilidad $K_g R$ de este conductor es la relación entre el cambio de resistencia y la deformación longitudinal unitaria.

$$dR = K_g \cdot \varepsilon; \quad K_g \cdot R = \frac{dR}{\varepsilon}$$

Ecuación nº 43.

En la figura nº 30, ya antes descrita, se representa como un bloque la relación entre “la entrada” y “la salida” de una galga extensiométrica.

La tensión mecánica y ϵ es la deformación unitaria. ϵ es adimensional, pero para mayor claridad se suele dar en microdeformaciones ($1 \text{ microdeformacion} = 1 \mu\epsilon = 10^{-6} \text{ m/m}$).

Se parte de la hipótesis inicial de que el sensor experimenta las mismas deformaciones que la superficie sobre la cual está pegada. El sensor está constituido básicamente por una base muy delgada no conductora, sobre la cual va adherido un hilo metálico muy fino, de forma que la mayor parte de su longitud está distribuida paralelamente a una dirección determinada, tal y como se muestra en la figura siguiente, (figura 32):

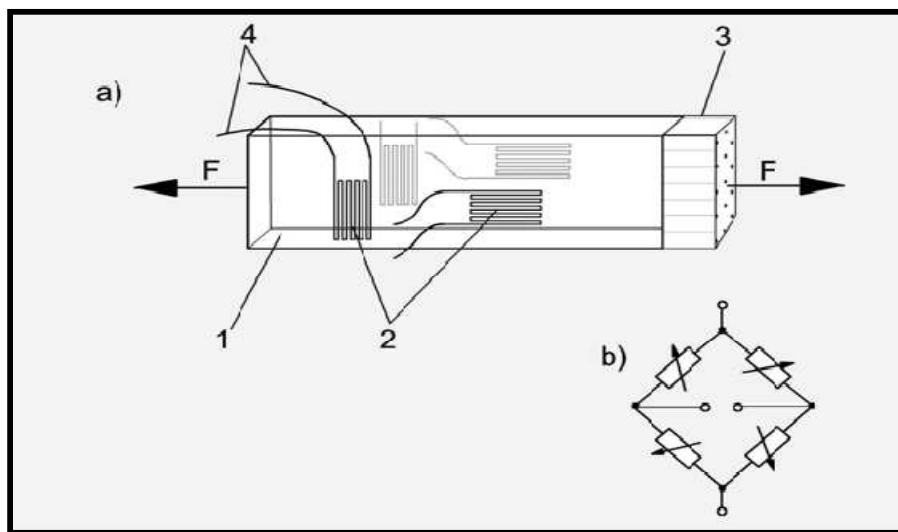


Figura N° 32. Disposición de una galga en una celda de carga.

a) Disposición de las galgas extensométricas en la barra de tracción, **b)** conexión de las galgas extensométricas;

1. barra de tracción, 2.- galga extensométrica, 3.- distribución de tensión, 4.- cableado; F fuerza de ataque.

De este modo las deformaciones que se producen en el objeto, en el cual está adherida la galga, provocan una variación de la longitud y, por consiguiente, una variación de la resistencia.

Otro principio de funcionamiento de las galgas se basa en la deformación de elementos semiconductores. Esta deformación provoca una variación, tanto en la longitud como en la sección.

Este tipo de sensor semiconductor posee un factor de galga más elevado que el constituido por hilo metálico.

4.3.2. Descripción constructiva

Actualmente se producen dos tipos de galgas extensiométricas. Las primeras denominadas galgas metálicas, están en uso desde hace varias décadas y se construyen de un material con efecto piezorresistivo pequeño. El coeficiente de la galga K_g tiene para estos materiales un valor aproximado a 2. Si se tiene en cuenta que el coeficiente *Poisson* μ jamás puede exceder el valor de 0,5, se verá que aporta muy poco al valor K_g del efecto piezorresistivo. Las galgas extensiométrica más comunes se utilizan en las siguientes aleaciones:

Advance (cobre 55%, níquel 45%) o Iso Elastic (níquel 36%, cromo 8%, manganeso, silicón y molibdeno 4%, el resto hierro). El Iso elastic tiene un factor K_g de 3,5. Como la sensibilidad es pobre, el circuito electrónico requiere una elevada ganancia para poder transformar las deformaciones en diferencia de potencial. Pero sin embargo la linealidad es de buena calidad.

Otro tipo de galgas, son las conocidas como galgas fabricadas en base a semiconductores o piezorresistivo, tiene un alto coeficiente de piezorresistividad y el tercer término de la ecuación nº 15, predomina sobre los dos primeros. Estas galgas se construyen de una delgada lámina de mono cristal de silicón o germanio que contiene una cantidad de impureza medida con gran exactitud para darle las propiedades deseadas. El coeficiente K_g de la galga puede tomar valores 50, 60 ó más veces mayores que en el caso anterior. Debido a su gran sensibilidad no es imprescindible que el sistema electrónico que transforma en tensión eléctrica los cambios de resistencia tenga una elevada ganancia.

No obstante esta ventaja, el efecto piezorresistivo, depende de alguna manera de ϵ y su cambio de resistencia no es lineal en todo el rango de las deformaciones. En la figura 33a se muestra una galga de semiconductor.

Llevado a la práctica, las galgas metálicas no pueden ser lineales como se mostraba en la figura 1. Esto se debe a que su sensibilidad es pobre, siendo necesario aumentar $K_g R$. Pero, se ha visto que K_g , en este tipo de galgas, toma valores de alrededor de 2 a 3,5. Por lo tanto, es necesario aumentar la resistencia del alambre. Esto se puede lograr haciendo que la sección del alambre disminuya. La otra opción es aumentar la longitud “L” del alambre. Pero si la longitud es grande, no se estará midiendo un adecuado valor de la deformación longitudinal unitaria, lo cual exige que la L sea lo menor posible. Para aumentar la longitud del alambre sin aumentar la zona de medición se recurrió a la solución mostrada en la figura 34. Ahora el alambre de Abvance o Iso Elastic, con un calibre de aproximadamente 25 micrones, forma una especie de serpentín o radiador. Esta solución trae cierta sensibilidad transversal no deseada. Si la pieza tiene, en la dirección de la medición, una deformación longitudinal esto acarrearía una deformación unitaria ϵ , así mismo se tendrá en la dirección transversal una deformación transversal unitaria $-\mu_m \epsilon$ (el subíndice m corresponde al material de la pieza sobre la cual se ha fijado la galga).

Si la longitud total longitudinal del alambre sigue siendo L y su área A , pero que la longitud total transversal del alambre es L_T , resulta que el cambio de resistencia total es:

$$\Delta R_L = K_g \frac{\rho L}{A} \epsilon$$

Ecuación n° 44, cambio de la sección transversal.

Luego, el cambio total de la resistencia será:

$$\Delta R_T = K_g \frac{\rho L_T}{A_T} (-\mu_m \epsilon)$$

Ecuación n° 45.

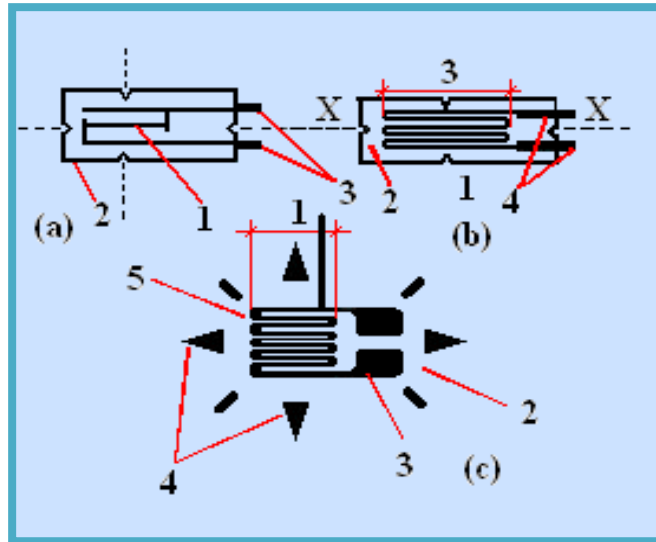


Figura N° 33, Galgas para medir deformaciones en el sentido axial.

- a) Galga semiconductor: 1.- cristal semiconductor; 2.- base aislante; 3.- terminales.
- b) Galga metálica de alambre: 1.- alambre; 2.- base; 3.- longitud efectiva de medición; 4.- terminales.
- c) Galga metálica de lámina: 1.- longitud efectiva de medición; 2.- base; 3.- terminales; 4.- marcas de alineación; 5.- lámina

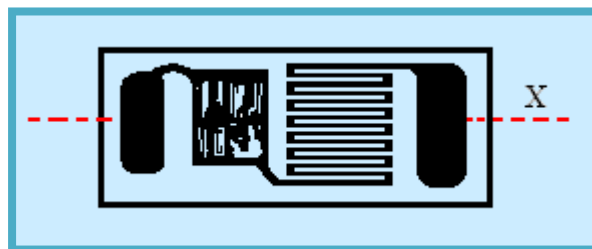


Figura N° 34. Galga cuya constante es directamente proporcional al esfuerzo normal en la dirección de la parrilla más larga.

$$\Delta R = K_g \rho \varepsilon \left(\frac{L}{A} - \mu_m \frac{L_T}{A_T} \right) = K_g \rho \varepsilon \frac{L}{A} \left(1 - \mu_m \frac{A}{A_T} \cdot \frac{L_T}{L} \right)$$

$$\Delta R = K_g R \varepsilon \left(1 - \mu_m \frac{A}{A_T} \cdot \frac{L_T}{L} \right) = K_g^1 R \varepsilon$$

$$K_g^1 = K_g \left(1 - \mu_m \frac{A}{A_T} \cdot \frac{L_T}{L} \right)$$

Ecuación nº 46.

Como en este caso todo el alambre tiene la misma sección uniforme A , entonces $A_T = A$ y finalmente tenemos:

$$K_g^1 = K_g \left(1 - \frac{L_T}{L} \right)$$

Ecuación nº 47.

En la ecuación nº 47 muestra, aunque la longitud total del alambre es $L + L_T$, la sensibilidad ahora es menor que si el alambre fuese recto con longitud L .

Después de varias investigaciones se comenzó a producir las galgas metálicas de láminas, como se ilustra en la figura nº 33. Aquí el conductor se hace grabando una figura tipo serpentín en la lámina de metal de unos cuantos micrones de espesor, hecha de una aleación similar a la usada para construir los alambres de las galgas. Las galgas son producidas en gran cantidad de tamaños, desde 1 mm de longitud efectiva hasta 10 cm. Las más pequeñas son utilizadas en espacios reducidos, como por ejemplo en investigación de dientes de engranajes, en la mecánica. Las más largas se pueden usar donde su longitud comparada con el tamaño de la pieza no afecta la determinación puntual de la deformación longitudinal unitaria. También se usan más largas en materiales heterogéneos (por ejemplo, hormigón) porque una galga pequeña mediría las propiedades puntuales (quizás de una piedra) y no la deformación promedio del material.

Las resistencias de las galgas metálicas tienen valores estandarizados de 120; 350; 600 y 1.000 W. La tolerancia se especifica, por ejemplo, escribiendo $R = (120 \pm 0,25) W$. La linealidad para deformaciones hasta 4.000 $\mu\epsilon$ es de hasta un 0,1 %. Para deformaciones de hasta 100.000 $\mu\epsilon$, no menos de 1 %.

El $\mu\epsilon$ (micro deformación) es una unidad adimensional de deformación longitudinal unitaria que quiere decir que $\epsilon = 10^{-6}$ (m/m) o (mm/mm). La deformación para romper las galgas metálicas está entre 20.000 y 25.000 $\mu\epsilon$ (cabe recordar que el prefijo μ significa 10^{-6}). La vida de las galgas, sometidas a cargas cíclicas

(fatiga), es de 10^7 ciclos completos, si la deformación no excede $1.000 \mu\epsilon$. Existen galgas especiales capaces de resistir deformaciones grandes, como por ejemplo, después de la zona de fluencia. Estos últimos resisten deformaciones del orden de los $100.000 \mu\epsilon$.

La corriente máxima que debe circular por una galga metálica depende de la disipación de calor en el punto donde se ha pegado este, pero 30 mA es una cifra prudencial.

Para galgas semiconductores la resistencia es de 12Ω , la linealidad dentro de un 1 %, hasta $1.000 \mu\epsilon$, la deformación de rotura, aproximadamente $5.000 \mu\epsilon$ y la vida útil, sometido a fatiga, es de 10^6 ciclos. Generalmente las galgas semiconductores han de ser usadas cuando sea imprescindible, como en la situación de medir deformaciones extremadamente pequeñas. La menor deformación que se puede medir con galgas metálicas es del orden de $0,1 \mu\epsilon$ y con galgas de semiconductores del orden de $0,001 \mu\epsilon$.

Con las galgas de la figura nº 33 se mide la deformación unitaria ϵ_x en la dirección longitudinal, que se la designará ahora como la dirección x. Para calcular el esfuerzo normal en la dirección x, es necesario conocer aprioris que no hay esfuerzo normal en la dirección y, como el caso de la viga sometida a tracción o compresión. Entonces para un material elástico con módulo de elasticidad E_m [Pa] (correspondiente al material de la pieza a la cual se ha fijado la galga) y dentro de la zona elástica se tiene:

$$\sigma_x = E_m \epsilon_x [\text{Pa}]$$

Ecuación nº 48.

Si no existiese la certeza de la ausencia de σ_y , se debe colocar otra galga en la dirección y, de modo que su eje tenga 90° con respecto al eje de la primera galga. Ahora se tendrán las lecturas de ϵ_x y ϵ_y . Recordando la **ley de Hook** general se tiene que;

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_m} - \frac{\mu_m}{E_m}(\sigma_y + \sigma_z)$$

Ecuación n° 49.

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_m} - \frac{\mu_m}{E_m}(\sigma_x + \sigma_z)$$

Ecuación n° 50.

La letra griega μ representa el **coeficiente de Poisson** del material (se supone que no se excede el límite elástico). Como en nuestro caso $\varepsilon_z = 0$. Entonces despejando los esfuerzos se tiene:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_m} - \frac{\mu_m \sigma_y}{E_m}$$

Ecuación n° 51.

Despejando σ_y/E_m y reemplazando en la ecuación n° 51, tenemos:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_m} - \frac{\mu_m \sigma_x}{E_m}$$

Ecuación n° 52.

$$\frac{\sigma_y}{E} = \varepsilon_y + \frac{\mu_m \sigma_x}{E_m}$$

Ecuación n° 53.

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_m} - \mu_m \left(\varepsilon_y + \frac{\mu_m \sigma_x}{E_m} \right) = \frac{\sigma_x}{E_m} - \mu_m \varepsilon_y - \frac{\mu_m^2}{E_m} \sigma_x$$

Ecuación n° 54.

$$\varepsilon_x + \mu_m \varepsilon_y = \sigma_x \left(\frac{1}{E_m} - \frac{\mu_m^2}{E_m} \right) = \frac{\sigma_x}{E_m} (1 - \mu_m^2)$$

Ecuación n° 55.

Despejando:

$$\sigma_x = \frac{E_m}{1 - \mu_m^2} (\varepsilon_x + \mu_m \varepsilon_y)$$

Ecuación n° 56.

Haciendo el mismo desarrollo para ε_y , tenemos:

$$\sigma_y = \frac{E_m}{1 - \mu_m^2} (\varepsilon_y + \mu_m \varepsilon_x)$$

Ecuación n° 57.

De esta forma se pueden determinar los esfuerzos normales en las dos direcciones. Otra forma de calcular el esfuerzo en una dirección consiste en aplicar la galga mostrada en la figura n° 33. La longitud del serpentín en la dirección y es μ veces la longitud de la parrilla en la dirección X. Además ambas parrillas están en serie, por lo que sus resistencias se suman. Llamando K_{go} a la constante de cada parrilla, que es la misma para las dos, se tiene para el cambio de resistencia en cada parrilla:

$$\Delta R_x = K_{go} R_x \varepsilon_x$$

Ecuación n° 58.

$$\Delta R_y = K_{go} \mu_m R_x \varepsilon_y$$

Ecuación n° 59.

La resistencia total es

$$\Delta R = K_{go} R_x (\varepsilon_x + \mu_m \varepsilon_y)$$

Ecuación nº 60.

De la ecuación nº 57, se obtiene:

$$\frac{\sigma_x (1 - \mu_m^2)}{E_m} = (\varepsilon_x + \mu_m \varepsilon_y)$$

Ecuación nº 61.

De la ecuación nº 60 se obtiene:

$$\frac{\Delta R}{R_x K_{go}} = (\varepsilon_x + \mu_m \varepsilon_y)$$

Ecuación nº 62.

Igualando,

$$\frac{\sigma_x (1 - \mu_m^2)}{E_m} = \frac{\Delta R}{R_x K_{go}}$$

Ecuación nº 63.

$$\sigma_x = \frac{E_m}{R_x K_{go} (1 - \mu_m^2)} \Delta R$$

Ecuación nº 64.

$$\sigma_x = K_g \Delta R$$

Ecuación nº 65.

$$K_g = \frac{E_m}{R_x K_{go} (1 - \mu_m^2)}$$

Ecuación nº 66.

Muchas veces no basta con hallar los esfuerzos normales en dos ejes perpendiculares entre sí; sino que se desea conocer el estado tensional del punto:

Por ejemplo, posición de los ejes principales con respecto a una posición dada, esfuerzos principales, etc. En tal caso se debe recurrir como mínimo a tres galgas y procesar las lecturas de cada uno de ellas.

En la figura nº 35 se muestran tres tipos de configuración para las galgas, que por su forma se hacen llamar rosetas.

En cada caso, la primera figura corresponde a la ubicación como si se pegaran tres (o cuatro) idénticas debido a que sólo se tiene el tipo convencional de galgas. Pero también es posible adquirir las tres (o cuatro) ya pegadas sobre una base común. Las restantes figuras de cada tipo corresponden a configuraciones ideadas para ahorrar espacio y hacer más puntual la medición. Cuando las tres galgas están apiladas uno sobre otro se hace más importante que nunca no someter a cada uno de ellos a una corriente elevada.

Los esfuerzos normales máximos (σ_{max}) y mínimos (σ_{min}) en el plano y la posición de los ejes principales (β_p) tomando siempre como referencia la galga 1, se dan a continuación.

Roseta rectangular:

$$\sigma_{max-min} = \frac{E_m}{2} \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 + \mu_m} \pm \frac{1}{1 + \mu_m} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right)$$

Ecuación nº 67.

$$\beta_p = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \right)$$

Ecuación nº 68.

Roseta Delta:

$$\sigma_{max-min} = \frac{E_m}{2} \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3(1 - \mu_m)} \pm \frac{1}{1 + \mu_m} \sqrt{\left(\varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\sqrt{3}} \right)^2} \right)$$

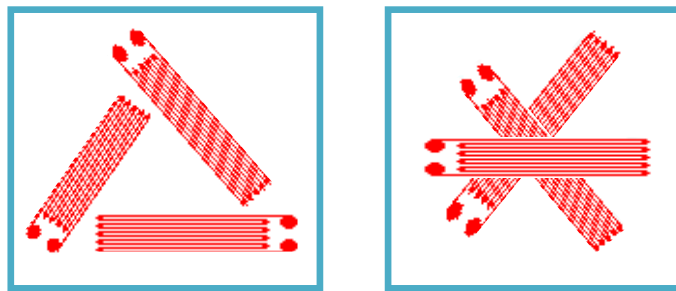
Ecuación nº 69.

$$\beta_p = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\sqrt{3}}}{\varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3}} \right)$$

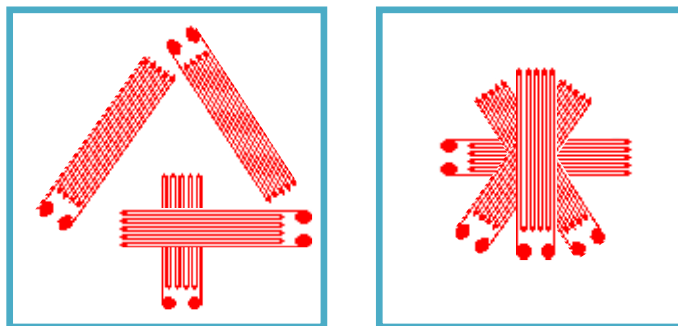
Ecuación nº 70.



a)



b)



c)

Figura Nº 35. Tipos de rosetas: a) roseta rectangular; b) roseta delta; c) roseta en delta.

Roseta delta “T”:

$$\sigma_{max-min} = \frac{E_m}{2} \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{(1 - \mu_m)} \pm \frac{1}{1 + \mu_m} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + \frac{4}{3}(\varepsilon_2 + \varepsilon_1)^2} \right)$$

Ecuación nº 71.

$$\beta_p = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\sqrt{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_4)} \right)$$

Ecuación nº 72.

Con los valores de σ_{max} , σ_{min} y β_p se puede calcular todos los restantes parámetros del estado tensional y la deformación.

Desde las ecuaciones nº 67 a nº 72, E_m es el módulo de elasticidad del material cuya deformación se quiere medir en P_a y μ_m el coeficiente de Poisson.

La base de la galga tiene dos funciones principales: proteger a la parrilla durante la manipulación y montaje, y transmite la deformación de la pieza a la parrilla. La base debe tener una rigidez pequeña comparada con el material ensayado, pero alta comparada con la galga, para garantizar una buena respuesta dinámica.

La resistencia a la humedad es otra propiedad muy importante de los pegamentos. Si el pegamento absorbe humedad, el aislamiento baja y la lectura se modifica. De todas formas las instalaciones de galgas a largo plazo y a la intemperie a corto plazo deben ser cubiertas con alguna protección contra la humedad.

4.3.3. Influencia de la temperatura

La temperatura es una interferencia importante en la medición con galgas. Si se mide deformación para calcular posteriormente esfuerzos se puede presentar la contradicción de que la pieza, sin estar sometida a carga externa alguna, se

deforme debido a las dilataciones o contracciones térmicas. Entonces, a partir de esa deformación que no fue producida por ninguna fuerza externa, se calcula un esfuerzo inexistente. Si esto no se toma en cuenta se pueden cometer errores muy importantes. Por ejemplo si consideramos una varilla de acero con un coeficiente de dilatación α térmica de $10,8 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ ($10,8 \times 10^{-6}\epsilon$) y la galga está pegada a ella y la temperatura Δt sube 10°C , la varilla tendrá una deformación:

$$\Delta L = L\alpha\Delta t; \Delta L/L = \Delta t \times \alpha = 10[^{\circ}\text{C}] \cdot 10,8.[\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}] = 108 [\mu\epsilon] = 108 \times 10^{-6}[\epsilon]$$

Ecuación nº 73.

$$\sigma_x = E_m \Delta L/L = 200000 \times 10^6[\text{Pa}] \cdot 108 \times 10^{-6} = 21,6 \times 10^6[\text{Pa}] \cdot 21,6[\text{MPa}]$$

Ecuación nº 74.

Si la varilla tuviese una sección **S** de 2 cm^2 , esto representaría una fuerza inexistente **F** de:

$$F = \sigma_x S = 21,6 [\text{MPa}] \times 2 \times 10^{-4}[\text{m}^2] = 4320 [\text{N}]$$

Ecuación nº 75.

Los cambios de resistencia que se producen en una galga son pequeños y no cualquier circuito es capaz de utilizarlos para producir una señal eléctrica. Para tener una idea de su magnitud se puede suponer una varilla de acero con una galga de 120 ohm y traccionada de forma tal que el esfuerzo sea de 200 MPa , lo que está cerca del límite elástico, para un acero de construcción. Si el coeficiente K_g de la galga es 2, entonces:

$$\Delta R = K_g R \sigma / E = 2 \cdot 120[\Omega] \times 200 \times 10^6[\text{Pa}] / (200000 \times 10^6[\text{Pa}]) = 0,24 [\Omega]$$

Ecuación nº 76

El valor de ΔR se puede considerar como elevado en comparación de los cambios de resistencia que se producen en las mediciones convencionales.

Un método que permite trabajar con estos cambios tan pequeños y que se utilizado por los equipos comerciales de medición da una galga es la aplicación del puente de **Wheatstone**. Tomando en consideración que el puente de Wheatstone se aplica también para la medición de otros elementos resistivos como por ejemplo, los termistores, se expondrá primero las generalidades del este puente:

El puente de Wheatstone básico se ilustra en la figura nº 6 Se asumirá primero que no hay efecto de carga sobre el sistema, es decir, que la resistencia entre los terminales **B** y **D** es infinita. En la práctica se debe colocar un instrumento para medir el potencial de salida e_o , pero el efecto de carga del instrumento se estudiará posteriormente. En las condiciones dadas, el potencial de salida depende del potencial de alimentación e_i y del valor de la resistencia según:

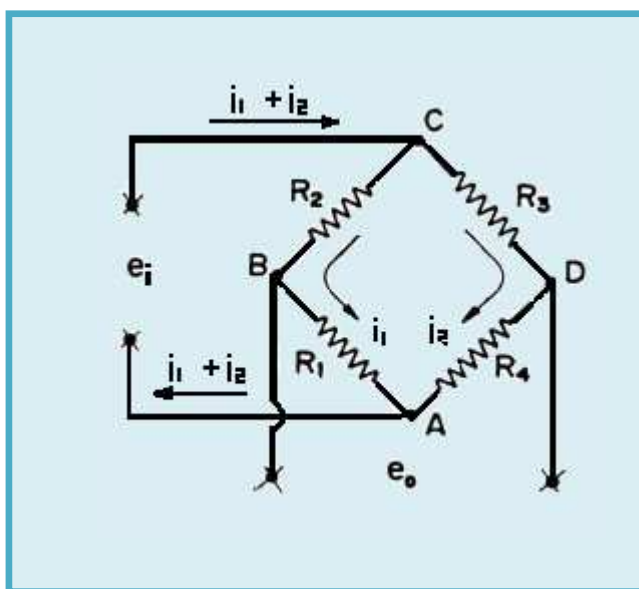


Figura N° 36. Puente de Wheatstone.

$$e_o = e_i \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Ecuación nº 77.

Se observa que si $R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4$ el puente está *equilibrado* y no hay tensión de salida. Entonces el cambio en el valor de alguna de las resistencias desequilibra el puente y aparece diferencia de potencial a la salida.

En la práctica para equilibrar inicialmente el puente se puede variar una resistencia que intencionalmente es susceptible de variar. Pero esta solución no es práctica cuando las cuatro resistencias deben variar debido a algún fenómeno físico que se desea medir.

En la ecuación nº 50 se observa un comportamiento no lineal de e_o con respecto a los valores de las resistencias, pues las mismas aparecen también en el denominador. Para *pequeños cambios de las resistencias*, esta relación es lineal. En términos matemáticos se tiene:

$$e_o = f(R_1, R_2, R_3, R_4)$$

Para pequeños cambios con respecto a los valores iniciales, se tiene:

$$\Delta e_o = \frac{\partial e_o}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial e_o}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial e_o}{\partial R_3} \Delta R_3 + \frac{\partial e_o}{\partial R_4} \Delta R_4$$

Ecuación nº 78.

Donde:

$$\frac{\partial e_o}{\partial R_1} = e_i \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2}$$

Ecuación nº 79.

$$\frac{\partial e_o}{\partial R_2} = -e_i \frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2}$$

Ecuación nº 80.

$$\frac{\partial e_o}{\partial R_3} = e_i \frac{R_4}{(R_3 + R_4)^2}$$

Ecuación nº 81.

$$\frac{\partial e_o}{\partial R_4} = -e_i \frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2}$$

Ecuación n° 82.

Luego, después del desglose de las ecuaciones, se tiene:

$$\Delta e_o = e_i \left[\frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_1 - \frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_2 + \frac{R_4}{(R_3 + R_4)^2} \Delta R_3 - \frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2} \Delta R_4 \right]$$

Ecuación n° 83.

Se observa que las derivadas parciales se toman como constantes, es decir, no se toma en cuenta la variación de los términos que las componen. Por esto la ecuación n° 56 sólo es válida para pequeños incrementos de resistencia comparados con el valor inicial de cada una.

En muchos casos prácticos, como por ejemplo las mediciones de las galgas, los cambios relativos de resistencia son tan pequeños que la ecuación n°56 es extraordinariamente lineal. Las corrientes en cada una de las ramas del puente (figura 36) son:

$$i_1 = \frac{e_i}{R_1 + R_2}; \quad i_2 = \frac{e_i}{R_3 + R_4}$$

Ecuación n° 84.

Para hallar la impedancia de salida del puente de Wheatstone se utiliza el circuito de la figura n° 37.

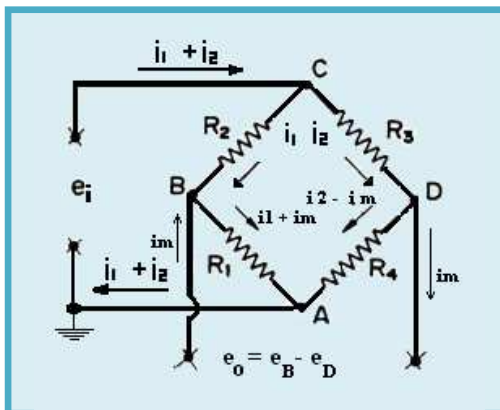


Figura N° 37. Circuito para el cálculo de la impedancia de salida de un puente de Wheatstone.

Este circuito es semejante en todo al de la figura n° 36, a excepción de que se asume que una corriente i_m entra al circuito procedente de otro sistema acoplado a este, por ejemplo el circuito de medición. Obsérvese que se ha asumido que entra en el punto **B** de mayor potencial que el **D**. Entonces se puede escribir el siguiente sistema de ecuaciones.

$$e_i - i_1 R_2 = e_B; \quad e_i - i_2 R_3 = e_D; \quad e_B = (i_1 + i_m) R_1; \quad e_D = (i_2 - i_m) R_2$$

Ecuación n° 85.

Resolviendo la ecuación, se tiene:

$$e_o = e_i \left(\frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_1 + R_4)} \right) + i_m \left(\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)} \right)$$

Ecuación n° 86.

Si no hubiese efecto de carga, o sea, $i_m = 0$, entonces queda demostrada la ecuación n° 50. Hallando la impedancia de salida:

$$Z_{go}(S) = \frac{\partial e_o}{\partial i_m} = \left(\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)} + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)} \right)$$

Ecuación n° 87.

La impedancia de salida del puente de Wheatstone es la suma en serie de las resistencias de cada rama sumadas en paralelo.

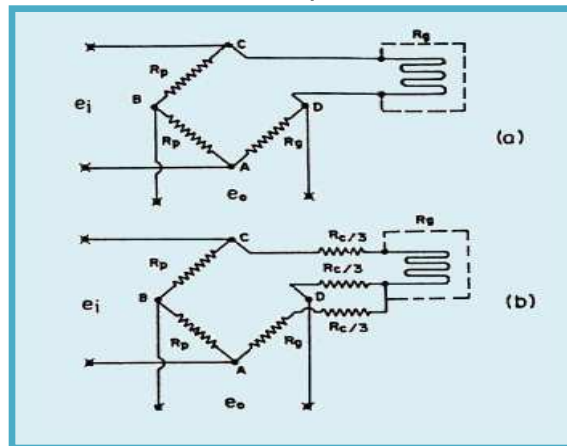


Figura N° 38. Configuración de cuarto de puente: a) cuarto de puente con galgas de dos cables; b) cuarto de puente con galgas de tres cables.

Para que no haya efecto de carga, la resistencia R_m del metro debe ser, al menos, 20 veces mayor que el valor de la impedancia de salida dado en la ecuación n° 87.

En todo el análisis realizado se ha asumido despreciable la resistencia interna de la fuente de alimentación. Por eso en las figuras 8a y 8b la corriente $i_1 + i_2$ pasa sin producir caída de potencial a través de la fuente e_i , o sea, los puntos **A** y **C** están prácticamente en corto circuito a través de la fuente.

Habiendo obtenido las ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento de un puente de Wheatstone, es ahora posible estudiar las aplicaciones del mismo a las mediciones galgas.

En la figura n° 39a se muestra una galga ocupando la posición de una de las resistencias del puente.

Así $R_3 = R_g$, siendo R_g la resistencia de la galga. Para que el puente se pueda equilibrar, la resistencia R_4 debe tener un valor R_g . Las otras dos pueden tener cualquier valor, con tal de que sean iguales. Entonces $R_1 = R_2 = R_p$. Las resistencias R_1 , R_2 y R_4 son resistencias fijas que no pueden variar. Entonces en la ecuación n° 39 la única rama que varía es la que contiene a R_g , se obtiene:

$$\Delta e_o = e_i \left(\frac{R_g}{(R_g + R_g)^2} \right) \Delta R_g = \frac{e_i}{4} \frac{\Delta R_g}{R_g}$$

Ecuación n° 88.

Sustituyendo, se tiene:

$$e_o = \frac{e_i K_g \varepsilon}{4}$$

Ecuación n° 89.

La configuración mostrada en la figura 9a se denomina cuarto puente, porque sólo hay una galga activa. Para tener idea del voltaje de salida de un puente galga tensométrica, se determinará el voltaje que produce una galga pegado a una varilla de acero estructural sometida a un esfuerzo σ de 200 MPa, si

el coeficiente K_g del galga vale 2, el puente se alimenta con una tensión $e_i = 4$ V, El módulo de elasticidad E_m de la varilla de 200.000 MPa y la resistencia R_g de la galga de 120 ohm. La deformación longitudinal unitaria será:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{200 MP_a}{200000 MP_a} = 0,001$$

Ecuación nº 90.

Entonces la ecuación nº 89:

$$e_o = \frac{4 \cdot 2 \cdot 0,001}{4} = 0,002 V = 2mV$$

Ecuación nº 91.

Luego la corriente que pasa por la galga será:

$$i = \frac{e_i}{2R_g} = \frac{4}{2 \cdot 120} = 0,0167 A = 16,7 mA$$

Ecuación nº 92.

Este valor es aceptable, pues es inferior a 30 mA.

En este sencillo ejemplo se observa que la tensión de salida del puente (en las galgas metálicas) es generalmente del orden de los micro-volts o mili-volts.

La sensibilidad del circuito de cuarto puente es:

$$S = \frac{1}{4} K_g e_i [V]$$

Ecuación nº 93.

Si el valor máximo recomendado de corriente admisible para la galga es i_{max} , entonces:

$$e_{imax} = 2R_g i_{imax}$$

Ecuación nº 94.

Por lo tanto:

$$S_{max} = \frac{1}{2} K_g R_g i_{max}$$

Ecuación nº 95.

Se evidencia que la mayor sensibilidad se alcanza con las galgas de mayor resistencia pero no debe olvidarse que el uso de resistencias grandes implicará que el instrumento a utilizar deberá tener a su vez impedancia de entrada también más grande.

Otro aspecto que puede producir errores es la inevitable resistencia del conductor, que puede cambiar con la temperatura. Asumiendo que la resistencia inicial del cable es pequeña comparada con la de la galga, la influencia del cambio de resistencia ΔR_c del cable (en ambas direcciones) se obtiene modificando la ecuación nº 88.

$$\Delta e_o = \frac{1}{4} e_i \left(\frac{\Delta R_g}{R_g} + \frac{\Delta R_c}{R_g} \right)$$

Ecuación nº 96.

El error que se comete es del orden de $\Delta R_c / \Delta R_g$.

Sea nuevamente una galga de 120 ohm pegado a la varilla de acero de construcción sometido a un esfuerzo de 200 MPa. El cambio de resistencia es de 0,24 ohm. Se asume que para hacer la instalación se utilizó un total de 20m (10 de ida y 10 de vuelta) con un diámetro d de 0,8 mm. La resistividad del cobre es $\rho = 0,017 \times 10^{-6}$ [Ωm] su coeficiente térmico es $\alpha = 0,004$ [1/°C]. La resistividad del conductor es:

$$R_c = \frac{\rho L}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{0,017 \times 10^{-6} \times 20}{0,785 \times 0,8^2 \times 10^{-6}} = 0,68 \Omega$$

Ecuación nº 97.

Luego el cambio de resistencia debido a un cambio de temperatura es:

$$\Delta R_c = R_c \alpha = 0,68 \times 0,004 = 0,002 \Omega/^{\circ}\text{C}$$

Si se compara este valor con el cambio de resistencia de la galga, que es de 0,24 ohm, resulta:

$$\Delta R_c / \Delta R_g = 0,01125 [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$

En otras palabras se comete un error de la medición de un 1,12 % por cada grado Celsius que varíe la temperatura.

En este ejemplo se ha asumido que el cambio de temperatura no afecta la lectura de la galga.

Hay que tomar en consideración que si la instalación es la misma, las cargas pueden variar. En otras palabras, si todo se mantuviera igual, pero el esfuerzo en la varilla metálica fuese de 20 MPa en vez de 200 MPa, el cambio de resistencia de la galga sería 10 veces menor y el error sería de un 11,25 % por cada grado Celsius de variación de la temperatura.

Este problema se elimina con la instalación de tres conductores, tal como lo indica la figura nº 39b. Sin hacer una demostración matemática rigurosa se puede razonar que ahora los cambios de resistencia se reparten por igual entre **CD** y **AD**. En la ecuación nº 56.

$$e_o = \left[\frac{R_g}{(R_g + R_g)^2} \left(\Delta R_g + \frac{\Delta R_c}{2} \right) - \frac{R_g}{(R_g + R_g)^2} \cdot \frac{\Delta R_c}{2} \right]$$

Ecuación nº 98

$$e_o = \frac{1}{4} e_i \frac{\Delta R_g}{R_g}$$

Ecuación nº 99.

Cuando se utiliza dos galgas, se tiene una configuración de medio puente. Esta configuración permite incrementar la sensibilidad (si no se deforma en sentido contrario el otro) y también se usa para lograr una compensación térmica. La configuración de medio puente se observa en la figura nº 40a.

