

**BRAZO ROBOTIZADO PARA ALIMENTACION Y DESCARGA DE UN SISTEMA DE
PRODUCCION DE PIEZAS DE MADERA**

**ALFONSO ZAPATA GUARIN
COD: 1088261148**

**CARLOS MAURICIO CHICA SEPULVEDA
COD: 1088269237**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE TECNOLOGIA ELECTRICA
PEREIRA
2010**

**BRAZO ROBOTIZADO PARA ALIMENTACION Y DESCARGA DE UN SISTEMA DE
PRODUCCION DE PIEZAS DE MADERA**

**ALFONSO ZAPATA GUARIN
COD: 1088261148**

**CARLOS MAURICIO CHICA SEPULVEDA
COD: 1088269237**

**Proyecto de grado para optar
al título de Tecnólogo Eléctrico**

**DIRECTOR:
Ing. Msc. SIGILFREDO CATALINO ARREGOCES CAMPO
Docente Programa de Tecnología Eléctrica**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE TECNOLOGIA ELECTRICA
PEREIRA
2010**

Dedicado a:

*Mi hija Sara, quien ha sido la motivación y el sendero
Que ilumina el camino de mi vida.*

*A mi esposa Tatiana, mi compañera incondicional en el
Camino de la vida.*

*A mi madre Sandra y a mi padre Alfonso, han sido la guía y
El apoyo incondicional en mi vida.*

Afonso Zapata Guarín

Dedicado a:

*Mi padre Leonel quien siempre me ha demostrado
Su gran carácter, y su apoyo incondicional en todas
Mis decisiones.*

*Mis dos madres, Francely que me brinda su amor desde el cielo,
Y a Yuby que me ha demostrado su cariño y amor
En mi vida.*

Mis hermanos los quiero mucho

Carlos Mauricio Chica Sepúlveda

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por darnos el apoyo y la motivación incondicional durante todo el transcurso del desarrollo del proyecto.

A nuestro maestro, el Ingeniero Sigilfredo Arregocés por brindarnos y compartir todo su conocimiento para que el desarrollo y la implementación de este proyecto para que fuera posible.

A todos los profesores y amigos que nos brindaron su compañerismo y ayuda durante la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	5
1. INSTALACION HIDRAULICA	12
1.1. INTRODUCCIÓN	12
1.2. DESARROLLO DE LA HIDRAULICA.....	12
1.3. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA HIDRAULICA Y LA NEUMATICA	13
1.3.1. <i>Aplicaciones móviles</i>	15
1.3.2. <i>Aplicaciones industriales</i>	15
1.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS HIDRAULICOS.....	16
1.5. FLUIDO HIDRÁULICO.....	17
1.5.1. <i>Propiedades de los fluidos hidráulicos</i>	17
1.5.1.1. Densidad de masa y volumen específico	17
1.5.1.2. Peso específico y densidad específica.....	18
1.5.1.3. Módulos de compresibilidad y de dispersión.....	18
1.5.1.4. Viscosidad	19
1.5.2. <i>Observaciones adicionales sobre fluidos hidráulicos</i>	20
1.5.3. <i>Fluido hidráulico empleado en el proyecto</i>	21
1.5.3.1. Aplicaciones	22
1.5.3.2. Características y beneficios.....	22
1.6. GENERALIDADES DEL FLUIDO	24
1.7. LEYES BÁSICAS DEL FLUJO DE FLUIDOS	25
1.7.1. <i>Número de Reynolds</i>	25
1.7.2. <i>Flujo laminar y flujo turbulento</i>	26
1.7.3. <i>Línea de corriente</i>	27
1.7.4. <i>Tubo de corriente</i>	27
1.7.5. <i>Flujo estable</i>	27
1.7.6. <i>Volumen de control</i>	28
1.7.7. <i>Ecuaciones de continuidad</i>	28
1.7.8. <i>Ecuación de movimiento de Euler</i>	29
1.7.9. <i>Ecuación de Bernoulli</i>	31
1.7.10. <i>Flujo a través de un orificio</i>	33
1.8. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA NEUMÁTICA E HIDRÁULICA	35
1.9. LEYES FÍSICAS RELATIVAS A LOS FLUIDOS.	36
1.9.1. <i>Presión y fuerza</i>	36
1.9.1.1. Calculando fuerza, presión, y área	37
1.9.1.2. Presión absoluta	37
1.9.1.3. Presión manométrica.....	38
1.9.1.4. Presión atmosférica	38
1.9.1.5. Transmisión de fuerzas a través de líquidos	41
1.9.2. <i>Ley de Pascal</i>	42
1.9.2.1. Aplicación de la Ley de Pascal por Bramah	43
1.9.3. <i>Ley de Boyle</i>	44
1.9.4. <i>Ley de Charles</i>	46
1.9.4.1. Efecto de la temperatura en los fluidos	46
1.9.5. <i>Definiciones:</i>	47
1.9.5.1. Compresibilidad de fluidos	47
1.9.5.2. Cavitación	47
1.9.6. <i>Transmisión de potencia</i>	48
1.9.7. <i>Transmisión de potencia a través de una tubería</i>	48
1.9.8. <i>Presión hidráulica</i>	49
1.10. UNIDAD DE POTENCIA HIDRÁULICA	50
1.10.1. <i>Depósito</i>	50

1.10.2.	<i>Filtros</i>	50
1.10.3.	<i>Bombas hidráulicas</i>	51
1.10.3.1.	Bombas de Pistón Axial	53
1.10.3.2.	Bombas de Pistón Radial	53
1.10.3.3.	Bombas de Aspas	55
1.10.3.4.	Bombas de Engranés	56
1.10.4.	<i>Acumuladores</i>	57
1.10.5.	<i>Actuadores</i>	57
1.10.5.1.	Actuadores Lineales	57
1.10.5.2.	Actuadores Rotatorios	58
1.10.6.	<i>Válvulas Hidráulicas de Control</i>	60
1.10.6.1.	Válvula de carretes deslizantes	60
1.10.7.	<i>Válvulas de aletas</i>	62
1.10.8.	<i>Válvulas de tubo de inyección</i>	62
1.10.9.	<i>Válvula de movimiento vertical</i>	63
1.11.	MODELADO MATEMATICO DEL SISTEMA HIDRÁULICO	64
1.11.1.	<i>Ecuación generalizada de la continuidad de flujo</i>	64
1.11.2.	<i>Ecuación generalizada del momento</i>	65
1.11.3.	<i>Aplicación de la teoría de circuitos fluidos a una trayectoria</i>	66
1.11.4.	<i>Cilindros</i>	67
2.	ROBOTICA	70
2.1.	ORIGEN Y DESARROLLO DE LA ROBOTICA	70
2.2.	MORFOLOGÍA DEL ROBOT	74
2.2.1.	<i>Estructura mecánica de un robot</i>	75
2.2.2.	<i>Transmisiones y reductores</i>	78
2.2.2.1.	Transmisiones	78
2.2.2.2.	Reductores	80
2.2.2.3.	Accionamiento directo	81
2.2.3.	<i>Actuadores</i>	83
2.2.3.1.	Actuadores eléctricos	84
2.2.3.1.1.	Motores de corriente continua	84
2.2.3.1.2.	Motores paso a paso	88
2.2.3.1.3.	Motores de corriente alterna	90
2.2.4.	<i>Sensores internos</i>	90
2.2.4.1.	Sensores de posición	91
2.2.4.1.1.	Codificadores angulares de posición	91
2.2.5.	<i>Sensores de presencia</i>	92
2.3.	ELEMENTOS TERMINALES	93
2.4.	CINEMATICA DEL ROBOT	96
2.4.1.	<i>El problema cinemático directo</i>	97
2.4.1.1.	Resolución del problema cinemático directo mediante matrices de transformación homogénea	97
2.4.1.2.	Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo	100
2.4.2.	<i>Cinemática inversa</i>	102
2.4.2.1.	Resolución del problema cinemático inverso por métodos geométricos	104
2.4.2.2.	Desacoplo cinemático	107
3.	ARQUITECTURA INTERNA DE UN AUTÓMATA PROGRAMABLE	108
3.1.	LOS AUTÓMATAS PROGRAMABLES	108
3.1.1.	<i>Arquitectura y configuración</i>	108
3.1.2.	<i>Interfaces de entrada/salida</i>	112
3.1.3.	<i>Programación</i>	114
3.2.	REGISTROS	123
3.2.1.	<i>Acumuladores (ACU1 y ACU2)</i>	123

3.2.2.	Registros 1 y 2 de direcciones.....	125
3.2.3.	Registros de módulos de datos (DB).....	125
3.3.	TEMPORIZADORES Y CONTADORES.....	125
3.3.1.	Temporizadores (T):.....	125
3.3.2.	Contadores (Z):.....	125
3.4.	CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES ÁREAS DE MEMORIA DE ACUERDO A SU FUNCIÓN.....	126
3.4.1.	Áreas de memoria de la CPU S7.....	127
3.4.2.	Direccionamiento físico de los puertos de entrada y salida.....	129
3.5.	TIPOS DE DATOS.....	131
3.5.1.	Memoria de marcas.....	131
3.5.2.	Entradas y salidas.....	132
3.6.	REGISTROS DE MÓDULOS DE DATOS.....	133
3.6.1.	Módulos de organización (OB).....	133
3.6.2.	Módulos de código (FC).....	134
3.6.3.	Módulos de funciones (FB).....	134
3.6.4.	Módulos de datos (DB).....	134
3.6.5.	Módulos de funciones especiales (SFB).....	134
3.6.6.	Módulos de funciones del sistema (SFC).....	135
3.7.	DIRECCIONAMIENTO DE LA MEMORIA DE LOS AUTOMATAS.....	136
3.7.1.	Direccionamiento inmediato.....	137
3.7.2.	Direccionamiento directo.....	137
3.7.3.	Operandos en el direccionamiento indirecto.....	140
3.7.4.	Direccionamiento indirecto de la memoria.....	142
3.7.4.1.	Operandos en el direccionamiento indirecto de la memoria.....	143
3.7.4.2.	Direccionamiento indirecto de la memoria con doble palabra (DW) de marca.....	144
3.7.4.3.	Direccionamiento indirecto con palabra de marca.....	147
3.7.4.4.	Direccionamiento indirecto utilizando punteros internos de áreas.....	147
3.7.4.5.	Calculo de la posición de memoria en el direccionamiento indirecto con puntero interno de área en formato doble.....	149
4.	REDES DE PETRI.....	152
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	152
4.2.	ESTRUCTURA DE UNA RED DE PETRI.....	153
4.2.1.	Secuencia.....	158
4.2.2.	Conflicto.....	158
4.2.3.	Sincronización.....	159
4.2.4.	Atribución.....	159
4.3.	CLASES DE REDES DE PETRI.....	160
4.3.1.	Redes de Petri ordinarias.....	160
4.3.1.1.	Grafo de estados.....	160
4.3.1.2.	Grafo marcado.....	161
4.3.2.	Red de Petri de libre elección.....	161
4.3.3.	Red de Petri simple.....	162
4.3.4.	Red de Petri binaria.....	162
4.3.5.	Red de Petri generalizada.....	162
4.3.6.	Redes de Petri con capacidad limitada.....	162
4.3.7.	Redes de Petri con arcos inhibidores.....	162
4.4.	MARCAJE EN UNA RED DE PETRI.....	163
4.5.	REGLAS DE EJECUCIÓN DE UNA RED DE PETRI.....	163
4.6.	MODELADO CON RED DE PETRI.....	164
4.6.1.	Conceptos para el modelo:.....	164
4.7.	PROCESOS CONCURRENTES O DE RECURSOS COMPARTIDOS.....	165
5.	IMPLEMENTACIÓN.....	166

5.1.	IMPLEMENTACIÓN DEL BRAZO ROBOT EN AUTOMATION STUDIO 5.0 ®	166
5.1.1.	<i>Programa máquina de taladrar en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®</i>	170
5.1.2.	<i>Programa del manipulador en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®</i>	172
5.1.3.	<i>Sistema integrado implementado en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®</i>	176
5.2.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TALADRADO INTEGRADO CON EL MANIPULADOR SIMATIC S7 SIEMENS ®. 177	
5.2.1.	<i>Programa de la máquina de taladrar SIMATIC S7 SIEMENS ®</i>	178
5.2.2.	<i>Programa del manipulador: SIMATIC S7 SIEMENS ®</i>	181
5.3.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TALADRADO Y DEL BRAZO ROBOT EN REDES DE PETRI.	188
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	193
7.	BIBLIOGRAFIA	195

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.1	UNIDADES DE LAS VISCOSIDADES DINÁMICA Y CINEMÁTICA	20
TABLA 1.2	VISCOSIDADES DINAMICA Y CINEMATICA DEL AGUA	21
TABLA 1.3	CARACTERISTICAS TÍPICAS DEL ACEITE SHELL TELLUS® 46	23
TABLA 1.4	CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS Y MOTORES HIDRAULICOS 52	
TABLA 2.1	SISTEMAS DE TRANSMISIÓN PARA ROBOTS	79
TABLA 2.2.	CARACTERÍSTICAS DE REDUCTORES PARA ROBÓTICA	81
TABLA 2.3.	TIPOS DE SENSORES INTERNOS DE ROBOTS	91
TABLA 2.4.	SISTEMAS DE SUJECIÓN PARA ROBOTS	94
TABLA 2.5.	HERRAMIENTAS TERMINALES PARA ROBOTS	96
TABLA 3.1	DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE MEMORIA	127
TABLA 3.2	RANGOS MÁXIMOS DE DIRECCIONES PARA LAS DIFERENTES ÁREAS DE MEMORIA	128
TABLA 3.3	MEMORIAS DE MARCA.....	131
TABLA 3.4	IMAGEN DEL PROCESO DE LAS ENTRADAS (PAE)	132
TABLA 3.5	IMAGEN DEL PROCESO DE LAS SALIDAS (PAA)	132
TABLA 3.6	ENTRADAS EXTERNAS	132
TABLA 3.7	SALIDAS EXTERNAS	132
TABLA 3.8	CLASES DE ALARMAS.....	135
TABLA 3.9	EVENTOS DE ERROR ASÍNCRONO Y OB CORRESPONDIENTE	136
TABLA 3.10	DIRECCIONAMIENTO INDIRECTO DE LAS MEMORIAS DE MARCA CON PUNTEROS DOBLES ...	145

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 (A) PERFIL DE VELOCIDAD DEL FLUJO LAMINAR; (B) PERFIL DE VELOCIDAD DEL FLUJO TURBULENTO.	26
FIGURA 1.2 LÍNEAS DE CORRIENTE	
FIGURA 1.3 TUBO DE CORRIENTE.....	27
FIGURA 1.4 (A) TUBO DE CORRIENTE; (B) CONJUNTO DE TUBOS DE CORRIENTE	28
FIGURA 1.5 TUBO DE CORRIENTE INFINITESIMAL DE LONGITUD ds	30
FIGURA 1.6 DIAGRAMA PARA ILUSTRAR LA SUMA DE LA ALTURA DE VELOCIDAD, LA ALTURA DE PRESIÓN Y LA ALTURA POTENCIAL ES CONSTANTE. ECUACIÓN DE BERNOULLI.	32
FIGURA 1.7 (A) FLUJO A TRAVÉS DE UN ORIFICIO CUANDO EL NÚMERO DE REYNOLDS ES BAJO.	33
FIGURA 1.7 (B) FLUJO A TRAVÉS DE UN ORIFICIO CUANDO EL NÚMERO DE REYNOLDS ES ALTO.....	33
FIGURA 1.8 ESQUEMA DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA O NEUMÁTICA.	36
FIGURA 1.9 TRANSMISIÓN DE FUERZA A: SOLIDO B: LÍQUIDO	40
FIGURA 1.10 EFECTOS DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA	41
FIGURA 1.11 DISTRIBUCIÓN DE FUERZA	41
FIGURA 1.12	42
FIGURA 1.14	43
FIGURA 1.15 A.....	45
FIGURA 1.16 A.....	46
FIGURA 1.17	47
FIGURA 1.18	48
FIGURA 1.19	48
FIGURA 1.20	49
FIGURA 1.21 A.....	49
FIGURA 1.22	50
FIGURA 1.23 A BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO	51
FIGURA 1.23 B BOMBA DE DESPLAZAMIENTO NO POSITIVO.....	52
FIGURA 1.24 BOMBA DE PISTÓN AXIAL.....	53
FIGURA 1.25 A BOMBA DE PISTÓN RADIAL	54
FIGURA 1.25 B DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA BOMBA DE PISTÓN RADIAL.....	54
FIGURA 1.26 A BOMBA DE ASPAS	55
FIGURA 1.26 B DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA BOMBA DE ASPAS.....	55
FIGURA 1.27 BOMBA DE ASPAS BALANCEADA	56
FIGURA 1.28 BOMBA DE ENGRANES	57

FIGURA 1.29 A CILINDRO DE DOBLE ACCIÓN DIFERENCIAL.....	58
FIGURA 1.29 B CILINDRO DE DOBLE ACCIÓN NO DIFERENCIAL.....	58
FIGURA 1.30 MOTOR DE PISTÓN AXIAL.....	59
FIGURA 1.31 MOTOR DE PISTÓN RADIAL.....	59
FIGURA 1.32 MOTOR DE ENGRANES.....	60
FIGURA 1.33 VÁLVULA DE CARRETES DESLIZANTES DE CUATRO VÍAS CONECTADA A UN CILINDRO DE POTENCIA.....	61
FIGURA 1.34 VÁLVULA DE TRES VÍAS CONECTADA A UN CILINDRO DE POTENCIA.....	61
FIGURA 1.35 VÁLVULA DE ALETA CONECTADA A UN CILINDRO DE POTENCIA.....	62
FIGURA 1.36 VÁLVULA DE TUBO DE INYECCIÓN CONECTADA A UN CILINDRO DE POTENCIA.....	63
FIGURA 1.37 VÁLVULA DE ALIVIO.....	64
FIGURA 1.38 FLUJO DE VOLUMEN GENERALIZADO.....	64
FIGURA 1.39 ACTUADOR LINEAL ASIMÉTRICO.....	68
FIGURA 2.1 SISTEMA DE TELEMANIPULACIÓN BILATERAL.....	70
FIGURA 2.2 ROBOT UNIMATE 2000. UNO DE LOS PRIMEROS MODELOS COMERCIALES DE UNIMATION ...	72
FIGURA 2.3 ROBOT IRB6 DE LA FIRMA SUECA ASEA.....	73
FIGURA 2.4 EJEMPLO DE ESTRUCTURA MECÁNICA Y ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UN ROBOT (CORTESÍA DE INSER ROBÓTICA).....	75
FIGURA 2.5 DISTINTOS TIPOS DE ARTICULACIONES PARA ROBOTS.....	76
FIGURA 2.6 CONFIGURACIONES MÁS FRECUENTES EN ROBOTS INDUSTRIALES.....	77
FIGURA 2.7 GRADOS DE LIBERTAD DEL ROBOT ARC MATE 120/S-12 (CORTESÍA DE FANUC).....	77
FIGURA 2.8 ROBOTS PLANARES REDUNDANTES.....	78
FIGURA 2.9 TELEMANIPULADOR TELBOT JUNTO CON LA CAJA DE TRANSMISIÓN POR ENGRANAJES SITUADA EN SU BASE. (CORTESÍA DE WÄLISCHMILLER GMBH.).....	80
FIGURA 2.10. ROBOT ADEPTTHREE DE ACCIONAMIENTO DIRECTO. (CORTESÍA DE ADEPT TECHNOLOGY) ..	83
FIGURA 2.11 ESQUEMA DE MOTOR DC SECCIONADO CON INDICACIÓN DE SUS DISTINTOS COMPONENTES.....	85
FIGURA 2.12 MOTOR DC. ESQUEMA Y FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.....	87
FIGURA 2.13 MOTOR DC DE IMANES PERMANENTES CONTROLADO POR INDUCIDO.....	87
FIGURA 2.14 ESQUEMA DE UN MOTOR PASO A PASO DE IMANES PERMANENTES CON CUATRO FASES. ..	89
FIGURA 2.15. DISPOSICIÓN DE UN CODIFICADOR ÓPTICO (ENCODER) INCREMENTAL.....	92
FIGURA 2.16. PINZA NEUMÁTICA DE DEDOS PARALELOS. (CORTESÍA FESTO.).....	95
FIGURA 2.17 DIAGRAMA DE RELACIÓN ENTRE CINEMÁTICA DIRECTA E INVERSA.....	97
FIGURA 2.18 ROBOT PLANAR DE 2 GRADOS DE LIBERTAD.....	98
FIGURA 2.19 PARÁMETROS D-H PARA UN ESLABÓN GIRATORIO.....	101

FIGURA 2.20 ROBOT ARTICULAR	104
FIGURA 2.21 ELEMENTOS 2 Y 3 DEL ROBOT DE LA FIGURA 2.20 CONTENIDOS EN UN PLANO Y EN A) CONFIGURACIÓN CODO ABAJO Y B) CONFIGURACIÓN CODO ARRIBA.	106
FIGURA 3.1 ARQUITECTURA INTERNA DE UN AUTÓMATA PROGRAMABLE.....	121
FIGURA 3.2 ARQUITECTURA INTERNA DE UN AUTÓMATA PROGRAMABLE.....	122
FIGURA 3.3 TIPOS DE MEMORIAS DEL AUTÓMATA.	126
FIGURA 3.4 ESQUEMA DE DIRECCIONAMIENTO POR DEFECTO E/S DIGITALES	130
FIGURA 3.5 ESQUEMA DE DIRECCIONAMIENTO E/S ANÁLOGAS	130
FIGURA 3.6 ILUSTRACIÓN DEL EJEMPLO 3.1	138
FIGURA 3.7 ILUSTRACIÓN EJEMPLO 3.2.....	139
FIGURA 3.8 ILUSTRACIÓN EJEMPLO 3.2.....	139
FIGURA 3.9 EJEMPLO DE IDENTIFICADOR MAS DIRECCIÓN	141
FIGURA 3.10 VISUALIZACIÓN DEL ESTADO DE LA MEMORIA DE MARCA EN SIMATIC S7	142
FIGURA 3.11 DIRECCIONAMIENTO INDIRECTO DE LA MEMORIA.....	143
FIGURA 3.12 GRAFICA TABLA DE VARIABLES ESTADO INTERNO DE LA CPU.....	146
FIGURA 3.13 ILUSTRACIÓN DEL EJEMPLO 3.5	146
FIGURA 3.14 DIRECCIONAMIENTO TIPO INDEXADO	148
FIGURA 3.15 SOLUCIÓN GRAFICA EJEMPLO 3.8.....	150
FIGURA 4.1: DISEÑO DE LA RED DE PETRI DESCRITA EN EL EJEMPLO 4.1.	156
FIGURA 4.2: RED DE PETRI SECUENCIAL.	158
FIGURA 4.3: RED DE PETRI EN CONFLICTO.....	158
FIGURA 4.4: EJEMPLO DE UNA RED DE PETRI SINCRONIZADA.	159
FIGURA 4.5: ESQUEMA DONDE SE PRESENTA UN CASO DE ATRIBUCIÓN EN UNA RED DE PETRI.....	159
FIGURA 4.6: GRAFO DE ESTADOS DE UNA RED DE PETRI.	160
FIGURA 4.7: GRAFO MARCADO DE UNA RED DE PETRI.....	161
FIGURA 4.8: RED DE PETRI DE LIBRE ELECCIÓN.....	161
FIGURA 4.9: RED DE PETRI SIMPLE.	162
FIGURA 4.10: EJEMPLO DE UNA RED DE PETRI CON ARCOS INHIBIDORES.	163
FIGURA 4.11: EJEMPLO DE UNA RP PARA APLICAR LAS REGLAS DE EJECUCIÓN.....	164
FIGURA 4.12: APLICACIÓN DE UN RECURSO COMPARTIDO EN UNA RED DE PETRI QUE REPRESENTA UNA MAQUINA DE TALADRADO Y UN BRAZO ROBOTIZADO QUE TRABAJAN EN CONJUNTO.	165
FIGURA 5.1 REPRESENTACIÓN DEL CONTROL DE GIRO DEL MOTOR AC EN AUTOMATION STUDIO 5.0 ® .	166
FIGURA 5.2 REPRESENTACIÓN DE LA PARTE HIDRÁULICA DEL MANIPULADOR EN AUTOMATION STUDIO 5.0 ®	167
FIGURA 5.4 REPRESENTACIÓN DE LA VENTOSA DEL MANIPULADOR EN AUTOMATION STUDIO 5.0 ®	169

GLOSARIO

AGUA GLICOLADA: Son mezclas en disolución del 20 al 45% de agua y etileno-propilenglicol, con aditivos anticorrosivos y mejoradores antidesgaste. Tiene buena relación viscosidad/temperatura, muy buenas propiedades de resistencia a la llama, excelente comportamiento a bajas temperaturas, y un costo que no es prohibitivo. Sin embargo, su temperatura de utilización está limitada por el agua, suele tener problemas de corrosión, presenta problemas de evaporación y separación de fases, y requiere frecuentes cuidados de mantenimiento.

ANTROPOMORFO: Que tiene forma o apariencia humana.

ARTICULACIÓN PRISMÁTICA: Tipo de articulación que permite realizar movimientos lineales, en una sola dirección.