Sea el caso de la medición de una pieza con el objetivo de determinar los esfuerzos en la misma.

Las dilataciones o contracciones provocan deformaciones que serían traducidas como esfuerzos que en realidad no existen. Asíumase que no se dispone de galgas compensadas térmicamente (que además disminuyen mucho el error pero no lo eliminan completamente). Una solución es pegar un galgas adicional a una pieza del mismo material y colocarla cerca de la pieza que se desea ensayar de forma tal que esté sometida a los mismos cambios de temperatura, pero que no esté sometida a carga alguna (figura nº 39b)

Para la primera galga.

$$\Delta R_g = \Delta R_{gp} + \Delta R_{g\theta}$$

Ecuación nº 100.

En la ecuación nº 100 ΔR_{gp} es el cambio de resistencia provocado por las cargas que se desean medir. $\Delta R_{g\theta}$ es el cambio de resistencia provocado por la temperatura debido a las contracciones o dilataciones. Para la segunda galga se tiene:

$$\Delta R_{gp} = \Delta R_{g\theta}$$

Ecuación nº 101.

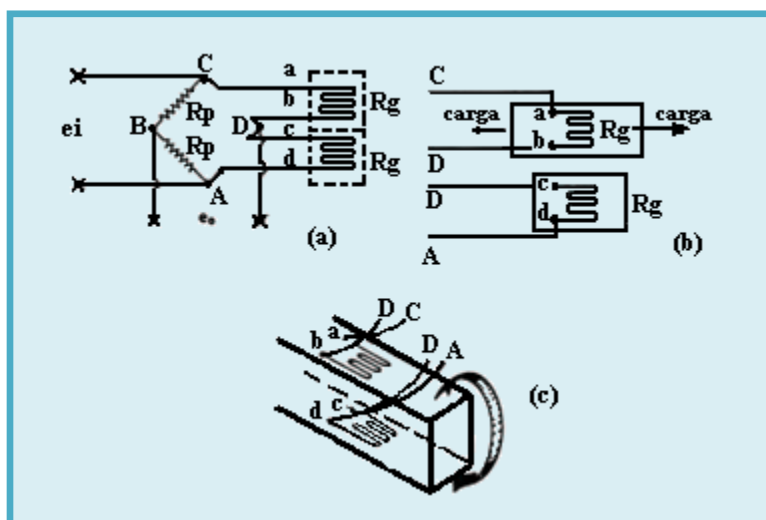


Figura Nº 39. Configuración de medio puente: a) circuito eléctrico de medio puente; b) compensación térmica por medio de una galga pasiva; c) incremento de sensibilidad y compensación térmica con dos elemento activos sobre una viga en flexión.

$$\Delta e_o = e_i \left[\frac{R_g}{(R_g + R_g)^2} (\Delta R_{gp} + \Delta R_{g\theta}) - \frac{R_g}{(R_g + R_g)} \Delta R_{g\theta} \right]$$

Ecuación n° 102.

$$\Delta e_o = \frac{1}{4} e_i \left[\frac{\Delta R_{gp}}{R_g} \right]$$

Ecuación n° 103.

Entonces la ecuación n° 41 queda de la siguiente manera:

$$e_o = \frac{1}{4} e_i [K_g \varepsilon_p]$$

Ecuación n° 104.

Ahora, con la ecuación n° 102 se tiene la seguridad de que la deformación longitudinal medida dependerá solamente de las cargas.

Otra aplicación muy importante se observa en la figura n° 40. Es evidente que las dos galgas estarán sometidas a las mismas deformaciones debido a la flexión, pero la superior aumentará su resistencia y la inferior disminuirá, o sea:

$$\Delta R_3 = -\Delta R_4$$

Desde la ecuación n° 83, se tiene:

$$\Delta e_o = e_i \left[\frac{R_g}{(R_g + R_g)^2} \Delta R_g - \frac{R_g}{(R_g + R_g)} (-\Delta R_g) \right]$$

Ecuación n° 105.

$$\Delta e_o = \frac{1}{2} e_i \left[\frac{\Delta R_g}{R_g} \right]$$

Ecuación n° 106.

Y la ecuación nº 14 queda de la siguiente forma:

$$e_o = \frac{1}{2} e_i [K_g]$$

Ecuación nº 107.

La configuración más sensible y autocompensada térmicamente es la de puente completo mos trado en la figura nº 40.

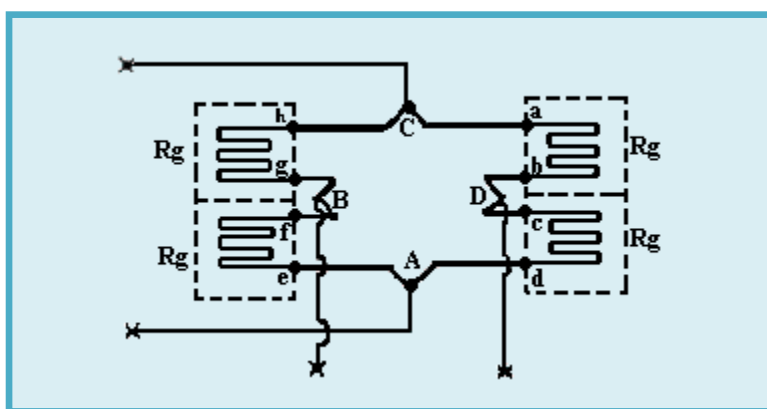


Figura N° 40. Configuración de puente completo.

Cuando se arma un circuito puente completo, es posible realizar las conexiones en la pieza, siempre y cuando la longitud de los cables sea la misma. Esto se debe ahora a que el puente está, ahora, sobre la pieza. Entonces los cables sobre la pieza y el equipo corresponden a la parte de entrada e_i y de salida e_o . La figura nº 41 muestra una instalación de puente completo en una viga flexionada.

La figura indica claramente como instalar las galgas y los cuatro elementos de cable de igual longitud que unirán las galgas entre sí. Si en este caso, por ejemplo, se produjera un cambio de resistencia en los cables que van desde la pieza hasta el instrumento de medición. Esto solo significaría un ligero cambio en la resistencia de entrada del instrumento, totalmente despreciable con respecto a su valor inicial.

En el caso indicado en la figura, las resistencias R_3 y R_1 tendrán cambios positivos del mismo valor que las disminuciones de las resistencias R_2 y R_4 . Entonces en la ecuación nº 56.

$$\Delta e_o = e_i \frac{R_g}{(R_g + R_g)^2} (\Delta R_g - (-\Delta R_g) + \Delta R_g - (-\Delta R_g))$$

Ecuación N° 108.

$$\Delta e_o = e_i \frac{\Delta R_g}{R_g}$$

Ecuación N° 109.

Teniendo en cuenta la ecuación nº 41,

$$e_o = K_g e_i \varepsilon$$

Ecuación N° 110.

Ahora se ha duplicado la salida con respecto a un solo elemento, con la ventaja adicional de compensación térmica y compensación sobre los cambios térmicos de la resistencia de los cables que unen las galgas.

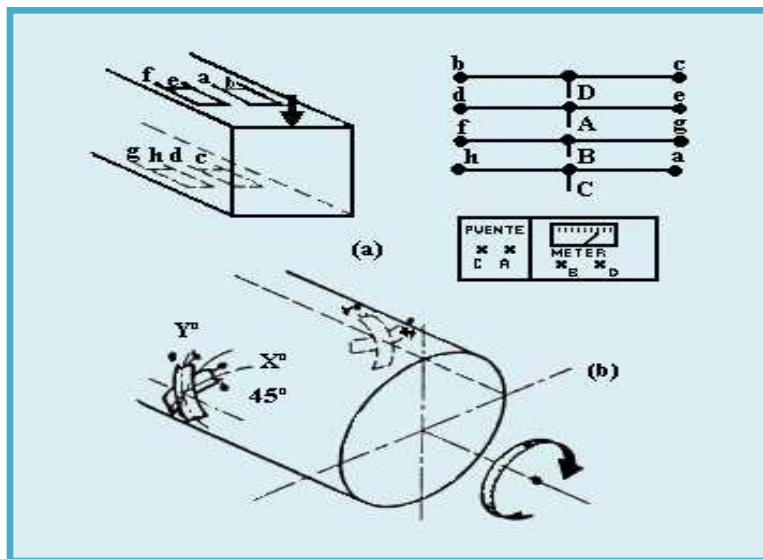


Figura N° 41. Aplicaciones del puente completo para cuadruplicar la sensibilidad y compensar térmicamente: a) viga a flexión; b) barra de torsión.

Las ecuaciones nº 108, 109 y 110 son enteramente válidas para barra circular torzonada como muestra la figura nº 41b. También son validas las conexiones indicadas en la figura nº 41a. Como es conocido los ejes principales se encuentran a 45 ° con respecto al eje de la barra y por esto, dos galgas se comprimirán y dos se traccionarán, en magnitudes iguales.

Una barra traccionada también puede ser dotada de 4 galgas en puente completo y se consigue que dos estén traccionadas y dos comprimidos. En la figura nº 42 se muestra el esquema de instalación.

La forma de unir los galgas es la misma sugerida para los cables de la figura nº 42. Ahora dos galgas (los longitudinales) tendrán un cambio de resistencia **R_g** y los otros dos (transversales) tendrán un cambio de resistencia opuesta, pero de valor **μ_m ΔR_g**. Esto se debe a que la deformación transversal unitaria y la deformación longitudinal unitaria están relacionadas entre sí por el coeficiente de Poisson **μ_m**. Entonces en la ecuación nº 83.

$$\Delta e_o = e_i \frac{R_g}{(R_g + R_g)^2} (\Delta R_g - (-\mu_m \Delta R_g) + \Delta R_g - (-\mu_m \Delta R_g))$$

Ecuación N° 111.

$$\Delta e_o = e_i \frac{\Delta R_g}{R_g} \cdot \frac{(1 + \mu_m)}{2}$$

Ecuación N° 112.

Teniendo en cuenta la ecuación nº 83

$$\Delta e_o = \frac{(1 + \mu_m)}{2} \cdot e_i K_g \varepsilon$$

Ecuación N° 113.

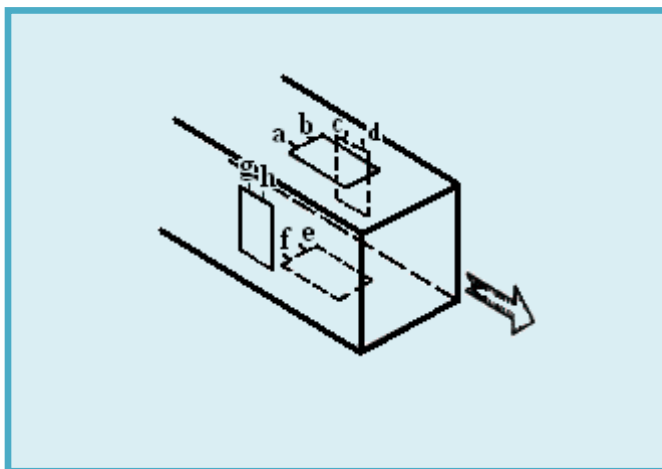


Figura N° 42. Puente completo en una barra de tracción- compresión

Se observa que en todos los casos se cuadruplica la ganancia cuando hay un puente completo.

Como un ejercicio numérico se determinará la expresión para calcular el momento de torsión transmitido por un eje macizo de 0,4 m de diámetro, módulo de elasticidad $0,2 \times 10^6$ MPa y coeficiente de Poisson 0,3 si sobre el eje se colocan cuatro galgas en la forma indicada en la figura n° 41b y el puente es alimentado por 4 volt. Los galgas tienen un coeficiente $K_g = 2$.

De la disciplina resistencia de materiales se sabe que los esfuerzos principales en los ejes que forman 45° con el eje longitudinal tienen una magnitud del mismo valor que los esfuerzos normales.

Observando que en la figura n° 41b se denominan x' e y' a los ejes principales, se tiene, aplicando la *ley de Hooke* generalizada,

$$\varepsilon'_x = \frac{\sigma_{x1}}{E} - \frac{\mu_m}{E} (\sigma'_y + \sigma'_x) = \frac{\tau}{E} - \frac{\mu_m}{E} (-\tau)$$

Ecuación n° 114.

$$\varepsilon'_x = \varepsilon = \frac{\tau}{E} (1 + \mu_m)$$

Ecuación n° 115.

Introduciendo este resultado en la ecuación

$$\Delta e_o = e_i K_g \frac{\tau}{E} (1 + \mu)$$

Ecuación nº 116.

La relación entre el momento de torsión y el esfuerzo tangencial en una barra maciza es:

$$\tau = \frac{16}{\pi} \cdot \frac{M_t}{d^3}$$

Ecuación nº 117.

Por lo tanto

$$\Delta e_o = \frac{16}{\pi} \cdot e_i K_g (1 + \mu) \frac{M_t}{E d^3}$$

Ecuación nº 118.

Y finalmente:

$$\frac{M_t}{\Delta e_o} = \frac{\pi}{16(1 + \mu)} \cdot \frac{E d^3}{e_i K_g}$$

Ecuación nº 119.

Sustituyendo los valores numéricos tenemos:

$$\frac{M_t}{\Delta e_o} = \frac{\pi 0,22 \times 10^{12} \cdot (0,4)^3}{16(1+0,3) \times 4 \times 2} = 241,66 \times 10^6 \quad [Nm/V]$$

Ecuación nº 120.

La sensibilidad del sistema de medición sería el inverso

$$S = 0,00414 \times 10^{-6} [V/Nm]$$

Por ejemplo, cuando el eje está soportando un esfuerzo tangencial de 200 MPa (cerca del límite elástico para el acero de construcción), el momento de torsión será de $2,513 \times 10^6$ Nm. La salida será entonces de 10 mV. La señal será muy débil aun en las condiciones de mayor carga. Por esto, es necesario ampliar la salida del puente.

El puente de Wheatstone para mediciones de galgas puede utilizarse en sistemas de corriente continua o alternada.

Una vez introducido en el tema, debemos tener en cuenta que estos métodos utilizados para realizar mediciones van evolucionando constantemente, ya que los componentes a utilizar mejoran las cualidades de los materiales o se descubren nuevos diseños o materiales.

En el siguiente capítulo nos introduciremos en los variadores de frecuencias, equipos esenciales para poder controlar los distintos motores o maquinas y se darán a conocer algunos conceptos y tipos de estos.

CAPITULO V

5. VARIADORES DE FRECUENCIA (VF)

5.1. Introducción

En nuestros tiempos se han mejorado ostensiblemente las tecnologías de los dispositivos que generan movimiento o que controlan a estos, Es por tal motivo que este capítulo apuntará a cómo funcionan los variadores de frecuencia, en su forma más elemental, ya que con el paso del tiempo se ido mejorando y seguirán haciéndolo, pero los principios de funcionamiento son los mismos.

Un variador de frecuencia, por lo general, está compuesto de 4 etapas: etapa rectificadora, etapa intermedia, inversor o invertir y etapa de control.

Los variadores más utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia.

El modo de trabajo puede ser manual o automático, según las necesidades del proceso, dada la enorme flexibilidad que ofrecen los variadores de velocidad, permitiendo hallar soluciones para obtener puntos de trabajo óptimos en todo tipo de procesos, pudiendo ser manejados por ordenador, PLC, señales digitales o de forma manual.

La mayoría de las marcas incluyen dentro del propio convertidor protecciones para el motor, tales como protecciones contra sobre intensidad, sobre temperatura, fallo contra desequilibrios, defectos a tierra, etc., además de ofrecer procesos de arranque y frenados suaves mediante rampas de aceleración y de frenado, lo que redundará en un aumento de la vida del motor y las instalaciones.

5.2. Partes que Componen un VF

Un regulador electrónico de velocidad está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o tiristores, siendo el principio básico de funcionamiento transformar la energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable.

Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie. Una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia en el llamado circuito intermedio y otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, con una frecuencia y una tensión regulables, que dependerán de los valores de consigna. A esta segunda etapa también se le suele llamar ondulator. Todo el conjunto del convertidor de frecuencia recibe el nombre de inversor.

Como debe saberse, el uso de variadores de frecuencia añade un enorme potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones. Además aportan los siguientes beneficios:

- ✓ Mejora el proceso de control y por lo tanto la calidad del producto.
- ✓ Se puede programar un arranque suave, parada y freno (funciones de arrancador progresivo).
- ✓ Amplio rango de velocidad, par y potencia. (velocidades continuas y discretas).
- ✓ Bucles de velocidad.
- ✓ Puede controlar varios motores.
- ✓ Factor de potencia unitario.
- ✓ Respuesta dinámica comparable con los drivers de DC.
- ✓ Capacidad de bypass ante fallos del variador.
- ✓ Protección integrada del motor.
- ✓ Marcha paso a paso (comando JOG).

Con respecto a la velocidad los variadores suelen permitir dos tipos de control:

Control manual de velocidad: La velocidad puede ser establecida o modificada manualmente (display de operador). Posibilidad de variación en el sentido de giro.

Control automático de velocidad: Utilizando realimentación se puede ajustar la velocidad automáticamente. Esta solución es la ideal para su instalación en aplicaciones en las que la velocidad demandada varía de forma continua.

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

5.2.1. Etapa Rectificadora. Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.

5.2.2. Etapa intermedia. Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.

5.2.3. Inversor o "Inverter". Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (Isolated Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobre corriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobre temperaturas, etc.

5.2.4. Etapa de control. Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Y además controla los parámetros externos en general, etc.

Los variadores más utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la

etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia.

El Inversor o Inverter convierte la tensión continua de la etapa intermedia en una tensión de frecuencia y tensión variables. Los IGBT envían pulsos de duración variable y se obtiene una corriente casi sinodal en el motor.

La frecuencia portadora de los IGBT se encuentra entre 2 a 16kHz. Una portadora con alta frecuencia reduce el ruido acústico del motor pero disminuye el rendimiento del motor y la longitud permisible del cable hacia el motor. Por otra parte, los IGBT's generan mayor calor.

Las señales de control para arranque, parada y variación de velocidad (potenciómetro o señales externas de referencia) estén aisladas galvánicamente para evitar daños en sensores o controles y evitar ruidos en la etapa de control.

Los variadores de frecuencia variable de estado sólido constan de un rectificador que convierte la corriente alterna de la línea de alimentación a corriente directa y de una segunda sección llamada inversor que convierte la corriente directa en una señal de corriente alterna de frecuencia ajustable que alimenta al motor, figura nº 43.

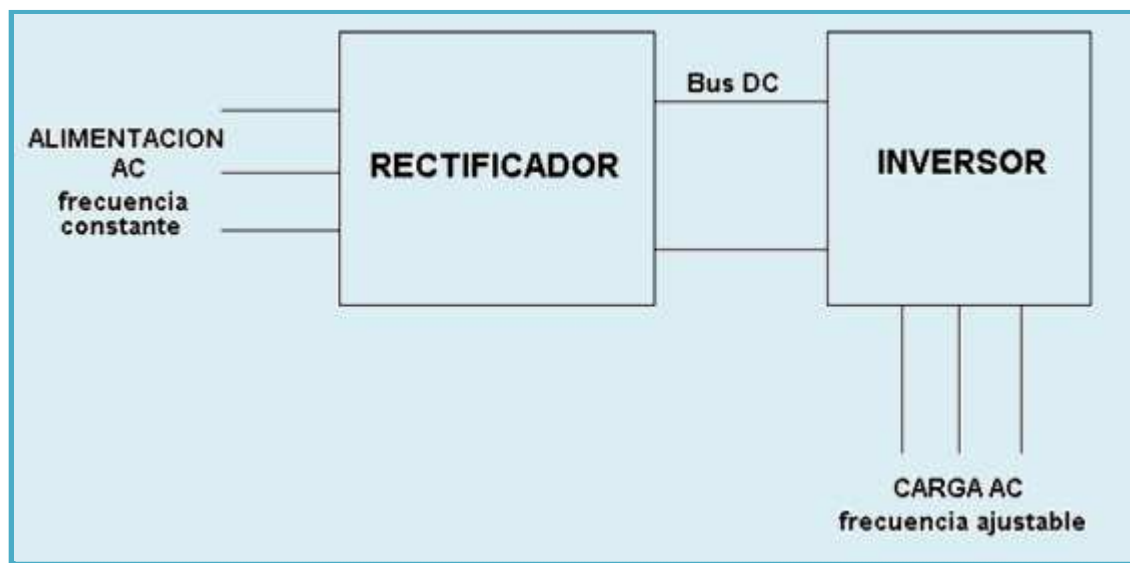


Figura Nº 43. Diagrama de bloques de un variador de frecuencia.

5.3.Rectificador

La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje al inversor para mantener constante la relación Volts/Hz, siendo los siguientes métodos básicos los más usados:

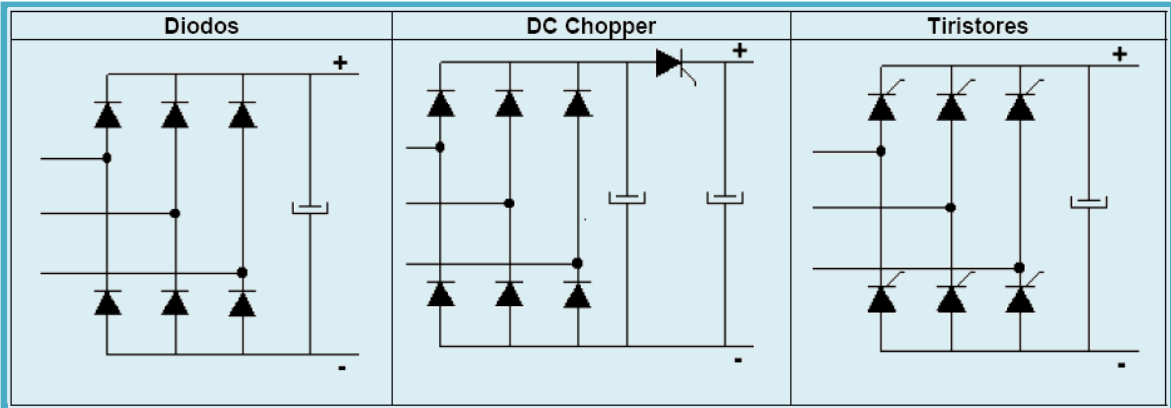


Figura N° 44.rectificador de voltaje.

DIODOS	DC CHOPPER	TIRISTORES
Control: No	Control: SCR, GTO, Transistor	Control: SCR
Voltaje CD: Constante	Voltaje CD: Variable	Voltaje DC: Variable
Rizo CD: Bajo	Rizo CD: Varía	Rizo CD: Varía
V/Hz: Se ajusta en Inversor	V/Hz: Rectificador-Inversor	V/Hz: Rectificador-Inversor
Inversor: PWM	Inversor	Inversor: 6 pasos, PWM
FPD: Alto para todas las velocidades	Inversor: 6 pasos	FPD: Se reduce con la velocidad
Armónicas: Alto	FPD: Se reduce con la velocidad	Armónicas: Alto
Regeneración: No	Armónicas: Alto	Regeneración: Sí
	Regeneración: No	

5.4.Inversor

Un inversor, también llamado ondulador, es un circuito utilizado para convertir corriente continua en corriente alterna. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente directa a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el

diseñador. Los inversores se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, hasta aplicaciones industriales para manejar alta potencia. Los inversores también se utilizan para convertir la corriente continua generada por los paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, etc, en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en la red eléctrica o usados en instalaciones eléctricas aisladas.

Un inversor simple consta de un oscilador que controla a un transistor, el cual se utiliza para interrumpir la corriente entrante y generar una onda cuadrada. Esta onda cuadrada alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer un poco más una onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario. Las formas de onda de salida del voltaje de un inversor ideal debería ser sinusoidal. Una buena técnica para lograr esto es utilizar la técnica de PWM logrando que la componente principal senoidal sea mucho más grande que las armónicas superiores.

Los inversores más modernos han comenzado a utilizar formas más avanzadas de transistores o dispositivos similares, como los tiristores, los triac's o los IGBT's.

Los inversores más eficientes utilizan varios artificios electrónicos para tratar de llegar a una onda que simule razonablemente a una onda senoidal en la entrada del transformador, en vez de depender de éste para suavizar la onda.

Se pueden clasificar en general en dos tipos: 1) inversores monofásicos y 2) inversores trifásicos.

Se pueden utilizar condensadores e inductores para suavizar el flujo de corriente desde y hacia el transformador.

Además, es posible producir una llamada "onda senoidal modificada", la cual se genera a partir de tres puntos: uno positivo, uno negativo y uno de tierra. Una circuitería lógica se encarga de activar los transistores de manera que se alternen adecuadamente. Los inversores de onda senoidal modificada pueden causar que ciertas cargas, como motores, por ejemplo; operen de manera menos eficiente.

Los inversores más avanzados utilizan la modulación por ancho de pulsos con una frecuencia portadora mucho más alta para aproximarse más a la onda seno o modulaciones por vectores de espacio mejorando la distorsión armónica de salida. También se puede predistorsionar la onda para mejorar el factor de potencia ($\cos \Phi$).

Los inversores de alta potencia, en lugar de transistores utilizan un dispositivo de conmutación llamado IGBT (Insulated Gate Bipolar transistor ó Transistor Bipolar de Puerta Aislada).

5.5. Parámetros de Rendimiento

5.5.1. Factor armónico de la n-ésima armónica (HF_n). El HF_n, que es una medida de la contribución individual de esa armónica se define así:

$$HF_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}}$$

Ecuación nº 121.

Para $n > 1$ donde V_1 es el valor eficaz (rms) de la componente fundamental, y V_{on} es el valor eficaz de la n-ésima componente armónica.

5.5.2. Distorsión armónica total (THD-Total Harmonic Distortion): La distorsión armónica total, es una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental, se define como:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_1^2}}{V_1}$$

Ecuación nº 122.

5.5.3. Factor de distorsión (DF-Distortion Factor): Se diferencia de la anterior en que detalla a cualquiera de las armónicas que constituye la señal, por el principio de Fourier. El DF indica la cantidad de distorsión armónica que queda en determinada forma de onda después de someter a las armónicas de esa onda a una atenuación o filtrado de segundo orden, es decir, dividir las entre n^2 . Se vuelve entonces una

medida de la eficacia de la reducción de armónicos no deseados, y se define así:

$$FD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} (V_n/n^2)^2}}{V_1}$$

Ecuación N° 123.

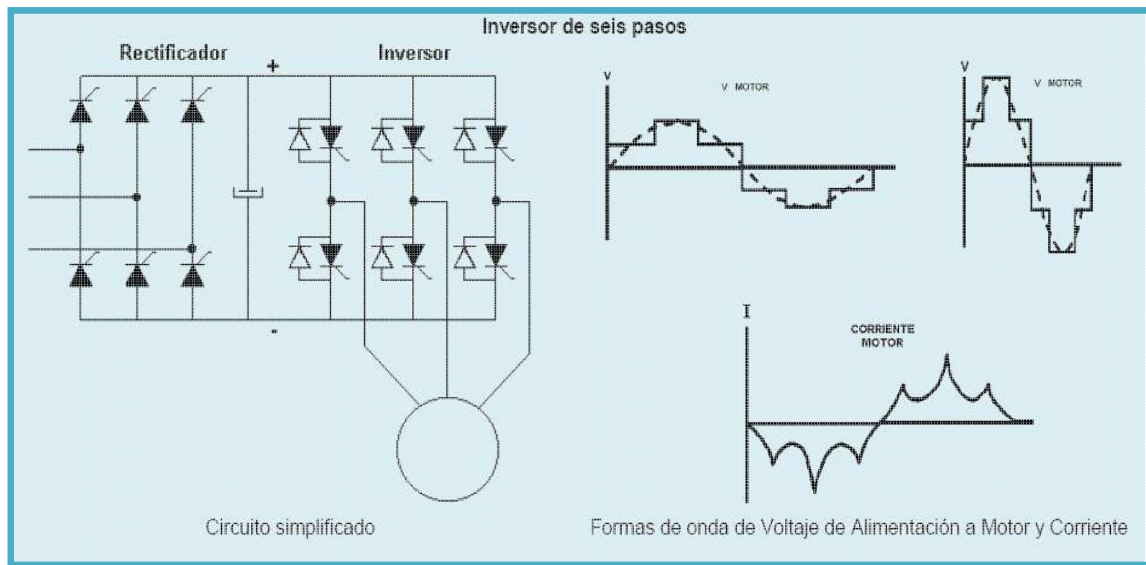


Figura N° 45. Inversor de 6 pasos.

Para variar la frecuencia del motor, se ajusta el tiempo de conducción de los SCR's para cada uno de los seis pasos, modificando el tiempo del ciclo. El voltaje de CD se ajusta para mantener la relación Volts-Hz constante.

Cuando se utilizan SCR's en el inversor, se utilizan circuitos complejos de conmutación que no se muestran en la figura y que incluye la lógica de disparo y componentes adicionales de potencia para apagarlos que constan de capacitores, inductores y SRC's adicionales. Esta complejidad se reduce cuando se utilizan GTO's o IGBT's como interruptores de potencia.

5.6. Inversor PWM

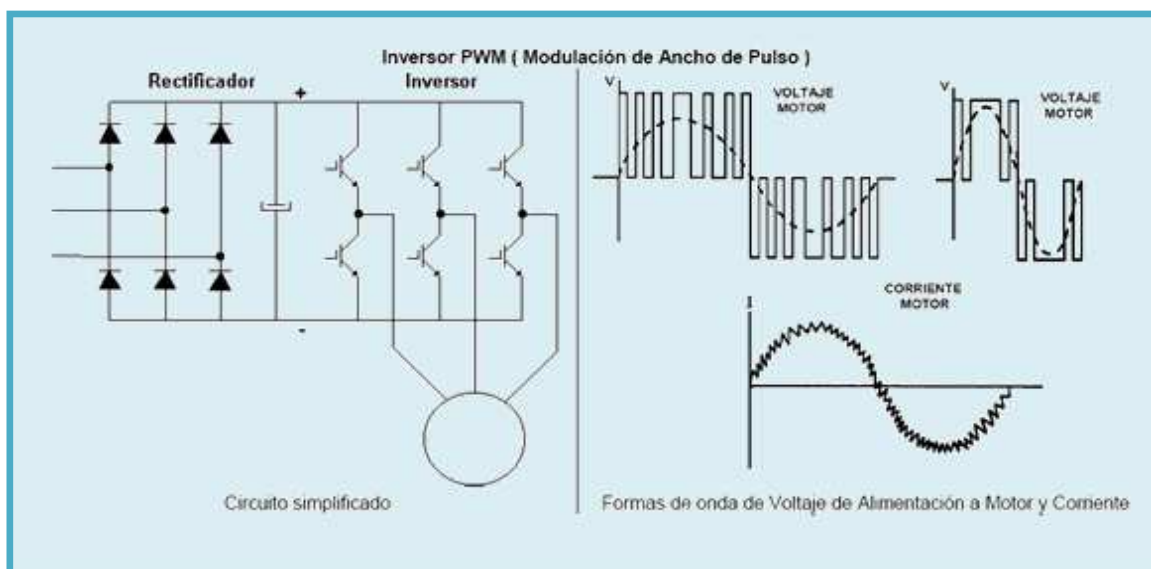


Figura N° 46. Inversor PWM.

El inversor consiste de seis IGBT's que se encienden y apagan en una secuencia tal que producen un voltaje en forma de pulsos cuadrados que se alimentan al motor. Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan resultando en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad. Para cada frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos que producen la menor distorsión armónica en la corriente que se aproxime a la señal sinusoidal.

El cambio de voltaje requerido para mantener la relación Volts-Hz constante conforme varía la frecuencia, se realiza por medio del microprocesador de propósito dedicado que controla el ancho de los pulsos y los demás parámetros para conseguir un adecuado funcionamiento.

La distorsión armónica afecta los aislamientos del motor, incrementa su ruido audible y eleva el calentamiento entre un 5% y un 15% dependiendo del diseño del fabricante y velocidad de operación.

5.7. Variadores de Tipo Flujo Vectorial

Los variadores de frecuencia de C.A. han estado limitados a aplicaciones de par normal mientras que las aplicaciones de alto par y baja velocidad han sido el dominio de los motores de CD. Esta situación ha cambiado por la introducción de una nueva generación de la tecnología PWM, el variador de flujo vectorial.

El método de control de par usado en el Variador de frecuencia de flujo vectorial es similar al usado en los de CD, que incluyen un amplio rango de velocidades con una rápida respuesta. Este variador tiene la misma sección de potencia que los PWM, pero usa un sofisticado control de lazo cerrado del motor al microprocesador del variador de frecuencia. La posición y velocidad del rotor es monitoreada en tiempo real a través de un codificador digital que determina y controla la velocidad, par y potencia del motor.

Al controlar la sección de inversión en respuesta a las condiciones actuales de la carga en tiempo real, se obtiene un control excelente del par, velocidad y potencia, así como una rápida respuesta a los cambios de carga y se consigue proporcionar el 100 % de par a velocidad 0.

La gran mayoría de fabricantes tienen Variadores de frecuencia con tecnología enfocada al control de par más que al control de velocidad. El objetivo es controlar el par del motor en lugar de la velocidad y por lo tanto tienen respuestas más rápidas y precisas a las variaciones del par demandado por la carga.

Para lograr esto, el variador “explora” al motor haciendo un auto-reconocimiento (autotuning), en el que le inyecta corriente y voltaje para determinar su comportamiento, creando un algoritmo o modelo de sus características de funcionamiento y controlarlo de la manera más adecuada.

El reconocimiento al motor se puede realizar con carga y sin carga y al concluir se guarda en la memoria del Variador de frecuencia un modelo matemático del motor con el que se va a trabajar quedando respaldado incluso cuando se desconecta totalmente.

Durante la operación, el modelo recibe la información de la corriente que el motor demanda en sus 3 fases, los valores de voltaje del bus de C.D. y el estado de los transistores de potencia (IGBT). Con estos datos se calcula el flujo en el estator, el par, la frecuencia y la velocidad de cada ciclo.

El modelo estima la resistencia en el estator, obteniendo este valor mediante la comparación de los datos obtenidos de la identificación inicial y en la subsecuente operación del mismo.

La diferencia en la operación del inversor comparada con la tecnología PWM que tiene una frecuencia de conmutación fijada de acuerdo a las necesidades, mientras que en los Variadores de frecuencia recientes la frecuencia de conmutación se modifica de acuerdo con las necesidades de par de la carga.

Este tipo de Variadores de frecuencia es ideal para aplicaciones de una complejidad mayor, que generalmente se controlan con motores de CD como extrusoras, grúas, elevadores, máquinas de papel, y molinos entre otras.

En todas las aplicaciones de Variadores de frecuencia anteriormente descritas hay que tener muy presentes el calentamiento que pueda llegar a sufrir el motor al disminuir la velocidad del ventilador de enfriamiento acoplado al mismo en la parte posterior. Si el motor va a trabajar en rangos de velocidad de 0 a 30 Hz durante periodos prolongados, se recomienda instalar ventilación extra a la del motor para asegurar el enfriamiento adecuado.

5.8. Tipos de Cargas

La primera consideración que se debe de hacer al aplicar un variador de frecuencia es determinar el tipo de carga y sus características, debiendo de conocer los requerimientos de Par y Velocidad.

Las cargas se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- ✓ Cargas de Par Variable.
- ✓ Cargas de Par Constante.
- ✓ Cargas de Potencia Constante.
- ✓ Cargas de Impacto.

5.9. Cargas de Par Variable

Las cargas en las que el Par se reduce cuando operan por debajo de la velocidad base y se incrementa al operar por encima de dicha velocidad base se clasifican como Cargas de Par Variable. En muchas de estas cargas el par se reduce con el cuadrado de la velocidad, siendo las bombas centrífugas y cierto tipo de ventiladores y sopladores las cargas más representativas.

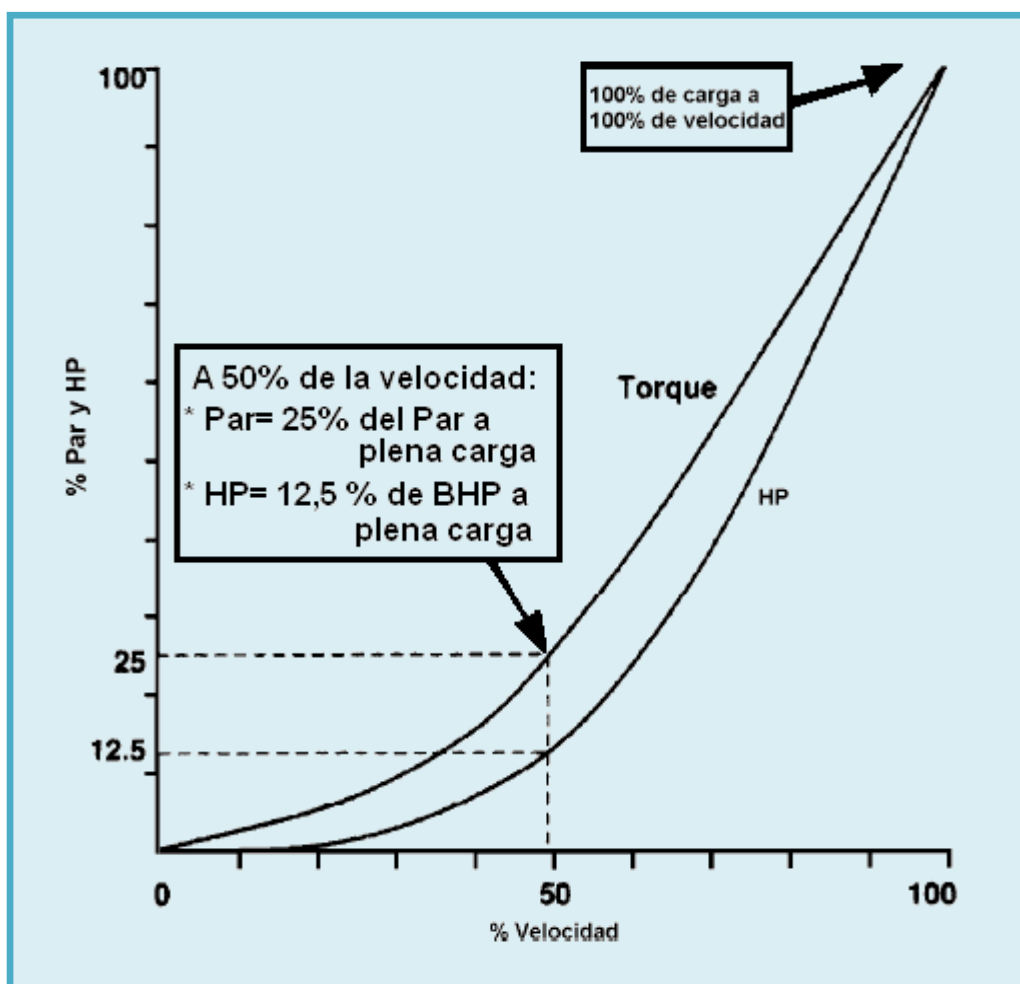


Figura N° 47. Comportamiento de Cargas de Par Variable.