ASCII: ASCII (acrónimo inglés de **American Standard Code for Information Interchange-Código Estadounidense Estándar para el Intercambio de Información**), pronunciado generalmente [áski], es un código de caracteres basado en el alfabeto latino tal como se usa en inglés moderno y en otras lenguas occidentales. Fue creado en 1963 por el Comité Estadounidense de Estándares (ASA, conocido desde 1969 como el Instituto Estadounidense de Estándares Nacionales, o ANSI) como una refundición o evolución de los conjuntos de códigos utilizados entonces en telegrafía. El código ASCII utiliza 7 bits para representar los caracteres, aunque inicialmente empleaba un bit adicional (bit de paridad) que se usaba para detectar errores en la transmisión. A menudo se llama incorrectamente ASCII a otros códigos de caracteres de 8 bits, como el estándar ISO-8859-1 que es una extensión que utiliza 8 bits para proporcionar caracteres adicionales usados en idiomas distintos al inglés, como el español.

BARÓMETRO: Instrumento que mide la presión atmosférica. La presión atmosférica es el peso por unidad de superficie ejercida por la atmósfera.

Los primeros barómetros estaban formados por una columna de líquido encerrada en un tubo cuya parte superior está cerrada. El peso de la columna de líquido compensa exactamente el peso de la atmósfera. Los primeros barómetros fueron realizados por el físico y matemático italiano Evangelista Torricelli en el siglo XVII.

La presión atmosférica equivale a la altura de una columna de agua de unos 10 m de altura. En los barómetros de mercurio, cuya densidad es 13.6 veces mayor que la del agua, la columna de mercurio sostenida por la presión atmosférica al nivel del mar en un día despejado es de aproximadamente unos 760 mm.

BARÓMETRO ANEROIDE: Es un barómetro que no utiliza mercurio. Indica las variaciones de presión atmosférica por las deformaciones más o menos grandes que aquélla hace experimentar a una caja metálica de paredes muy elásticas en cuyo interior se ha hecho el vacío más absoluto. Se gradúa por comparación con un barómetro de mercurio pero sus indicaciones son cada vez más inexactas por causa de la variación de la elasticidad del resorte metálico. Fue inventado por Lucien Vidie en 1844.

BIT: Un bit es un dígito dentro del sistema de numeración binario, es decir que un bit puede ser un 1 o un 0.

BYTE: El byte es la unidad de capacidad de almacenamiento estándar. Con esta unidad de medida se mide desde el almacenamiento de datos hasta la capacidad de memoria de una computadora.

CATÁLISIS: Transformación química motivada por sustancias que no se alteran en el curso de la reacción.

CATALÍTICO: Pertenece o relativo a la catálisis.

DELGAS: Cada una de las láminas o varillas conductoras que, aisladas unas de otras, forman el colector de una dinamo.

DINAMO: Máquina destinada a transformar la energía mecánica en energía eléctrica, por inducción electromagnética, debida a la rotación de cuerpos conductores en un campo magnético.

ENCODER (CODIFICADOR DE POSICIÓN): Un encoder es un codificador rotatorio, también llamado codificador del eje, suele ser un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor.

Estos dispositivos se utilizan en robótica, en lentes fotográficas de última generación, en dispositivos de entrada de ordenador (tales como el ratón y el TrackBall), y en plataformas de radar rotatorias. Hay dos tipos principales: absoluto y relativo.

EXOESQUELETO: Esqueleto que recubre la superficie corporal o está situado en la piel.

FILTRO PASA BAJAS: Filtro pasa-bajo es el nombre común dado a un circuito Electrónico que permite el paso de bajas frecuencias sin dificultades y atenúa (o reduce) la amplitud de las frecuencias mayores que la frecuencia de corte.

La cantidad de atenuación para cada frecuencia varía para cada filtro.

FUERZA CONTRA-ELECTROMOTRIZ EN MOTORES ELÉCTRICOS: En cuanto circula corriente por el bobinado del rotor (inducido), se produce la acción dinámica entre la corriente y el campo magnético de las expansiones polares haciendo que el motor comience a funcionar.

Pero en cuanto los conductores del rotor se mueven, cortan las líneas de fuerza del campo y ya conocemos que por tal motivo se inducirá una fem en ellos. De acuerdo con la

ley de Lenz, la fuerza electromotriz tiende a oponerse a la causa que la genera, es decir, que en el caso que nos ocupa tendera a frenar el rotor.

Aplicando la regla de la mano izquierda se encuentra que la espira es impulsada hacia un sentido señalado, pero al moverse los conductores que la forman dentro del campo se inducirá una fem cuyo sentido se encuentra con la regla de la mano derecha y el sentido de la tal es opuesto al de la corriente principal.

Por tal motivo a esa fem se la llama fuerza contra-electromotriz y obliga a aumentar la tensión aplicada al motor para que se asegure la circulación de corriente en el rotor.

GOLPE DE ARIETE: El Golpe de Ariete es el causante principal de las averías en tuberías e instalaciones hidráulicas. Al cerrar bruscamente una válvula o un grifo instalado en el extremo de una tubería de cierta longitud, las partículas de agua que quedan detenidas son presionadas por las que vienen avanzando detrás y aún siguen moviéndose. Esto causa una sobrepresión que se desplaza por la tubería a una velocidad un tanto menor que la velocidad del sonido en el agua. El agua en circulación golpea la válvula o el grifo cerrado y rebota. El rebote continúa hasta que el agua impacta un punto y la energía de la onda de agua se comienza a distribuir más uniformemente en el sistema de tuberías. El punto de impacto, que puede ser la conexión entre dos tuberías o en una junta, genera ese sonido particular de golpe que puede escucharse a veces en los caños.

GUINCHE: Grúa, montacargas (máquina para levantar y trasladar cargas).

HERRUMBRE: Óxido del hierro.

LEVA: Pieza que gira solidariamente con un eje, con el que está unida directamente o por medio de una rueda, y que al girar comunica su movimiento a otro mecanismo: *la leva se emplea para transformar un movimiento circular continuo en un movimiento rectilíneo alternativo; la rotación de la leva provoca el vaivén de la varilla.*

MAQUINA SINCRÓNICA: La máquina sincrónica es un particular tipo de máquina eléctrica rodante que tiene velocidad de rotación rígidamente relacionada a la frecuencia de las grandezas eléctricas sinusoidales presentes a los bornes.

En el funcionamiento como generador se llama alternador; cuando funciona como motor se llama motor sincrónico.

No existen diferencias fundamentales entre las dos condiciones y frecuentemente la misma máquina puede funcionar sea como alternador sea como motor.

Aunque el motor encuentra importantes empleos, todavía la aplicación fundamental de la máquina sincrónica es como alternador. De hecho, casi la totalidad de la potencia eléctrica utilizada en el mundo está producida con los alternadores. Usualmente el inductor está puesto en el rotor y el inducido en el estator.

MATRIZ: Cuadro de números o elementos dispuestos ordenadamente en filas numeradas de arriba abajo y en columnas de izquierda a derecha; si se emplea la misma letra, esta

lleva dos subíndices, el primero para la fila y el segundo para la columna; si la matriz tiene tantas filas como columnas se llama cuadrada.

PALABRA (W): La palabra está compuesta por 16 bits.

PALABRA DOBLE (DD): La palabra doble está compuesta por 32 bits.

SENSOR: Son instrumentos que miden variables físicas, como temperatura, presión, velocidad, posición, etc., esta información se convierte en una señal útil para un sistema de medida o control.

SERVOMECANISMOS: Un servomecanismo es un sistema formado de partes mecánicas y electrónicas que en ocasiones son usadas en robots, con parte móvil y fija. Puede estar formado también de partes mecánicas, hidráulicas y controladas con precisión. Ejemplos: brazo robot, mecanismo de frenos automotor.

SERVOMOTOR: Un servomotor (también llamado Servo) es un dispositivo similar a un motor de corriente continua, que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición.

Está conformado por un motor, una caja reductora y un circuito.

SERVOVÁLVULA: Una servoválvula es un dispositivo de control de flujo de un fluido controlado por un servomotor. Las servoválvulas son accionadores de tipo neumático o hidráulico que conectan dos o más vías por las que circula un fluido.

Con este control mecánico se consigue obtener una gran potencia de accionamiento de las válvulas o una gran precisión en su apertura que no sería posible obtener con un control manual de esas válvulas.

La diferencia con las válvulas es que estas son de tipo todo o nada, mientras que las servoválvulas tienen la posibilidad de controlar la presión o el caudal.

TERMOPAR: Dispositivo para medir temperaturas, mediante las fuerzas electromotrices originadas por el calor en las soldaduras de dos metales distintos.

TOBERA: Tubo de salida por el que termina el conducto de descarga de un fluido.

TRANSCODIFICACIÓN: La transcodificación no es más que una traducción, conversión, transformación o pasaje de un formato a otro. Representa un carácter, lo que sería aproximadamente una letra, y está constituido por 8 bits consecutivos, de modo tal que un byte equivaldría a 8 bits.

VACÍO: El vacío (del latín *vacivus*) es la ausencia total de materia en un determinado espacio o lugar, o la falta de contenido en el interior de un recipiente. Por extensión, se denomina también vacío a la condición de una región donde la densidad de partículas es muy baja, como por ejemplo el espacio interestelar; o la de una cavidad cerrada donde la presión de aire u otros gases es menor que la atmosférica.

Puede existir naturalmente o ser provocado en forma artificial, ya sea para usos tecnológicos o científicos, o en la vida diaria. Se lo aprovecha en diversas industrias, como la alimentaria, la automovilística o la farmacéutica.

RESUMEN

Para este proyecto se estudiaron fundamentos básicos de la robótica como lo son la hidráulica y la neumática, los cuales son necesarios para comprender el comportamiento de los fluidos dentro de cada cilindro que compone al sistema de producción de piezas de madera y al manipulador. Otro fundamento básico es la morfología, el cual nos indica como está constituido el manipulador mecánicamente, además de explicar las funciones de cada componente y los tipos de manipuladores que pueden ser construidos. Denavit-Hartenberg y el método geométrico son dos representaciones matemáticas de cómo el manipulador se va a ubicar y va a trabajar en el espacio limitado que éste tiene.

Tanto el sistema de manufactura como el manipulador van a ser programados en el autómatas SIMATIC® S7 CPU 314, y para ello es necesario conocer el lenguaje de programación de este PLC.

Para poder obtener una completa visualización en tiempo real de ambos sistemas integrados en uno solo, se utiliza una herramienta llamada red de Petri, la cual simula todo el sistema en conjunto y nos permite solucionar los errores que éste puede presentar.

En este documento se representa la simulación completa del brazo robotizado y del sistema de taladrado de piezas de madera en AUTOMATION STUDIO® 5.0 el cual concluye un preciso funcionamiento de todo el sistema en conjunto y nos demuestra que la implementación es viable.

INTRODUCCION

Los sistemas de producción industrial requieren una eficiencia y calidad en sus productos, por tanto se ve en la necesidad de implementar nuevas tecnologías en sus sistemas de producción.

La automatización es la más clara solución ante esta necesidad constante de la industria moderna, por este motivo se implementará este sistema de producción de piezas con un brazo robotizado, se busca construir un prototipo a escala sistema automático y flexible de producción que sirva como modelo a la industria regional.

Para la solución de este problema utilizaremos un autómata (PLC Simatic-S7) el cual será la unidad central de mando del sistema de taladrado y del brazo robotizado y se encargará de tomar las decisiones para ejecutar los procesos de la manera más eficiente y adecuada.

El sistema de taladrado de piezas está compuesto por tres cilindros neumáticos para sujetar la pieza, perforarla y expulsarla de la máquina. La posición inicial y final de cada cilindro será detectada por medio de sensores electrónicos construidos con base al integrado CNY70.

El brazo robotizado se encargará de alimentar el sistema de producción y también de desplazar las piezas ya procesadas a otro lugar. Este robot está conformado por un cilindro hidráulico y uno neumático. Su posicionamiento será controlado por un encoder incremental el cual estará acoplado al eje de un motor de inducción que hace girar el brazo horizontalmente desde su base, la velocidad de giro es controlado por un variador de velocidad (Altivar 54).

Acoplar estos sistemas es un impedimento al momento de programar en el PLC, por esta razón hacemos uso de una herramienta de programación llamada Redes de Petri, la cual nos permite observar la simulación del funcionamiento en conjunto del sistema de taladrado y el brazo robotizado.

1. INSTALACION HIDRAULICA

1.1. INTRODUCCIÓN

La palabra “**Hidráulica**” proviene del griego “**hydor**” que significa “**agua**”, cubrió originalmente el estudio del comportamiento físico del agua en reposo y en movimiento. El uso ha ampliado su significado para incluir el comportamiento de todos los líquidos, aunque se refiera sobre todo al movimiento de líquidos. La hidráulica incluye la manera de la cual los líquidos actúan en los tanques y las cañerías, se ocupa de sus características, y explora maneras de aprovechar las mismas. Hoy el término hidráulica se emplea para referirse a la transmisión y control de fuerzas y movimientos por medio de líquidos, es decir, se utilizan los líquidos para la transmisión de energía, en la mayoría de los casos se trata de aceites minerales pero también pueden emplearse otros fluidos, como líquidos sintéticos, agua o una emulsión agua-aceite.

La potencia fluida es un término que fue creado para incluir la generación, control, y el uso de la energía en forma continua y eficaz de fluidos bombeados o comprimidos (líquidos o gases) cuando se utiliza esta energía para proporcionar la fuerza y el movimiento a los mecanismos. Esta fuerza y movimiento puede estar en forma de empuje, tracción, rotación, regulación, o conducción. La potencia fluida incluye la hidráulica, que se relaciona con los líquidos, y la neumática, que se relaciona con los gases. Los líquidos y los gases son similares en muchos aspectos.

1.2. DESARROLLO DE LA HIDRAULICA

Aunque el desarrollo moderno de la hidráulica sea comparativamente reciente, las antiguas civilizaciones estaban familiarizadas con muchos principios hidráulicos y sus usos. Los egipcios y la población antigua de Persia, India, y China transportaron el agua a lo largo de canales para la irrigación y propósitos domésticos, usando las presas y esclusas para controlar el caudal. Los antiguos cretenses tenían un sistema de fontanería avanzado. Arquímedes estudió las leyes de la flotación y cuerpos sumergidos. Los romanos construyeron los acueductos para llevar el agua a sus ciudades.

Después de la desintegración del mundo antiguo, hubo pocas novedades por muchos siglos. Luego, durante un período comparativamente corto, comenzando cerca del final del siglo XVII, el físico italiano, Evangelista Torricelle, el físico francés, Edme Mariotte, y posteriormente, Daniel Bernoulli condujeron

experimentos para estudiar los elementos de fuerza en la descarga del agua a través de pequeñas aberturas a los lados de los tanques y a través de cañerías cortas. Durante el mismo período, Blaise Pascal, científico francés, descubrió la ley fundamental de la ciencia de la hidráulica.

La ley de Pascal indica que el aumento en la presión sobre la superficie de un líquido confinado es transmitido sin disminución a través del recipiente o del sistema que lo contiene. (Éste es el principio básico de la hidráulica).

Para que la ley de Pascal sea útil en usos prácticos, era necesario tener un pistón que “encajara exactamente.” No fue sino hasta la última parte del siglo XVIII en que fueron encontrados métodos para hacer piezas que encajaran con precisión según los requerimientos de los sistemas hidráulicos. Esto fue logrado por la invención de máquinas que fueron utilizadas para cortar y para dar forma a las piezas, logrando el encastre necesario, particularmente, por el desarrollo de juntas y empaquetaduras. Desde entonces, componentes tales como válvulas, bombas, cilindros actuadores, y motores han progresado y perfeccionado para hacer de la hidráulica una de tecnologías principales para transmitir potencia.

La prensa hidráulica, inventada por el inglés John Brahmah, fue uno de los primeras partes realizables de maquinaria desarrolladas que utilizaron la hidráulica en su operación. Consistió en una bomba de émbolo canalizada por tubos a un cilindro grande y a un pistón. Esta prensa encontró uso amplio en Inglaterra porque proporcionó medios más eficaces y más económicos de aplicar grandes fuerzas en aplicaciones industriales.

1.3. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA HIDRAULICA Y LA NEUMATICA

En la actualidad las aplicaciones de la oleohidráulica y neumática son muy variadas, esta amplitud en los usos se debe principalmente al diseño y fabricación de elementos de mayor precisión y con materiales de mejor calidad, acompañado además de estudios más acabados de las materias y principios que rigen la hidráulica y neumática. Todo lo anterior se ha visto reflejado en equipos que permiten trabajos cada vez con mayor precisión y con mayores niveles de energía, lo que sin duda ha permitido un creciente desarrollo de la industria en general.

Hoy, se utiliza la potencia hidráulica para hacer funcionar muchas y variadas herramientas y mecanismos. En un garaje, un mecánico levanta el extremo de un automóvil con un gato hidráulico. Los dentistas y los peluqueros utilizan transmisión hidráulica, a través pequeños movimientos de una palanca de mando, para levantar y colocar sus sillas a una altura de trabajo conveniente. Los cierres hidráulicos evitan que puertas pesadas se cierren de golpe. Los frenos hidráulicos han sido un equipo estándar en los automóviles desde los años 30. La mayoría de los automóviles se equipan con transmisiones automáticas que son accionadas hidráulicamente. La dirección hidráulica es otro uso de la potencia hidráulica. Los trabajadores de construcción dependen de la energía hidráulica para la operación

de varios componentes de su equipamiento. Por ejemplo, la pala de una niveladora es accionada normalmente por energía hidráulica. Durante el período precedente a la Segunda Guerra Mundial la marina de guerra comenzó a aplicar la hidráulica a los mecanismos navales extensivamente. Desde entonces, los usos navales han aumentado al punto donde muchos dispositivos hidráulicos ingeniosos se utilizan en la solución de problemas de artillería, de aeronáutica, y de navegación. A bordo de la nave, se utiliza la transmisión hidráulica para operar equipos tales como el guinche de ancla, las grúas, dirección, dispositivos teledirigidos, y los impulsores hidráulicos de elevación y de entrenamiento para el armamento y los lanzacohetes. Los elevadores en portaaviones utilizan potencia hidráulica para transferir los aviones de la cubierta de hangar a la cubierta de vuelo y viceversa.

El uso extenso de la hidráulica y de la neumática para transmitir energía es debido al hecho de que los sistemas fluidos correctamente construidos poseen un número de características favorables. Eliminan la necesidad de sistemas complicados de engranajes, de levas, y de palancas. El movimiento se puede transmitir sin la holgura inherente en el uso de las piezas sólidas de máquina. Los líquidos usados no están sujetos a roturas al igual que las piezas mecánicas, y los mecanismos no se están expuestos a un gran desgaste. Las diversas piezas de un sistema de energía fluido se pueden situar convenientemente en puntos muy distanciados, puesto que las fuerzas generadas se transmiten rápidamente a distancias considerables con pequeñas pérdidas. Estas fuerzas se pueden desplazar hacia arriba y hacia abajo o a través de codos con pequeñas pérdidas en eficacia y sin mecanismos complicados. Fuerzas muy grandes se pueden controlar por otras más pequeñas y se pueden transmitir a través de líneas y de orificios comparativamente pequeños.

Si el sistema se adapta bien al trabajo que se requiere realizar, y si no se emplea mal, puede proporcionar una acción continua, flexible, uniforme y sin vibraciones, y no es afectado por variaciones de la carga. En caso de una sobrecarga, una reducción automática de la presión puede ser garantizada, de manera de proteger el sistema contra averías o tensiones excesivas. Los sistemas de potencia mediante fluidos pueden proporcionar amplios movimientos variables, tanto en la transmisión de energía rotatoria como en forma rectilínea. La necesidad del control manual puede ser reducida al mínimo. Además, los sistemas de potencia fluida son económicos para operar.

La pregunta que puede presentarse es porqué usar la hidráulica en ciertos usos y neumática en otros. Muchos factores son considerados por el usuario y/o el fabricante al determinar qué tipo de sistema utilizar en un uso específico. No hay reglas claras e inmediatas a seguir; sin embargo, la experiencia pasada ha proporcionado algunas conclusiones que se consideran generalmente cuando se toman tales decisiones. Si la necesidad del sistema requiere velocidad, una cantidad media de presión, y solamente un control relativamente exacto, un sistema neumático puede ser utilizado. Si el uso requiere solamente una cantidad media de presión y de un control más preciso, una combinación de hidráulica y de neumática puede ser utilizada. Si el uso requiere una gran cantidad de presión y/o control extremadamente exacto, un sistema hidráulico deberá ser la opción a elegir.

La hidráulica y la neumática se combinan para algunos usos. Esta combinación se refiere como hidroneumática. Un ejemplo de esta combinación es la elevación usada en garajes y estaciones de gasolina. La presión de aire se aplica a la superficie del fluido hidráulico en un depósito. La presión de aire fuerza el líquido hidráulico a levantar el elevador.

Dentro de las aplicaciones se pueden distinguir dos, móviles e industriales:

1.3.1. Aplicaciones móviles

El empleo de la energía proporcionada por el aire y aceite a presión, puede aplicarse para transportar, excavar, levantar, perforar, manipular materiales, controlar e impulsar vehículos móviles tales como:

- Tractores.
- Grúas.
- Retroexcavadoras.
- Camiones recolectores de basura.
- Cargadores frontales.
- Frenos y suspensiones de camiones.
- Vehículos para la construcción y mantención de carreteras.
- Etc.

1.3.2. Aplicaciones industriales

En la industria, es de primera importancia contar con maquinaria especializada para controlar, impulsar, posicionar y mecanizar elementos o materiales propios de la línea de producción, para estos efectos se utiliza con regularidad la energía proporcionada por fluidos comprimidos. Se tiene entre otros:

- Maquinaria para la industria plástica.
- Maquinas herramientas.
- Maquinaria para la elaboración de alimentos.
- Equipamiento para robótica y manipulación automatizada.
- Equipo para montaje industrial.
- Maquinaria para la minería.
- Maquinaria para la industria siderúrgica.
- Etc.

Otras aplicaciones se pueden dar en sistemas propios de vehículos automotores, como automóviles, aplicaciones aeroespaciales y aplicaciones navales, por otro lado se pueden tener aplicaciones en el campo de la medicina y en general en todas aquellas áreas en que se requiere movimientos muy controlados y de alta precisión, así; se tiene:

- Aplicación Automotriz: suspensión, frenos, dirección, refrigeración, etc.
- Aplicación Aeronáutica: timones, alerones, trenes de aterrizaje, frenos, simuladores, equipos de mantenimiento aeronáutico, etc.
- Aplicación Naval: timón, mecanismos de transmisión, sistemas de mando, sistemas especializados de embarcaciones o buques militares.
- Medicina: instrumental quirúrgico, mesas de operaciones, camas de hospital, sillas e instrumental odontológico, etc.

La hidráulica y neumática tienen aplicaciones tan variadas, que pueden ser empleadas incluso en controles escénicos (teatro), cinematografía, parques de entretenimientos, represas, puentes levadizos, plataformas de perforación submarina, ascensores, mesas de levante de automóviles, etc.

[1]

1.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS HIDRAULICOS

Hay ciertas ventajas y desventajas en el uso de los sistemas hidráulicos más notables que en otros sistemas. Algunas de las ventajas se enlistan a continuación.

- El fluido hidráulico actúa como lubricante, además de transportar el calor generado en el sistema hasta un intercambiador de calor conveniente.
- Los actuadores hidráulicos de tamaño comparativamente pequeño pueden desarrollar grandes fuerzas o pares.
- Los actuadores hidráulicos tienen una mayor velocidad de respuesta con arranques, paros e inversiones de la velocidad rápidos.
- Los actuadores hidráulicos pueden operarse sin dañarse en condiciones continuas, intermitentes, inversoras y de paro.
- La disponibilidad de actuadores lineales y rotatorios ofrece flexibilidad en el diseño.
- Por el escaso escurrimiento en los actuadores hidráulicos, la caída de velocidad es pequeña cuando se aplica carga.

Por otra parte, existen varias desventajas que tienden a limitar su uso.

- La potencia hidráulica no está tan fácilmente disponible comparada con la potencia eléctrica.
- El costo de un sistema hidráulico puede ser mayor que un sistema eléctrico semejante que realice una función similar.
- Existen riesgos de fuego y explosión a menos que se usen fluidos a prueba de incendios.
- En vista de que es difícil mantener un sistema hidráulico libre de escurrimientos, el sistema tiende a ser sucio.
- El aceite contaminado puede causar fallas en el funcionamiento correcto de un sistema hidráulico.

- Como resultado de la no linealidad y otras características complejas involucradas, el diseño de sistemas hidráulicos complicados es muy comprometedor.
- Los circuitos hidráulicos generalmente tienen características de amortiguamiento limitadas. Si un circuito hidráulico no está diseñado correctamente, pueden ocurrir o desaparecer algunos fenómenos de inestabilidad, dependiendo de las condiciones de operación.

1.5. FLUIDO HIDRÁULICO

Las propiedades del fluido hidráulico tienen un efecto importante en el funcionamiento de los sistemas hidráulicos. Además de servir como un medio para la transmisión de potencia, el fluido hidráulico debe mantener al mínimo el desgaste de las partes móviles proveyendo una lubricación satisfactoria. En la práctica, los aceites basados en el petróleo con los aditivos adecuados son los fluidos hidráulicos más comúnmente utilizados porque ofrecen buena lubricación para las partes móviles en el sistema y son casi incompresibles. Es necesario el uso de aceite limpio de alta calidad para la operación satisfactoria del sistema hidráulico.