5.10. Cargas de Par Constante

Son cargas en las que el Par no es función de la velocidad sino que permanece constante, mientras que la potencia varía linealmente con la velocidad.

Las aplicaciones típicas son:

- ✓ Accionamientos de tracción.
- ✓ Bandas transportadoras.
- ✓ Bombas de desplazamiento positivo.
- ✓ Grúas y malacates.

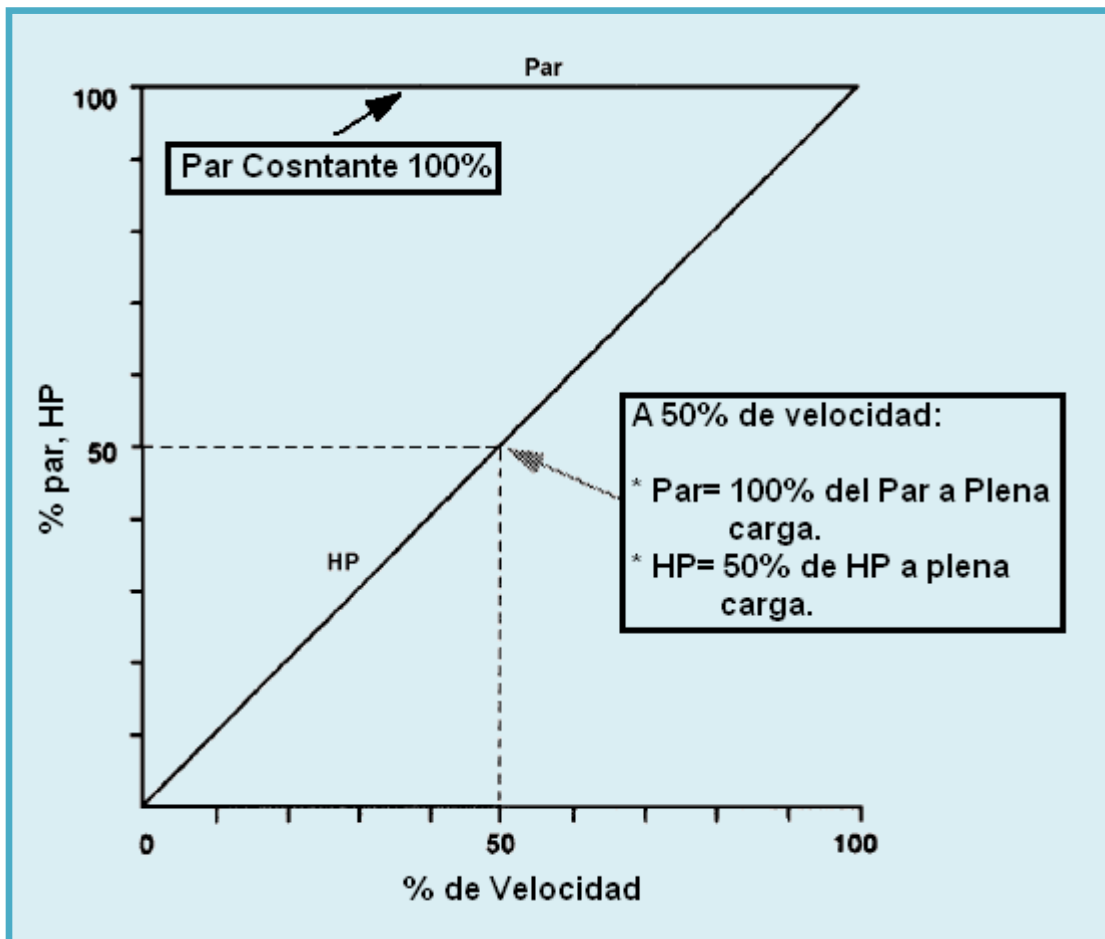


Figura Nº 48. Comportamiento de Cargas de Par Constante.

5.11. Cargas de Potencia Constante

En las cargas de potencia constante, cuando se opera por encima de la velocidad base, el Par requerido decrece, mientras que la potencia se mantiene casi constante. Las aplicaciones típicas son:

- ✓ Molinos.
- ✓ Embobinadoras.

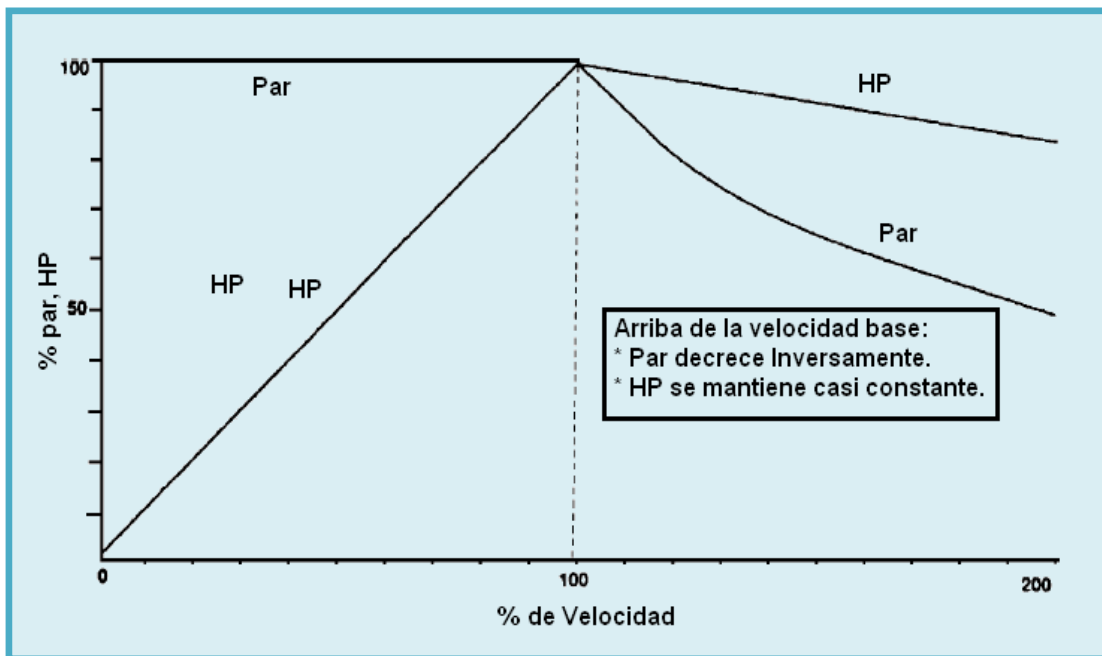


Figura N° 49. Comportamiento de Cargas de Potencia Constante.

5.12. Cargas de Impacto

En las cargas de impacto, las máquinas que cuentan con embragues de operación cíclica o las prensas de estampado de lámina, el Par es intermitente y no es función de la velocidad.

En el caso de las prensas se requiere que la combinación del motor y el variador de frecuencia produzcan un par suficiente de aceleración para regresar el volante de inercia a la velocidad requerida antes de que inicie el siguiente ciclo.

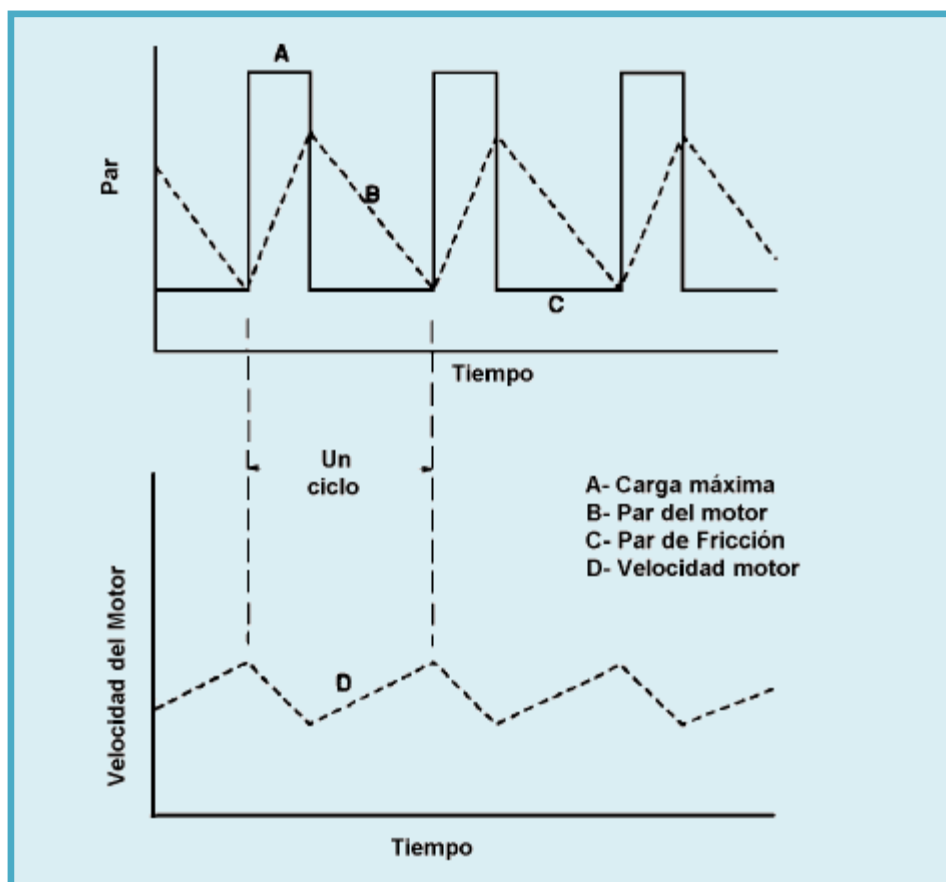


Figura N° 50. Comportamiento de Cargas de Impacto.

5.13. Utilización en la industria

A continuación se mostrarán tablas donde se especifican algunos de los usos que se les da a los variadores de frecuencia. Luego se indicaran gráficos donde se ilustran las fuerzas y las ventajas de utilizar estos equipos.

En la figura nº 51 se ilustran como se distribuye el uso de los variadores dependiendo del tipo de bomba a utilizar, esto radica en el tipo de líquidos que se moverán o transportaran, ya que la consistencia de estos líquidos varía según la densidad de ellos, además varia el torque ejercido por los líquidos dependiendo de la “fuerza” con la que se quiere mover los líquidos. En la figura nº 52 se ilustran los distintos tipos de movimiento de aires que se realizan en la industria lo que implica que se deben utilizar diferentes tipos de variadores de frecuencia, es decir, que para cada tipo de movimiento o circulación del aire, se debe utilizar el variador adecuado.

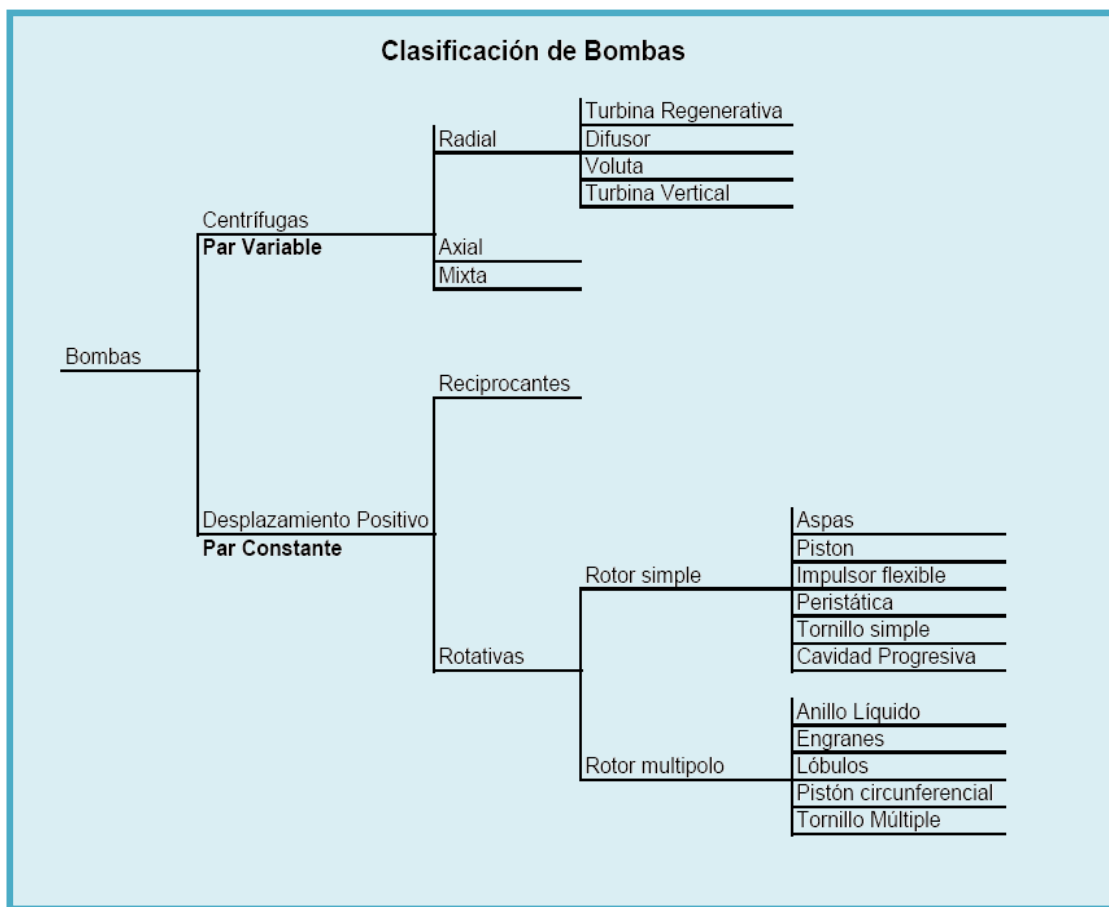


Figura Nº 51. Clasificación del uso de variadores en fluidos.

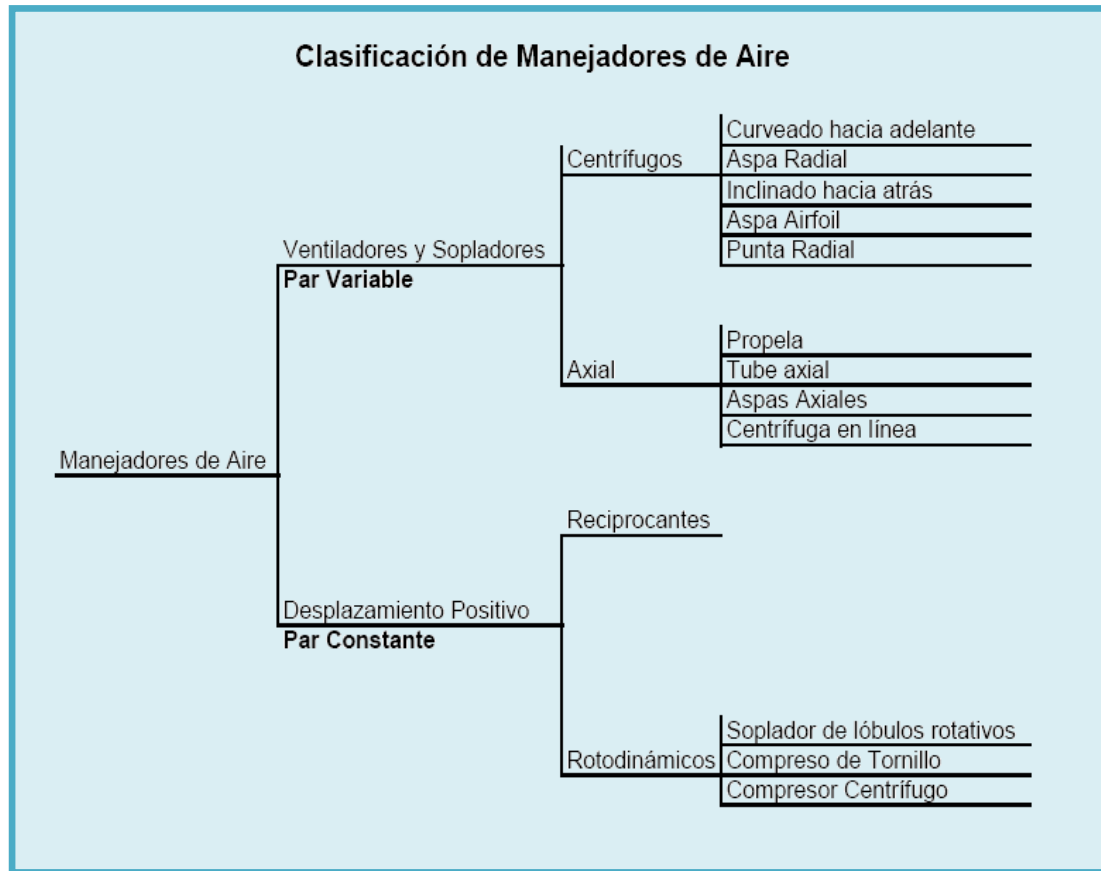


Figura N° 52. Clasificación del uso de variadores en aire.

5.14. Control De Flujo En Ventiladores

Los motores son los dispositivos más ampliamente utilizados para convertir la energía eléctrica en alguna otra forma útil, representando el 70% del consumo total de una industria. Una gran parte de ésta energía se aplica a motores de inducción para accionar bombas, sopladores y ventiladores, considerándose que el 50% de los motores en uso están destinados a este tipo de cargas.

Las bombas y ventiladores son calculados para cubrir los requerimientos máximos de la carga, sin embargo, es común que el sistema demande una amplia gama de puntos de operación, hasta fracciones de los parámetros de diseño.

Elementos como válvulas reguladoras o compuertas son ampliamente utilizados en ventiladores y bombas para adecuarse a estas necesidades y aunque son confiables y simples afectan severamente la eficiencia del sistema.

El continuo desarrollo de variadores de frecuencia plantea una alternativa más eficiente para el control de flujo, permitiendo aprovechar los accionamientos existentes.

El ventilador más comúnmente empleado, es el tipo centrífugo, el cual imparte la energía al aire por la fuerza centrífuga, incrementando su presión y produciendo un flujo a la salida.

En la Figura nº 53 se muestra la curva presión-flujo para un ventilador centrífugo a una velocidad dada. Las curvas estándar comprenden una familia de éstas para diferentes velocidades e incluyen las eficiencias y requerimientos de potencia.

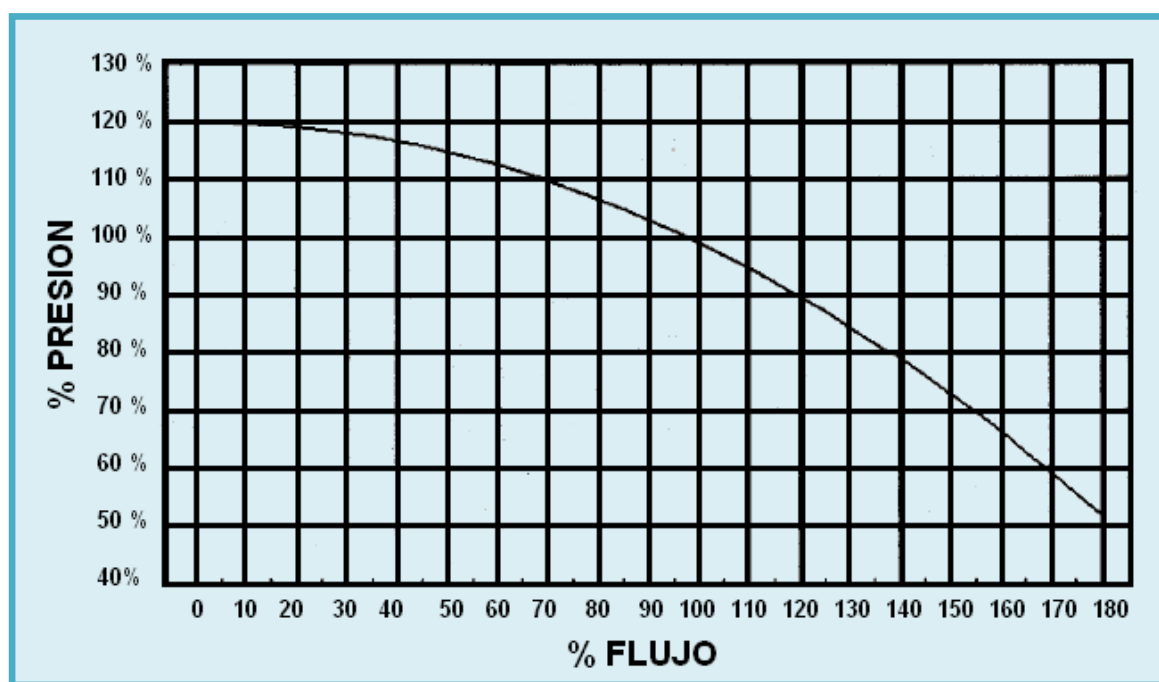


Figura Nº 53. Curva del ventilador centrífugo.

La curva del sistema representa los requerimientos totales, incluyendo pérdidas y, carga útil, mismas que el ventilador debe vencer para aportar el flujo requerido. Su función se establece como:

$$P = k\Phi^2$$

P: Presión a la carga del ventilador.

Φ : Flujo de aire en el sistema.

K: Constante que representa la fricción al flujo del aire.

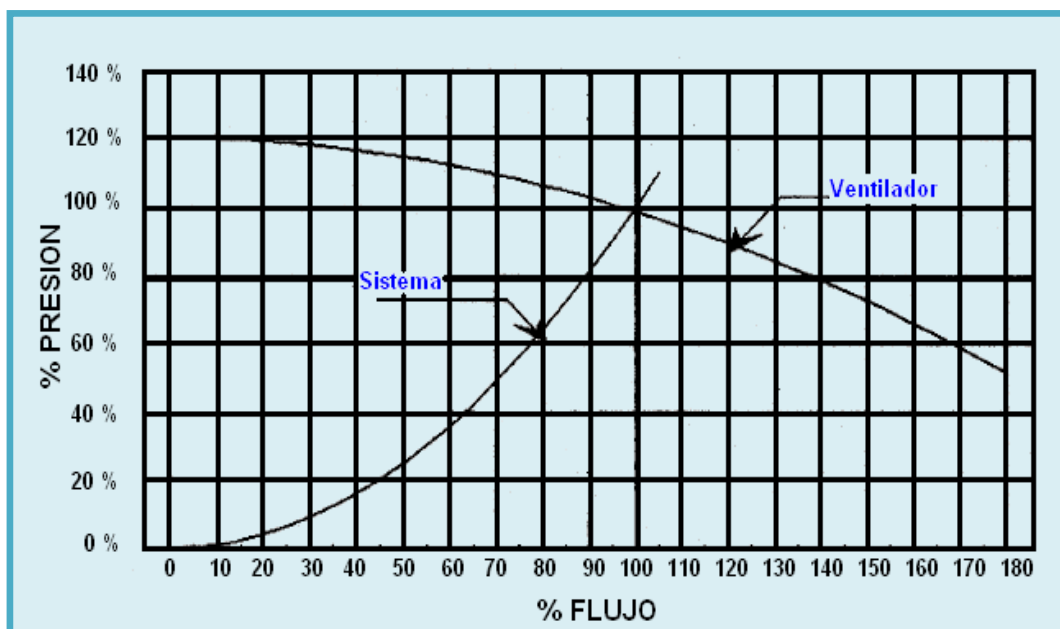


Figura N° 54 Curva del sistema.

Esta curva es independiente de la capacidad del ventilador. La intersección de ambas curvas es el punto natural de operación en el que se define la presión y el flujo que el ventilador proporcionará cuando se conecte al sistema.

5.15. Métodos De Regulación

Para poder alcanzar los diferentes puntos de operación requeridos por el sistema, se emplean básicamente tres métodos para modular el flujo:

- ✓ Compuertas en la descarga.
- ✓ Aletas regulables en la entrada.
- ✓ Accionamientos de velocidad variable.

5.15.1. Compuertas en la descarga

Con este dispositivo la regulación se obtiene variando la apertura de las persianas', lo cual provoca que se incremento la resistencia de] aire, afectándose la constante "k" del sistema y por lo tanto su curva de operación, tal como se muestra en la Figura nº 55.

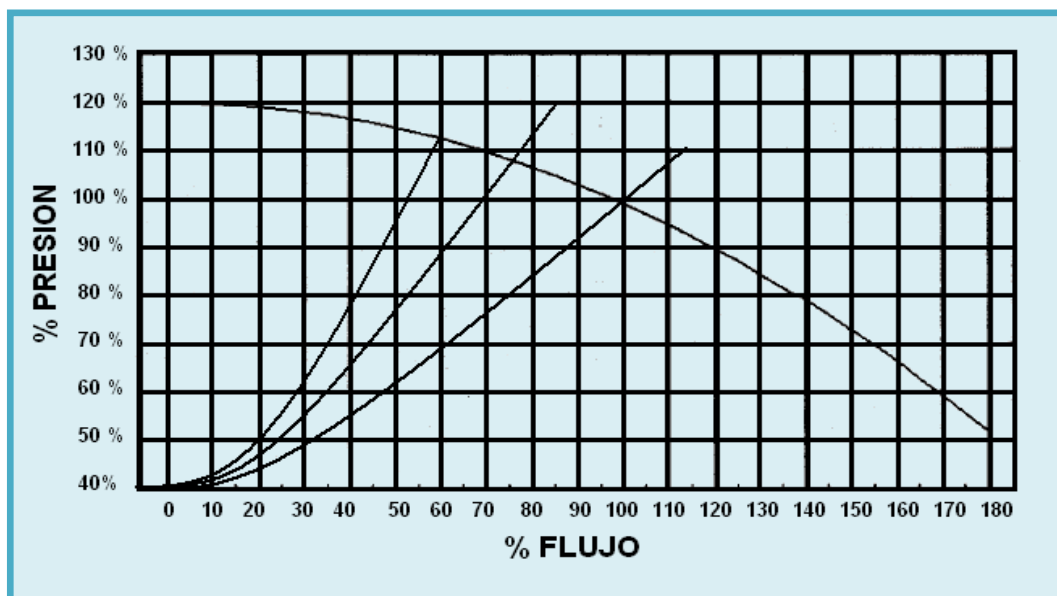


Figura nº 55. Curvas del sistema para diferentes posiciones de las compuertas.

Este arreglo permite obtener diferentes puntos de operación, destacándose que la reducción en el flujo está acompañada de un incremento en la presión. Así mismo, los requerimientos de potencia decrecen gradualmente con la disminución del flujo como se observa en la Figura nº 56.

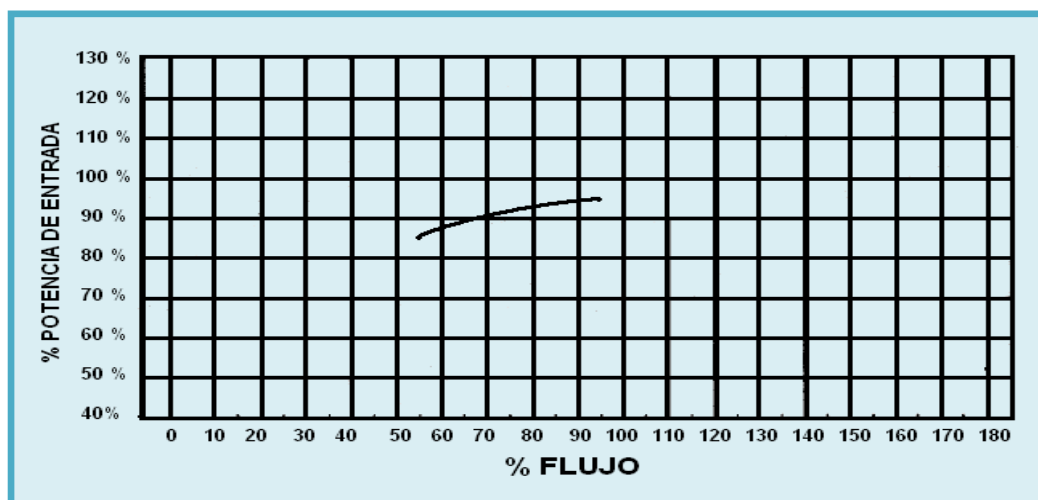


Figura Nº 56. Requerimientos de potencia con compuertas a la descarga.

5.15.2. Aletas regulables en la entrada

En este método se regula la posición de las aletas ubicadas en la succión, mortificándose la curva de] ventilador de forma tal que intercepta la curva del sistema en diferentes puntos, tal como se indica en la Figura nº 57.

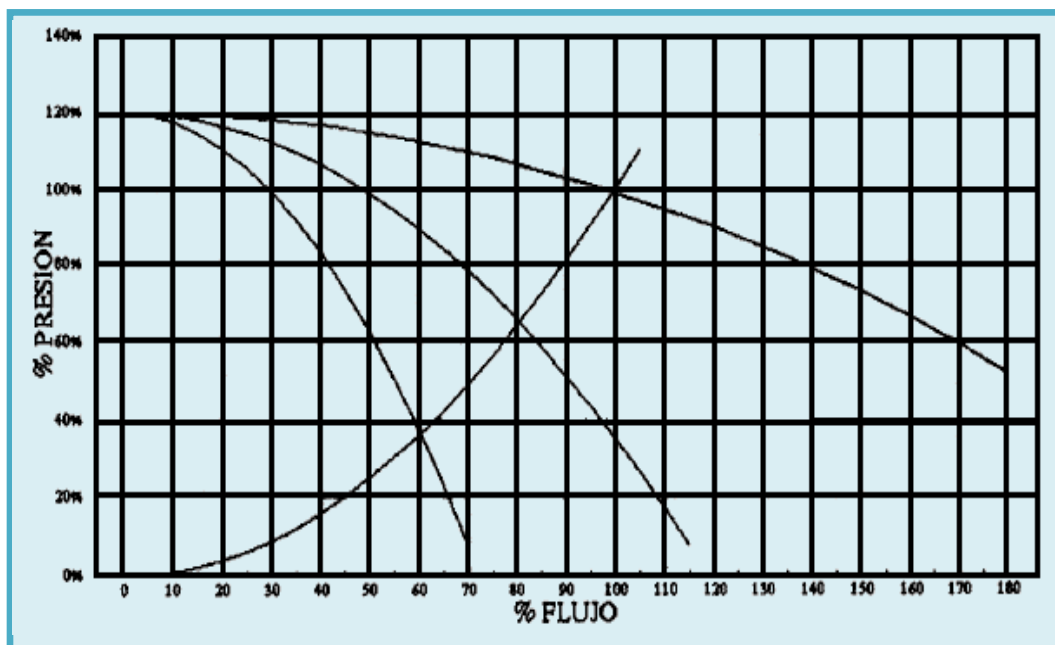


Figura Nº 57. Curvas del ventilador para diferentes posiciones de las aletas.

La disminución en el flujo conlleva a una reducción en la presión, requiriéndose de menor potencia para el mismo caudal que con relación al método anterior, como lo demuestra la Figura nº 57.

5.15.3. Accionamientos de velocidad variable

Con este método se aprovecha el cambio en la curva del ventilador conforme se varía su velocidad, cuyo comportamiento se define por las leyes de afinidad.

$$Q_2 = (N_2/N_1) \times Q_1$$

$$P_2 = (N_2/N_1)^2 \times P_1$$

$$HP_2 = (N_2/N_1)^3 \times HP_1$$

Consiguiendo que el ventilador siga de una manera muy cercana a la curva del sistema, cuando se varía su velocidad.

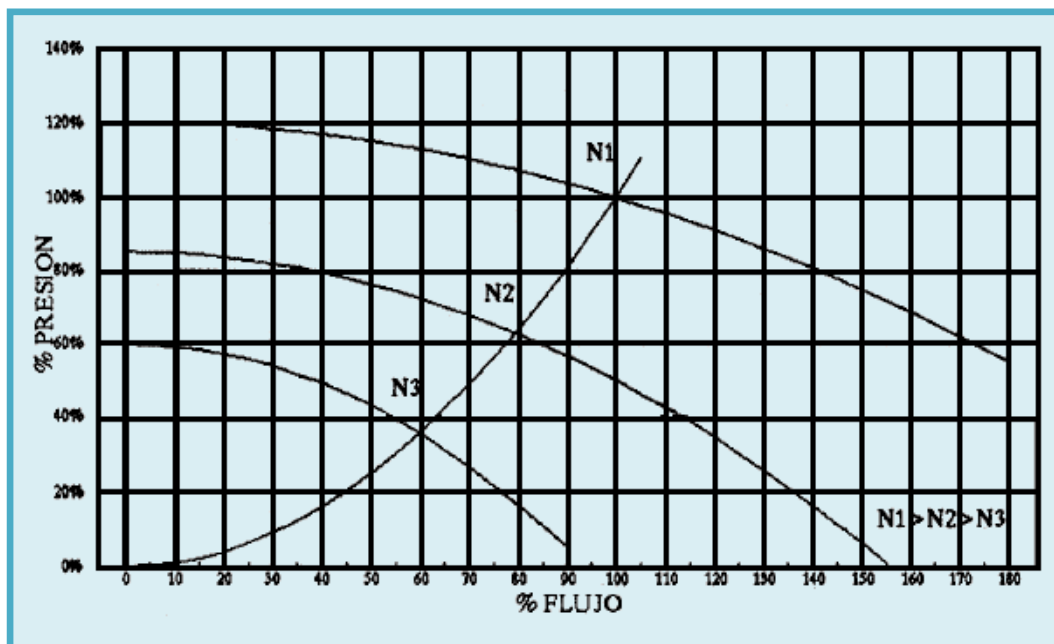


Figura N° 58. Curvas del ventilador accionado por un variador de velocidad.

Con este método se mejora la eficiencia, obteniéndose el resultado deseado con la mínima potencia de entrada.

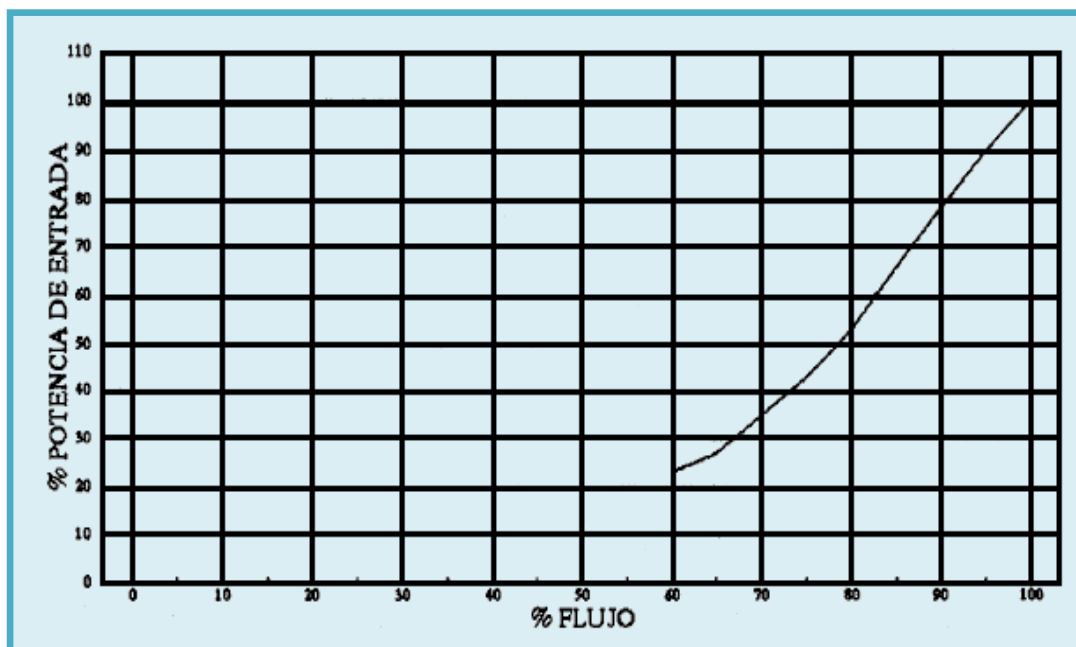


Figura N° 59. Requerimientos de potencia con variador de velocidad.