1.5.1. Propiedades de los fluidos hidráulicos

1.5.1.1. Densidad de masa y volumen específico

La *densidad de masa* ρ de una sustancia es la masa por unidad de volumen. Las unidades comúnmente usadas son kg/m^3 , lb/ft^3 , etcétera. Para el agua a la presión atmosférica estándar ($1.0133 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ abs, la cual es igual a $1.0332 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ abs o $14.7 \text{ lb}_f/\text{in}^2$ abs) y temperatura estándar (277.15 K que es igual a 4°C o 39.2°F), la densidad de masa es

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 = 62.43 \text{ lb/ft}^3 = 1.94 \text{ slug/ft}^3$$

Para los aceites basados en petróleo, la densidad de masa es aproximadamente

$$\rho = 820 \text{ kg/m}^3 = 51.21 \text{ lb/ft}^3 = 1.59 \text{ slug/ft}^3$$

El *volumen específico* v es el recíproco de la densidad ρ . Es el volumen ocupado por unidad de masa del fluido, o bien

$$v = \frac{1}{\rho}$$

1.5.1.2. Peso específico y densidad específica

El *peso específico* γ de una sustancia es su peso por unidad de volumen. Las unidades comúnmente usadas son N/m^3 , Kg_f/m^3 , etc.

Para los aceites basados en petróleo, el peso específico es aproximadamente

$$\gamma = 8.04 \times 10^3 N/m^3 = 820 Kg_f/m^3 = 51.2 lb_f/ft^3$$

El peso específico γ y la densidad de masa ρ están relacionados por

$$\gamma = \rho g$$

Donde g es la aceleración de la gravedad.

La densidad específica de una sustancia es la relación de su peso con respecto al peso de un volumen igual de agua a la presión atmosférica y temperatura estándar.

La densidad ρ de un líquido es función de la presión y la temperatura.

Puede escribirse:

$$\rho = \rho_0 [1 + a(p - p_0) - b(\theta - \theta_0)]$$

Donde ρ , p , y θ son la densidad de masa, la presión y temperatura, respectivamente. (Se supone que la densidad del líquido es ρ_0 cuando la presión es p_0 y la temperatura es θ_0 .) Los valores de a y b son positivos. Así pues, la densidad de masa de un líquido se incrementa cuando la presión se incrementa y decrece cuando la temperatura se incrementa. Los coeficientes a y b se llaman *módulo de compresibilidad* y *coeficiente de expansión cúbica*, respectivamente.

1.5.1.3. Módulos de compresibilidad y de dispersión

La compresibilidad de un líquido se expresa por medio de su módulo de dispersión. El módulo de dispersión de un líquido y el módulo de compresibilidad son recíprocamente inversos. Si la presión de un líquido de volumen V se incrementa por dp , esto causará un decrecimiento en el volumen dV .

El módulo de dispersión se define por

$$\beta = \frac{dp}{-dV/V}$$

(Nótese que dV es negativo, de modo que $-dV$ es positivo.) El módulo de dispersión del agua a la temperatura y presión ordinarias es aproximadamente $2.1 \times 10^9 \text{ N / m}^2$, lo cual es igual a 2.1 GPa (gigapascal), $2.14 \times 10^4 \text{ Kg / cm}^2$, o $3 \times 10^5 \text{ lb / in}^2$.

Es importante observar que todos los fluidos hidráulicos se combinan con el aire en cierta medida. De modo que en la determinación experimental del módulo de dispersión y el valor de este, cualquier líquido, depende de la cantidad de aire que contenga.

1.5.1.4. Viscosidad

La *viscosidad*, la propiedad más importante del fluido hidráulico, es una medida de la fricción interna o de la resistencia del fluido. Una viscosidad baja significa un incremento en las pérdidas por escurrimiento y una alta viscosidad implica una operación alta. En los sistemas hidráulicos, las viscosidades disponibles están limitadas por las características de operación de la bomba, motor y válvulas, tanto como por las temperaturas del ambiente y de operación. La viscosidad de un líquido decrece con la temperatura.

La viscosidad se mide mediante la observación del tiempo requerido por un cierto volumen del líquido para fluir, en ciertas condiciones como enfrentarse a un tubo corto de orificio pequeño.

La resistencia causada por un fluido al movimiento relativo de sus partes se llama *viscosidad dinámica* o *absoluta*. Es la relación de su esfuerzo cortante a la razón de cambio en la deformación cortante de un fluido. El coeficiente de viscosidad dinámica o absoluta μ es la resistencia causada por una lámina del fluido al movimiento paralelo a esa lámina u otra lámina del fluido a una distancia unitaria de ella, con una velocidad relativa unitaria.

Las unidades del SI para la viscosidad dinámica son N-s/m^2 y kg/m-s . La unidad cgs de la viscosidad dinámica es el poise (P) (dyn-s/m^2 o g/cm-s). La unidad del SI diez veces mayor que la unidad poise. El centiPoise (cP) es 1/100 de poise. (Nótese que la viscosidad dinámica del agua a 20.2°C o 68.4°F es 1 centiPoise.) Las unidades BES de viscosidad dinámica son lb-f-s/ft^2 y slug/ft-s . Nótese que

$$\begin{aligned} 1 \text{ slug/ft s} &= 1 \text{ lb}_f\text{s/ft}^2 = 47,9 \text{ kg/m s} = 47,9 \text{ N s/m}^2 \\ 1 \text{ P} &= 100 \text{ cP} = 0,1 \text{ N s/m}^2 \end{aligned}$$

La *viscosidad cinemática* ν es la viscosidad dividida entre la densidad de masa o

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde ρ es la densidad de masa del fluido la unidad en el SI de la viscosidad cinemática es m^2/s , en tanto que la unidad cgs de la viscosidad cinemática es el

Stoke (St) (cm^2/s) y 1/100 Stoke se llama centiStoke (cSt). La unidad BES de viscosidad cinemática es ft^2/s . Al cambiar del Stoke al Poise, multiplique por la densidad de masa en g/cm^3 . Adviértase que

$$\begin{aligned}
 &1 \text{ m}^2/\text{s} \text{ (Unidad en el SI de viscosidad cinemática)} \\
 &= 10,764 \text{ ft}^2/\text{s} \text{ (Unidad BES de energía cinemática)} \\
 &1 \text{ St} = 100 \text{ cSt} = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}
 \end{aligned}$$

La tabla 1.1 resume las unidades usadas para las viscosidades dinámica y cinemática en diferentes sistemas de unidades, y la tabla 1.2 muestra las viscosidades dinámica y cinemática del agua. Para aceites hidráulicos en condiciones de operación normales, la viscosidad cinemática es de alrededor de 5 a 10 centiStokes (5×10^{-6} a $10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Los aceites de petróleo tienden a adelgazarse cuando la temperatura se incrementa y a engrosarse cuando la temperatura decrece. Si el sistema opera sobre una amplia escala de temperatura, debe usarse un fluido que tenga una sensibilidad relativamente menor a los cambios de temperatura.

Tabla 1.1 UNIDADES DE LAS VISCOSIDADES DINÁMICA Y CINEMÁTICA

Sistema de unidades	Sistemas absolutos			Sistemas gravitacionales	
	SI	mks	cgs	Métrico de ingeniería	Ingles de ingeniería
Viscosidad dinámica μ	$\frac{N s}{m^2}$ ó $\frac{kg}{m s}$	$\frac{N s}{m^2}$ ó $\frac{kg}{m s}$	$\frac{dyn s}{cm^2}$ ó $\frac{g}{cm s}$ (poise)	$\frac{kg_f s}{m^2}$	$\frac{lb_f s}{ft^2}$ ó $\frac{slug}{ft s}$
Viscosidad cinemática ν	$\frac{m^2}{s}$	$\frac{m^2}{s}$	$\frac{cm^2}{s}$ (stoke)	$\frac{m^2}{s}$	$\frac{ft^2}{s}$

1.5.2. Observaciones adicionales sobre fluidos hidráulicos

Para concluir esta sección, en seguida se hacen algunas observaciones complementarias:

- Aunque los fluidos como el agua, el aceite crudo, los aceites vegetal o animal transmitirán potencia hidráulica, no deben usarse como fluidos hidráulicos por su falta de capacidad para lubricar correctamente y resistir asperezas, corrosión, jabonadura, etc.

- La vida operativa de un fluido hidráulico depende de su resistencia a la oxidación. La oxidación del fluido hidráulico la causan el aire, el calor y la contaminación. Obsérvese que cualquier fluido hidráulico se combina con el aire en cierta medida, especialmente a altas temperaturas de operación. Nótese que también que la temperatura de operación del sistema hidráulico debe conservarse entre 30° y 60°C. En temperaturas de operación por arriba de 70°C, la oxidación se acelera. Los fluidos de grado Premium usualmente contienen inhibidores que abaten la oxidación.
- Cuando se opera a altas temperaturas, las propiedades importantes del fluido son la lubricidad, la viscosidad, la estabilidad térmica, el peso y el módulo de dispersión. (Adviértase que estas no son variables independientes.)

Tabla 1.2 VISCOSIDADES DINAMICA Y CINEMATICA DEL AGUA

Temperatura °C	Viscosidad Dinámica μ [N s/m ²]	Viscosidad Cinemática ν [m ² /s]
0	$1,792 \times 10^{-3}$	$1,792 \times 10^{-6}$
20	$1,002 \times 10^{-3}$	$1,004 \times 10^{-6}$
40	$0,653 \times 10^{-3}$	$0,658 \times 10^{-6}$
60	$0,467 \times 10^{-3}$	$0,475 \times 10^{-6}$
80	$0,355 \times 10^{-3}$	$0,365 \times 10^{-6}$
100	$0,282 \times 10^{-3}$	$0,295 \times 10^{-6}$
Temperatura °F	Viscosidad Dinámica μ [lb _f s/ft ²]	Viscosidad Cinemática ν [ft ² /s]
32	$3,742 \times 10^{-5}$	$1,929 \times 10^{-5}$
100	$1,418 \times 10^{-5}$	$0,736 \times 10^{-5}$
212	$0,589 \times 10^{-5}$	$0,318 \times 10^{-5}$

- En sistemas hidráulicos localizados cerca de fuentes de alta temperatura, deben usarse fluidos resistentes al fuego. Estos fluidos están disponibles en varios tipos generales, tales como agua glicolada, aceite sintético y emulsiones de agua y aceite. (en las emulsiones de agua y aceite, el aceite forma moléculas alrededor del agua para proveer la lubricidad).

[2]

1.5.3. Fluido hidráulico empleado en el proyecto

El fluido hidráulico empleado en este proyecto es un aceite de alto rendimiento de la compañía **Shell®**, hablaremos más específicamente del aceite **Shell Tellus® 46**.

Los fluidos hidráulicos de la nueva generación Shell Tellus® Oils son aceites de calidad premium elaborados con básicos altamente refinados y de alto índice de viscosidad, reconocidos como 'standard-setters' en el campo de lubricación de sistemas hidráulicos industriales y de transmisión de potencia.

1.5.3.1. Aplicaciones

- Sistemas Hidráulicos Industriales
- Equipos Hidráulicos Móviles de Transmisión de Potencia
- Sistemas Hidráulicos Marinos

1.5.3.2. Características y beneficios

- **Estabilidad térmica**

Los sistemas hidráulicos modernos que trabajan con altas cargas y altas temperaturas requieren de aceites con elevada estabilidad térmica. Los fluidos hidráulicos Shell Tellus® son altamente resistentes a la degradación y formación de lodos, lo cual mejora la confiabilidad operativa del sistema y su grado de limpieza.

- **Resistencia a la oxidación**

Alta resistencia a la oxidación en presencia de aire, agua y agentes catalíticos como el cobre. Los resultados de los ensayos TOST (Turbine Oil Stability Test) muestran un excelente desempeño con bajos niveles de acidez, formación de lodos y corrosión de cobre, lo cual contribuye a la posibilidad de extender períodos de cambio de aceite y reducir los gastos de mantenimiento.

- **Estabilidad hidrolítica**

Los fluidos hidráulicos Shell Tellus® tienen una elevada estabilidad química en presencia de agua, lo cual contribuye a una mayor duración del período de servicio del lubricante y reduce el riesgo de corrosión y herrumbre.

- **Excelentes propiedades anti-desgaste**

Tienen incorporado un nuevo conjunto de aditivos anti-desgaste, muy efectivo en todas las condiciones de operación, incluidas las de servicio severo con altas cargas. Este permite obtener excelentes resultados en todos los ensayos funcionales efectuados en bombas de pistón y paletas, y muy especialmente en los más exigentes como son Denison T6C (en seco y húmedo) y Vickers 35VQ25. Los fluidos hidráulicos Shell Tellus® contribuyen de este modo a prolongar la vida útil de los componentes más solicitados del sistema.

- **Filtrabilidad superior**

Los fluidos hidráulicos Shell Tellus® están especialmente recomendados para el uso en sistemas de filtración ultra fina destinados a mantener un alto grado de limpieza del fluido, un requerimiento esencial en los sistemas hidráulicos modernos. No se ven afectados por los contaminantes usuales como agua y calcio que favorecen el bloqueo prematuro de los mismos.

- **Baja fricción**

Los fluidos hidráulicos Shell Tellus® tienen muy buenas propiedades lubricantes y exhiben bajos coeficientes de fricción, lo que es importante para todos los sistemas hidráulicos ya sea que operen a altas o bajas velocidades. Previenen problemas de movimiento a sacudidas o “stick-slip” en aplicaciones críticas y permiten un control muy fino de los movimientos.

- **Excelentes propiedades de liberación de aire y anti-desgaste**

Una cuidadosa selección de los aditivos asegura una rápida liberación de aire sin excesiva formación de espuma minimizando los efectos de cavitación en bombas, oxidación del aceite y manteniendo el desempeño del sistema.

- **Buena demulsibilidad**

Se separan fácilmente del agua, resistiendo la formación de emulsiones, lo que previene daños en bombas y otros componentes del sistema.

- **Versatilidad**

Los fluidos hidráulicos Shell Tellus® están indicados para una amplia gama de aplicaciones industriales.

Tabla 1.3 CARACTERISTICAS TÍPICAS DEL ACEITE SHELL TELLUS® 46

SHELL TELLUS® OIL	SHELL TELLUS® OIL 46
Viscosidad Cinemática	
0 °C	580 cSt
40 °C	46 cSt
100 °C	6,7 cSt
Índice de Viscosidad	98
Densidad	
15 °C	0,879 kg/l
Punto de Inflamación	
°C (Pensky-Martens Closed Cup)	218
Punto de Escurrimiento	
°C	-30

[3]

1.6. GENERALIDADES DEL FLUIDO

El aceite en sistemas hidráulicos desempeña la doble función de lubricar y transmitir potencia.

Constituye un factor vital en un sistema hidráulico, y por lo tanto, debe hacerse una selección cuidadosa del aceite con la asistencia de un proveedor técnicamente bien capacitado.

Una selección adecuada del aceite asegura una vida y funcionamiento satisfactorios de los componentes del sistema, principalmente de las bombas y motores hidráulicos y en general de los actuadores.

Algunos de los factores especialmente importantes en la selección del aceite para el uso en un sistema hidráulico industrial, son los siguientes:

- El aceite debe contener aditivos que permitan asegurar una buena característica de desgaste. No todos los aceites presentan estas características de manera notoria.
- El aceite debe tener una viscosidad adecuada para mantener las características de lubricante y limitante de fugas a la temperatura esperada de trabajo del sistema hidráulico.
- El aceite debe ser inhibidor de oxidación y corrosión.
- El aceite debe presentar características antiespumantes.

Para obtener una óptima vida de funcionamiento, tanto del aceite como del sistema hidráulico; se recomienda una temperatura máxima de trabajo de 65°C.

El estudio de los líquidos se divide en dos ramas principales: líquidos en reposo (hidrostática) y líquidos en el movimiento (hidráulica). Los efectos de líquidos en reposo se pueden expresar a menudo por fórmulas simples. Los efectos de los líquidos en el movimiento son más difíciles de expresar debido a los factores friccionales y otros cuyas acciones no se pueden expresar por matemáticas simples.

Ya vimos que los líquidos tienen un volumen definido pero toman la forma del recipiente que los contiene. Hay dos características adicionales que debemos explorar antes de proseguir:

Los líquidos son casi incompresibles. Por ejemplo, si una presión de 100 libras por la pulgada cuadrada (psi) se aplica a un volumen dado de agua que esté a la presión atmosférica, el volumen disminuirá solamente un 0.03 por ciento. Necesitaríamos una fuerza de aproximadamente 32 toneladas para reducir su volumen en un 10 por ciento; sin embargo, cuando se quita esta fuerza, el agua

vuelve inmediatamente a su volumen original. Otros líquidos se comportan de manera casi parecida al agua.

Otra característica de un líquido es la tendencia a mantener su nivel superficial libremente. Si la superficie no está a nivel, los líquidos fluirán en la dirección que corresponda tendiendo a nivelar su superficie.

[1]

1.7. LEYES BÁSICAS DEL FLUJO DE FLUIDOS

Aquí obtendremos las ecuaciones básicas que gobiernan el flujo de un fluido tales como las ecuaciones de continuidad, la ecuación de Euler y la ecuación de Bernoulli. Comenzaremos con definiciones del número de Reynolds, flujos laminar y turbulento, y otra terminología necesaria y luego obtendremos las ecuaciones.

1.7.1. Número de Reynolds

Las fuerzas que afectan el flujo de un fluido son debidas a la gravedad, la frotación, la inercia del fluido, la viscosidad, la tensión superficial y factores semejantes. En muchas situaciones de flujo, las fuerzas resultantes de la inercia del fluido y la viscosidad son las más significativas. De hecho, los flujos de fluido en muchas situaciones importantes están dominados ya sea por la inercia o por la viscosidad del fluido. La relación adimensional de la fuerza de inercia con respecto a la fuerza viscosa se llama *número de Reynolds*. Así pues, un número de Reynolds grande indica el predominio de la fuerza de inercia y un número pequeño el predominio de la viscosidad.

El número de Reynolds R está dado por

$$R = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Donde ρ es la densidad de masa del fluido, μ la viscosidad dinámica, v la velocidad promedio del flujo y D una longitud característica. Para el flujo en tubos, la longitud característica es el diámetro interior del tubo. Puesto que la velocidad promedio v del flujo en un tubo es

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Donde Q es la razón de flujo volumétrico, A el área del tubo y D el diámetro interior del tubo, el número de Reynolds para el flujo en tubos puede darse por

$$R = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\pi\mu D}$$

1.7.2. Flujo laminar y flujo turbulento

El flujo dominado por la fuerza de viscosidad se llama *flujo laminar*. Esta caracterizado por un movimiento del flujo suave, según líneas paralelas. Cuando dominan las fuerzas de inercia, el flujo se llama *flujo turbulento* y está caracterizado por un movimiento del flujo irregular y como remolino. Para un número de Reynolds por debajo de 2000 o $R < 2000$, el flujo es siempre laminar. Para un número de Reynolds 4000 o $R > 4000$, el flujo es usualmente turbulento excepto en casos especiales.

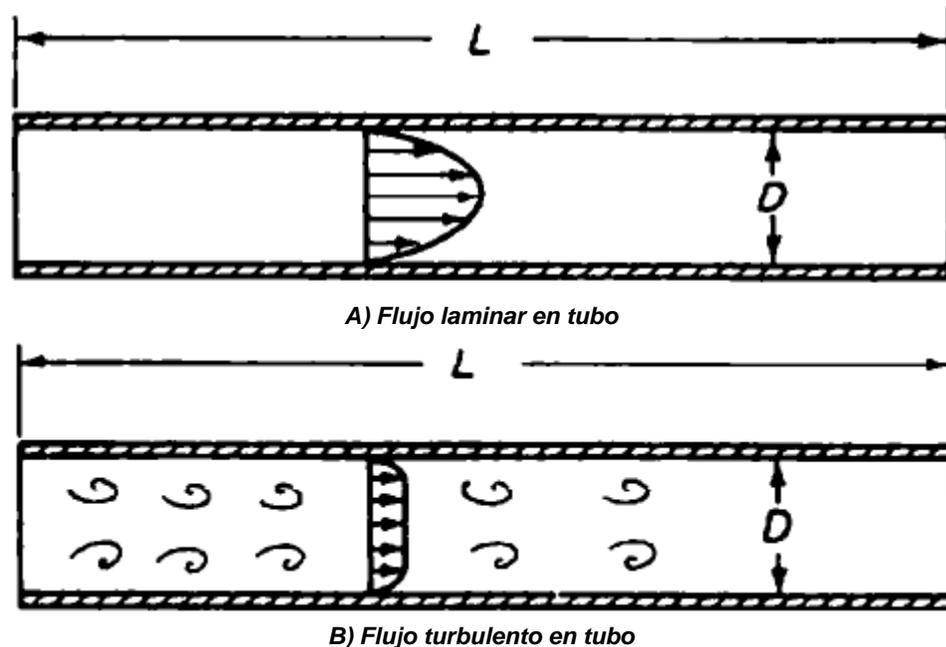


Figura 1.1 (A) Perfil de velocidad del flujo laminar; (B) Perfil de velocidad del flujo turbulento.

En los tubos capilares el flujo es laminar. Si las velocidades se mantienen muy bajas o las viscosidades son muy altas, el flujo en tubos de diámetro relativamente grande puede resultar también un flujo laminar. En general, el flujo en un tubo es laminar si la sección transversal del conducto es comparativamente pequeña y/o la longitud del tubo es relativamente grande. De otro modo resulta el flujo turbulento. Debe notarse que el flujo laminar es sensible a la temperatura, ya que depende de la viscosidad.

En el flujo laminar, el perfil de velocidad en un tubo se hace parabólico como en la figura 1.1 (A). La figura 1.1 (B) muestra el perfil de velocidad en un tubo con flujo turbulento.

Los procesos industriales a menudo incluyen el flujo de líquidos a través de tubos de conexión y tanques. En los sistemas de control hidráulicos hay muchos casos de flujo a través de pequeños conductos tales como un flujo entre carrete y orificio y entre pistón y cilindro. Las propiedades de tal flujo a través de pequeños

conductos dependen del número de Reynolds del flujo involucrado en cada situación.

1.7.3. Línea de corriente

Una *línea de corriente* es una línea continua tendida a través del fluido de modo que tenga la dirección del vector velocidad en cada punto (Figura 1.2). Por lo tanto, ningún flujo puede cruzar a una línea de corriente.

1.7.4. Tubo de corriente

Un *tubo de corriente* es el tubo hecho con todas las líneas de corriente que pasan por una curva cerrada (Figura 1.3). Ningún flujo puede atravesar sus paredes porque el vector de velocidad no tiene componente normal a la superficie del tubo.



Figura 1.2 Líneas de corriente

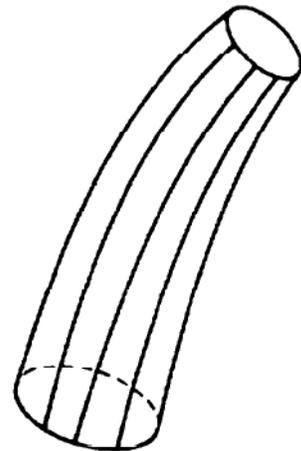


Figura 1.3 Tubo de corriente

1.7.5. Flujo estable

Si la presión, la velocidad, la densidad, la temperatura y factores similares en cualquier punto del flujo no cambian con el tiempo, se dice que el flujo es *estable*. Esto es, en flujo estable cualquier punto se mantiene constante en el espacio.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Donde $p, v, \rho, y T$ son la presión, el vector de velocidad, la densidad y la temperatura, respectivamente.

Se dice que el flujo es *inestable* si la condición en cualquier punto cambia con el tiempo. El análisis del flujo inestable es mucho más complejo que el del flujo estable.

1.7.6. Volumen de control

Un *volumen de control* se refiere a una región en el espacio. Aunque del todo arbitrario, el tamaño y la forma del volumen de control frecuentemente se escogen con el objeto de simplificar el análisis. El uso de un volumen de control es conveniente en el análisis de situaciones donde el flujo ocurre dentro y fuera del espacio.

1.7.7. Ecuaciones de continuidad

Las ecuaciones de continuidad se obtienen aplicando el principio de conservación de la masa de flujo. Este principio establece que la masa dentro de un sistema permanece constante con el tiempo.

Las ecuaciones de continuidad para un volumen de control establecen que la razón de incremento con respecto al tiempo de la masa dentro de un volumen de control es igual a la razón de cambio neto de masa que fluye hacia el volumen de control.

Considere un flujo estable a través de del tubo de corriente mostrado en la figura 1.4 (A), donde el volumen de control constituye las paredes del tubo de corriente y las secciones transversales dA_1 y dA_2 que son normales al tubo de corriente.