5.15.4. Comparación De Potencia Entre los Tres Métodos

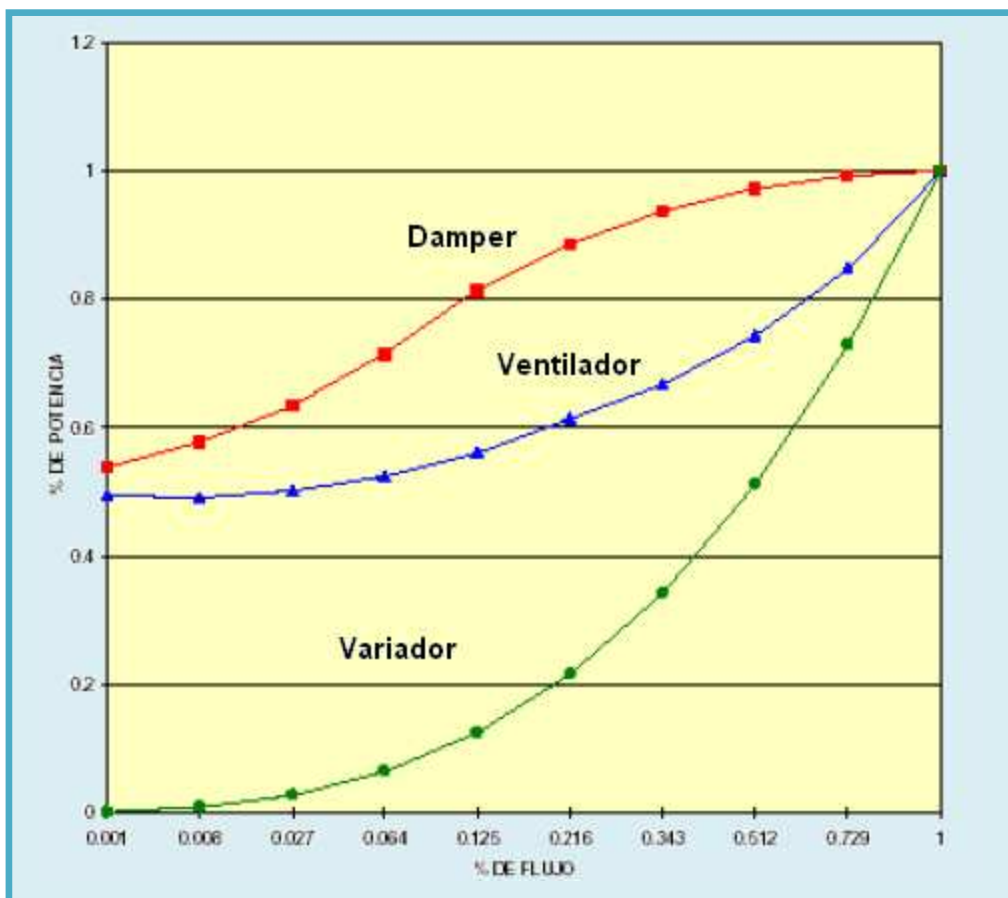


Figura N° 60. Comparación entre distintos métodos de ventilación

5.16. Ahorro de Energía

Para cuantificar el ahorro de energía y los beneficios económicos que se obtienen al utilizar un variador de frecuencia se comparan los requerimientos de potencia contra el método de compuertas en la descarga ante un perfil de carga dado.

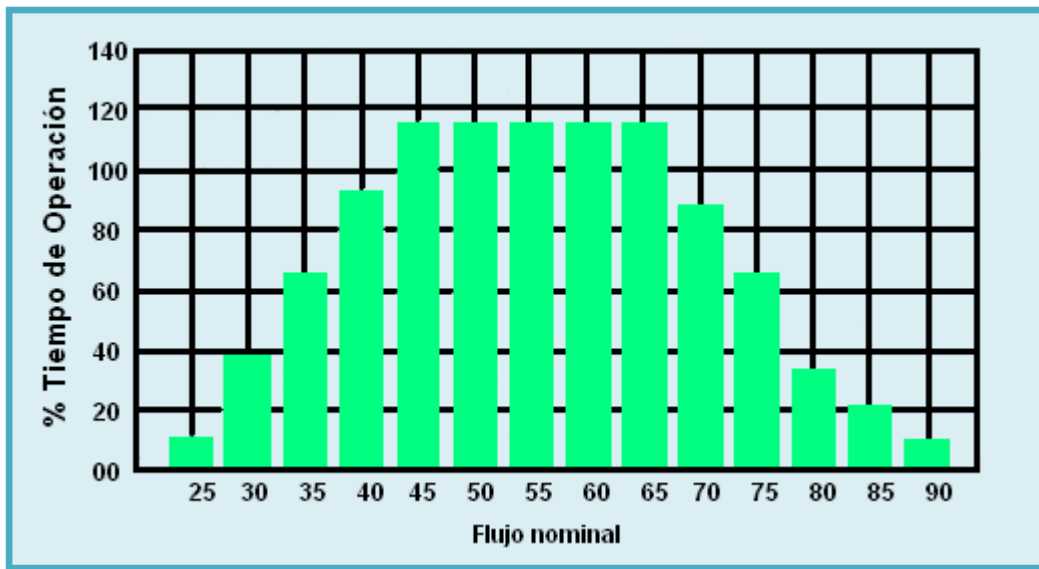


Figura N° 61. Perfil de carga de un sistema.

Esta evaluación se realizó a un ventilador centrífugo cuyos valores nominales de flujo son 100,000 cfm operando a 300 rpm.

Para determinar la potencia requerida en el caso de las persianas de descarga se utilizan las curvas del fabricante y las leyes de afinidad para el variador de velocidad.

La energía consumida y los costos de operación se obtienen considerando:

Persianas en descarga	Variador de Frecuencia		Diferencia
Potencia promedio Kw	19.73	5.35	14.38
Energía anual kwh	147,736	40,085	107,652
Costo anual Energía	103,415	28,059	75,356

Para aplicaciones específicas los beneficios dependerán de los perfiles de carga, costos de energía, horas de operación y eficiencias.

CAPITULO VI

6. CONFIGURACION DE LOS SISTEMAS INDIVIDUALIZADOS

6.1. Introducción

Este capítulo trata sobre cómo se incluyen e integran los distintos componentes en el sistema que se está diseñando. Cada uno de los sistemas son incorporados de manera tal que estos dependan unos de otros.

La Arquitectura Integrada está compuesta de 4 plataformas las cuales se unen para dar una solución.

La primera plataforma está formada por el estanque de pesaje, construido en acero inoxidable, el cual recibe el producto, lo almacena y lo entrega al siguiente sistema a través de un tornillo sin fin que es controlado con un variador de frecuencia. El variador de frecuencia trabaja en secuencia con lo solicitado por el proceso. La segunda plataforma está conformada por las celdas de carga que controlan el peso del estanque donde se almacena el producto, estas celdas pesan el producto y hacen la diferencia entre lo cargado y lo entregado a la plataforma siguiente, esto para indicar cuando este falta de producto. La tercera plataforma está conformada por el sistema de pesaje que regula el producto solicitado para ser mezclado con los demás ingredientes que forman la mezcla, esta plataforma está conformada por un recipiente de acero inoxidable, un actuador que gira 180° y una celda de carga capaz de pesar con gramos de exactitud. La cuarta plataforma se constituye por otro estanque, pero más pequeño, el cual está aguas debajo del resto de plataformas, este estanque tiene por misión recibir el producto pesado en la plataforma 3 y mezclarlos con aceite y agua que vienen de otras unidades, en este estanque se unen los aceites con agua y el producto que viene de las etapas anteriores y son mezcladas y entregadas a otra etapa de la producción.

Todas las plataformas mencionadas anteriormente están enlazadas con el sistema de comunicación y manejados con el software que se instale en el sistema.

6.2. Primera Plataforma

6.2.1. Estanque de Acopio

El estanque de acopio está fabricado en acero inoxidable y con forma cilíndrica. La forma de la construcción del estanque es muy importante porque en él van instalados las celdas de carga, esto se hace montando cada celda a 120° una de la otra, esto para distribuir el peso equitativamente y así lograr una medición más precisa.

El estanque se fabrica en acero inoxidable por que este acero no contamina el producto y tiene una mayor durabilidad en los procesos industriales. El espesor del estanque va directamente relacionado al peso que debe soportar y a la fricción a la cual será sometido. En este caso se ha seleccionado una plancha de 3 mm de espesor y del tipo 316L.

Las celdas son montadas en el estanque y colgadas a una estructura fija, esto es para que las celdas puedan realizar su trabajo, es decir, extenderse y generar la dilatación necesaria para que así el sistema lea el peso y viceversa.

La descarga del producto que se encuentra en el estanque se realiza a través de un tornillo sin fin. Este tornillo es movido por un motor que a su vez es controlado por un variador de frecuencia.

Cuando se hace referencia al tornillo nos referimos al motorreductor que mueve al tornillo y este, luego, alimenta la etapa siguiente con el producto y sólo entrega lo que el sistema solicita. El motorreductor está siendo controlado por el variador, el variador está conectado al sistema principal de proceso el cual recibe todas las lecturas del sistema, es decir, peso, estado de los actuadores, estado de las celdas, etc. La señal enviada al variador, a través de las señales de control es la llamada señal de corriente, 4-20mA. Esta señal indica o mejor dicho, se adapta a las siguientes características: 4 es nada o cero por ciento y 20 es todo o 100 por ciento. Con este tipo de señal se le indica al variador que gire a mayor o menor velocidad para así controlar la porción de producto que se debe entregar al siguiente sistema.

A continuación se describe gráficamente el funcionamiento del estanque y cómo está conformado, figura nº 62.

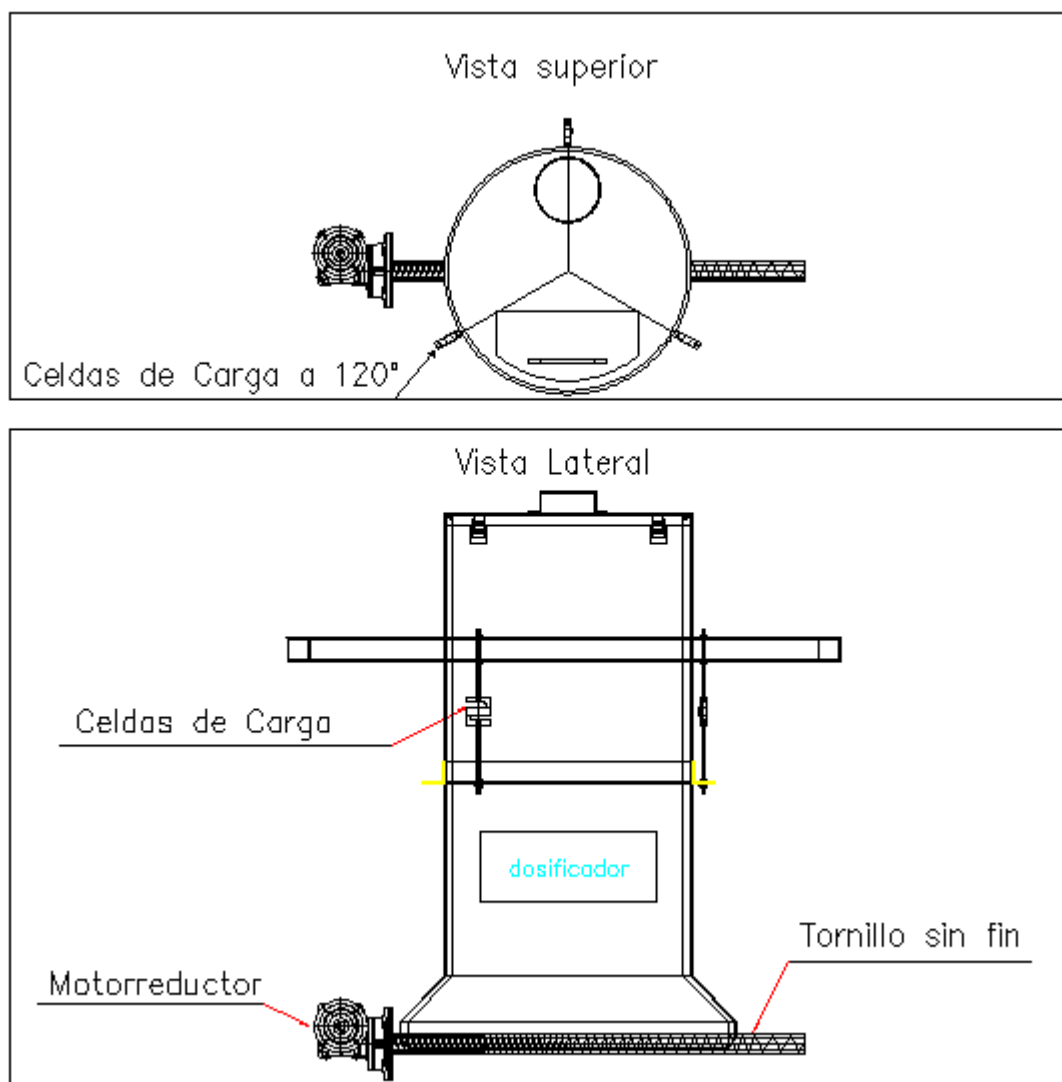


Figura Nº 62. Disposición de estanque y componentes.

6.3. Celdas de Carga

Este apartado hace referencia a Las celdas de carga que se utilizan en las plataformas 2 y 3, como se mencionó en el capítulo cuatro, están construidas para captar deformaciones en los distintos medios en los que se utilicen, en el caso puntual de las celdas de cargas utilizadas en este diseño, para medir la dilatación del metal en donde se encuentran alojadas.

En el sistema diseñado nos encontraremos con tres kit de celdas de carga y cada uno montado en lugares estratégicos, así como: estanque de acopio, dosificador y estanque de mezcla. En el primer y tercer caso se utilizan mas una celda de carga, por ende en estos casos se requiere de un sistema capaz de realizar la suma de las tres medidas tomadas por cada celda. Como cada celda pesa por si misma se requiere de la tarjeta sumadora. Esta tarjeta sumadora, como su nombre lo indica, suma las 3 medidas de las celdas y realiza un promedio de la medida y ésta envía al visor una medida ponderada.

El caso mencionado es para cuando se necesita sólo una lectura del peso. Cuando existe la necesidad de controlar otro equipo con las celdas, se requiere de un dispositivo especial el cual comunica la medición de las celdas con la tarjeta sumadora y esta a su vez se comunica con el equipo, este dispositivo tiene por nombre tarjeta Devicenet, el cual es un driver que utiliza el protocolo Devicenet y está encargada de “traducir” las lecturas de la tarjeta sumadora y luego enviarlas al sistema principal. En el caso particular de la celda de carga del dosificador, este no consta de tarjeta sumadora debido a que sólo utiliza una celda de carga, lo que implica que se debe conectar directo al visor y luego a la tarjeta Devicenet.

Todas las medidas captadas, de las celdas de cargas, son enviadas a través de las tarjetas Devicenet al PLC, el cual las recibe como entradas.

Las señales recibidas se pueden manipular utilizando los sistemas mencionados en el capítulo 2: Sistema Proporcional, Sistema Integrativo y Sistema Derivativo. En este diseño se considera el sistema PID el cual abarca a los tres sistemas, por ende hace que sea más exacto en el momento de manipular las señales y los actuadores.

Para el caso de los kit de celdas (tres celdas) se utilizan celdas tipo “S”. Estas células de carga se utilizan para pesar silos, tolvas suspendidas, cargas en cintas transportadoras y básculas híbridas. Las celdas de carga de tracción de tipo “S” están diseñadas para su uso en tolvas suspendidas, dosificación y otros contenedores suspendidos de una estructura de soporte. Ofrecemos una amplia gama de capacidades para dar solución a una gran variedad de aplicaciones.

A continuación se darán algunas de las características de las celdas y especificaciones, haciendo referencia a la empresa Mettler Toledo, figura nº 63:

Celda de carga SLS410, acero, IP67, de Mettler Toledo.

Características y ventajas

- ✓ Células de carga en S para pesaje en tensión
- ✓ 0,03% de precisión
- ✓ Acero niquelado
- ✓ Grado de protección IP67
- ✓ Sensibilidad 3 mV/V
- ✓ Disponibles en versiones en lb o kg

Especificaciones - Célula de carga SLS410, acero, IP67

Capacidad máxima	50, 100, 250, 500kg; 1, 2.5, 5, 7.5t; 50, 100, 200, 300, 500, 750lb, 1, 1.5, 2, 3, 5, 10, 15, 20klb
Aplicaciones	Tolvas suspendidas, pesaje de silos, básculas híbridas
Indicadores adecuados	IND110, IND130, IND560, JAGXTREME, LYNX, LYNXBATCH, PANTHER, PUMA, HAWK
Modelo	Pesaje en tensión



Figura N° 63, celda de carga tipo “S”.

Para el caso del dosificador, se utiliza sólo una celda de carga y esta es del tipo modular y están específicamente diseñados para su aplicación en procesos automatizados en entornos industriales. Velocidad, resistencia, precisión y conectividad directa son las características clave de esta gama de productos. Se pueden utilizar estos sensores para el control del peso, y para aplicaciones de llenado/dosificación. A continuación se dan algunas especificaciones de la celda de carga y se muestra en la figura nº 64.

Especificaciones - WM6002

Capacidad máxima	6100 g
Precisión	0.01 g
Linealidad	± 0.04 g (10 ... 30 °C, typ.)
Repetibilidad	0.01 g (with factory setting and normal environmental conditions)
Tiempo de estabilización	0.2 s with required weighing tolerance of 0.1 g (típico)
Velocidad. de indicación	de up to 38 updates per second
salida de datos	

Grado de protección	IP44 to IP66 (wash down configuration)
Dimensiones	length 240 mm; width 85 mm; height of platform above mounting surface 126 mm



Figura N° 64, celda de carga de alta precisión.

En la figura n° 65 se muestran donde van ubicadas las celdas en cada plataforma.

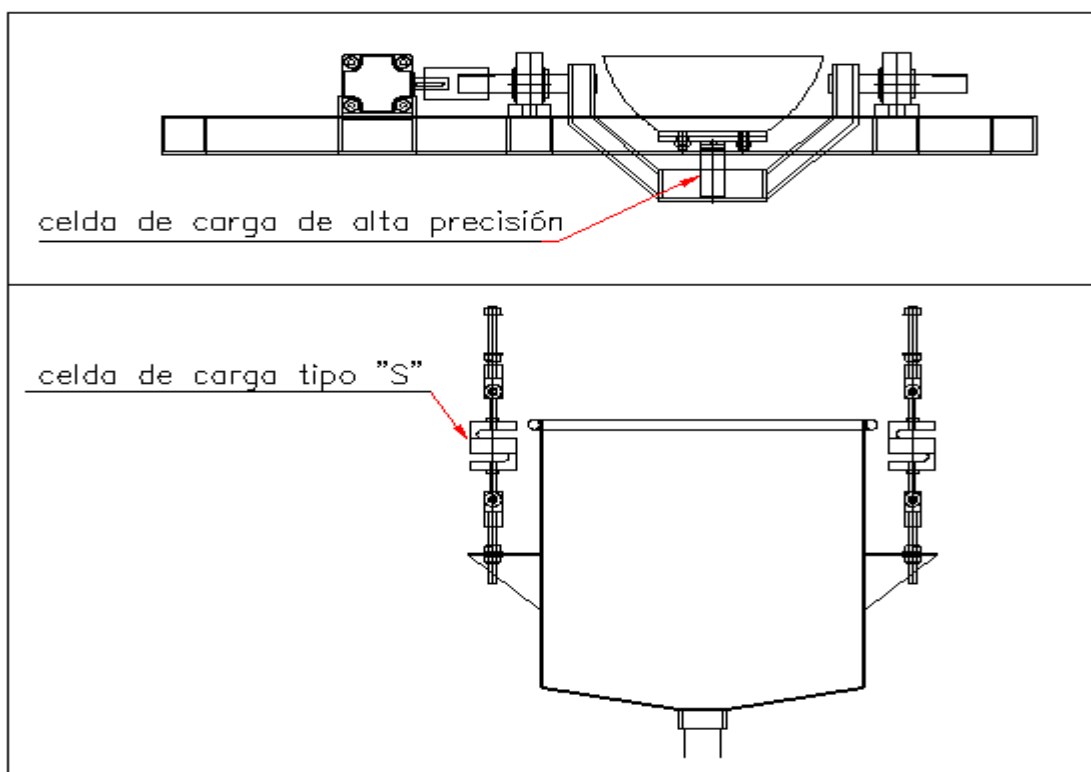


Figura N° 65. Ubicación de celdas de carga en segunda y tercera plataforma.

6.4. Estanque de mezclado

En este estanque se mezclan: agua, aceite de pescado, aceite vegetal y el pigmento. La mezcla se realiza con un agitador, el cual trabaja en base a un determinado tiempo. El tiempo de mezclado está dado dependiendo del tipo de dieta que se esté produciendo. En la figura nº 66 se muestra cómo está conformado el estanque de mezclado.

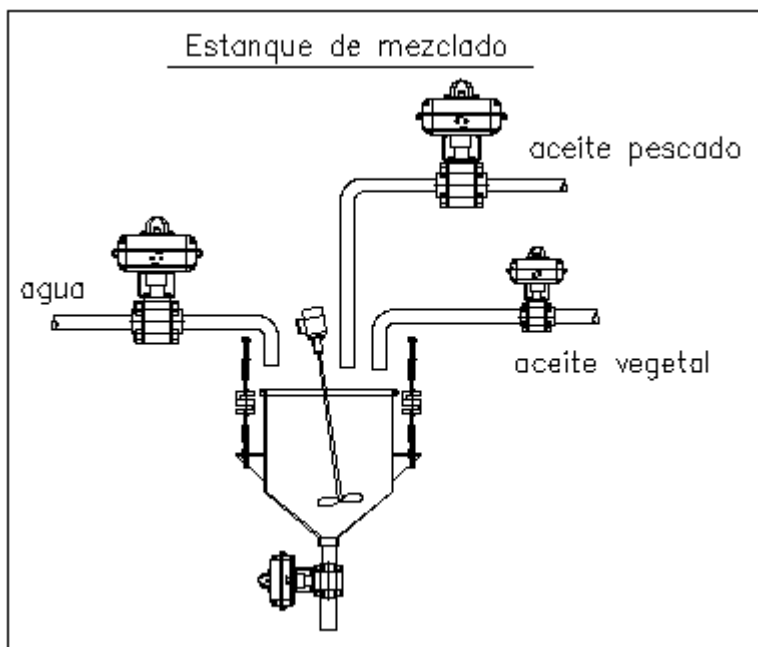


Figura Nº 66. Distribución del estanque de mezclado y sus componentes.

6.5. Sistema de Comunicación

El sistema de comunicación se realizará a través de una red Devicenet, la cual conecta los distintos equipos que forman parte del diseño.

Devicenet es una de las redes que han adoptado el esquema productor/consumidor, lo que implica que la información producida por una sola fuente en la red alimenta en forma simultánea a todos los probables receptores y deja a éstos la decisión de escuchar o no el mensaje recibido. Los beneficios del esquema se reflejan en una mejor utilización del ancho de banda y la agilización en el tiempo de respuesta en la red.

La red permite que los dispositivos conectados a la misma se puedan enlazar como maestro/esclavo (Master/Slave), entre pares (Peer-to-Peer) y como productor/consumidor. Este último modo de comunicación es un modelo recientemente desarrollado para las pistas de comunicación más sofisticadas, como FF Fieldbus y ControlNet. Múltiples nodos consumen en forma simultánea los mismos datos generados por un productor sencillo. Así, los nodos pueden sincronizarse con facilidad, y el ancho de banda es utilizado con mayor eficiencia. La relación maestro/esclavo es la más sencilla de entender, ya que el PLC o Scanner es el maestro y los dispositivos entrada/salida son los esclavos. El esclavo sólo habla cuando se le interroga, y únicamente hay un maestro por red.

En el caso especial de este diseño se considera al PLC como un maestro y todos los periféricos serían los esclavos, pero estos con la condición de poder enviar señales al PLC para que este realice acciones acorde a las instrucciones recibidas.

CAPITULO VII

7. CONFIGURACION DEL SISTEMA DOSIFICADOR DE PIGMENTOS

7.1.Introducción

En este capítulo se plantearán cómo se incorporan todos los componentes del sistema. Los distintos elementos están individualizados, pero todos convergen con un solo fin, el cual es facilitar y maximizar el sistema de pesaje del dosificador.

El dosificador se compone de múltiples etapas, la primera etapa está formada por toda la estructura metálica, en este diseño en particular el material es acero inoxidable. Se utiliza este metal por razones de higiene y debido que este metal no contamina el producto con el cual está en contacto, es decir, no suelta partículas de óxido, como lo hace el acero carbono. La segunda etapa está compuesta por el control electromecánico del sistema, este está formado por actuadores neumáticos, electro válvulas y el transporte del material. La tercera etapa está constituida por las celdas de cargas y el visor. Por último tenemos la comunicación. Esta se encarga de interconectar el PLC con todos los periféricos que están relacionados en el sistema.

En este capítulo se mostrará la configuración que se realiza en terreno entre el PLC, la red y los periféricos.

Una de las grandes ventajas que tiene realizar diseños con PLC o autómatas programables es la gran dinámica y lo versátil de estos.

7.2. Configuración mecánica del sistema

Para poder transportar los insumos y en este caso los pigmentos, aceites y agua, se requieren de equipos capaces de trabajar con gran torque. Es por esta razón que en el diseño de este sistema se consideran algunos elementos que ayudan a hacer más fácil y eficiente el proceso. En la figura nº 67 se ilustra el conjunto completo del dosificador.

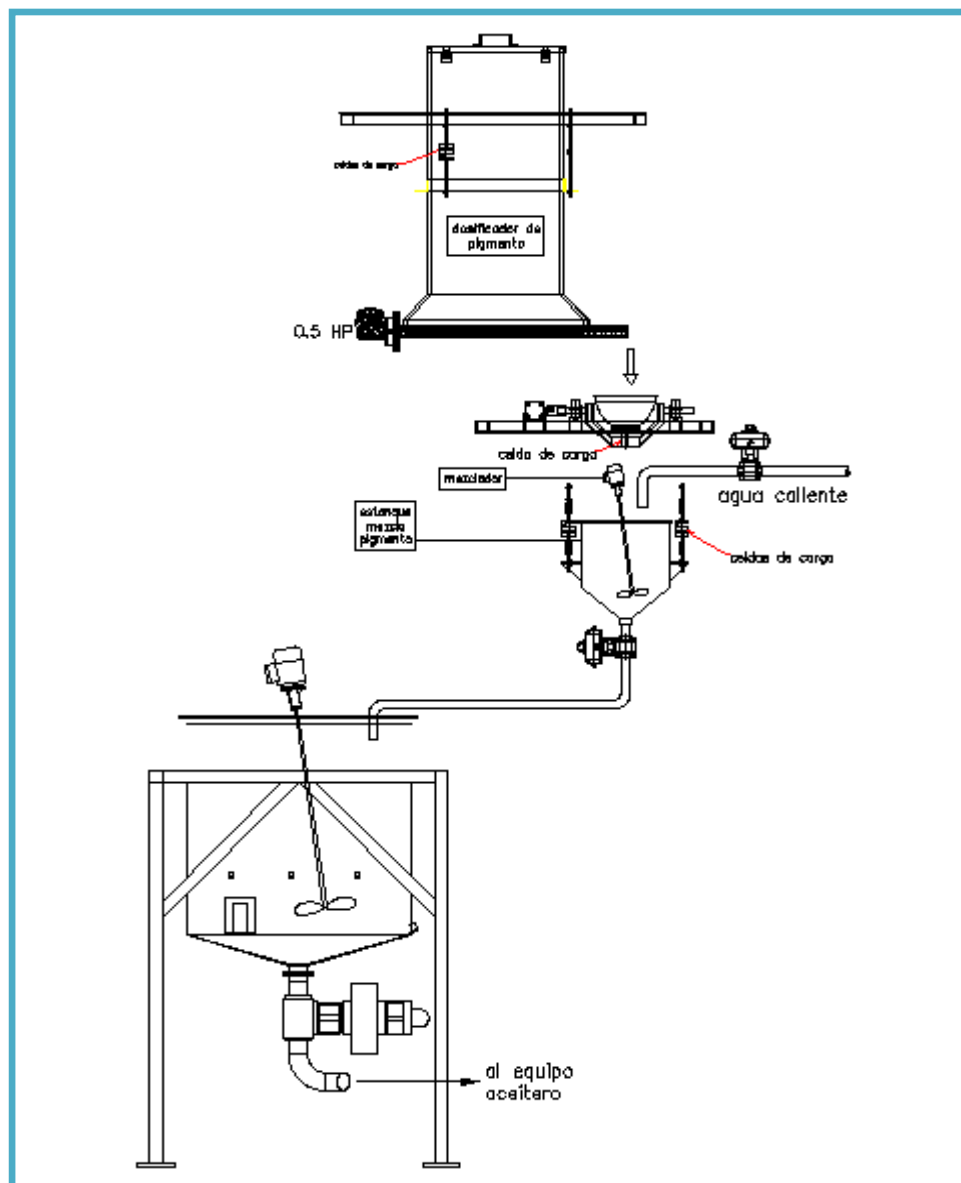


Figura Nº 67. Configuración completa del dosificador.

7.2.1. Motorreductor

Normalmente los motores empleados responden a la clase de protección IP-44 (Según DIN 40050). Bajo pedido se puede mejorar la clase de protección en los motores y unidades de reducción.

7.2.1.1. Características del reductor o motorreductor

7.2.1.1.1. Tamaño

- ✓ **Potencia**, en HP, de entrada y de salida.
- ✓ **Velocidad**, en RPM, de entrada y de salida.
- ✓ **PAR** (o torque), a la salida del mismo, en KG/m.
- ✓ **Relación de reducción**: índice que detalla la relación entre las RPM de entrada y salida.

7.2.1.2. Características del trabajo a realizar

- ✓ Tipo de máquina motriz.
- ✓ Tipos de acoplamiento entre máquina motriz, reductor y salida de carga.
- ✓ Carga: uniforme, discontinua, con choque, con embrague, etc.
- ✓ Duración de servicio: horas/día.
- ✓ N° de Arranques/hora.

7.2.1.3. Guía para la elección de tamaño de reductor o motorreductor

Para seleccionar adecuadamente una unidad de reducción debe tenerse en cuenta la siguiente información básica:

7.2.1.3.1. Características de operación

- ✓ Potencia (HP tanto de entrada como de salida)
- ✓ Velocidad (RPM de entrada como de salida)
- ✓ Torque (par) máximo a la salida en kg-m.
- ✓ Relación de reducción (I).

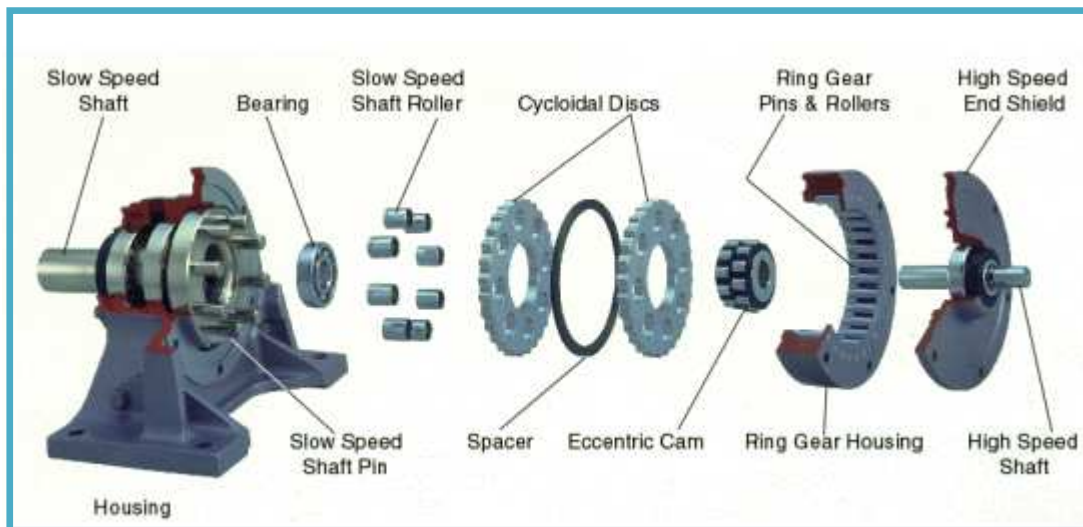


Figura N° 68. Partes de un reductor tipo Cyclo.

El eje de alta velocidad soportada en la tapadera posterior mueve una balinera excéntrica que está en el corazón del reductor. Esta balinera excéntrica es la única pieza junto con el eje de alta velocidad que rota a la velocidad alta. Esta balinera empuja los discos cicloidales hacia la circunferencia interior de los casquillos y pines estacionarios. La acción que resulta es similar a eso de una rueda rotando dentro de un anillo, la rueda (el disco cicloidal) al recorrer un sentido horario dentro del anillo (carcasa de pines), ella en sí, rota lentamente en su propio eje en el sentido contrario. En el sistema cicloidal, el perfil cicloidal del disco intentas encajar con los pines y casquillos colocados en la carcasa de pines, para producir una rotación inversa a la velocidad reducida. Para cada revolución completa del eje rápido, el disco cicloidal rota un lóbulo (diente) en la dirección contraria.

Generalmente hay un lóbulo (diente) del disco cicloidal menos que hay pines y casquillos, el cual resulta a una relación de reducción igual al número de lóbulos del disco cicloidal.

La rotación reducida es transmitida al eje lento por unos pines que forman parte del mismo y que se encuentran introducidos en los agujeros interiores del disco cicloidal.

7.2.1.4. Ventajas del Reductor Ciclo

7.2.1.4.1. Baja Generación de Calor y Fricción

Los reductores Cyclo cuentan con lóbulos y casquillos con pines que rotan de manera acompañada, lo cual minimiza la fricción y asegura la vida larga de las piezas que transmiten potencia. Figura nº 69.

Los puntos de contacto en un reductor Cyclo son múltiples. Hasta 2/3 de los lóbulos están en contacto en cada momento, garantizando que toda la carga quede compartida. En la figura se aprecia como el estrés creado por la concentración de carga (gráficamente representado por los colores intensos en una prueba hecha con materiales foto elásticos bajo carga). Los discos cicloidales muestran poca intensidad de colores el cual representa poca concentración de cargas. Los engranes helicoidales reciben toda la carga en uno o dos dientes a la vez creando alto estrés y riesgos de desgaste o hasta rompimiento.

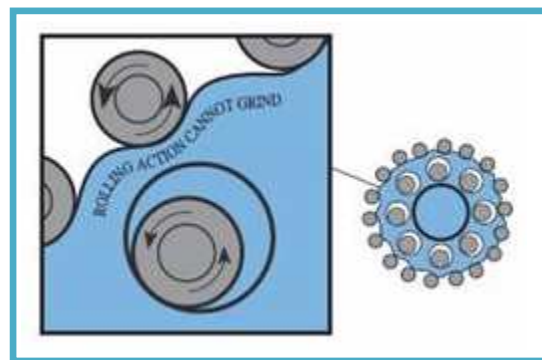


Figura Nº 69. Sistema de contacto en discos y rodamientos.

7.2.1.5. Reductores de corona o tornillo sin fin

El reductor más utilizado en la industria es el tipo corona. Este reductor consta de engranajes de bronce los cuales están lubricados en aceite y acoplados, por lo general, al motor eléctrico. En la figura nº 70 se muestran la gran variedad de variadores que existe.

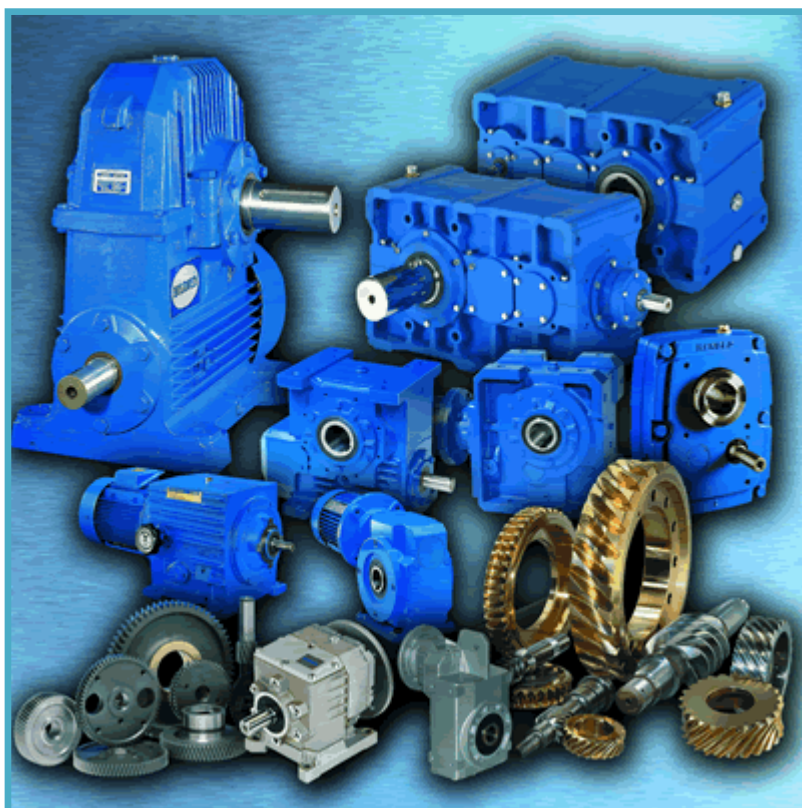


Figura N° 70. Tipos de reductores de corona.

7.2.1.5.1. Tipos de engranajes:

- ✓ *Engranajes rectos:* Tienen forma cilíndrica y funcionan sobre ejes paralelos. Los dientes son rectos y paralelos a los ejes.
- ✓ *Cremallera recta:* Un engranaje recto que tiene dientes rectos los cuales forman ángulos rectos con la dirección del movimiento.
- ✓ *Engranajes helicoidales:* Un engranaje helicoidal de forma cilíndrica y dientes helicoidales. Los engranajes helicoidales paralelos operan sobre ejes paralelos y, cuando ambos son externos, las hélices tienen sentido contrario.

- ✓ *Engranés con dientes helicoidales angulares:* Cada uno de ellos tienen dientes helicoidales con hélice hacia la derecha y hacia la izquierda, y operan sobre ejes paralelos. Estos engranajes también se conocen como de espigas de pescado.
- ✓ *Engranés con hélices cruzadas:* Estos engranajes operan sobre ejes cruzados y pueden tener dientes con el mismo sentido o con sentido opuesto. El término de engranajes de hélices cruzadas ha reemplazado el antiguo de engranaje en espiral.
- ✓ *Engranés de tornillo sin fin:* Es el engranaje que se acopla a un tornillo sin fin. Se dice que un engranaje de un tornillo sin fin que se acopla a un tornillo de este tipo cilíndrico es de una sola envolvente.
- ✓ *Engranés con tornillo sin fin cilíndrico:* Es una forma de engranaje helicoidal que se acopla a un engranaje de tornillo sin fin.
- ✓ *Engranés de tornillo sin fin de doble envolvente:* Este comprende tornillos albardillados sin fin, acoplado a un engranaje de tornillo sin fin.
- ✓ *Engranés cónicos:* Tienen forma cónica y operan sobre ejes que se interceptan y forman por lo común ángulos rectos.
- ✓ *Engranés cónicos rectos:* Estos engranajes tienen elementos rectos de los dientes los cuales si se prolongaran, pasarían por el punto de intersección de los ejes.
- ✓ *Engranés cónico helicoidales:* Tienen dientes curvos y oblicuos.
- ✓ *Engranés hipoides:* Semejantes, en su forma general, a los engranajes cónicos. Los engranajes hipoides operan sobre ejes que no se interceptan.

A continuación se muestran algunas ecuaciones con las cuales se pueden construir los engranajes.

7.2.1.5.2. Engranajes rectos:

Módulo: $m = \frac{\rho}{\pi}$

Paso circular: $\rho = m.\pi$

Diámetro primitivo: $d = m.z$

Distancia entre centros: $a = \frac{d_1 + d_2}{2}$

Addendum: $h_a = m$

Dedendum: $h_f = m .1,25$

Espacio libre de fondo: $c = m .0,25$

Profundidad de diente: $h = m . 2,25$

Profundidad de trabajo: $h' = m . 2$

Espesor circular del diente: $s = \frac{p}{2}$

Diámetro exterior: $d_a = m(z + 2)$

Diámetro base: $d_b = d . \cos x$

Longitud del diente: $b = 3 . p$

7.2.1.5.3. Engranajes cónicos

7.2.1.5.3.1. Engranaje cónico recto $\delta = 90^\circ$

Z = número de dientes

m = módulo (se entiende siempre que es el correspondiente a la cabeza mayor del diente)

d = diámetro primitivo

Da = diámetro exterior

dm = diámetro medio (en el centro de la longitud del diente)

Ha = Addendum = m

Hf = Dedendum = 1,25x m

h = profundidad del diente = 2,25 x m

$$s = \text{espesor del diente} = \frac{p}{2} = \frac{\pi \cdot m}{2}$$

δ = ángulo de presión

b = longitud del diente. No será nunca superior a 1/3 de la generatriz

$$R = \text{generatriz} = \frac{d}{2 \sin \delta}$$

$$\delta \text{ ángulo primitivo: } \operatorname{tg} \theta = \frac{h_f}{R} = \frac{2 \cdot 1,25 \sin \delta}{z}$$

δ_f = ángulo de Dedendum

δ_a = ángulo de Addendum

➤ con espacio libre de fondo convergente: $\operatorname{tg} \theta_a = \frac{h_a}{R}$

➤ para dentado normal: $\operatorname{tg} \theta_a = \frac{2 \operatorname{sen} \delta}{z}$

➤ con espacio libre de fondo constante: $\theta_{a.1} = \theta_{f.2}, \theta_{a.2} = \theta_{f.1}$

δ_a = ángulo de cara: $\delta_a = \delta + \delta_a$

D_a = diámetro exterior: $d_a = d + 2 \cdot h_a \cos \delta_v =$ numero de dientes virtual $\frac{z}{\cos \delta}$

7.2.1.5.3.2. Engranaje cónico recto con ángulos de ejes $\delta < 90^\circ$

Todas las dimensiones para los $\delta = 90^\circ$:

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{\operatorname{sen} E}{\frac{z_2}{z_1} + \cos E}$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{\operatorname{sen} E}{\frac{z_1}{z_2} + \cos E}$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = E$$

7.2.1.5.3.3. Engranaje cónico recto, con ángulo de ejes $\delta > 90^\circ$

Todas las dimensiones para los $\delta = 90^\circ$:

7.2.1.5.4. Engranaje Helicoidal:

$$\text{Módulo normal} = m_n = \frac{p_n}{\pi} = m_t \cos \beta$$

$$\text{Módulo circunferencial} = m_t = \frac{p_t}{\pi} = \frac{m_n}{\cos \beta} = m_n \sec \beta$$

$$\text{Número de dientes} = z$$

$$\text{Addendum} = h_a = m_n$$

$$\text{Dedendum} = h_f = m_n \times 1,25.$$

$$\text{Diámetro primitivo} = d = m_z \times z$$

$$\text{Diámetro exterior} = d_a = d + 2 \times h_a$$

$$\text{Distancia entre centros} = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$\text{Paso normal} = p_n = p_t \cdot \cos \beta = \pi \cdot m_t$$

$$\text{Paso circunferencial} = p_t = \frac{p_n}{\cos \beta} = p_n \cdot \sec \beta = \pi \cdot m_t \quad n \cdot \sec \beta = \pi \cdot m_t$$

$$\text{Paso de hélice} =$$

$$p_n = \frac{d \cdot \pi}{\text{tg } \beta}$$

$$\text{Ángulo de hélice} = \delta$$

$$\cos \beta = \frac{m_n}{m_c}$$

$$\text{tg } \beta = \frac{d \cdot \pi}{p_n}$$

7.2.2. Actuadores

Existen, principalmente, dos tipos de actuadores, los actuadores neumáticos y los actuadores eléctricos. Los actuadores neumáticos funcionan con aire y estos son lubricados por pequeñas capsulas de aceite ubicadas en determinados puntos de las líneas o maquinas. Los actuadores eléctricos, en cambio, funcionan con motores eléctricos y estos son controlados con circuitos electrónicos. Por lo general existen dos formas de activar un actuador, de manera on/off, es decir, abierto o cerrado y, de manera proporcional, lo cual implica un activación utilizando cualquiera de los sistemas mencionados en el capítulo 2 (Proporcional, Integrativo, Derivativo o una mezcla de ellos).

El trabajo realizado por un actuador neumático puede ser lineal o rotativo. El movimiento lineal se obtiene por cilindros de émbolos (estos también proporcionan movimiento rotativo con variedad de ángulos por medio de actuadores del tipo piñón-cremallera). También están los actuadores de rotación continua (motores neumáticos), movimientos combinados e incluso alguna transformación mecánica de movimiento que lo hace parecer de un tipo especial.

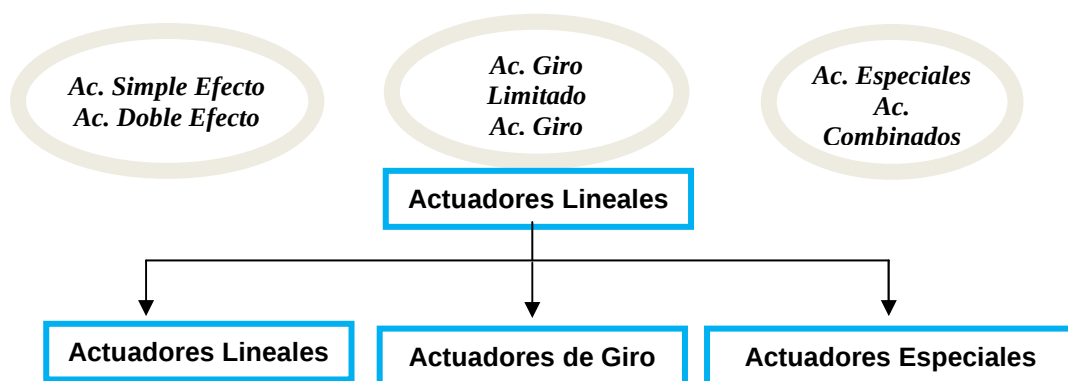


Figura N° 71. Clasificación general de los actuadores.

A continuación se describen los distintos tipos de los actuadores.

7.2.2.1. Actuadores Lineales

Los cilindros neumáticos independientes de su forma constructiva, representan los actuadores más comunes que se utilizan en los circuitos neumáticos. Existen dos tipos de fundamentos de los cuales se derivan construcciones especiales.

7.2.2.1.1. Cilindros de simple efecto

Un cilindro de simple efecto posee una entrada de aire para producir una carrera de trabajo en un solo sentido. El émbolo se hace retorna por medio de un resorte interno o por algún otro medio externo como cargas, movimientos mecánicos, etc. Puede ser de tipo “normalmente dentro” o “normalmente afuera”. En la figura nº 72 se ilustran las dos condiciones del estado del cilindro.

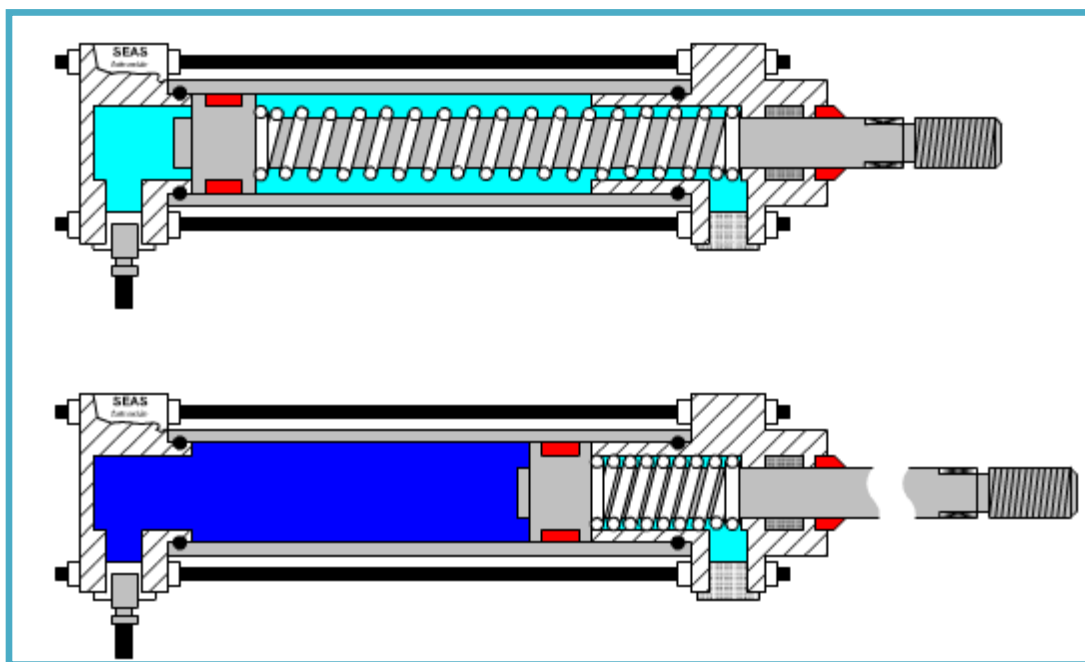


Figura Nº 72. Cilindros de simple efecto, normalmente adentro.

Los cilindros de simple efecto se utilizan para sujetar, marcar, expulsar, etc. Tienen un consumo de aire algo más bajo que un cilindro de doble efecto de igual tamaño. Sin embargo, hay una reducción de impulso debida a la fuerza contraria del resorte, así que puede ser necesario un diámetro interno algo más grande para conseguir una misma fuerza. También la adecuación del resorte tiene como consecuencia una longitud global más larga y una longitud de carrera limitada,

debido a un espacio muerto. En la figura nº 73 se ilustran la simbología de los cilindros de simple efecto.

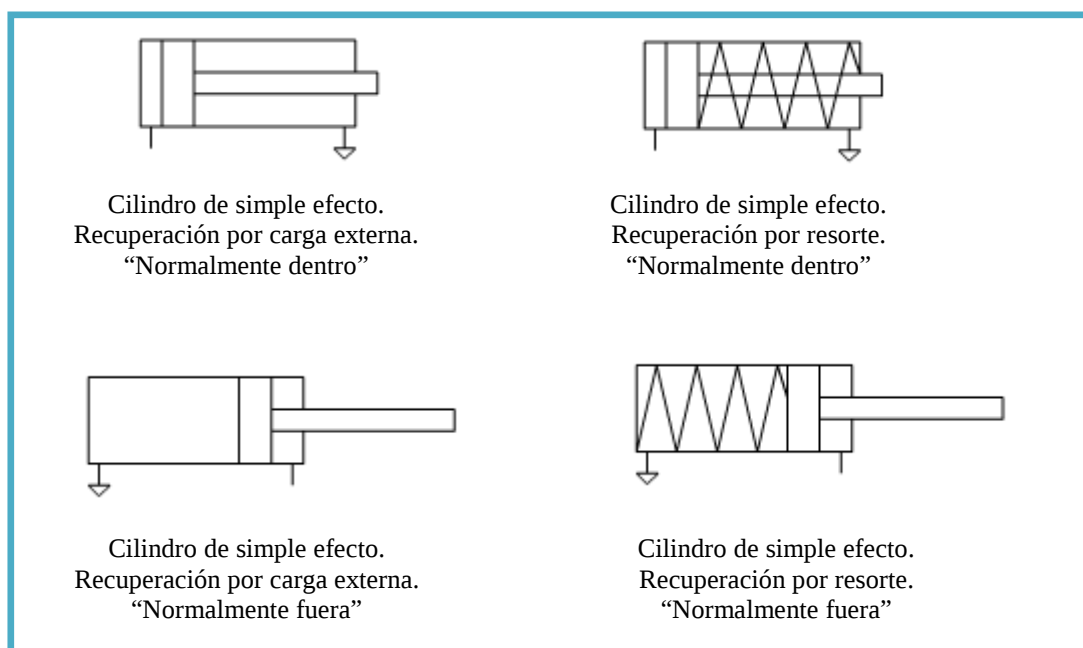


Figura Nº 73. Símbolos de los actuadores de simple efecto.

La variedad constructiva de los cilindros de simple efecto es muy importante, pero todos ellos presentan la misma mecánica de trabajo. Se muestran a continuación algunos ejemplos de los mismos se muestran en la figura nº 74.

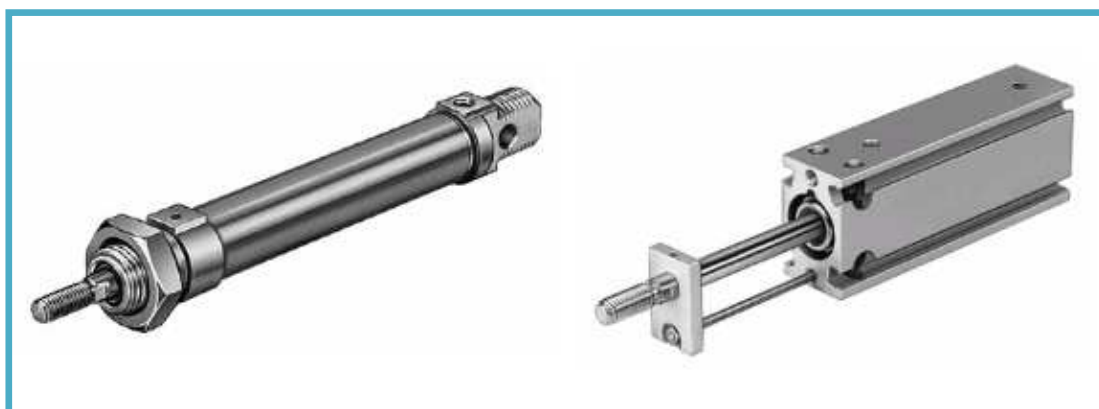


Figura Nº 74. Cilindro normalmente dentro, cilindro normalmente fuera.



Figura 75. Cilindro compacto normalmente dentro y micro cilindro.

Como se puede observar, los fabricantes ofrecen soluciones para casi todas las necesidades que se pueden presentar en el diseño de la automatización neumática.

7.2.2.1.2. Cilindros de doble efecto

Los cilindros de doble efecto son aquellos que realizan tanto su carrera de avance como de retroceso por acción del aire comprimido. Su denominación se debe a que emplean las dos caras del émbolo (aire en ambas caras), por lo que estos sí pueden realizar trabajo en ambos sentidos.

Sus componentes internos son prácticamente iguales a los del simple efecto, pero con pequeñas variaciones en su construcción. Algunas de las más notables las encontramos en la culata anterior, que ahora ha de tener un orificio roscado para poder realizar la inyección de aire comprimido (en la disposición de simple efecto este orificio no suele presentarse a ser conexionado, siendo su función la comunicación con la atmosfera con el fin de que no se produzcan contrapresiones en el interior de la cámara).

El perfil de las juntas dinámicas también variará debido a que se requiere la estanqueidad entre cámaras, algo innecesario en la disposición de simple efecto. En la figura nº 76 se ilustra el cilindro de doble efecto.

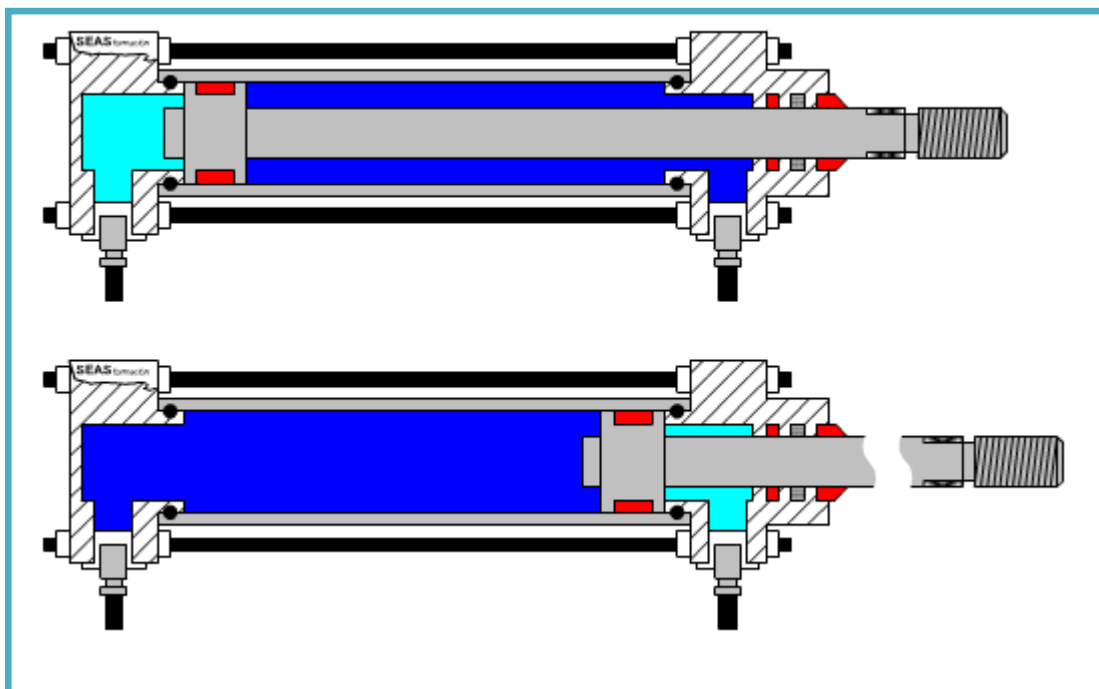


Figura N° 76. Cilindro de doble efecto.

El cambio de aplicación de los cilindros de doble efecto es mucho más extenso que el de los de simple efecto, incluso cuando no es necesaria la realización de esfuerzo en ambos sentidos. Esto debido a que, por norma general (en función del tipo de válvula empleada para el control), los cilindros de doble efecto siempre contienen aire en una de sus dos cámaras, por lo que se asegura el posicionamiento.

Para poder realizar un determinado movimiento (avance o retroceso) en un actuador de doble efecto, es preciso que entre las cámaras exista una diferencia de presión. Cuando una de las cámaras recibe aire a presión, la otra está comunicada con la atmósfera, y viceversa. Este proceso de conmutación de aire entre cámaras nos ha de preocupar poco, puesto que es realizado automáticamente por la válvula de control asociada, actuadores con disposiciones de 4 ó 5 vías con 2 ó 3 posiciones.

7.2.2.1.3. Desfase fuerza/velocidad

Los actuadores lineales de doble efecto, se produce un desfase entre la fuerza provocada a la salida y a la entrada del vástago y, lo mismo ocurre con la velocidad. Este efecto se debe a la diferencia que hay entre los volúmenes de las cámaras formadas (en consecuencia, del volumen ocupado por el vástago del cilindro).

Cuando se aplica aire a una cámara que fuerza la salida del vástago, éste actúa sobre una superficie conocida, que denominamos A_1 . Es conocido que el valor de la fuerza provocada responde a la formula nº 124:

$$F = P \times A$$

Ecuación Nº 124.

Así, para calcular el valor de la fuerza de salida, realizamos la siguiente operación:

$$F_{\text{salida}} = P \times A_1, \text{ resultando un valor } F_1$$

Para el cálculo de la fuerza provocada en el retroceso, se aplica la misma fórmula y valor de presión, pero se debe tener en cuenta que el área sobre la cual se aplica ya no es A_1 , sino A_1 menos el área del vástago (ya que ésta no es efectiva). Ahora se denomina, para diferenciarla, A_2 .

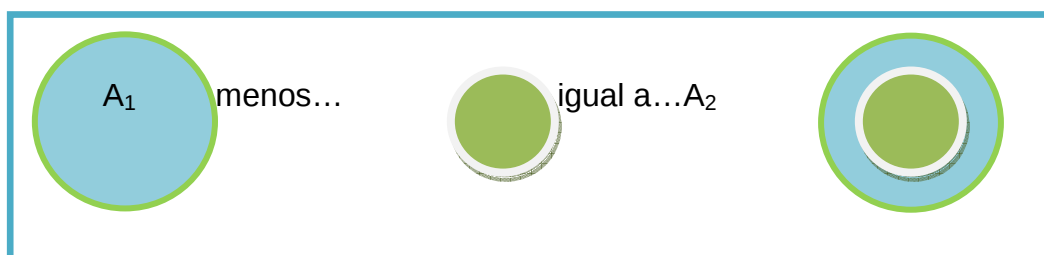


Figura Nº 77. distancias entre las secciones efectivas de un cilindro.

Con lo anterior se obtiene:

$$F_{\text{retorno}} = P \times A_2, \text{ resultando un valor } F_2$$

Con lo anterior se puede deducir, a igualdad de valor de presión, y debido a la desigualdad de áreas, el valor de la fuerza de salida (F_1) es mayor que el valor de la fuerza de retroceso (F_2).

Lo anterior mencionado es aplicable a la velocidad para el vástago, ya que si el volumen de la cámara de retorno es menor, para una igualdad de caudal le costará menos llenarse, y por ello la velocidad de retorno será mayor. En consecuencia, los actuadores de doble efecto, para igualdad de presión y caudal:

- ✓ La velocidad de retorno es mayor que la de avance.
- ✓ La fuerza provocada a la salida es mayor que la fuerza de retorno.

$$F_{\text{salida}} > F_{\text{retorno}}; V_{\text{retorno}} > V_{\text{salida}}$$



Figura N° 78. Cilindro de doble efecto convencional.

Los cilindros de doble efecto convencionales presentan un desfase de fuerza y velocidad. Este efecto puede ser corregido mecánicamente o bien por automatismo.

Los desfases mencionados anteriormente pueden corregirse mediante la utilización de cilindros de doble vástago. Estos disponen de vástagos a ambos lados del émbolo, consiguiendo así igualdad entre las áreas de acción y volúmenes. Debido a ello se consigue igualdad de fuerzas y velocidades en las

carreras (perdidas de fuerza y aumento de la velocidad para cilindros de igual tamaño).

7.2.2.1.4. Cilindros de doble vástago

Este tipo de cilindros tiene un vástago corrido hacia ambos lados. La guía del vástago es mejor, porque dispone de dos rodamientos y la distancia entre éstos permanece constante. Por esta razón, este cilindro puede absorber también cargas laterales pequeñas. Los emisores de señal pueden disponerse en los lados libres del vástago. En la figura nº 79 se ilustra este tipo de vástago.

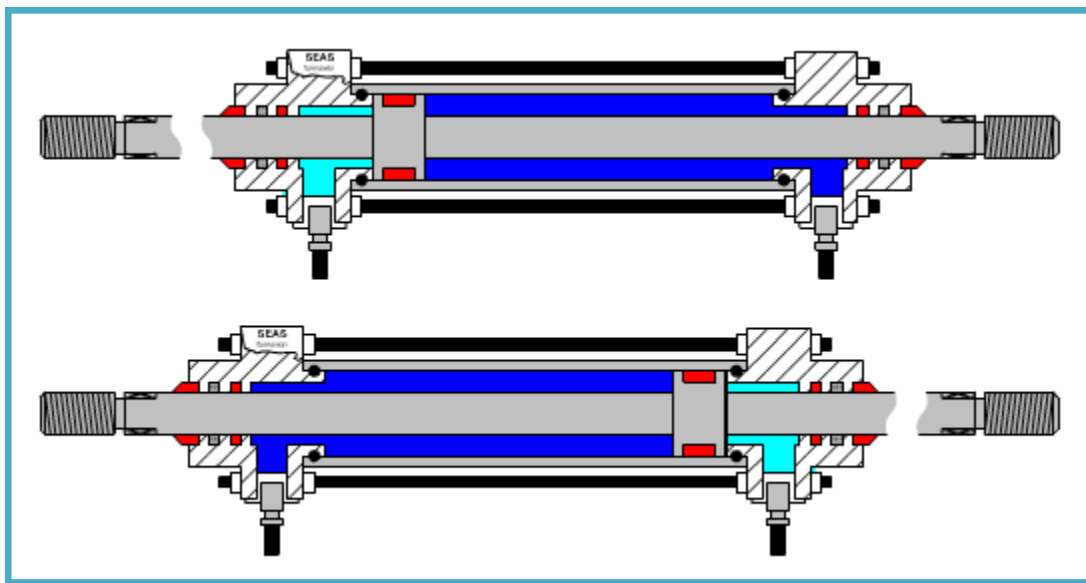


Figura 79. Cilindro de doble vástago.

La fuerza es igual en los dos sentidos (las superficies del émbolo son iguales), al igual que sucede con la velocidad de desplazamiento. Este tipo de cilindros recibe, también, el nombre de cilindro compensado y es importante mencionar que el equilibrio entre fuerzas y velocidad de lo que puede considerarse como “teóricos” avances y retornos de vástagos.

Con la utilización de cilindros de doble efecto se tiene:

Fuerza de avance = fuerza de retorno.

Velocidad de avance = velocidad de retorno.

Para que se pueda cumplir lo mencionado, se debe cumplir que los diámetros deben ser iguales. En la figura nº 80 se muestra un vástago de doble efecto.

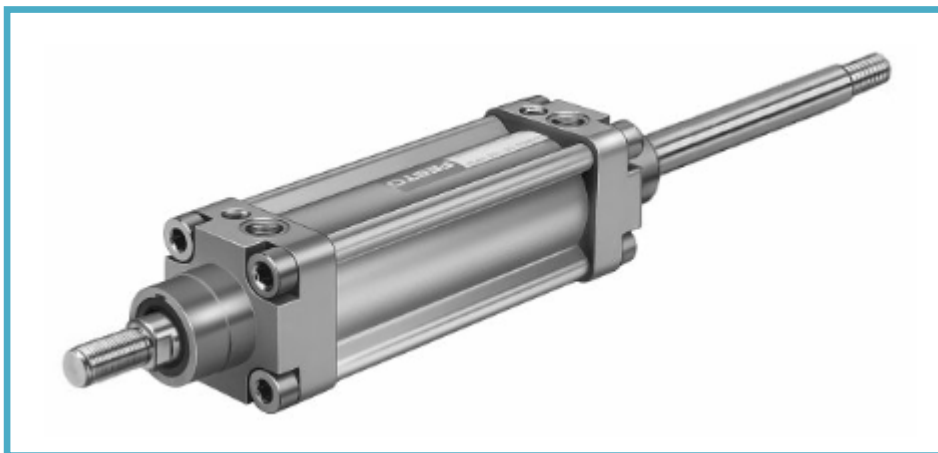


Figura Nº 80. Cilindro de doble vástago o compensado.

Simbólicamente los cilindros de doble efecto muestran su doble punto de conexión. En el caso de los doble vástago (efecto compensador), también se puede apreciar su mecánica doble efecto.

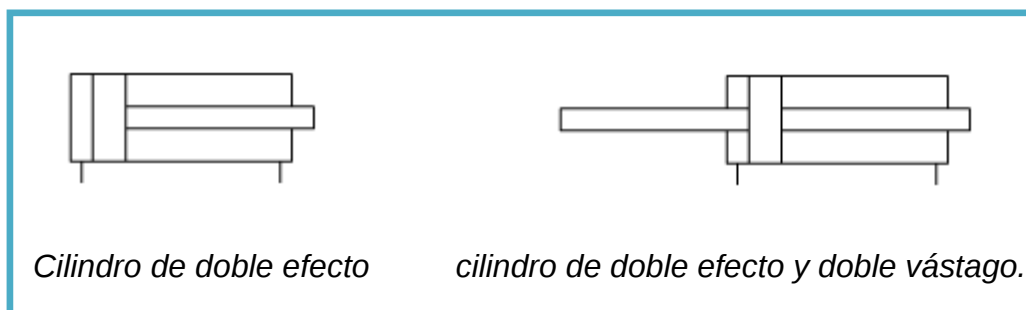


Figura 81. Símbolos de los cilindros de doble efecto.

7.2.3. Ejemplos de uso de actuadores

A continuación se dan algunos diagramas a modo de ejemplo.

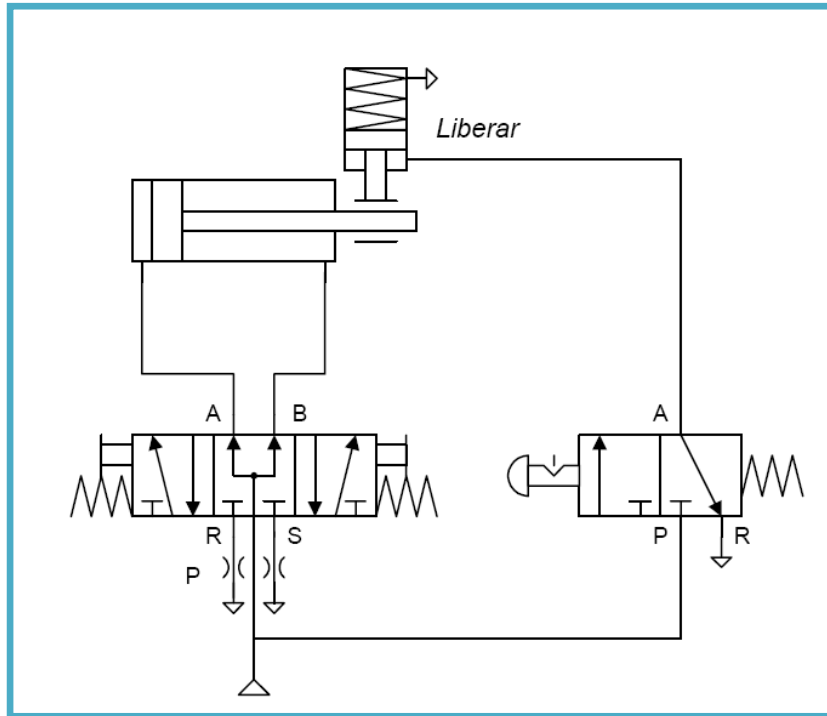


Figura N° 82. Ejemplo de aplicación de cilindro.

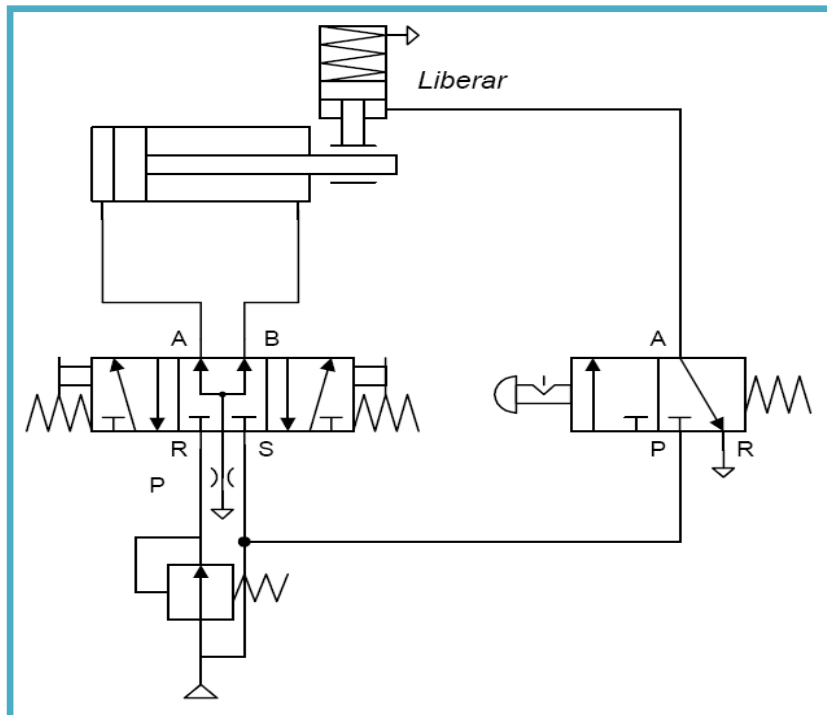


Figura N° 83. Ejemplo de aplicación de cilindro.

7.3. Agitadores

Los agitadores, como su nombre lo indica, se utilizan para agitar distintos tipos de líquidos o mezclas medianamente acuosas.

En este apartado se mencionaran algunos de los agitadores utilizados, ya sea en la industria como en laboratorios.

El principio de funcionamiento se basa, por lo general, en un motor de inducción con un vástago de un determinado largo (dependiendo de la altura del recipiente donde sea instalado) y los alabes o aspas también dependerán del tipo de material o sustancia a revolver, ya que esta deberá romper la inercia del producto y además debe tener la fuerza necesaria para mantener en movimiento lo que se quiere agitar.

Los agitadores se utilizan por dos razones, primero para mantener en movimiento algún líquido, para que este no decante alguno de sus compuestos y mantener uniforme la temperatura de éste; por otro lado también se utiliza para mezclar dos o más productos.

A continuación se muestran algunos tipos de agitadores para uso en la industria y laboratorios.



Figura N° 84. Agitadores para uso en laboratorio.

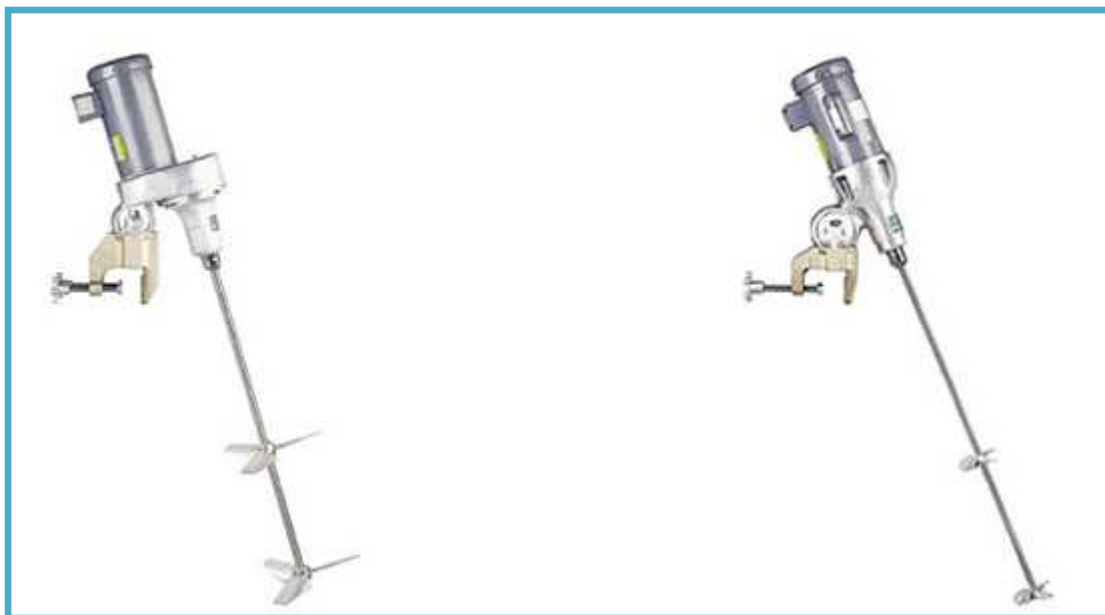


Figura N° 85. Agitadores portátiles.



Figura N° 86. Agitadores fijos.

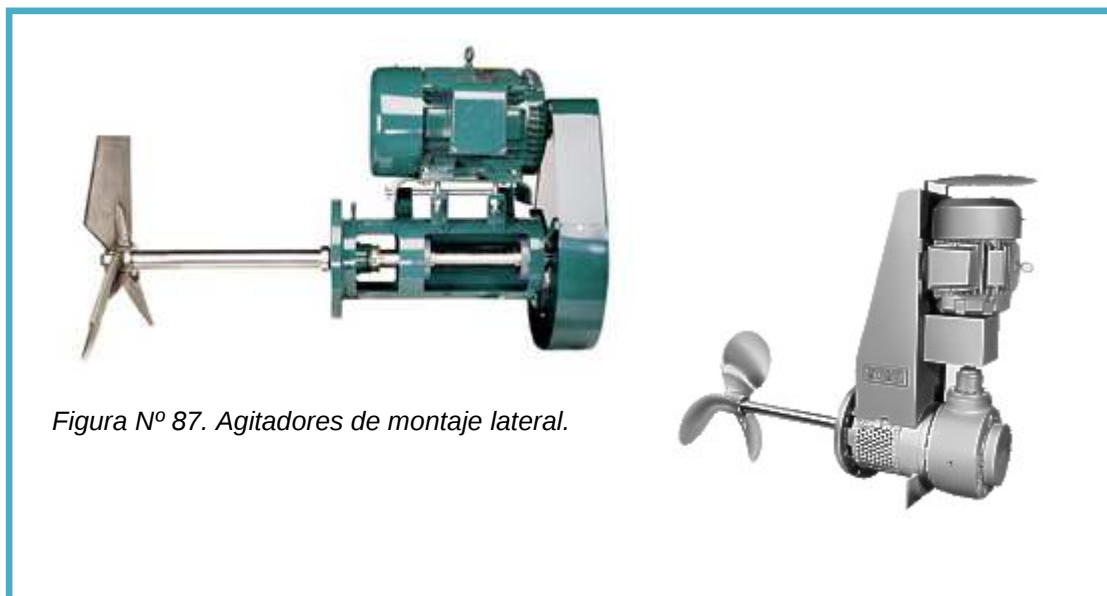


Figura N° 87. Agitadores de montaje lateral.