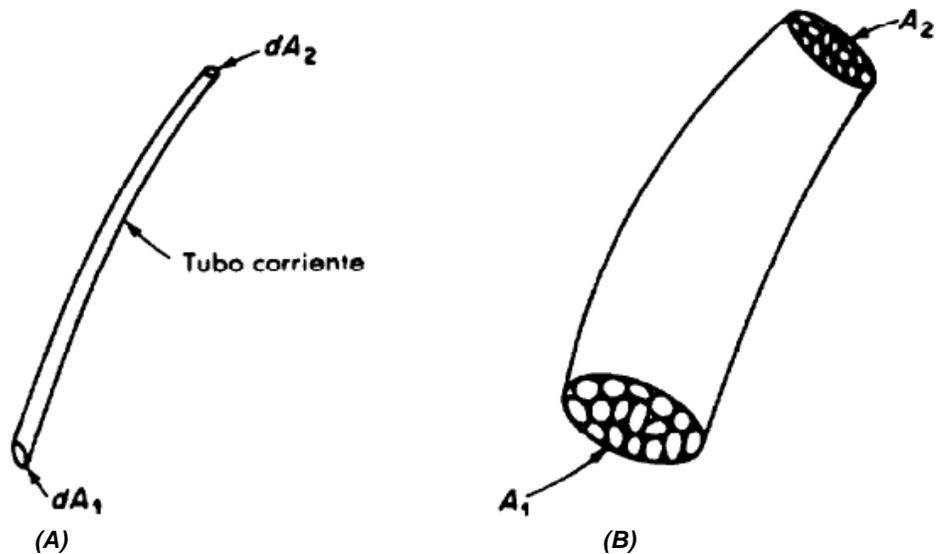


Figura 1.4 (A) Tubo de corriente; (B) Conjunto de tubos de corriente

Si definimos p_1 y p_2 como las densidades de masa en las secciones transversales dA_1 y dA_2 , respectivamente, entonces al aplicar el principio de conservación de masa, obtendremos

$$\rho_1 v_1 dA_1 = \rho_2 v_2 dA_2$$

Esta es la ecuación de continuidad aplicada a dos secciones transversales a lo largo de un tubo de corriente en flujo estable.

En una colección de tubos de corriente como se muestra en la figura 1.4 (B), si las densidades promedio son ρ_1 y ρ_2 sobre las secciones transversales A_1 y A_2 , respectivamente, y las velocidades promedio son V_1 y V_2 , respectivamente, entonces,

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

Donde

$$V_1 = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} v_1 dA_1, \quad V_2 = \frac{1}{A_2} \int_{A_2} v_2 dA_2$$

Definiendo las descargas Q_1 y Q_2 como

$$Q_1 = A_1 V_1, \quad Q_2 = A_2 V_2$$

Podemos escribir la ecuación de continuidad como

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2$$

Para el flujo estable incompresible, tenemos $\rho_1 = \rho_2$. Por lo tanto,

$$Q_1 = Q_2$$

O bien

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Esto significa que la razón de cambio del flujo de un líquido en un tubo es constante en cualquier sección transversal.

1.7.8. Ecuación de movimiento de Euler

Considérese un tubo de corriente infinitesimal de longitud ds como se muestra en la figura 1.5. Considérese también el volumen de control compuesto por la pared del tubo de corriente entre las secciones 1 y 2 más las áreas de las secciones 1 y 2 que son normales al tubo de corriente. Fijemos este volumen de control en el espacio y consideremos el flujo que lo atraviesa. Para simplificar el análisis, supongamos que la viscosidad es cero o que el fluido no tiene fricción.

La masa del fluido en el volumen de control es $\rho dA ds$ y la aceleración de esta masa es dv/dt . La fuerza de presión que actúa sobre la sección 1 en la dirección positiva de s es $p dA$ y la que actúa en la sección 2 en la dirección negativa de s es $p + \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right) ds dA$. La fuerza de gravedad es $\rho g dA ds$. Cualesquiera fuerzas sobre los lados del volumen de control son normales a s y no participan en la ecuación.

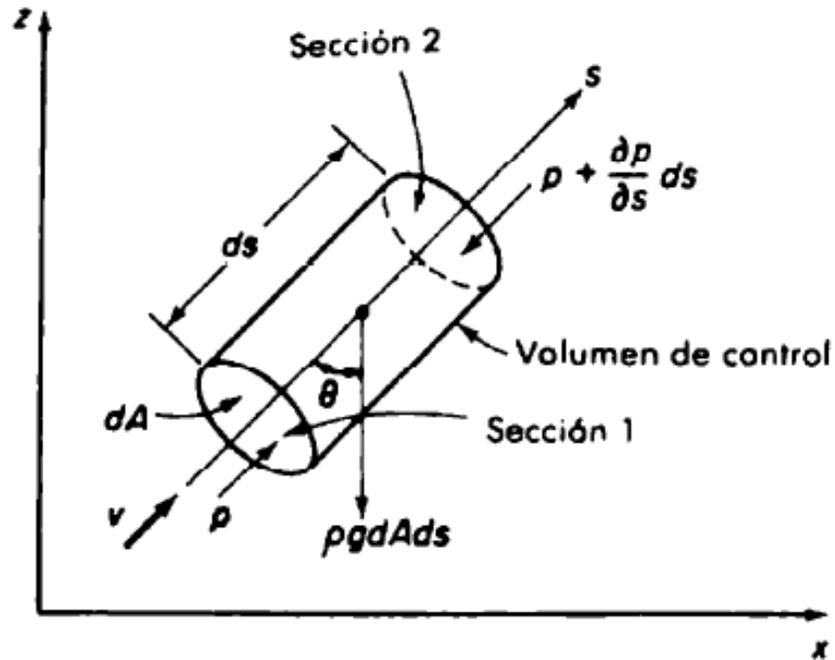


Figura 1.5 Tubo de corriente infinitesimal de longitud ds

Aplicando la segunda ley de Newton, tenemos la ecuación de movimiento

$$m \frac{dv}{dt} = p dA - \left(p + \frac{\partial p}{\partial s} ds \right) dA - \rho g dA ds \cos \theta$$

Donde $m = \rho dA ds$

$$\rho dA ds \frac{dv}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial s} ds dA - \rho g dA ds \cos \theta$$

O bien

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \cos \theta \quad (1.1)$$

En general, la velocidad v de s y t , o $v = v(s, t)$. Por lo tanto,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial s} \cdot \frac{ds}{dt} + \frac{\partial v}{\partial t} = v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.2)$$

Al sustituir la ecuación 1.2 en la ecuación 1.1 encontramos

$$v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} - g \cos \theta$$

Y observando que $\cos \theta = \partial z / \partial s$, donde z es el desplazamiento vertical, esta última ecuación puede escribirse

$$v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} = 0 \quad (1.3)$$

La cual es la *ecuación de movimiento de Euler*.

El flujo estable $\partial v / \partial t = 0$, y la ecuación 1.3 se simplifica a

$$v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} = 0$$

El flujo estable, puesto que v, p y z son funciones de s , solo la última ecuación puede reescribirse como

$$v \frac{dv}{ds} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{ds} + g \frac{dz}{ds} = 0$$

$$v dv + \frac{dp}{\rho} + g dz = 0 \quad (1.4)$$

La cual es la *ecuación de Euler de movimiento en flujo estable*.

1.7.9. Ecuación de Bernoulli

Para flujo estable, sin fricción (significa que el flujo tiene viscosidad despreciable) e incompresible, la ecuación 1.4 puede ser integrada para dar

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constante} \quad (1.5)$$

Esta ecuación es la ecuación de energía para el flujo estable a través de un volumen de control. Al dividir ambos lados de la ecuación 1.5 entre g , tenemos.

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{constante} \quad (1.6)$$

Donde $\gamma = \rho g$. Esta ecuación, se llama *ecuación de Bernoulli*. Cada uno de sus términos tiene la dimensión de longitud. La ecuación 1.6 muestra a lo largo de un tubo de corriente la suma de la velocidad $v^2/(2g)$, la presión p/γ y la altura potencial z es constante (figura 1.6). Si la velocidad en alguna sección se incrementa, la presión y la altura potencial deben decrecer y viceversa; esto es, la altura total en todas las secciones es constante.

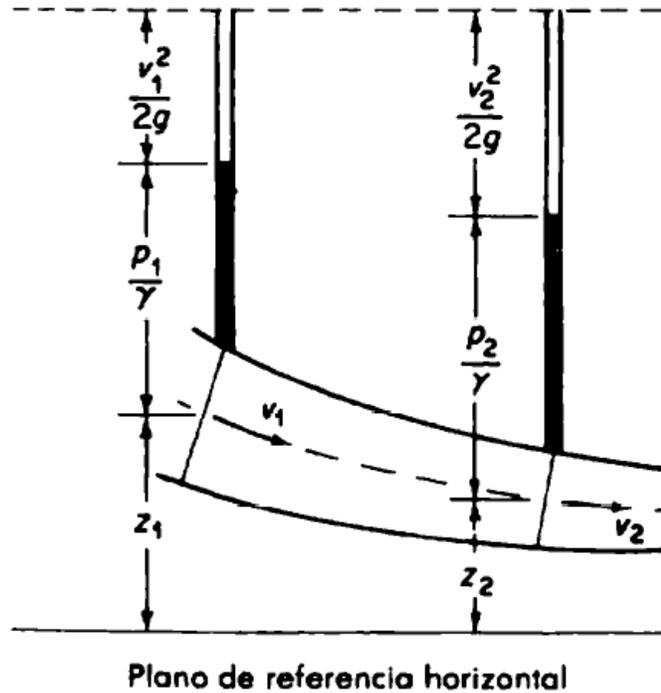


Figura 1.6 Diagrama para ilustrar la suma de la altura de velocidad, la altura de presión y la altura potencial es constante. Ecuación de Bernoulli.

Para el flujo inestable, la ecuación 1.4 puede reescribirse como

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz \right) = 0$$

La integración de esta última ecuación a lo largo del tubo de corriente resulta

$$\int_0^s \frac{\partial v}{\partial t} ds + \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constante}$$

En las secciones transversales 1 y 2, obtenemos

$$\int_0^{s_1} \frac{\partial v}{\partial t} ds + \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \int_0^{s_2} \frac{\partial v}{\partial t} ds + \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gz_2$$

O bien

$$\left(\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gz_1\right) - \left(\frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gz_2\right) = \int_{s_1}^{s_2} \frac{\partial v}{\partial t} ds \quad (1.7)$$

La ecuación 1.7 se llama *ecuación de energía para el flujo inestable* a través de un volumen de control.

1.7.10. Flujo a través de un orificio

Un *orificio* es una restricción súbita de corta longitud en un conducto de flujo. Existen dos tipos de régimen de flujo, dependiendo de que dominen las fuerzas viscosas o la inercia [figura 1.7(A) y (B)]. A causa de la ley de continuidad, la velocidad del flujo a través de un orificio debe incrementarse por arriba de la velocidad corriente arriba.

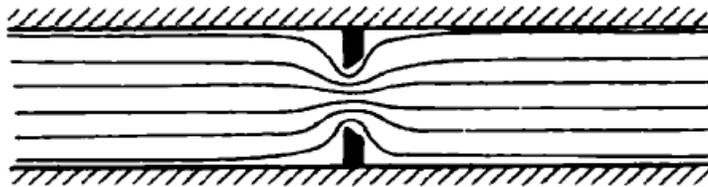


Figura 1.7 (A) Flujo a través de un orificio cuando el número de Reynolds es bajo.

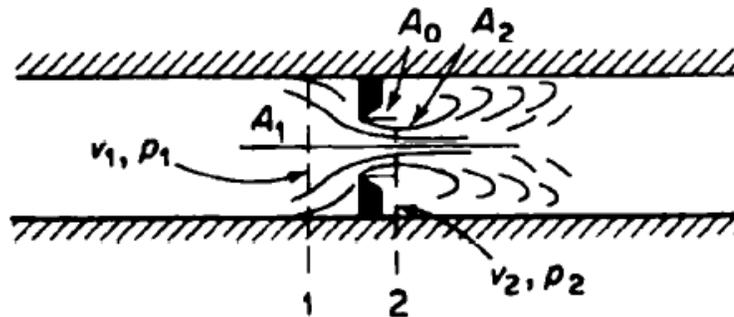


Figura 1.7 (B) Flujo a través de un orificio cuando el número de Reynolds es alto.

En la figura 1.7(A) la caída de presión se origina por las fuerzas cortantes internas que resultan de la viscosidad. Esta situación ocurre cuando el número de Reynolds es bajo. La figura 1.7 (B) muestra el caso donde la caída de presión a través del orificio se origina por la aceleración del fluido de la velocidad corriente arriba a la velocidad del chorro más alta. La situación aparece aquí cuando el número de Reynolds es alto. El flujo corriente abajo se hace turbulento. Puesto que los flujos de orificio más importantes ocurren como la figura 1.7 (B), a continuación consideraremos este caso en detalle.