Así como existen distintos tipos de agitadores, también existen distintos tipos de alabes o hélices, a continuación se darán a conocer algunos.



Figura N° 88. Tipos de hélices para agitadores.

Las hélices y agitadores que se han mencionado, se utilizan en una gran variedad de productos especialmente en lo que ha mezclado de líquidos se refiere.

7.4. Configuración en terreno entre el PLC, la red y los periféricos

En este apartado se ilustraran las posibles configuraciones que puede tomar el diseño que se está presentando en este trabajo,

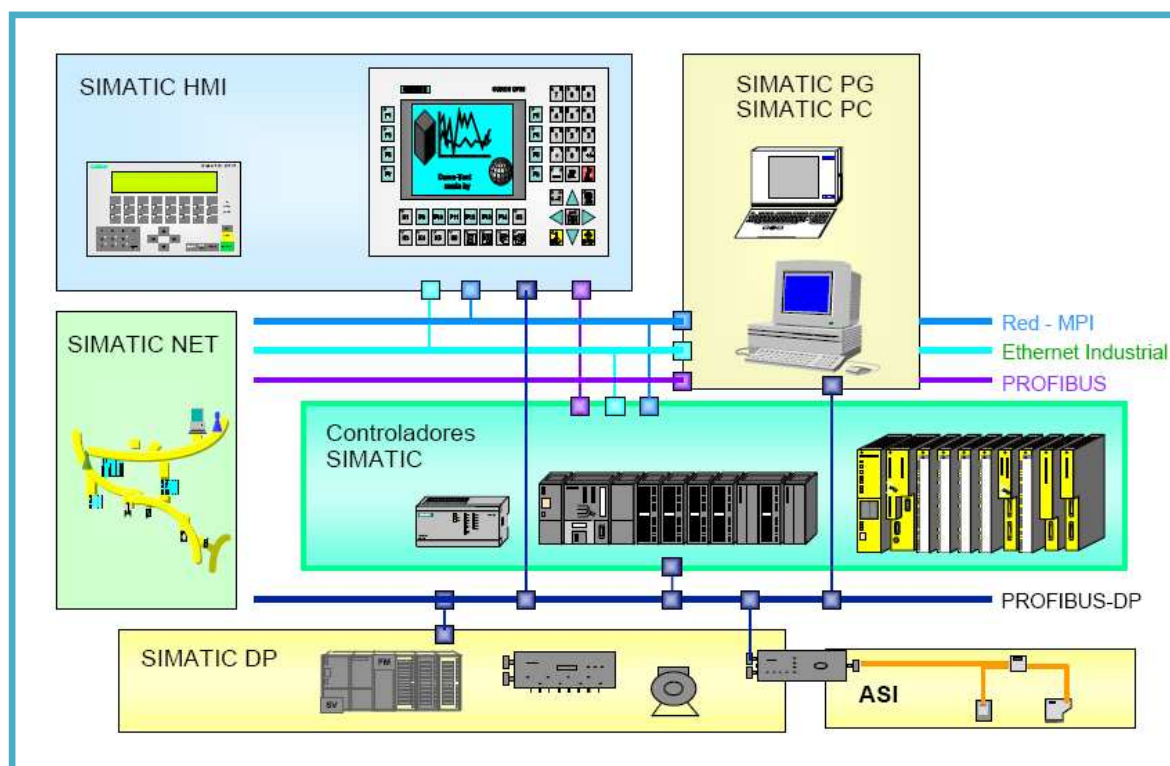


Figura N°89. Equipos involucrados en sistema utilizando la serie Simatic de Siemens.

En la siguiente imagen se ilustra la distribución de los equipos y los diferentes cables y protocolos utilizados por Siemens, el sistema recibe el nombre de Freeport, figura n° 90.

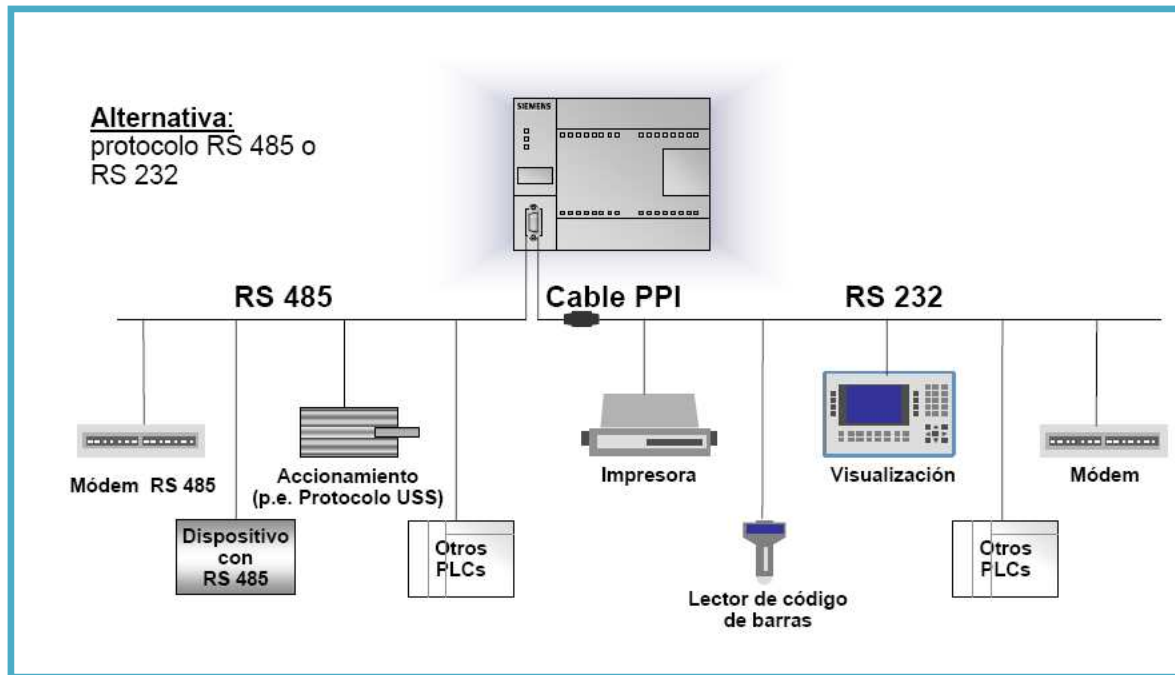


Figura N° 90. Comunicación Freeport. SIMATIC S7-200 de Siemens.

En la imagen de a continuación se muestran los dispositivos que posee Siemens para poder transmitir de un protocolo a otro, en este caso de RS232 a RS484.

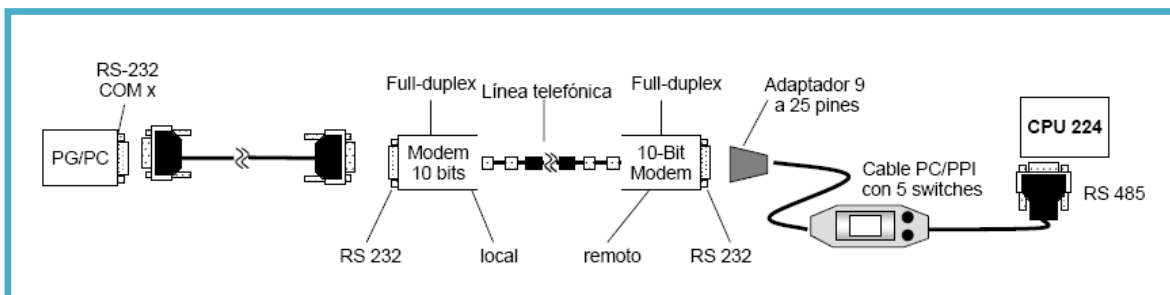


Figura N° 91. Transmisión de RS232 a RS485.

CAPITULO VIII

8. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL

8.1. Introducción

En la industria los protocolos de comunicación, en principio, son un conjunto de reglas que permiten la transferencia e intercambio de datos entre los distintos dispositivos que conforman una red. Estos han tenido un proceso de evolución gradual a medida que la tecnología electrónica ha avanzado y muy en especial en lo que se refiere a los microprocesadores.

Un importante número de empresas en nuestro país presentan la existencia de islas automatizadas (células de trabajo sin comunicación entre sí), siendo en estos casos las redes y los protocolos de comunicación Industrial indispensables para realizar un enlace entre las distintas etapas que conforman el proceso.

La irrupción de los microprocesadores en la industria ha posibilitado su integración a redes de comunicación con importantes ventajas, entre las cuales figuran:

- Mayor precisión derivada de la integración de tecnología digital en las mediciones.
- Mayor y mejor disponibilidad de información de los dispositivos de campo.
- Diagnóstico remoto de componentes.

8.2. Buses de Campo

La integración de las mencionadas islas automatizadas suele hacerse dividiendo las tareas entre grupos de procesadores jerárquicamente anidados. Esto da lugar a una estructura de redes Industriales, las cuales es posible agrupar en tres categorías:

- Buses de campo
- Redes LAN
- Redes LAN-WAN

En esta oportunidad nos referiremos a los protocolos de comunicación más usados en la industria.

Los buses de datos que permiten la integración de equipos para la medición y control de variables de proceso, reciben la denominación genérica de buses de campo.

Un bus de campo es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipamientos industriales utilizados en procesos de producción.

El objetivo de un bus de campo es sustituir las conexiones punto a punto entre los elementos de campo y el equipo de control a través del tradicional lazo de corriente de 4 -20mA o 0 a 10V DC, según corresponda. Generalmente son redes digitales, bidireccionales, multipunto, montadas sobre un bus serie, que conectan dispositivos de campo como PLCs, transductores, actuadores, sensores y equipos de supervisión.

Varios grupos han intentado generar e imponer una norma que permita la integración de equipos de distintos proveedores. Sin embargo, hasta la fecha no existe un bus de campo universal.

Los buses de campo con mayor presencia en el área de control y automatización de procesos son:

- HART.
- Profibus.
- Fieldbus Foundation.

8.2.1. Hart

El protocolo HART (High way-Addressable-Remote-Transducer) agrupa la información digital sobre la señal analógica típica de 4 a 20 mA DC. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 1 y 0 respectivamente y que en conjunto forman una onda sinusoidal que se superpone al lazo de corriente de 4-20 mA, ver figura 92. Este protocolo utiliza el protocolo Bell 200 que permite la superposición simultánea a niveles bajos de una señal de comunicaciones digitales.

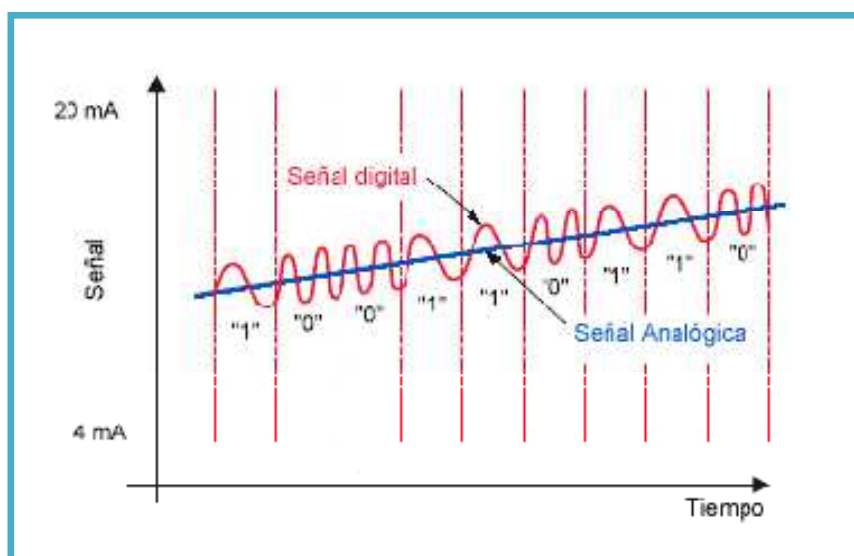


Figura N° 92. Señal de transmisión con Protocolo Hart.

Como la señal promedio de una onda sinusoidal es cero, no se añade ninguna componente DC a la señal analógica de 4-20 mA., lo que permite continuar utilizando la variación analógica para el control del proceso. Ver Características en Tabla N°1

8.2.2. Profibus

PROFIBUS (**PRO**cess **Field BUS**) es una normativa Alemana relativa a los buses de proceso y de campo. El estándar PROFIBUS especificado en la norma "DIN 19.245, partes 1 y 2". En la parte 1, se describen las características funcionales, eléctricas y mecánicas para un bus de campo con una transmisión serie. El objetivo de este esfuerzo de normalización es poder conectar en una red local autómatas programables y equipos de campo como sensores, actuadores, transmisores, máquinas herramientas de control numérico, etc. de diferentes fabricantes (sistema abierto).

La arquitectura PROFIBUS está modelada de acuerdo con el modelo de referencia ISO/OSI, restringida a 3 capas:

- Capa de aplicación (compuesta de las subcapas FMS y LLI, Layer 7)
- Capa de enlace (FDL Layer, Layer 2)
- Capa física (PHY Layer, Layer 1)

La especificación de las dos capas inferiores está descrita en "DIN 19.245, parte 1", mientras que la capa de aplicación lo está en "DIN 19.245, parte 2". Las capas 3 a 6 del modelo de referencia ISO/OSI no están implantadas en el modelo PROFIBUS, estado su funcionalidad transferida a la capa de aplicación.

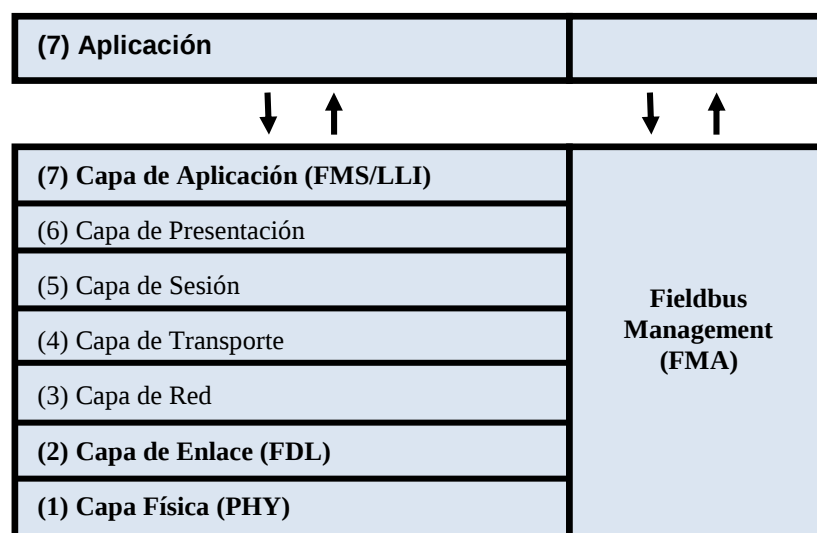


Figura N° 93. PROFIBUS en el modelo de Referencia ISO/OSI

La elección del medio de transmisión y del interface físico de bus vendrá determinada principalmente por el área de aplicación del sistema de bus de campo. Se han considerado los costes de compra e instalación, además del grado de fiabilidad en la transmisión. Por lo tanto, el estándar PROFIBUS prevé la posibilidad de especificar diferentes tipos de interfaces físicos. De hecho, la especificación de PROFIBUS está basada principalmente en estándares ya existentes. Pero, con el fin de satisfacer los requerimientos de varias áreas de aplicación (automatización de procesos de fabricación, edificios inteligentes, etc.) se especificó el interface físico del estándar EIA RS-485.

Las capas 1 y 2 se encargan de asegurar la correcta transmisión de los datos, independientemente de su significado. Las características más importantes de estas dos capas, según la norma, son:

- Velocidades de transmisión: 9.6, 19.2, 93.75, 187.5 y 500 KBaudios.
- Cableado: par trenzado apantallado de acuerdo con el estándar Americano EIA. RS-485 (ISO DP 8482). Ambos extremos del cable deben incorporar resistencias terminales de bus. Los cables se conectan a los dispositivos por medio de conectores sub-D de 9 pines.
- Número máximo de estaciones: 127 (32 sin utilizar repetidores).
- Distancias máximas alcanzables con cable de 0.22 mm. de diámetro:
 - ✓ hasta 93.75 KBaudios: 1200 metros.
 - ✓ 187.5 KBaudios: 600 metros.
 - ✓ 500 KBaudios: 200 metros.
- Las estaciones pueden ser activas (maestros) o pasivas (esclavos).
- Medio de acceso: híbrido.
 - ✓ maestro-esclavo.
 - ✓ pase de testigo entre las estaciones maestras.
- Acceso al medio determinántico, asegurándose así los tiempos de respuesta.
- Comunicaciones por medio de conexiones de tipo bidireccionales, multicast o broadcast.

- Servicios:
- ✓ con o sin reconocimiento.
 - ✓ cíclicos o acíclicos.

8.2.2.1. Capa Física:

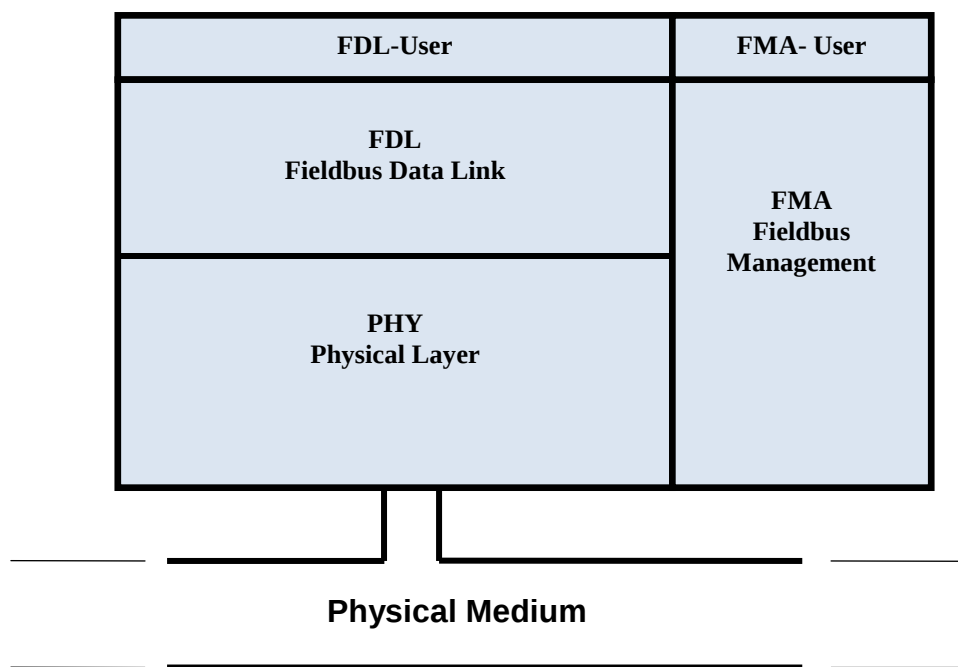


Figura Nº 94. Capa Física.

La transmisión de datos se realiza de manera *simétrica* de acuerdo con el estándar Americano **RS-485**. Las versiones más simples utilizan únicamente *par trenzado apantallado*, puesto que:

- ✓ Permite operar en ambientes con EMI a elevadas velocidades de transmisión.
- ✓ Su instalación es sencilla y su coste bajo.

Si no se esperan fuertes interferencias electromagnéticas (EMI), puede emplearse par trenzado sin apantallamiento.

La conexión de los equipos al bus se realizará por medio de un conector sub-D de 9 pines con la siguiente asignación, figura nº 3:

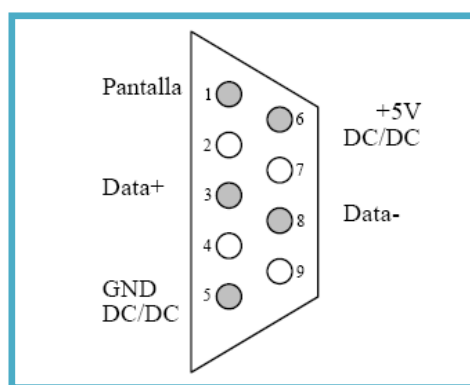


Figura N° 95. Asignación de polos en el conector DB9.

A diferencia del extendido estándar RS-232 (V.24), en el que se utilizan *niveles* absolutos de tensión para reconocer la información digital, en la transmisión RS-485 la información se reconoce por la *polaridad* de la tensión recibida. De este modo, es posible emplear velocidades de transmisión muy elevadas (hasta 10 Mbit/s) en ambientes con interferencias electromagnéticas.

La codificación utilizada para los bits de información es la **NRZ** (Non-Return-to-Zero), muy utilizada en tecnologías digitales. Cada bit consiste de un pulso rectangular, cuyo ancho coincide con el periodo de reloj utilizado. Una tensión no nula identifica al '1' lógico, mientras que una tensión nula identifica al '0' lógico. En la codificación RTZ (Return-To-Zero), el '1' lógico no se identifica por el nivel de tensión, sino por el flanco negativo que aparece a mitad de periodo. Por ello, en este código, el ancho de pulso es la mitad del periodo del reloj.

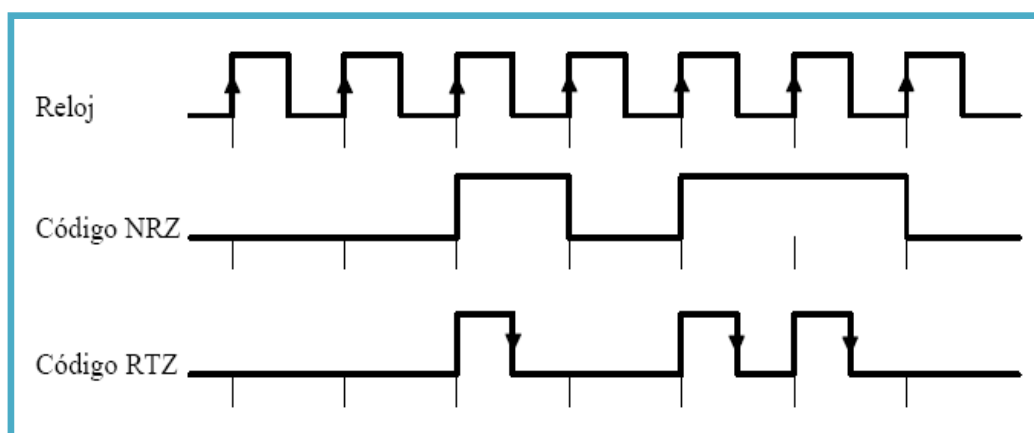


Figura N° 96. Códigos NRZ y RTZ.

En PROFIBUS se utiliza una técnica de transmisión asíncrona, en la que los relojes del emisor y receptor no están sincronizados, y la transmisión está orientada a caracteres.

Cada caracter consiste de un total de 11 bits:

- ✓ 1 bit de comienzo ('Start bit', ST) que es siempre un '0' lógico.
- ✓ 1 bit de parada ('Stop bit', SP) que es siempre un '1' lógico.
- ✓ 1 bit de paridad ('Parity bit', P).
- ✓ 8 bits de datos ($2^0 \dots 2^7$).

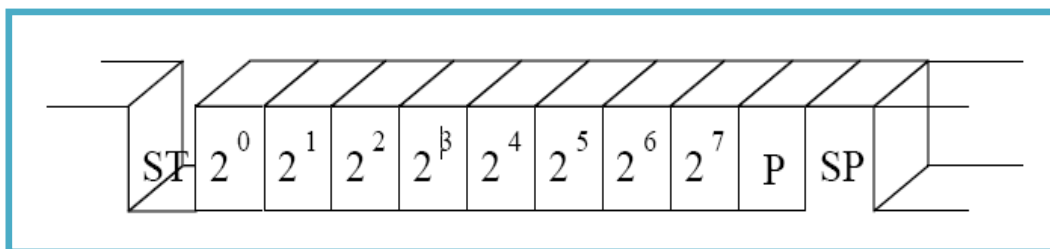


Figura Nº 97. Estructura de un caracter UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter).

Para asegurar la correcta recepción de los datos, los bits transmitidos deben ser muestreados en la mitad del periodo de duración del bit después de su comienzo. Esto requiere que el reloj del receptor duplique como mínimo el del transmisor. El estándar PROFIBUS permite desviaciones en las frecuencias de los relojes menores del 0.3%.

Entre dos mensajes transmitidos debe esperarse un tiempo definido en la norma como **Idle Time**. Este tiempo se caracteriza por la presencia de un '1' lógico en el bus. Su duración mínima ha de ser la equivalente al envío de tres caracteres, esto es, 33 periodos de bit.

La utilización de un **Idle Time** presenta dos ventajas importantes:

- ✓ Las estaciones pasivas activarán sus receptores sólo cuando haya transcurrido este tiempo de espera. Tras él, chequearán la dirección de destino del siguiente mensaje y desconectarán el receptor si no va dirigido a ellas. Este mecanismo de escucha 'selectiva' reduce la carga del protocolo, de modo que se libera mayor capacidad de procesamiento para el programa de aplicación de dichas estaciones.

- ✓ Las estaciones que acaban de transmitir pueden deshabilitar su transmisor durante este tiempo de espera. Tras la desconexión, la resistencia terminadora de bus se encarga de mantener éste en el '1' lógico.

Todas las estaciones activas monitorizarán el **Idle Time** por medio de temporizadores controlados por hardware. Un '0' lógico detectado en este periodo (causado, por ejemplo, por ruidos) será interpretado como un error que hará que el temporizador se re dispere.

En el futuro se planea utilizar el estándar PROFIBUS en instalaciones con alto riesgo de explosión. No obstante, las especificaciones necesarias todavía no han sido realizadas. También será ventajoso utilizar otras técnicas de transmisión, como la fibra óptica, que permitirán alcanzar mayores distancias y utilizar otras topologías. En esta área, existen ya realizaciones comerciales [como la red SINEC L2FO ('Fiber Optics') de SIEMENS].

8.2.2.2. Capa de Enlace:

En la terminología PROFIBUS, a la capa 2 se la conoce como la capa FDL (Fieldbus Data Link), capa de enlace.

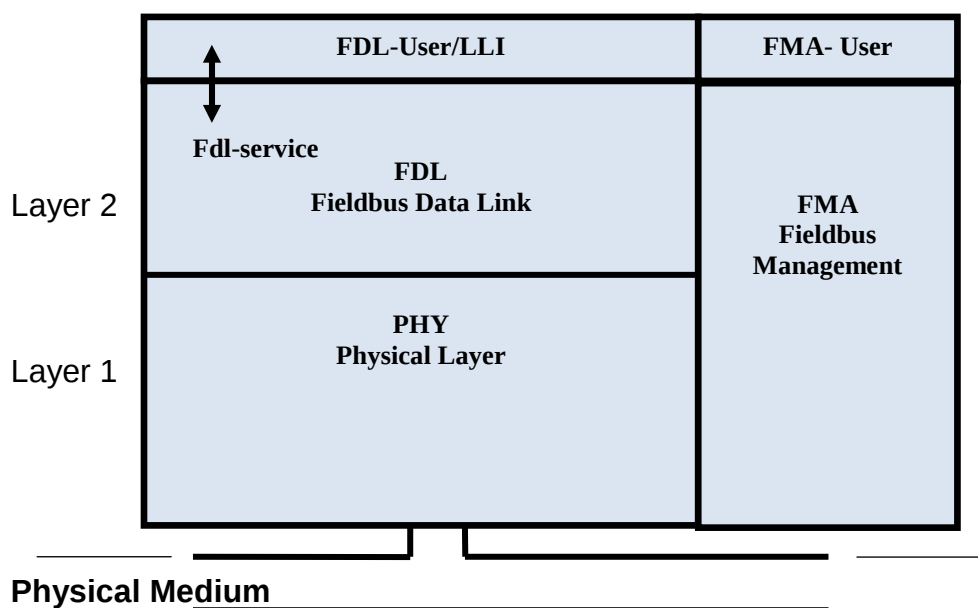


Figura N° 98. Estructura de la capa 2.

Aunque la unidad mínima de información en PROFIBUS es el caracter, el protocolo utilizado está orientado a paquetes de información (mensajes). Estos mensajes consisten en una cadena ordenada de caracteres enviados de acuerdo con las especificaciones de la capa física.

Para desarrollar los servicios de transferencia de datos, es preciso definir unos formatos de mensaje estandarizados en los que, además de buscar la máxima eficiencia en la codificación, se asegura una transmisión de datos fiable. Por esta razón, se incluye en los mensajes información redundante que inevitablemente aumenta la carga de protocolo.

En la figura siguiente se muestran tres ejemplos de formatos de mensajes en PROFIBUS. El primero de ellos se presenta un mensaje de llamada (*'call frame'*) sin campo de datos, que es el mensaje más corto posible. Un mensaje siempre empieza por un delimitador de inicio (**SD**, 'Start Delimiter'), que contiene el código del formato de mensaje. A continuación aparece la dirección de destino (**DA**, 'Destination Address') y la dirección de origen (**SA**, 'Source Address') que identifican al receptor y transmisor del mensaje, respectivamente. Tras ellos sigue el control de mensaje (FC, 'Frame Control'), por el cual se le indica al receptor el tipo de mensaje; en él también se incluye la prioridad del mensaje y el control de la información que evita, por ejemplo, la pérdida del mensaje. Al final del mensaje aparece la secuencia de verificación de mensaje (**FCS**, 'Frame Check Structure'), que sirve para verificar la consistencia de los datos recibidos, seguido del delimitador de final de mensaje (**ED**, 'End Delimiter'). La estación receptora reconoce la recepción del mensaje transmitiendo un pequeño mensaje de reconocimiento (1 único caracter).

Los ejemplos siguientes son auto explicativos. El último de ellos puede utilizar la máxima longitud de mensaje en la capa 2 (255 caracteres), de los cuales 246 son información.

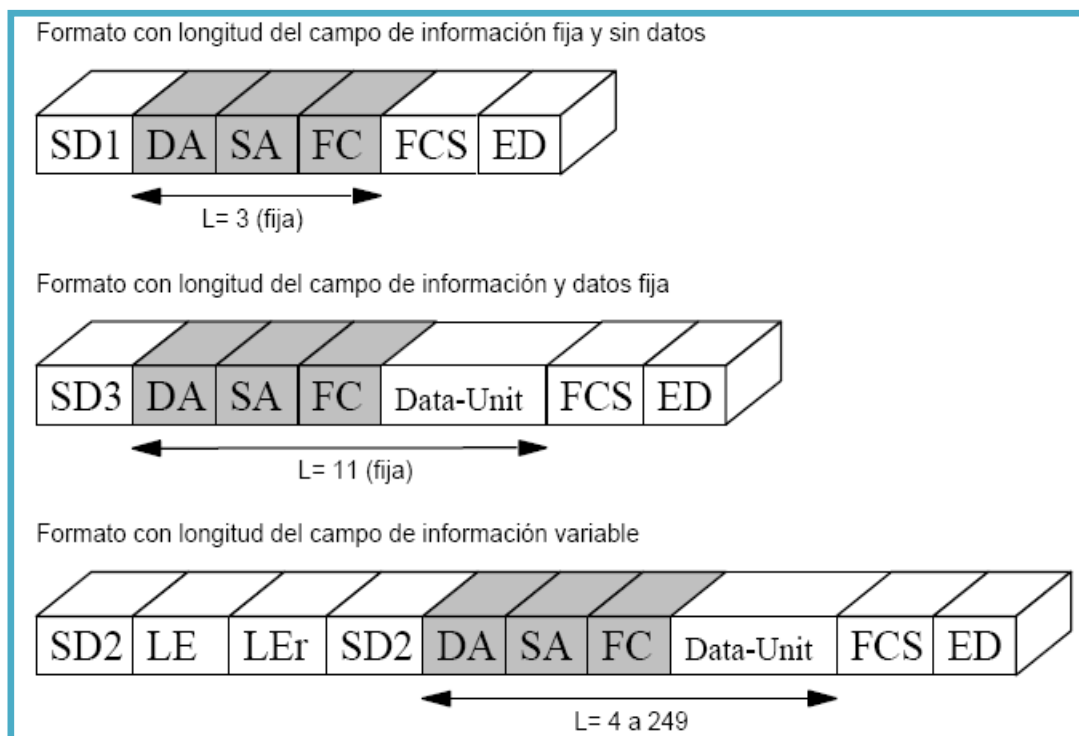


Figura N° 99. Tres ejemplos de mensajes PROFIBUS con HD=4.

- ✓ SD1.SD4: Start Delimiter (byte de inicio)
- ✓ LE, LEr: Length byte (byte de longitud)
- ✓ DA: Destination Address byte (byte de dirección de destino)
- ✓ SA: Source Address byte (byte de dirección de origen)
- ✓ FC: Frame Control byte (byte de control del mensaje)
- ✓ Data-Unit:
- ✓ FCS: Frame Check Sequence (byte de chequeo)
- ✓ ED: End Delimiter (byte final)
- ✓ L: Longitud del campo de información

Aunque PROFIBUS dispone de protección contra los errores de transmisión, éstos no pueden ser totalmente eliminados, ya que pueden ocurrir por la existencia de transmisores defectuosos, tierras con alta impedancia, reflexión de la señal, etc. Los componentes de la UART son capaces de detectar algunos de estos errores:

- ✓ error de "frame": el bit de stop de un carácter no fue reconocido.

- ✓ error de "overrun": se ha sobre escrito un caracter recibido con el siguiente antes de que aquel pudiera ser almacenado.

Para asegurar una transmisión libre de errores, PROFIBUS dispone como mecanismo de seguridad con distancia Hamming 4 ($H_d = 4$). La distancia Hamming indica en cuantas unidades binarias difieren dos caracteres reconocidos como válidos por la UART (así, la introducción de un bit de paridad en los caracteres UART incrementa en 1 la distancia Hamming). En el caso de $H_d = 4$, es posible detectar y corregir un error de 1 bit en un caracter, mientras que un error de 2 bits es posible detectarlo pero no corregirlo.

Se logra $H_d=4$ enviando un FCS ("Frame Check Sequence") con cada mensaje, que representa la columna paridad del campo de información, de longitud L. Se genera haciendo la suma sin acarreo de los caracteres transmitidos. Puesto que los bits SD y ED no se incluyen en esta suma, su distancia Hamming frente a los demás es 5.

En PROFIBUS no se utiliza la corrección de errores. Cuando se detecta un error en un mensaje, se descarta el mismo y se repite la transmisión.

Según se comentó anteriormente, en PROFIBUS existen dos tipos de estaciones: activos y pasivos.

Las estaciones activas (maestros) pueden:

- ✓ enviar por iniciativa propia datos a otras estaciones.
- ✓ solicitar datos de otras estaciones.

Las estaciones pasivas (esclavos):

- ✓ NO pueden intercambiar datos excepto en el caso de que una estación activa les autorice a ello.

La característica activo/pasivo de una estación depende del equipo considerado. En general, los elementos de campo simples (estaciones de mando de motores, sensores, etc.) serán pasivos, mientras que los equipos "inteligentes" (autómatas programables, máquinas herramientas con control numérico, etc.) serán activos. También es posible que una misma estación se pueda configurar como activa o pasiva en el bus.

Para evitar que todas las estaciones activas accedan al mismo tiempo al bus, toda estación que desee enviar una información debe esperar hasta que se reciba una autorización de acceso al bus. Dicha estación recibe la autorización en forma de un telegrama especial, el "testigo" (token):

- ✓ El testigo pasa automáticamente de una estación activa a la siguiente, siguiendo el orden de direcciones de las estaciones.
- ✓ La transmisión del testigo se efectúa según un anillo lógico, es decir, la estación activa presente cuya dirección sea la más elevada reenvía el testigo a la estación activa presente cuya dirección sea la más baja.
- ✓ Cada estación activa "conoce" las direcciones de las restantes estaciones activas y controla de manera cíclica el campo de direcciones entre ella y la estación activa presente que le sigue. Durante este control se detecta:
 - ✓ El añadido de una estación activa o pasiva, o - La supresión de una estación pasiva.
 - ✓ Si se detecta que se ha añadido una nueva estación activa, ésta última recibe inmediatamente el testigo.

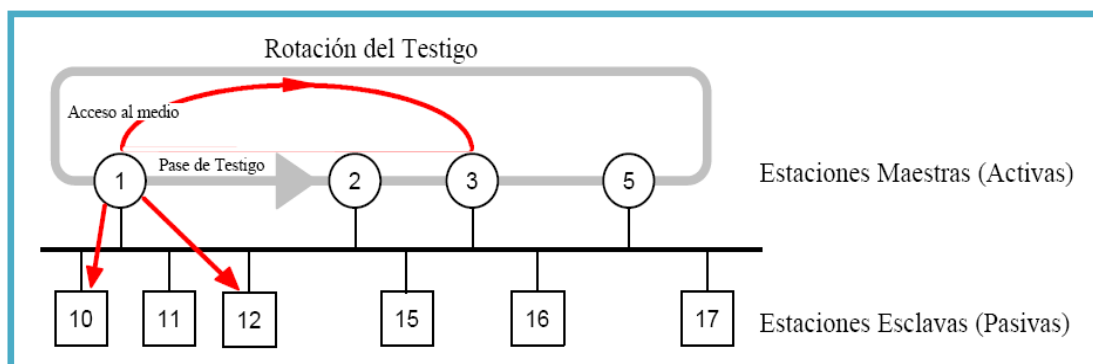


Figura Nº 100. Estaciones Activas y Pasivas. El testigo rota entre los maestros para distribuir el acceso al medio.

Con respecto al diagrama anterior:

- ✓ Las estaciones 1, 2, 3 y 5 son activas. El testigo se transmite de la siguiente forma:

1 → 2 → 3 → 5 → 1 → 2...

- ✓ Un ciclo de rotación de testigo se compone aquí de 4 transmisiones sucesivas del testigo:

1→ 2→ 3→ 5→ 1

- ✓ Las estaciones 10, 11, 12, 15, 16 y 17 son pasivas
- ✓ Las direcciones de estación 0, 4, 13, 14 y 18 a 126 no están ocupadas.

Un ciclo de rotación del testigo dura un cierto tiempo. El tiempo máximo de ciclo de rotación de testigo se especifica en la norma por medio del parámetro **Token-Rotation- Time (TRT o T_{TR})**.

El valor seleccionado para el **TRT** debe ser respetado incluso en presencia de un gran volumen de datos a transferir. Esto se consigue con los principios que se describen a continuación:

Las conexiones entre las diferentes estaciones de la red pueden ser de **alta** prioridad o de **baja** prioridad. La prioridad de una conexión influye sobre el tratamiento de los mensajes que deben ser emitidos por la conexión considerada. Cada estación activa mide el tiempo durante el cual ella no está en posesión del testigo; [dicho tiempo representa para ella el **Real-Token-Rotation-Time (TRR)**] y lo compara con el **TRT** parametrizado.

El tratamiento de los mensajes a emitir depende del resultado de esta comparación y la prioridad de las conexiones, de modo que:

- ✓ Si **TRR** es inferior al **TRT**, todas las órdenes de emisión y recepción existentes son ejecutadas hasta que finalice el **TRT** o bien se agoten todas las órdenes en espera: en primer lugar las órdenes cuyas conexiones son de alta prioridad y después las órdenes cuyas conexiones tienen baja prioridad.
- ✓ Si **TRR** es igual o superior al **TRT**, sólo se elabora **una** orden cuya conexión tenga prioridad alta. Las órdenes con prioridad baja solamente se elaborarán en los siguientes ciclos, cuando **TRR** sea inferior al **TRT**.

Estos dos casos se ilustran de forma gráfica en la siguiente figura, en la cual el **TRT** se representa por el círculo completo.

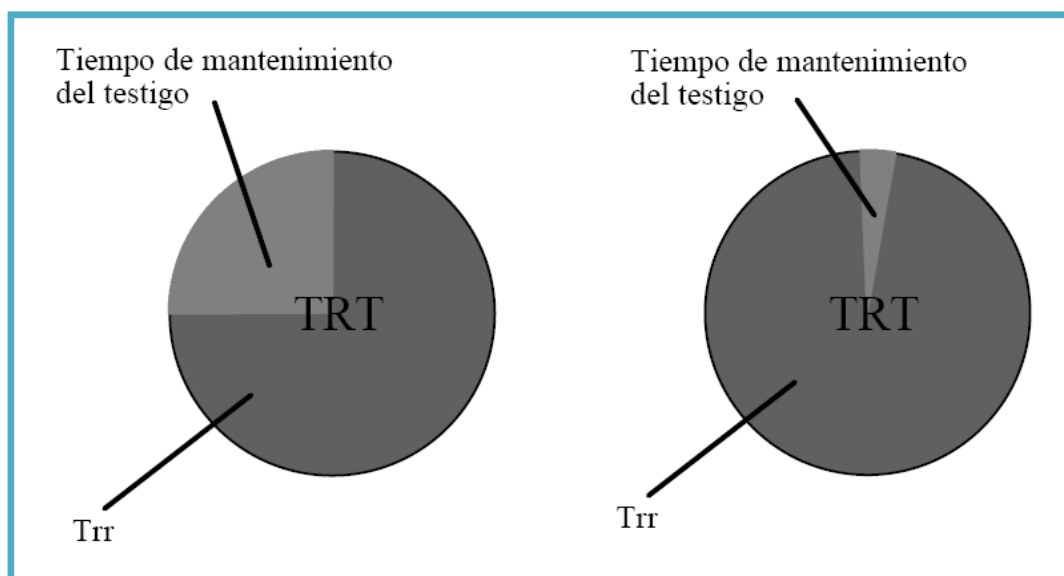


Figura N° 101. Descomposición del Token-Rotation-Time.

Los servicios de baja prioridad se realizan de acuerdo con la siguiente secuencia:

- ✓ Procesamiento de la Lista de Consulta (Poll List).
- ✓ Procesamiento de los mensajes de baja prioridad (servicios acíclicos).
- ✓ Almacenamiento de la lista de estaciones activas (Live List).
- ✓ Actualización del GAP (a lo sumo una dirección de la GAP list).

Esta secuencia no es fija, sino que puede ser modificada bajo ciertas condiciones de operación. Por ejemplo, el procesado de la Lista de Consulta se hace de manera segmentada, de modo que si no queda disponible tiempo de testigo, no se pueden procesar servicios acíclicos. Por esta razón el control FDL debe asegurar el procesamiento de todas las peticiones de baja prioridad, incluyendo la actualización del GAP, antes de comenzar un nuevo ciclo de consulta.

A continuación se enumeran los principales parámetros de bus que han de inicializarse obligatoriamente, tabla n° 3:

Nombre	Rango de Valores	Significado
TS	0 a 126	Address of this Station
Baud_rate	9.6 , 19.2, ... 500 kbit/s	Baud Rate in this PROFIBUS
Medium_red	single o redundant	Single/Redundant Media available
HW-Release	ASCII String	Hardware Release Number
SW-Release	ASCII String	Software Release Number
TSL	1 ... 65535 bit times	Slot Time
min TSDR 1 ...	65535 bit times	smallest Station Delay Time
*) max TSDR	1 ... 65535 bit times	largest Station Delay Time
*) TQUI	0 ... 255 bit times	Transmitter fall Time / Repeater switch Time
*) TSET	1 ... 255 bit times	Setup Time
*) TTR	1 ... 16.777.215 bit times	Target Rotation Time
*) G	1 a 100	GAP Update Factor
*) in ring desired	true o false	Request entry into or exit out of the logical Token Ring
*) HSA	2 ... 126	Highest Station Address in PROFIBUS
*) max retry limit	1 ... 8 (preferible 1)	Maximum number of retries
*) sólo posible en Estaciones Maestras		

Tabla nº 3. Principales parámetros de bus.

TS: Dirección de la estación en el bus (no pueden existir dos estaciones con la misma dirección en el bus). Como es lógico, este parámetro es específico de cada estación.

Baud rate: Velocidad de transmisión en Kbits/segundo. Una vez seleccionada, se define el *bit time* (t_{bit}) como el tiempo necesario para la transmisión de un bit de

información, es decir: $t_{\text{bit}} = 1 / \text{Baud rate}$ (en bits/segundo). Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones.

Medium red: Se indica aquí si existe o no redundancia.

T_{SL}: Tiempo durante el cual el transmisor de un mensaje espera el reconocimiento por parte del destinatario. Cuando se sobrepasa, se repite o no la transmisión de acuerdo con el valor de **max retry limit**. Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones.

min T_{SDR}: Mínimo tiempo que debe esperar el destinatario de un mensaje para enviar el reconocimiento al transmisor del mismo. Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones.

max T_{SDR}: Mínimo tiempo que debe esperar el transmisor antes de enviar un nuevo mensaje. Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones maestras.

T_{QUI}: Tiempo que una estación transmisora debe esperar tras enviar un mensaje para activar su receptor. Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones maestras.

T_{SET}: Mínimo tiempo de espera entre la recepción de un reconocimiento y el envío de un nuevo mensaje por parte del transmisor. (Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones maestras).

T_{TR}: Tiempo predeterminado para que el testigo pase por todas las estaciones del anillo

lógico. Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones maestras.

G: Después de transcurrido el tiempo " $G * T_{\text{TR}}$ ", el área de direcciones libres entre dos estaciones activas debe ser chequeado por la estación con dirección más baja para detectar si existen una nueva estación que desea entrar en el anillo lógico. Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones maestras.

In ring desired: Indica si la estación va a entrar en la red PROFIBUS como esclava o como maestra. Este parámetro es específico de cada estación.

HSA: Especifica la dirección más alta permitida para una estación maestra en el bus. Las direcciones de estaciones esclavas pueden ser mayores que **HSA**. Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones maestras.

Max retry limit: Especifica el número máximo de veces que el transmisor repetirá el envío de un mensaje cuando no reciba el reconocimiento del mismo por parte del destinatario. Este parámetro debe ser igual en todas las estaciones maestras. Además de controlar el acceso al medio y el tiempo de rotación de testigo, en la capa FDL existen una serie de servicios de transferencia de datos disponibles para el usuario a través de dicha capa. PROFIBUS ofrece tres servicios de transferencia de datos para envíos y recepciones *acíclicas*:

- ✓ **SDA** Send Data with Acknowledge.
- ✓ **SDN** Send Data with No acknowledge.
- ✓ **SRD** Send and Request Data.

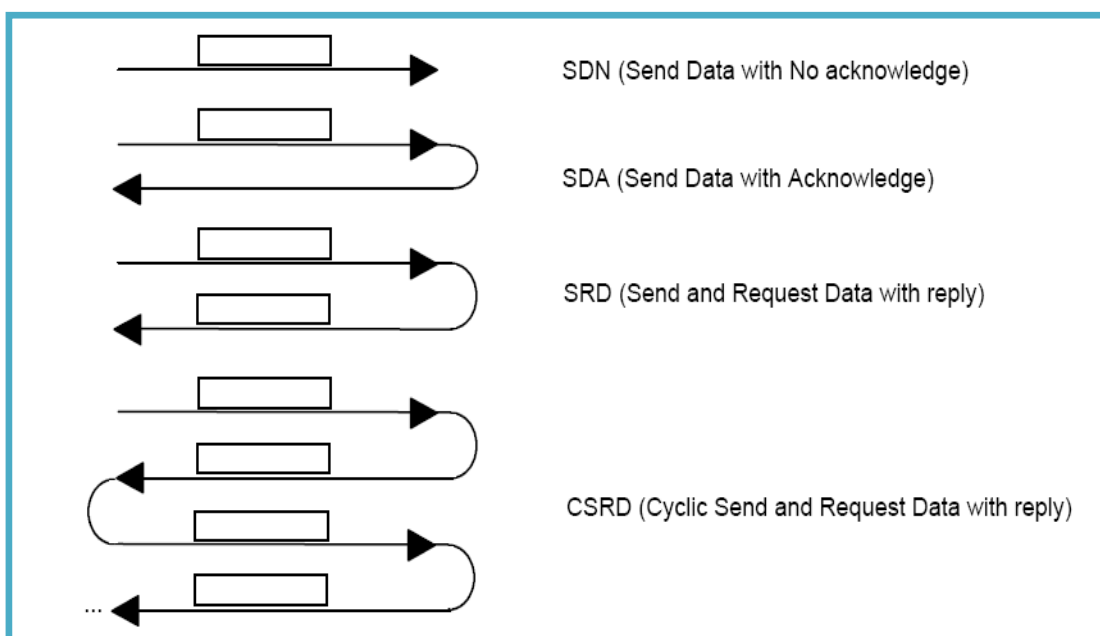


Figura N° 102. Servicios disponibles en la capa FDL.

El servicio **SDA** es un servicio básico por el cual la estación activa (la estación que tiene actualmente el derecho de acceso al bus) puede enviar un mensaje a una estación pasiva y recibir inmediatamente la confirmación. Esta última sólo puede reconocer los datos recibidos o reaccionar ante los datos recibidos transmitiendo otros datos ella misma.

El servicio **SDN** se utiliza principalmente en mensajes de tipo 'broadcast' o 'multicast' desde la estación activa a varias (o todas las demás) estaciones, razón

por la cual no se recibe reconocimiento. Todos los demás servicios se basan en una conexión recíproca entre un *iniciador* (la estación que posee el testigo) y un *respondedor* (cualquier estación que no tenga el testigo), y requieren bien un reconocimiento (Acknowledge) bien una respuesta (Response). Este comportamiento, importante para el funcionamiento en tiempo real del sistema de bus, se denomina de **respuesta inmediata**.

El servicio SRD permite transmitir datos a una estación pasiva y al mismo tiempo solicitar datos de ésta. Los datos solicitados se envían conjuntamente con la respuesta.

Como caso especial de este servicio, una estación puede solamente solicitar datos de otra estación enviándole un 'mensaje vacío'. Además de estos tres servicios acíclicos, las aplicaciones industriales requieren a menudo la realización de transmisiones cíclicas. El método de consulta centralizada es adecuado para recoger información de dispositivos de campo sencillos, como sensores y multiplexores de E/S que nunca serán dispositivos controlados por eventos ni tendrán (por razones de coste) la funcionalidad de una estación activa. PROFIBUS ofrece la posibilidad de almacenar una lista de consulta (Poll List) en un nivel cercano al hardware y, basándose en el servicio acíclico SRD, implantar una consulta cíclica de las estaciones incluidas en la misma. Además, al estar realizados los procedimientos de consulta en la capa de enlace se optimizan los tiempos de respuesta. Este servicio es el definido como:

- ✓ CSRD Cyclic Send and Request Data with reply.

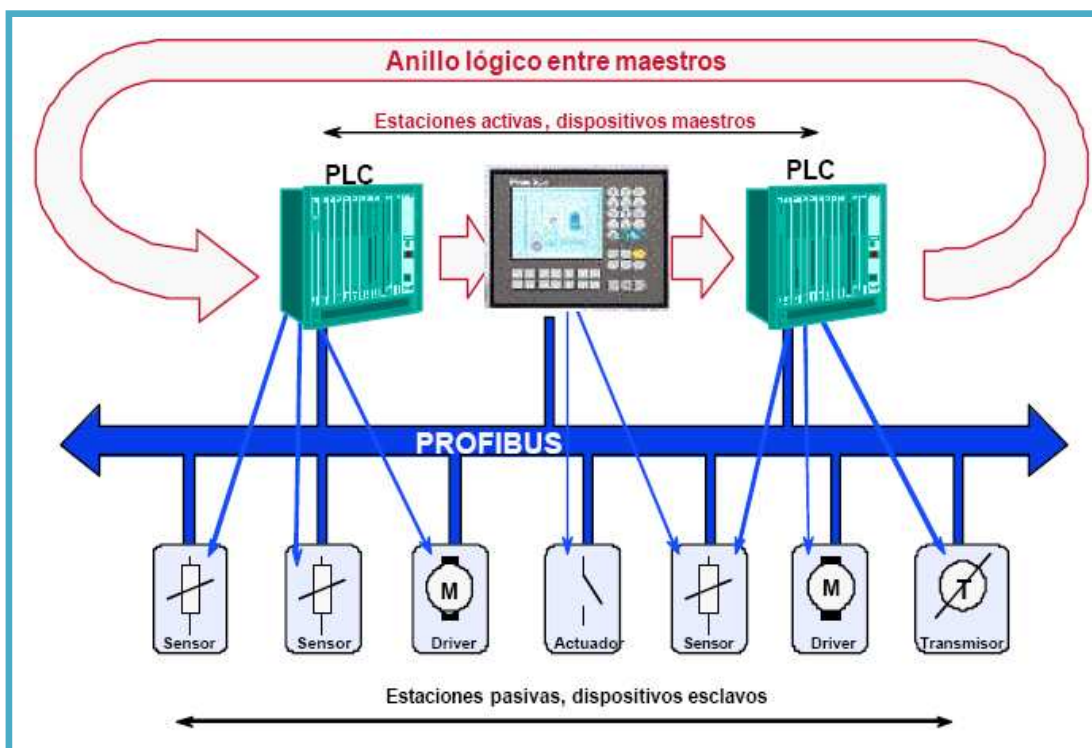


Figura N°103. Esquema de comunicaciones existentes en una red Profibus multimaestro.

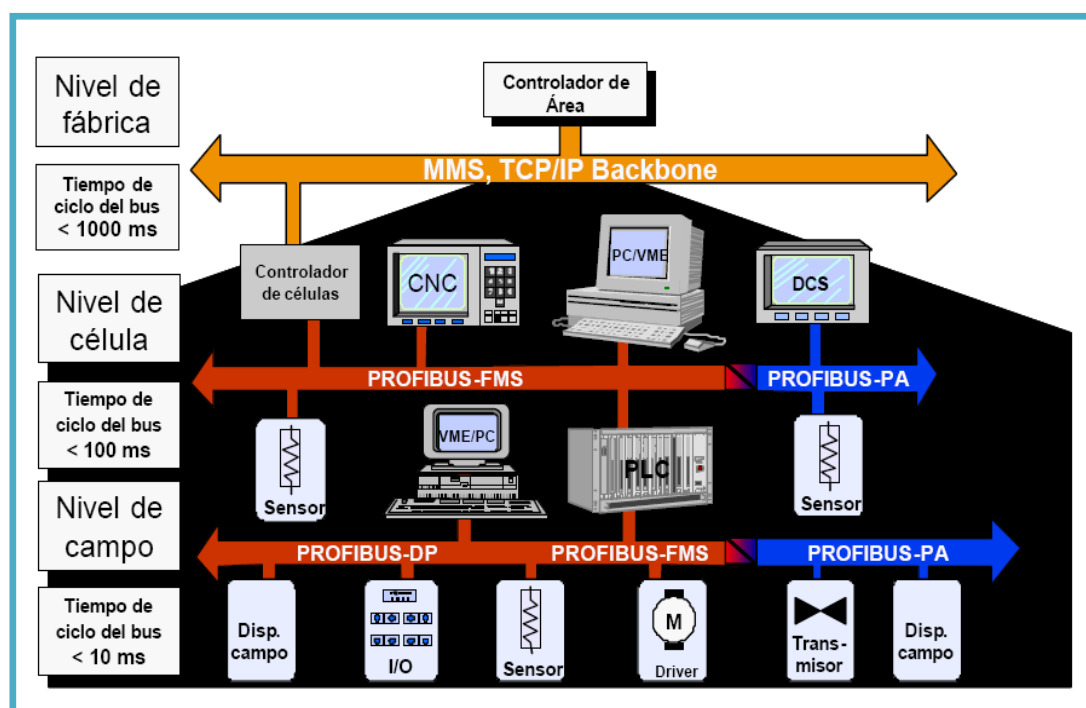


Figura N°104. Estructura de una pirámide de automatización basada en diferentes versiones.

La figura nº 104 nos muestra cómo es posible la utilización de Profibus dentro de los diferentes niveles de la pirámide de automatización y su uso posible en conjunto con redes corporativas basadas en Ethernet (TCP/IP) con el empleo de las tres versiones Profibus existentes.

Profibus emplea una topología de bus con terminación en ambos extremos para adaptación de impedancias. Esta técnica asegura el acoplamiento y desacoplamiento de estaciones (incluso en áreas de seguridad) durante operación normal sin afectar al resto. En cuanto al medio físico empleado, se utiliza:

8.2.2.3. RS 485 (H2): par trenzado apantallado, usado básicamente para DP y FMS, acorde al estándar RS-485, emplea transmisión asíncrona, con transferencias desde 9,6 Kbit/s hasta 12 Mbit/s (seleccionables). Usa 32 estaciones por segmentos, máximo 127 estaciones, con distancia máxima dependiente de velocidad deseada (12 Mbit/s = 10 mt; 1,5 Mbit/s = 400 mt; <187,5 Kbit/s = 1000 mt), aunque con repetidores puede alcanzar hasta 10 km. La combinación del trenzado de conductores, el apantallamiento de la lámina y el apantallamiento de malla lo hace especialmente apropiado para el tendido en entornos industriales con fuertes interferencias electromagnéticas y con un coste de instalaciones reducido. Este tipo de cable, por lo general, utiliza un conector DB9.

8.2.2.4. IEC 1158-2 (H1). Usado para Profibus-PA. Funciona en modo corriente y alcanza 31,25 Kbit/s. la tecnología de transmisión cumple con los requisitos de las industrias químicas y petroquímicas. Permite seguridad intrínseca y hace posible que se alimente a los dispositivos de campo a través del bus. Esta tecnología consta de un protocolo síncrono al bit con transmisión libre de corriente continua. Emplea par trenzado apantallado o no, con distancia de hasta 1900 mt por segmento, extendida con repetidores se pueden alcanzar distancias

de hasta 10 km, 127 estaciones máximas de 10 a 32 por segmento. Sus posibles configuraciones son la lineal, árbol o estrella.

8.2.2.5. Fibra Óptica. Usada para DP y FMS. Los elementos que proporcionan la salida de datos a través de fibra óptica se denominan “Módulo de Enlace Óptico” (Optical Link Module, OPM) y “Conector de Enlace Óptico” (Optical Link Plug, OLP). Con OLM se pueden conseguir topologías de red con estructura de línea, estrella o anillo, creando enlaces de hasta 15 km. Con OLP se logran estructuras de anillo monofibra, pero con distancias cortas. Debido al funcionamiento unidireccional de las fibras ópticas, las redes ópticas se implementan con enlaces punto a punto entre los componentes activos. Como ventajas principales ofrece separación galvánica entre los usuarios del bus y el soporte de transmisión, es inmune frente a las interferencias electromagnéticas y la técnica de conexión es extremadamente sencilla utilizando fibras ópticas plásticas en distancias cortas. Para OLM las velocidades de transmisiones posibles son: 9,6 kbit/s, 19,2 kbit/s, 93,75 kbit/s, 187,5 kbit/s, 500 kbit/s, 1,5 Mbit/s. Para OLP: 93,75 kbit/s, 187,5 kbit/s, 500 kbit/s, 1,5 Mbit/s.

8.2.3. Foundation Fieldbus

Foundation Fieldbus (FF) es un protocolo de comunicación digital para redes industriales, específicamente utilizado en aplicaciones de control distribuido y constituye un subconjunto del estándar IEC/ISA (IEC61158 e ISA s50.02). Puede comunicar grandes volúmenes de información, ideal para aplicaciones con varios lazos complejos de control de procesos y automatización. Está orientado principalmente a la interconexión de dispositivos en industrias de proceso continuo. Los dispositivos de campo son alimentados a través del bus Fieldbus cuando la potencia requerida para el funcionamiento lo permite.

Otros protocolos ampliamente usados aunque de menor alcance son:

- Modbus
- DeviceNet

8.2.4. Modbus

Modbus es un protocolo de transmisión para sistemas de control y supervisión de procesos (SCADA) con control centralizado, puede comunicarse con una o varias Estaciones Remotas (RTU) con la finalidad de obtener datos de campo para la supervisión y control de un proceso. La Interfaces de Capa Física puede estar configurada en:: RS-232, RS-422, RS-485. Ver características en tabla N° 1.

En Modbus los datos pueden intercambiarse en dos modos de transmisión:

- Modo RTU
- Modo ASCII

8.2.5. Devicenet

Red de bajo nivel adecuada para conectar dispositivos simples como sensores fotoeléctricos, sensores magnéticos, pulsadores, etc. y dispositivos de alto nivel (PLC, controladores, computadores, HMI, entre otros). Provee información adicional sobre el estado de la red, cuyos datos serán desplegados en la interfaz del usuario. Ver características en tabla N° 4.

Nombre	Topología	Soporte	Max dispositivos	Tasa de transmisión	Distancia max Bus	Comunicación
Profibus DP	línea, estrella y anillo	par trenzado fibra óptica	127/segm	Hasta 1.5M y 12M	0.1 segm 24 fibra	Master/Slave peer to peer
Profibus PA	línea, estrella y anillo	par trenzado fibra óptica	14400 /segm	31.5K	0.1 segm 24 fibra	Master/Slave peer to peer
Profibus FMS		par trenzado fibra óptica	127/segm	500K		Master/Slave peer to peer
Foundation Fieldbus HSE	estrella	par trenzado fibra óptica	240 p/segm 32.768 sist	100M	0.1 par 2 fibra	Single/multi master
Foundation Fieldbus H1	estrella o bus	par trenzado fibra óptica	240 p/segm 32.768 sist	31.25K	1.9 cable	Single/multi master
LonWorks	bus, anillo, lazo, estrella	par trenzado fibra óptica coaxial, radio	32768 /dom	500K	2	Master/Slave peer to peer
Interbus-S	segmentado	par trenzado fibra óptica	256 nodos	500K	400/segm 12.8 total	Master/Slave
DeviceNet	trunca/puntual c/bifurcación	par trenzado fibra óptica	2048 nodos	500K	0.5 6 c/repetid	Master/Slave, multi-master, peer to peer
AS-I	bus, anillo, arbol, estrella	par trenzado	31 p/red	167K	0.1, 0.3 c/rep	Master/Slave
Modbus RTU	línea, estrella, arbol, red con segmentos	par trenzado coaxial radio	250 p/segm	1.2 a 115.2K	0.35	Master/Slave
Ethernet Industrial	bus, estrella, malla-cadena	coaxial par trenzado fibra óptica	400 p/segm	10, 100M	0.1 100 mono c/switch	Master/Slave peer to peer
HART		par trenzado	15 p/segm	1.2K		Master/Slave

Tabla N° 4. Características y propiedades de los protocolos industriales.

DeviceNet está orientado a los niveles de automatización medio-bajo, es decir, dentro de la pirámide de automatización se encuadra en el nivel de planta, y en algunos casos en el nivel de célula. Originariamente fue desarrollado por el fabricante de autómatas y elementos de automatización norteamericano Allen-Bradley en 1994, aunque actualmente es un sistema abierto en el que numerosos fabricantes basan sus elementos de red; la “Asociación de fabricantes de Devicenet” (ODVA, Open DeviceNet Vendor Association) es la encargada actualmente de gestionar y organizar la certificación de dispositivos DeviceNet e impulsar el empleo de esta tecnología dentro de la industria. DeviceNet es un protocolo versátil en el área de buses de campo, ha sido diseñado para satisfacer al menos el 80% de las necesidades de comunicación a nivel de célula.

Las características principales de DeviceNet son:

- ✓ Número máximo de nodos: 64
- ✓ Distancia máxima: entre 100 m. y 500 m.
- ✓ Velocidad de transferencia de datos: 125, 250 y 500 kbit/s (dependiendo de la velocidad varía la distancia máxima).
- ✓ Estructura de comunicaciones en bus con una línea principal y posibilidad de bifurcación de la línea hacia los nodos (mayor número de bifurcaciones implica menor velocidad y distancia admisible).
- ✓ Requiere terminación de línea con impedancia de 120 Ohmios aproximadamente.
- ✓ Emplea dos pares trenzados (un par para alimentación hasta 8A y otro par para datos hasta 3A).
- ✓ Tamaño máximo del mensaje: 8 bytes para cada nodo (igual que CAN).
- ✓ El sistema de transmisión está basado en un modelo productor/consumidor, por ello, admite modelo maestro/esclavo, multimaestro, de igual a igual, etc., que se traduce en la transmisión de mensajes mediante diferentes métodos tales como sondeo, envío cíclico, etc.

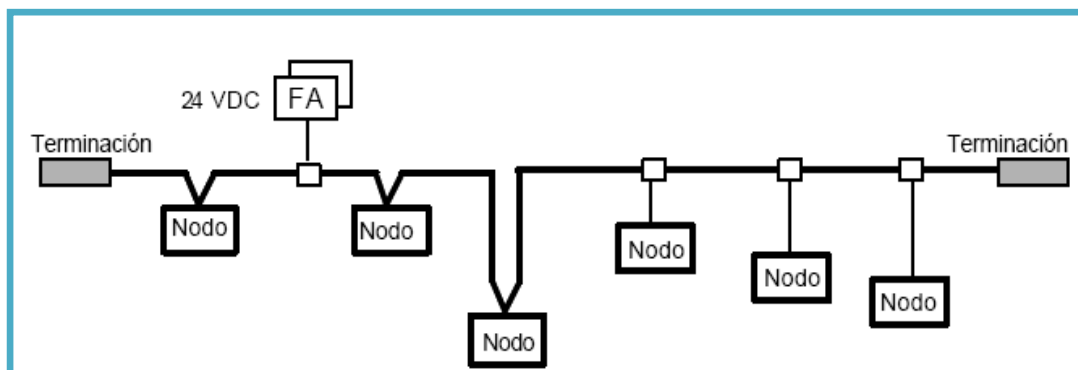


Figura N° 105. Estructura general de una red DeviceNet.



Figura N° 106. Cable para comunicación DeviceNet.

Las aplicaciones en las que habitualmente se emplea DeviceNet son todas las aplicaciones habituales de los buses de campo, como por ejemplo ensamblado de piezas, máquinas de soldadura, captación de sensores distribuidos, sensores inteligentes, válvulas neumáticas, lectores de código de barras, interfaces de operador, etc. Como ventajas principales se puede resaltar su bajo coste, alta fiabilidad, empleo eficiente del ancho de banda y la posibilidad de incorporar la tensión de alimentación (24 VDC) en el mismo cable de bus. Las desventajas destacables serían su ancho de banda limitado (no muy alta velocidad de transferencia de datos) y el tamaño limitado de los mensajes.

DeviceNet emplea las especificaciones del bus CAN (la capa 2 de DeviceNet es íntegramente CAN), por lo que son aplicables gran parte de las características de robustez de CAN, y añade las especificaciones eléctricas de RS485. Como ya se dijo, CAN no incorpora la capa de aplicación pues se trata de un protocolo de mensajes de bajo nivel implementado en circuitos integrados de bajo coste, por lo que DeviceNet aprovecha esta situación para no desarrollar sus propios circuitos integrados (lo que resultaría más costoso). Por tanto, al protocolo CAN se le añaden nuevas capas dentro de los niveles ISO/OSI. De manera sencilla, puede pensarse en DeviceNet como un conjunto de funciones o “macros” de alto nivel que incluyen mensajes CAN, donde dichas funciones están orientados a facilitar las comunicaciones necesarias en procesos de automatización. Análogamente, CAN-open y SDS son protocolos similares a DeviceNet en el sentido de emplear CAN como base de funcionamiento.

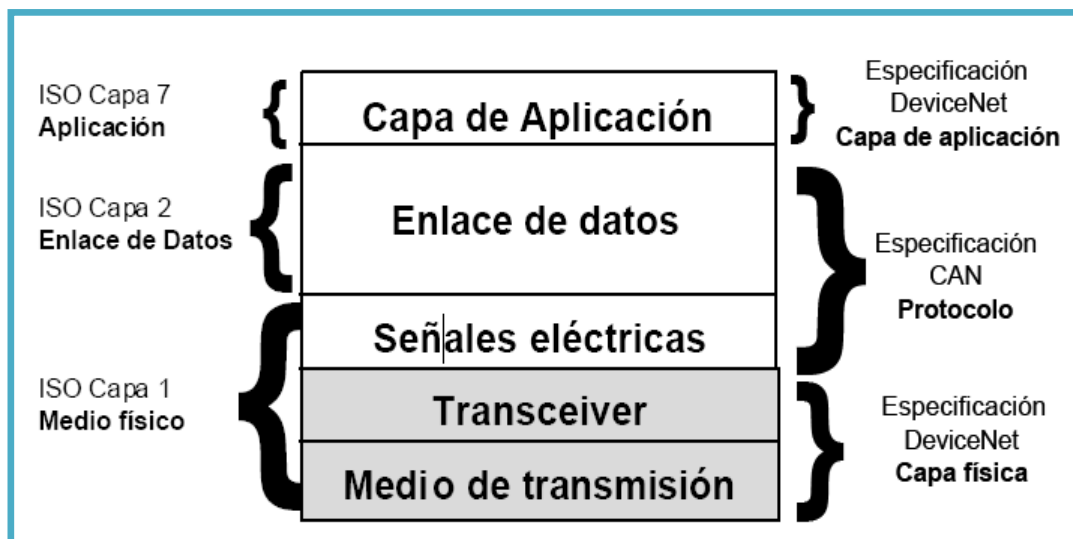


Figura Nº 107. Ubicación de las capas ISO/OSI de DeviceNet y empleo del protocolo CAN en DeviceNet.

Las funciones que incorpora la capa de aplicación DeviceNet son:

- ✓ Asignación de identificación CAN, estableciendo niveles de prioridad y permitiendo que cada nodo conozca qué mensajes van destinados a él. La configuración se puede realizar mediante software o micro interruptores.
- ✓ Control del tipo de mensajes a transmitir (mensajes explícitos, fragmentación, etc.).

- ✓ Detección de direcciones duplicadas. Antes de estar activos en la red debe chequearse la no duplicidad.
- ✓ Consistencia de datos en el dispositivo: datos de identidad (tipo de nodo, fabricante, número de serie, etc.), datos del enlace de comunicaciones (dirección del nodo, velocidad de transferencia, etc.) y datos de configuración del nodo (dependiendo del tipo de dispositivo, se deben configurar valores límite, velocidades, consumos, inicialización de contadores, etc.).

Una de las características particulares de DeviceNet es la existencia de múltiples formas de mensajes, lo que permite al bus operar de un modo u otro dependiendo del tipo de mensajes enviados, y pudiendo mezclar diversos tipos de mensajes. Los tipos de mensajes que se definen son:

- ✓ Sondeo. El maestro interroga uno por uno cada nodo para recibir o enviar una actualización del estado del nodo. Este método requiere un mensaje saliente y otro mensaje entrante para cada nodo de la red. Es un método preciso y riguroso, pero poco eficiente a la hora de solicitar información a los dispositivos.
- ✓ Strobing. Un nodo solicita mediante difusión (broadcast) simultánea la actualización a todos los nodos. Cada nodo responde a este mensaje mediante un orden predeterminado por una lista priorizada para permitir que los nodos más críticos sean los primeros en responder.
- ✓ Envío cíclico: Los dispositivos son configurados para enviar mensajes de forma regular según el tiempo programado. Este tipo de envío de mensajes se suele emplear juntamente con el modo de “cambio de estado”.
- ✓ Cambio de estado. Los nodos únicamente envían mensajes cuando su estado cambia, lo que implica una utilización mínima del bus. El principal problema radica en que el tiempo de recepción no es fijo ya que dependerá del tráfico del bus en el instante en que se desea acceder a él.
- ✓ Mensajes explícitos. Este método indica cómo un nodo debe interpretar los mensajes. Este método es habitualmente empleado en nodos con

funcionalidad compleja para así poder enviar mensajes con numerosos parámetros de configuración que es necesario modificar regularmente, pero no tan a menudo como la lectura de datos del proceso que ese nodo realiza.

- ✓ Mensajes fragmentados. Es empleado para el caso donde es necesario enviar más de 8 bytes de datos en un solo envío. En este caso, se envían varios mensajes de hasta 8 bytes donde viajan los datos fragmentados para posteriormente ser unidos de nuevo.

Gestión de mensajes no conectados (UCMM, UnConnected Message Manager). La capacidad UCMM en DeviceNet permite comunicación de igual a igual (peer to peer), es decir, que no es necesaria la gestión de un maestro en la red sino que dos nodos cualquiera pueden comunicarse entre ellos de forma directa sin pasar por el nodo maestro. Para ello, los nodos UCMM deben poder aceptar todos los mensajes CAN y realizar un filtrado de mensajes para conocer y aceptar únicamente aquellos mensajes que van dirigidos a él. Este filtrado se realiza en la capa de software y requiere mayores recursos (RAM, ROM y capacidad de proceso) que un nodo que sólo admite mensajes provenientes de un maestro.

Análogamente a como se hace en Profibus, existe una modalidad de configuración de dispositivos electrónica consistente en un fichero “modelo” para cada tipo de dispositivo de modo que cada parámetro queda situado en una ubicación concreta. De este modo es posible intercambiar dispositivos de diferentes fabricantes con igual funcionalidad, aunque es necesario ser cuidadoso y analizar si esta equivalencia es completa para asegurar la inexistencia de problemas.

8.3. Aplicación de redes Industriales

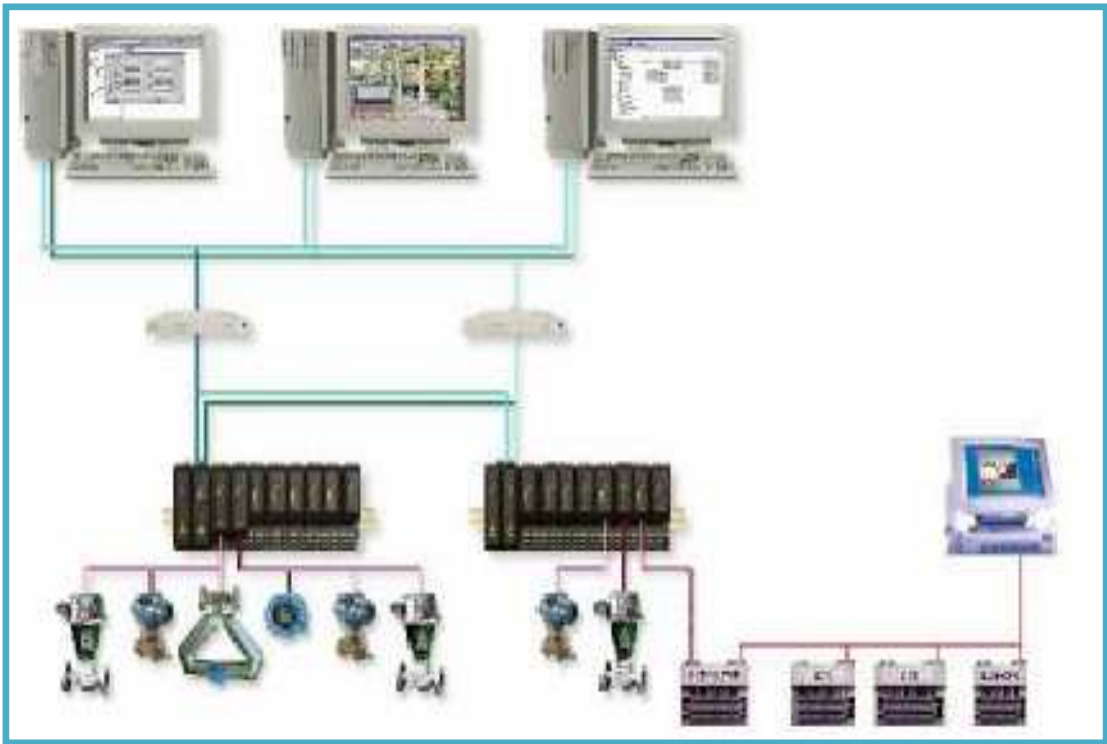


Figura N° 108. Aplicación de las redes de comunicación industrial.

La ventaja de las comunicaciones es la posibilidad de intercambio de información entre equipos que controlan fases sucesivas de un mismo proceso, facilidad de comunicación hombre máquina y uso de una base de datos común.

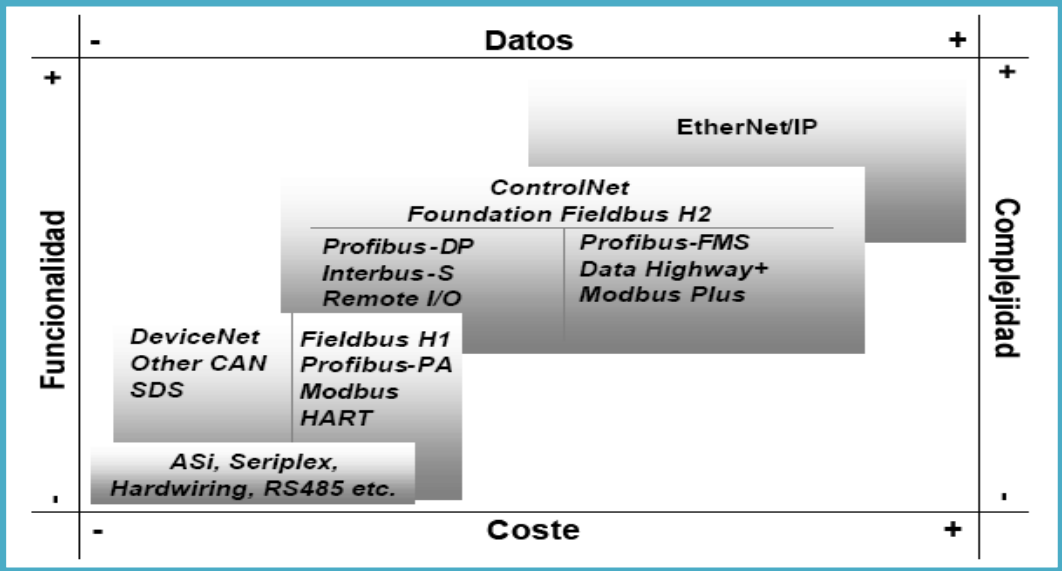


Figura N° 109. Clasificación de los diversos buses de campo.

Para finalizar este capítulo se ilustraran unas fotografías donde queda de manifiesto la gran diferencia que existe al utilizar redes industriales de comunicación, sea cual fuese esta.

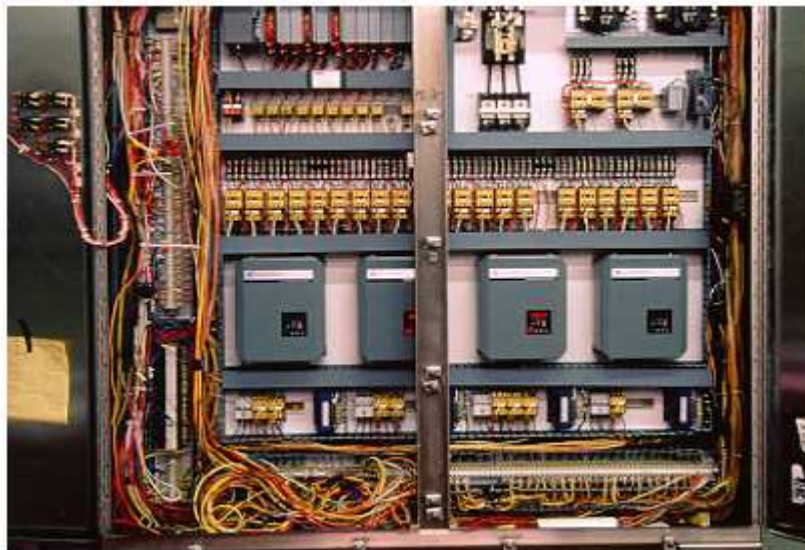


Figura N° 110. Tablero armado utilizando la tecnología cableada y con relés de accionamientos.



Figura N° 111. Tablero armado utilizando buses de campo.

La diferencia entre ambos tableros radica en la disminución de dispositivos y componentes, ya que la comunicación entre los maestros y esclavos es mucho más directa gracias a los protocolos utilizados y por ende a los dispositivos que

hacen posible este tipo de comunicación. Todo lo anterior radica en la disminución de los costos de mantenimiento, ya que la inversión inicial es elevada.

CAPITULO IX

9. MOTO-BOMBAS

9.1. Introducción

Para poder transportar los líquidos de un lugar a dentro, en una planta, se requieren de maquinas especializadas para tal efecto, estas maquinas son las conocidas como bombas de agua o moto-bombas.

En el mercado existen distintos tipos de bombas las cuales se especializan para distintos tipos de líquidos o aceites. El tipo de bomba a utilizar en el proceso depende específicamente de qué tipo de producto se quiere mover y en qué condiciones trabajará, es decir, lugar de trabajo, altura, de succión, altura de impulso, etc.

9.2. Bombas de Agua

Una bomba es una máquina hidráulica generadora que transforma la energía (generalmente energía mecánica) con la que es accionada en energía hidráulica del fluido incompresible que mueve. El fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos como puede ser el hormigón antes de fraguar o la pasta de papel. Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura, todas ellas relacionadas según el principio de Bernoulli. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud.

Existe una ambigüedad en la utilización del término bomba, ya que generalmente es utilizado para referirse a las máquinas de fluido que transfieren energía, o bombean fluidos incompresibles, y por lo tanto no alteran la densidad de su fluido de trabajo, a diferencia de otras máquinas como lo son los compresores, cuyo campo de aplicación es la neumática y no la hidráulica. Pero también es común encontrar el término bomba para referirse a máquinas que bombean otro tipo de fluidos, así como lo son las bombas de vacío o las bombas de aire.

La primera bomba conocida fue descrita por Arquímedes y se conoce como tornillo de Arquímedes, descrito por Arquímedes en el siglo III a. C., aunque este sistema había sido utilizado anteriormente por Senaquerib, rey de Asiria en el siglo VII A. C.

En el siglo XII, Al-Jazari describió e ilustró diferentes tipos de bombas, incluyendo bombas reversibles, bombas de doble acción, bombas de vacío, bombas de agua y bombas de desplazamiento positivo.

9.3. Tipos de Bombas

9.3.1. Según el principio de funcionamiento

La principal clasificación de las bombas según el funcionamiento en que se base:

9.3.1.1. Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas, en las que el principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. En este tipo de bombas, en cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, por lo que también se denominan bombas volumétricas. En caso de poder variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. A su vez este tipo de bombas pueden subdividirse en:

9.3.1.1.1. Bombas de émbolo alternativo, en las que existe uno o varios compartimentos fijos, pero de volumen variable, por la acción de un émbolo o de una membrana. En estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente. Algunos ejemplos de este tipo de bombas son la bomba alternativa de pistón, la bomba rotativa de pistones o la bomba pistones de accionamiento axial.

9.3.1.1.2. Bombas volumétricas rotativas o roto estáticas, en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina. Algunos ejemplos de este tipo de máquinas son la bomba de paletas, la bomba de lóbulos, la bomba de engranajes, la bomba de tornillo o la bomba peristáltica.

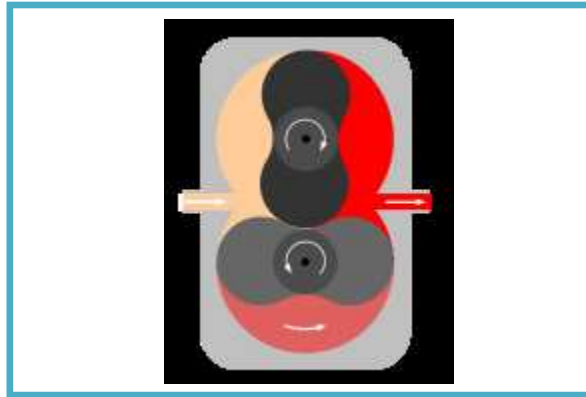


Figura N° 112. Bomba de lóbulos dobles.

9.3.1.2. Bombas roto dinámicas, en las que el principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo. Estas turbo máquinas hidráulicas generadoras pueden subdividirse en:

Radiales o centrífugas, cuando el movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor.

Axiales, cuando el fluido pasa por los canales de los álabes siguiendo una trayectoria contenida en un cilindro.

Diagonales o helicocentrífugas, cuando la trayectoria del fluido se realiza en otra dirección entre las anteriores, es decir, en un cono coaxial con el eje del rodete.

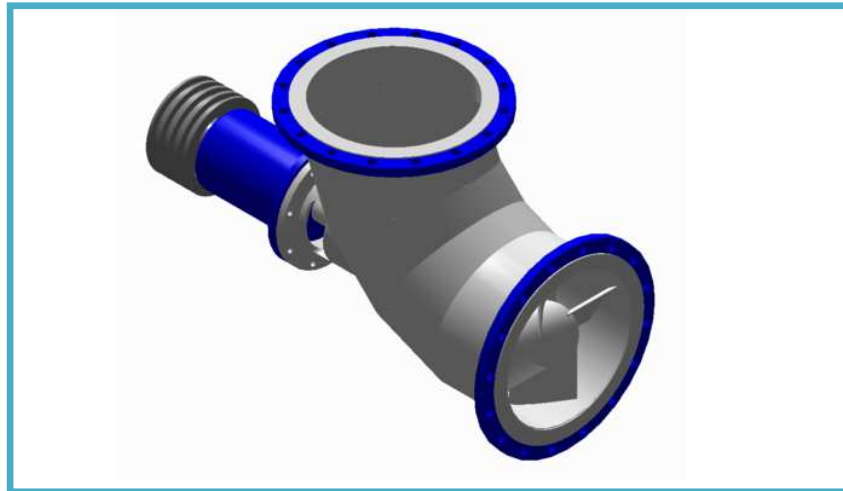


Figura N° 113. Bomba roto dinámica axial.

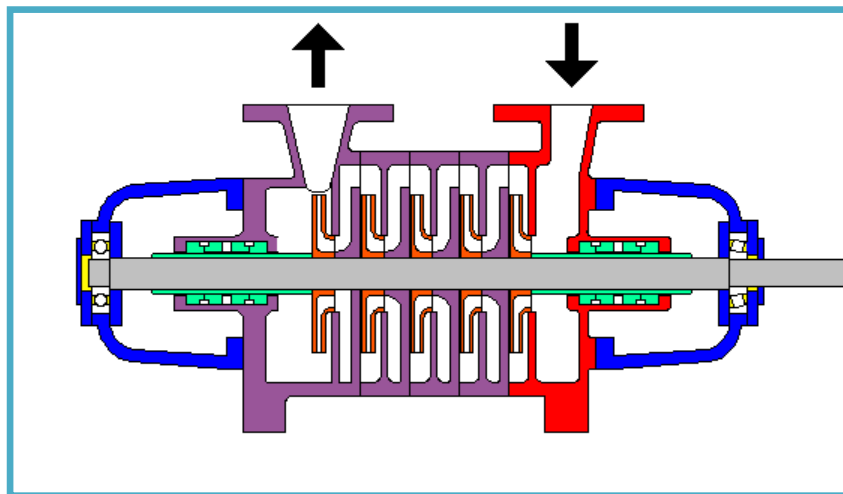


Figura N° 114. Bomba centrífuga de 5 etapas.

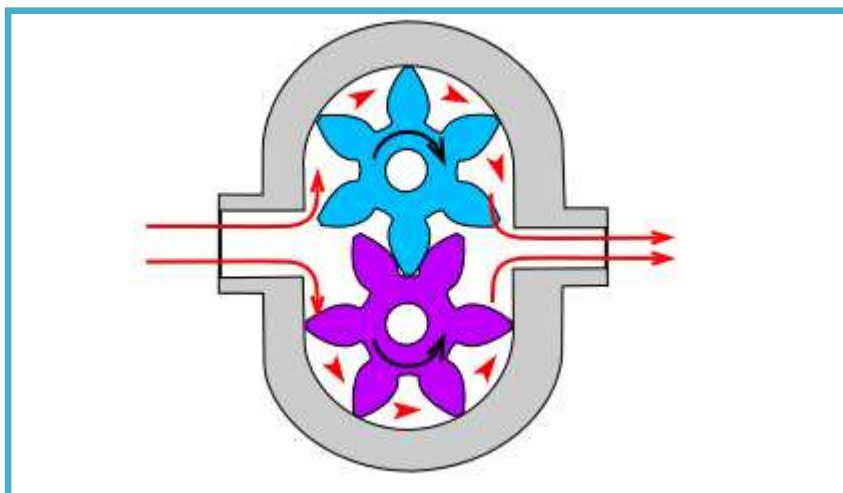


Figura N° 115. Bomba de engranajes.

9.3.1.3. Según el tipo de accionamiento

Electrobombas. Genéricamente, son aquellas accionadas por un motor eléctrico, para distinguirlas de las motobombas, habitualmente accionadas por motores de explosión

Bombas neumáticas, que son bombas de desplazamiento positivo en las que la energía de entrada es neumática, normalmente a partir de aire comprimido.

Bombas de accionamiento hidráulico, como la bomba de ariete o la noria.

Bombas manuales. Un tipo de bomba manual es la bomba de balancín.

9.3.1.4. Tipos de bombas de émbolo

9.3.1.4.1. Bomba aspirante

En una "bomba aspirante", un cilindro que contiene un pistón móvil está conectado con el suministro de agua mediante un tubo. Una válvula bloquea la entrada del tubo al cilindro. La válvula es como una puerta con goznes, que solo se abre hacia arriba, dejando subir, pero no bajar, el agua. Dentro del pistón, hay una segunda válvula que funciona en la misma forma. Cuando se acciona la manivela, el pistón sube. Esto aumenta el volumen existente debajo del pistón, y, por lo tanto, la presión disminuye. La presión del aire normal que actúa sobre la

superficie del agua, del pozo, hace subir el líquido por el tubo, franqueando la válvula-que se abre- y lo hace entrar en el cilindro. Cuando el pistón baja, se cierra la primera válvula, y se abre la segunda, que permite que el agua pase a la parte superior del pistón y ocupe el cilindro que está encima de éste. El golpe siguiente hacia arriba hace subir el agua a la espita y, al mismo tiempo, logra que entre más agua en el cilindro, por debajo del pistón. La acción continúa mientras el pistón sube y baja.

Una bomba aspirante es de acción limitada, en ciertos sentidos. No puede proporcionar un chorro continuo de líquido ni hacer subir el agua a través de una distancia mayor a 10 m. entre la superficie del pozo y la válvula inferior, ya que la presión normal del aire sólo puede actuar con fuerza suficiente para mantener una columna de agua de esa altura. Una bomba impelente vence esos obstáculos.

9.3.1.4.2. Bomba impelente

La bomba impelente consiste en un cilindro, un pistón y un caño que baja hasta el depósito de agua. Asimismo, tiene una válvula que deja entrar el agua al cilindro, pero no regresar. No hay válvula en el pistón, que es completamente sólido. Desde el extremo inferior del cilindro sale un segundo tubo que llega hasta una cámara de aire. La entrada a esa cámara es bloqueada por una válvula que deja entrar el agua, pero no salir. Desde el extremo inferior de la cámara de aire, otro caño lleva el agua a un tanque de la azotea o a una manguera.

9.3.1.4.3. Bomba Centrífuga

Una bomba centrífuga es un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio llamado rodete en energía cinética y potencial requeridas. El fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba, que por el contorno su forma lo conduce hacia las tubuladuras de salida o hacia el siguiente rodete (siguiente etapa).

Aunque la fuerza centrífuga producida depende tanto de la velocidad en la periferia del impulsor como de la densidad del líquido, la energía que se aplica por unidad de masa del líquido es independiente de la densidad del líquido. Por tanto, en una bomba dada que funcione a cierta velocidad y que maneje un volumen definido de líquido, la energía que se aplica y transfiere al líquido, (en pascales, Pa , metros de columna de agua *m.c.a.* o pie-lb/lb de líquido) es la misma para cualquier líquido sin que importe su densidad. Tradicionalmente la presión proporcionada por la bomba en metros de columna de agua o pie-lb/lb se expresa en metros o en pies y por ello que se denomina genéricamente como "altura", y aun más, porque las primeras bombas se dedicaban a subir agua de los pozos desde una cierta profundidad (o altura).

Las bombas centrífugas tienen un uso muy extendido en la industria ya que son adecuadas casi para cualquier uso. Las más comunes son las que están construidas bajo normativa DIN 24255 (en formas e hidráulica) con un único rodete, que abarcan capacidades hasta los 500 m³/h y alturas manométricas hasta los 100 metros con motores eléctricos de velocidad normalizada. Estas bombas se suelen montar horizontales, pero también pueden estar verticales y para alcanzar mayores alturas se fabrican disponiendo varios rodetes sucesivos en un mismo cuerpo de bomba. De esta forma se acumulan las presiones parciales que ofrecen cada uno de ellos. En este caso se habla de bomba multifásica o multietapa, pudiéndose lograr de este modo alturas del orden de los 1200 metros para sistemas de alimentación de calderas.

Constituyen no menos del 80% de la producción mundial de bombas, porque es la más adecuada para mover más cantidad de líquido que la bomba de desplazamiento positivo.

No hay válvulas en las bombas de tipo centrífugo; el flujo es uniforme y libre de impulsos de baja frecuencia.

Los impulsores convencionales de bombas centrífugas se limitan a velocidades en el orden de 60 m/s (200 pie/s).

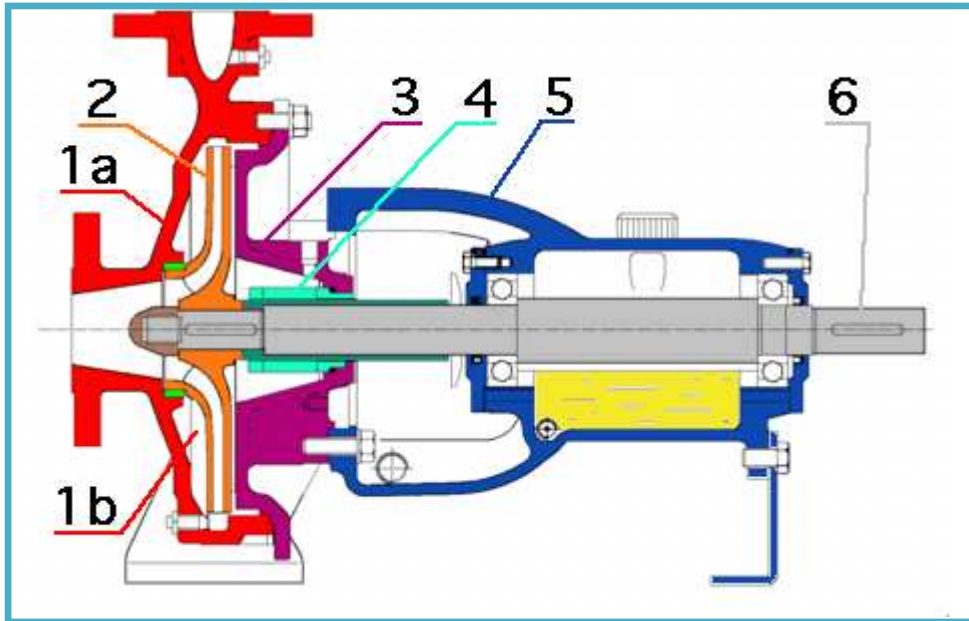


Figura N° 116. Corte esquemático de una bomba centrífuga. 1a carcasa, 1b cuerpo de bomba, 2 rodete, 3 tapa de impulsión, 4 cierre del eje, 5 soporte de cojinetes, 6 eje.

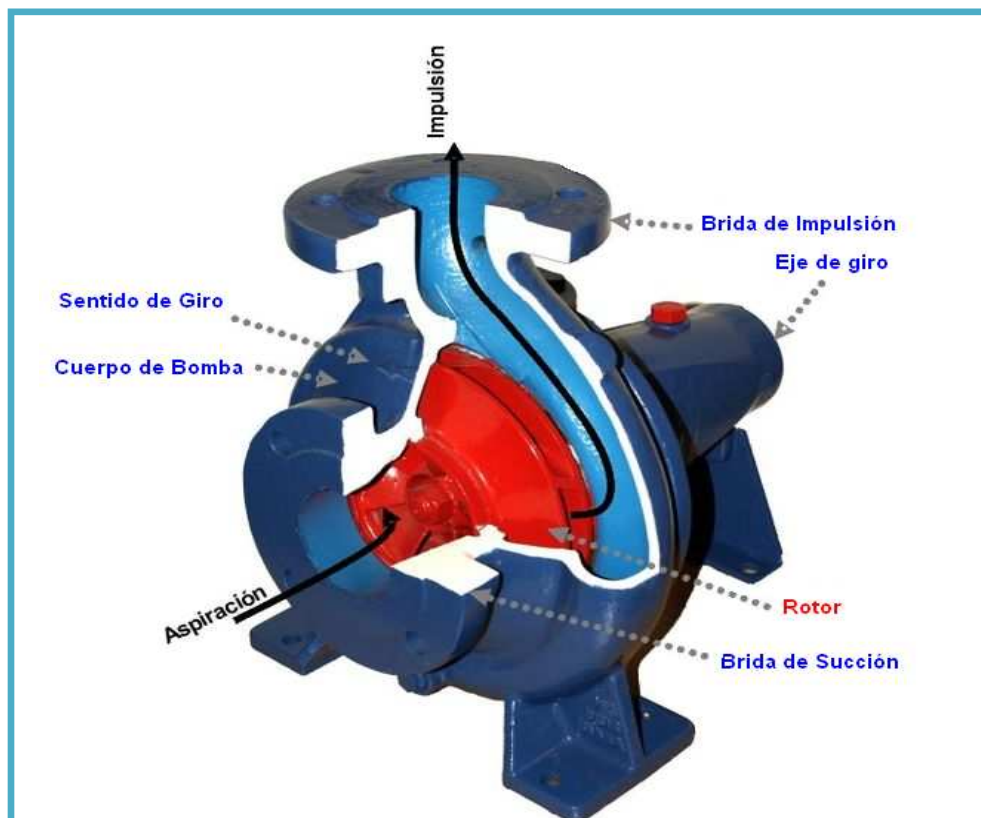


Figura N° 117. Partes de una bomba Centrífuga.

9.3.1.5. Cebado de bombas roto dinámicas

Para el correcto funcionamiento de las bombas roto dinámicas se necesita que estén llenas de fluido incompresible, es decir, de líquido, pues en el caso estar llenas de fluido compresible (cualquier gas como el aire) no funcionarían correctamente.

El cebado de la bomba consiste en llenar de líquido la tubería de aspiración succión y la carcasa de la bomba, para facilitar la succión de líquido, evitando que queden bolsas de aire en el interior. Al ser necesaria esta operación en las bombas roto dinámicas, se dice que no tienen capacidad autocebante. Sin embargo, las bombas de desplazamiento positivo son autocebantes, es decir, aunque estén llenas de aire son capaces de llenar de fluido el circuito de aspiración.

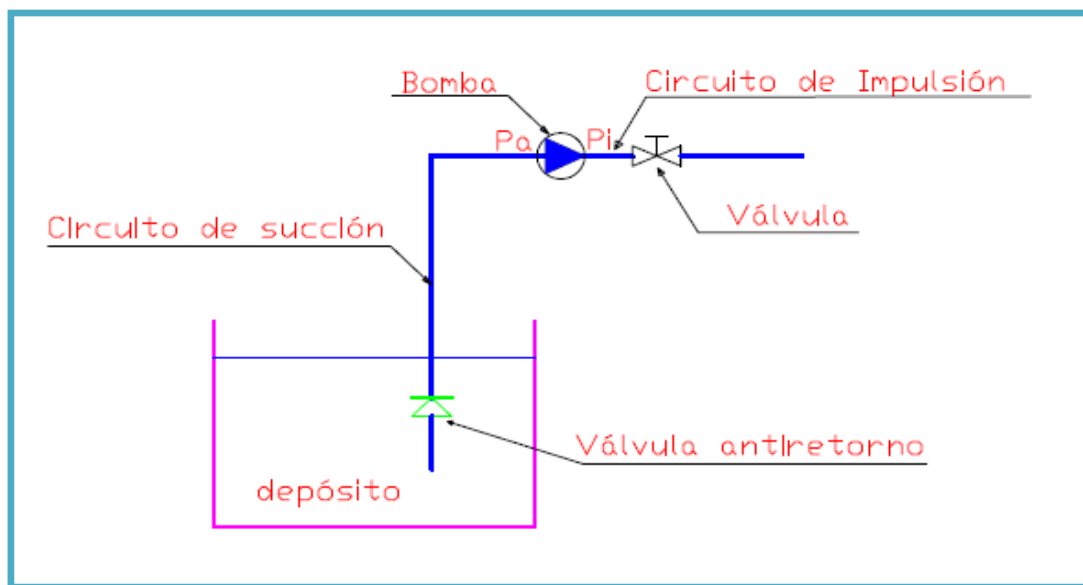


Figura N° 118. Esquema de una bomba instalada por sobre el nivel de agua.

En un circuito como el mostrado en el esquema adjunto sin ningún dispositivo adicional, al detener la bomba centrífuga el fluido del circuito de aspiración cae hacia el depósito vaciándose la bomba por el vacío creado por el circuito primario.

La altura de elevación H que proporciona la bomba es siempre la misma y responde a la siguiente fórmula:

$$H = \frac{P_I - P_A}{\rho g}$$

Ecuación N° 125.

Donde P_I es la presión de impulsión, P_A es la presión de aspiración, ρ es la densidad del fluido y g la aceleración de la gravedad.

Despejando la diferencia de presiones se tiene que:

$$(P_I - P_A) = H \cdot \rho \cdot g$$

Ecuación N° 126.

De esta fórmula se puede observar que la diferencia de presiones que consigue la bomba entre la impulsión y la aspiración es mayor cuanto mayor sea la densidad del fluido a mover. De tal forma que para el caso concreto del agua se tiene:

$$(P_I - P_A)_{aire} = H \cdot \rho_{aire} \cdot g = 1,29 \times 9,81 \cdot H$$

Ecuación N° 127.

$$(P_I - P_A)_{agua} = H \cdot \rho_{agua} \cdot g = 1000 \times 9,81 \cdot H$$

Ecuación N° 128.

Con lo cual:

$$\frac{(P_I - P_A)_{aire}}{(P_I - P_A)_{agua}} = \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} = \frac{1,29}{1000} = 0,00129$$

Ecuación N° 129.

Es decir, si la bomba está llena de aire la presión de aspiración es 0,00129 veces la que conseguiría dicha bomba si estuviese llena de agua, es decir, si estuviese cebada. Por lo que si la bomba está vacía la altura que se eleva el agua en el circuito de aspiración sobre el nivel del agua en el depósito es mínima y totalmente insuficiente para que el agua llegue a la bomba.

Por otra parte el funcionamiento de una bomba centrífuga en vacío puede estropear el sellado de la bomba debido a una deficiente refrigeración dado que no circula fluido por su interior que ayuda a mejorar la disipación del calor producido por la bomba.

9.3.1.6. Sellado de bombas

Las bombas x precisan de sellos hidráulicos para impedir que los fluidos que están siendo impulsados salgan al exterior de la máquina a través de la vía de transmisión de movimiento desde el motor a los internos móviles de la bomba.

En el campo del refino de petróleo y de la petroquímica existen sellos mecánicos de bombas estandarizados por API (American Petroleum Institute) que, aunque se trata de una asociación estadounidense, son de aplicación en todo el mundo. Cada tipo de sello recibe el nombre de PLAN API. Estos sellos pueden ser simples o dobles y, además, pueden disponer o no de un sistema de refrigeración. También existe una clasificación de sellos de bombas según ANSI.

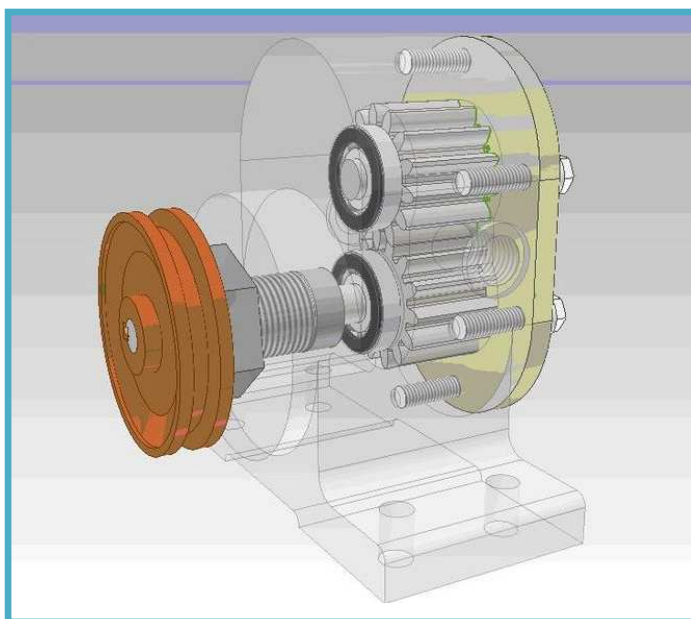


Figura N° 119. Bomba de engranajes con vista traslúcida.

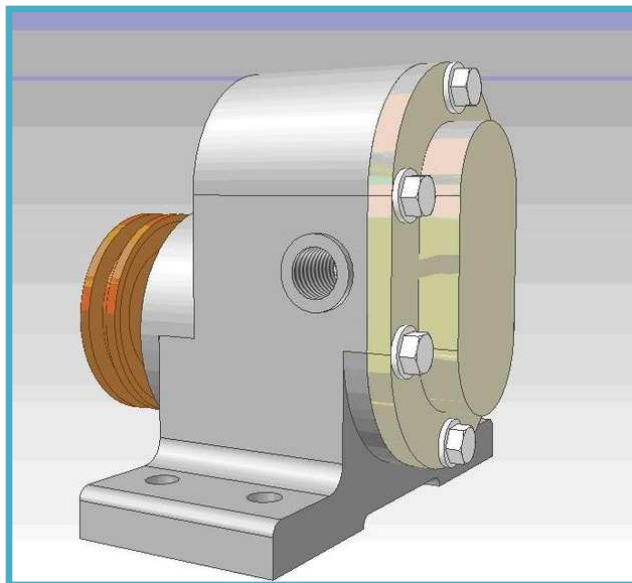


Figura N° 120. Bomba de engranajes armada.

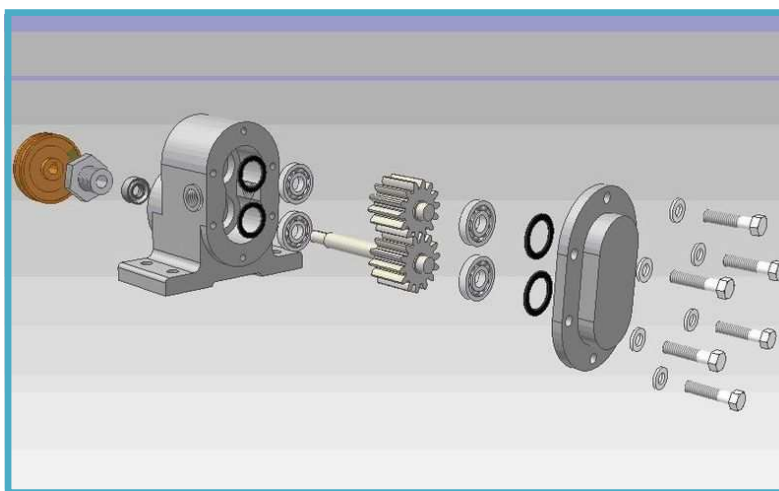


Figura N° 121. Despiece de bomba engranaje.

Debido a la gran variedad de bombas que existen en el mercado, la mejor manera de solicitar una es dando los siguientes datos:

- ✓ Flujo.
- ✓ Caudal.
- ✓ Presión.
- ✓ Viscosidad (el tipo de líquido a transportar).
- ✓ Altura de succión.
- ✓ Altura de impulsión.

CAPITULO X

10. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En la actualidad existe un gran número de empresas que se desarrollan en el área de la automatización, ya sea diseñando equipos y utilizando estos instrumentos para desarrollar sus propios procesos, o empresas que se dedican al diseño de instrumentos que, como usuarios, mas tarde nosotros utilizaremos en nuestros propios equipos.

Desde el punto de vista del proceso de este trabajo, se identifican los procesos y luego se procede a estudiar cada uno de los equipos que controlan y ejecutan las diversas tareas para llegar a un todo, donde el modelo CIM realiza el enlace entre las distintas etapas y equipos.

Los equipos Individualmente se comportan de manera diferente a como lo harían en un sistema más completo, esto debido a que son parte de un proceso que depende de respuestas y de señales, donde un equipo no puede realizar su función si el equipo anterior a él no ha enviado la señal al hardware y este a su vez recibe la señal y envía una respuesta al equipo correspondiente. Todo se puede resumir como un circuito serie, donde el último equipo no puede funcionar si alguno de los que está antes que él no está conectado.

En todo proceso existen equipos que son clave para el buen funcionamiento del proceso, en este caso y debido a la importancia del control que debe tener el peso del producto, el sistema más importante es el de las celdas de carga o galgas extensiométricas. El funcionamiento de las celdas se basa en el Puente de Wheatstone, donde las galgas se comportan como resistencias eléctricas, pero que varían su valor dependiendo de la deformación que se produzcan en ellas, luego la electrónica realiza la conversión y cuantifica la variación. Las galgas pueden ser de semiconductor, metálica de alambre o metálica de lámina. La desventaja que pueden tener las galgas es la exposición a cambios bruscos de temperatura, debido a que están directamente relacionadas con la deformación del metal en el cual están montadas, por lo general son aceros inoxidables.

Así como existen equipos claves en un proceso y para el caso de este trabajo, existe un parámetro sumamente importante el cual hace que el equipo no sea capaz de realizar las instrucciones para las cuales fue diseñado, la comunicación. Para la comunicación entre los distintos periféricos, esclavos y maestros, en este caso un PLC, existen variadas alternativas, mediante buses de campo, Fieldbus, Modbus, Field Foundation, Profibus, etc. Donde la función principal de la comunicación es, como su nombre lo indica, comunicar las diferentes partes que componen el proceso, enviar y recibir señales de los, por ejemplo, actuadores, si estos están abiertos, cerrados o presentan fallas. Sin la comunicación el maestro (PLC) estaría ciego y no podría ser parte del proceso, por lo tanto él debe tener realimentación de las señales que él envía al exterior.

Para el traslado de líquidos y aceites existe una variada gama de bombas y como se ilustró en este trabajo van desde bombas impulsoras por rodete a bombas de engrane. La diferencia entre usar una u otra, radica en la densidad del líquido a transportar, la altura de elevación del producto y la altura a la cual debe succionar éste.

Para finalizar una de las ventajas de un sistema automatizado es el gran dinamismo que tiene el desarrollo del proyecto, ya que puede variar su versión original al 100 por ciento utilizando los mismos equipos. Como una de las desventajas que presenta el automatizar un proceso es el costo que esto implica, ya que las tecnologías a utilizar son caras, pero efectivas y, además, la escasez de técnicos y profesionales del área hace que la implementación y desarrollo del proyecto sea de costos elevados.

CAPITULO XI

11. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- Tesis del Estudio De La Plataforma Integrada De Automatización Del Fabricante Rockwell Automation Y Su Aplicación Como Solución Real De Automatización De Un Proceso Industrial, Katherine Kaiser Álvarez
- Methodologies for designing CIM Systems. G. Doumeingts; B. Vallespir.
- Manufactura Integrada por Computadora (CIM). Ing. Ricardo Jiménez.
- Tecnología de sistemas de control. Autores: Cecilio Angulo Bahón, Cristóbal Raya Giner.
- Electrónica Industrial Moderna. Timothy J. Maloney.
- Autómatas Programables. Josep Balcells, José Luis Romeral.
- Sensores y Acondicionadores de señal. Ramón Pallás Areny.
- <http://www.automatas.org/redes/redes.htm>
- Diseño y aplicaciones con autómatas programables. Autores:
Joan Dgo. Peña, Juan Gámiz caro, Antoni Grau saldes, Herminio Martínez García.
- PLC: automation with programmable logic controllers. Peter Rohner
- Tecnología de sistemas de control. Cecilio Angulo Bahón, Cristóbal Raya.
- Medición de Eventos Mecánicos Dinámicos. José A Argüelles Parrado.
- Instrumentación Eléctrica y Sistemas de Medida. B.A. Gregory.
- Strain Gage Based Transducers. The Technical Staff of Measurement Group, Inc
- <http://www.scribd.com/doc/2684435/ACTUADORES-NEUMATICOS>
- http://html.rincondelvago.com/engranajes_5.html
- http://www.automatas.org/redes/ethernet_archivos/frame.htm
- http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_hidráulica
- <http://books.google.cl/books?id=quyTx3vOsdYC&pg=PA9&dq=fuentes+de+alimentacion#v=onepage&q=&f=false>
- http://books.google.cl/books?id=_50ty8YvPHEC&pg=PA35&dq=fuentes+de+alimentacion+electronica#v=onepage&q=&f=false