En relación con la figura 1.7 (B), la velocidad del fluido se incrementa a velocidad de chorro entre las secciones 1 y 2. El área del chorro emitido es menor que el

área del orificio. El punto a lo largo del chorro donde el área del chorro se hace mínima se llama *vena contracta*. La relación entre el área de la corriente A_2 en la vena contracta y el área del orificio A_0 se llama *coeficiente de contracción* C_c , o sea

$$A_2 = C_c A_0$$

Puesto que el flujo entre las secciones 1 y 2 es de línea de corriente, puede aplicarse la ecuación de Bernoulli. De la ecuación 1.6 obtendremos, en las secciones 1 y 2, la ecuación

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (1.8)$$

Si suponemos $z_1 = z_2$, entonces la ecuación 1.8 se hace

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2) \quad (1.9)$$

De la ecuación de continuidad tenemos

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (1.10)$$

Donde A_1 y A_2 son las áreas de las corrientes de las secciones 1 y 2, respectivamente.

Utilizando las ecuaciones anteriores, encontramos

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)}$$

Entonces la razón del flujo volumétrico en la vena contracta es

$$\begin{aligned} v_2 A_2 &= \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)} \\ &= \frac{C_c A_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{C_c^2 A_0^2}{A_1^2}\right)}} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)} \end{aligned} \quad (1.11)$$

La ecuación 1.11 da la razón de flujo a través del orificio. Sin embargo, esto es aproximado porque la fricción viscosa del fluido no fue considerada. Para tomar en

cuenta la fricción viscosa despreciada, se introduce un factor empírico llamado *coeficiente de velocidad* C_v para dar la razón de flujo Q :

$$Q = C_v v_2 A_2$$

O bien

$$Q = \frac{C_v C_c A_0}{\sqrt{1 - (C_c^2 A_0^2 / A_1^2)}} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)} = c A_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)} \quad (1.12)$$

Donde c , el coeficiente de descarga es

$$c = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 - (C_c^2 A_0^2 / A_1^2)}}$$

El valor del coeficiente de descarga c casi siempre se obtiene en forma experimental.

En el caso de las válvulas hidráulicas donde el área de estrangulamiento se ajusta para controlar la presión y la razón de flujo, la ecuación 1.12 sirve como una ecuación básica.

Comentarios.

En conclusión, nos gustaría mencionar que las pérdidas por fricción excesivas en las líneas hidráulicas deben evitarse. Cuando un fluido fluye en una línea hidráulica, algo de la energía que se transfiere, se pierde en la forma de energía calorífica que resulta de la fricción. Al diseñar líneas hidráulicas deben eliminarse las causas de fricción excesiva, tales como demasiada longitud de las líneas, un número grande de curvas (o codos), accesorios y válvulas, la velocidad del fluido excesiva como resultado de líneas subdimensionales y la excesiva viscosidad del fluido.

[2]

1.8. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA NEUMÁTICA E HIDRÁULICA

Es un sistema en el cual se genera, transmite y controla la aplicación de potencia a través del aire comprimido y la circulación de aceite en un circuito. El sistema puede dividirse en tres grandes grupos que observamos en el diagrama de bloques de la figura 1.8.

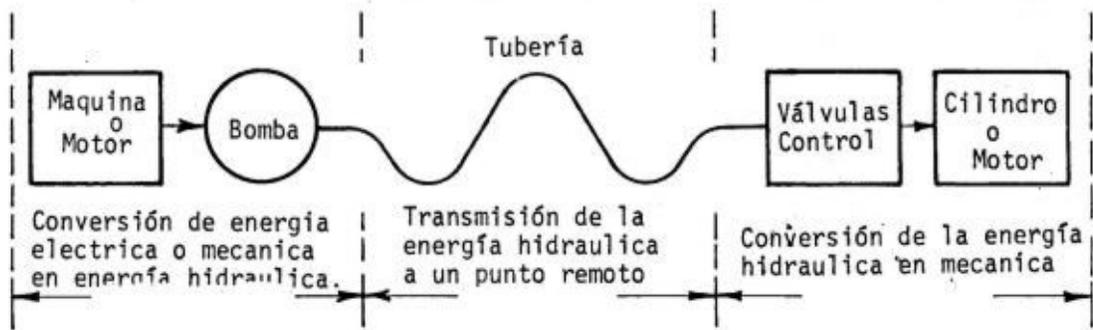


Figura 1.8 Esquema de un sistema de transmisión de energía hidráulica o neumática.

Comenzando desde la izquierda del diagrama, la primera sección corresponde a la conversión de Energía Eléctrica y/o Mecánica en un sistema de energía Neumática y o Hidráulica.

Un motor eléctrico, de explosión o de otra naturaleza está vinculado a una bomba o compresor, a cuya salida se obtiene un cierto caudal a una determinada presión. En la parte central del diagrama, el fluido es conducido a través de tubería al lugar de utilización.

A la derecha en el diagrama, el aire comprimido o el aceite en movimiento produce una reconversión en Energía mecánica mediante su acción sobre un cilindro o un motor neumático o hidráulico. Con las válvulas se controla la dirección del movimiento, la velocidad y el nivel de potencia a la salida del motor o cilindro.

1.9. LEYES FÍSICAS RELATIVAS A LOS FLUIDOS.

Hay infinidad de leyes físicas relativas al comportamiento de los fluidos, muchas de ellas son utilizadas con propósitos científicos o de experimentación, nosotros nos limitaremos a estudiar aquellas que tienen aplicación práctica en este proyecto.

1.9.1. Presión y fuerza

Los términos fuerza y presión se utilizan extensivamente en el estudio de la potencia fluida. Es esencial que distingamos la diferencia entre los términos. La fuerza significa un empuje o una tracción total. Es el empuje o la tracción ejercida contra la superficie total de una superficie particular y se expresa en libras o gramos. La presión significa la cantidad de empuje o de tracción (fuerza) aplicado a cada área de unidad de la superficie y se expresa en libras por la pulgada cuadrada (lb/in^2) o gramos por el centímetro cuadrado (gm/cm^2). La presión puede ser ejercida en una dirección, en varias direcciones, o en todas las direcciones.

1.9.1.1. Calculando fuerza, presión, y área

Una fórmula se utiliza para el cálculo de fuerza, la presión, y el área en los sistemas de potencia fluida. En esta fórmula, P refiere a la presión, F indica la fuerza, y A representa el área. La fuerza es igual a la cantidad de presión ejercida sobre un área. Así, se escribe la fórmula:

$$F = P \times A$$

La presión es igual a la fuerza dividida por el área. Cambiando la fórmula, esta declaración se puede resumir en:

$$P = \frac{F}{A}$$

Puesto que el área es igual a la fuerza dividida por la presión, se escribe la fórmula:

$$A = \frac{F}{P}$$

- **NOTA:** El área no se puede expresar a veces en unidades cuadradas. Si la superficie es rectangular, usted puede determinar su área multiplicando su longitud (por ejemplo, en pulgadas) por su anchura (también en pulgadas). La mayoría de áreas que usted considerará; en estos cálculos son circulares en forma.

El radio o el diámetro puede ser dado, pero usted debe saber el radio en pulgadas para encontrar el área. El radio es la mitad del diámetro. Para determinar el área, utilice la fórmula para encontrar el área de un círculo. Se escribe esto como

$$A = \pi r^2$$

Donde: A Es el área.

π Es 3.1416

r Indica el radio al cuadrado.

[1]

1.9.1.2. Presión absoluta

La presión absoluta es la presión que ejerce el aire atmosférico que es igual a $1.033 \text{ Kp/cm}^2 = 1 \text{ atmósfera}$ (kilogramo fuerza por centímetro cuadrado). Consecuentemente, la presión absoluta es la presión atmosférica más la presión manométrica (presión que se mide con el manómetro). Es la presión de un fluido medido con referencia al vacío perfecto o cero absoluto. La presión absoluta es cero únicamente cuando no existe choque entre las moléculas lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la velocidad molecular es muy pequeña. Este término se creó debido a que la presión atmosférica varía con la

altitud y muchas veces los diseños se hacen en otros países a diferentes altitudes sobre el nivel del mar por lo que un término absoluto unifica criterios.

Presión medida desde el punto de vacío total. Por ejemplo, la presión atmosférica absoluta a nivel del mar es el 14.7 psi (1 barra, 100 kpa o 29.92 in-Hg) a una temperatura de 80 grados Fahrenheit (26.7 grados Centígrados.)

Es la escala de presión donde el punto cero es el vacío perfecto, es decir, la suma de la presión atmosférica y de la presión indicada por un manómetro.

[4]

1.9.1.3. Presión manométrica

Se llama presión manométrica a la diferencia entre la presión absoluta o real y la presión atmosférica. Se aplica tan solo en aquellos casos en los que la presión es superior a la presión atmosférica.

Muchos de los aparatos empleados para la medida de presiones utilizan la presión atmosférica como nivel de referencia y miden la diferencia entre la presión real o absoluta y la presión atmosférica, llamándose a este valor presión manométrica.

Los aparatos que miden la presión manométrica reciben el nombre de manómetros y funcionan según los mismos principios en que se fundamentan los barómetros de mercurio y los aneroides. La presión manométrica se expresa bien sea por encima o por debajo de la presión atmosférica. Los manómetros que sirven para medir presiones inferiores a la atmosférica se llaman manómetros de vacío o vacuómetros.

[5]

1.9.1.4. Presión atmosférica

La presión atmosférica es la presión ejercida por el aire atmosférico en cualquier punto de la atmósfera. Normalmente se refiere a la presión atmosférica terrestre, pero el término es generalizable a la atmósfera de cualquier planeta o satélite.

La presión atmosférica en un punto representa el peso de una columna de aire de área de sección recta unitaria que se extiende desde ese punto hasta el límite superior de la atmósfera. Como la densidad del aire disminuye cuando nos elevamos, no podemos calcular ese peso a menos que seamos capaces de expresar la densidad del aire ρ en función de la altitud z o de la presión p . Por ello, no resulta fácil hacer un cálculo exacto de la presión atmosférica sobre la superficie terrestre; por el contrario, es muy fácil medirla.

La presión atmosférica en un lugar determinado experimenta variaciones asociadas con los cambios meteorológicos. Por otra parte, en un lugar determinado, la presión atmosférica disminuye con la altitud, a causa de que el

peso total de la atmósfera por encima de un punto disminuye cuando nos elevamos. La presión atmosférica decrece a razón de 1 mmHg o Torr por cada 10 m de elevación en los niveles próximos al del mar. En la práctica se utilizan unos instrumentos, llamados altímetros, que son simples barómetros aneroides calibrados en alturas; estos instrumentos no son muy precisos.

La presión atmosférica estándar, 1 atmósfera, fue definida como la presión atmosférica media al nivel del mar que se adoptó como exactamente 101 325 Pa o 760 Torr. Sin embargo, a partir de 1982, la IUPAC recomendó que para propósitos de especificar las propiedades físicas de las sustancias "*el estándar de presión*" debía definirse como exactamente 100 kPa o (\approx 750,062 Torr). Aparte de ser un número redondo, este cambio tiene una ventaja práctica porque 100 kPa equivalen a una altitud aproximada de 112 metros, que está cercana al promedio de 194 m de la población mundial.

[6]

La atmósfera es toda la masa de aire que rodea la tierra. Mientras que la misma se extiende hacia arriba cerca de 500 millas, la sección de interés primario es la porción que se encuentra próxima a la superficie de tierra y que se extiende 7 ½ millas hacia arriba. Esta capa se llama la troposfera. Si una columna de aire de 1 pulgada cuadrada que se extienda hasta la parte superior de la atmósfera pudiera ser pesada, dicha columna pesaría aproximadamente 14.7 libras en el nivel del mar. Así, la presión atmosférica en el nivel del mar es aproximadamente 14.7 psi.

A medida que uno asciende, la presión atmosférica disminuye en aproximadamente 1.0 psi por cada 2.343 pies. Sin embargo, debajo del nivel del mar, en excavaciones y depresiones, la presión atmosférica aumenta. Las presiones debajo del agua se diferencian de aquellas debajo del aire solamente porque el peso del agua se debe agregar a la presión del aire.

La presión atmosférica se puede medir por varios métodos. El laboratorio común el método utiliza el barómetro de columna del mercurio. La altura de la columna del mercurio sirve como indicador de la presión atmosférica. En el nivel del mar y a una temperatura de 0° Celsius (C), la altura de la columna del mercurio es aproximadamente 30 pulgadas, o 76 centímetros. Esto representa una presión de aproximadamente 14.7 psi. La columna de 30 pulgadas se utiliza como estándar de referencia.

Otro dispositivo usado para medir la presión atmosférica es el barómetro aneroide. El barómetro aneroide utiliza el cambio de forma de una célula al vacío de metal, para medir variaciones en la presión atmosférica. El fino metal de la célula aneroide se mueve hacia adentro o hacia fuera con la variación de la presión sobre su superficie externa. Este movimiento se transmite a través de un sistema de palancas a un indicador, que indica la presión.

La presión atmosférica no varía uniformemente con la altitud. Cambia más rápidamente en altitudes más bajas debido a la compresibilidad del aire, que causa

que las capas del aire cercanas a la superficie de la tierra se compriman por las masas de aire superiores. Este efecto, sin embargo, está parcialmente contrarrestado por la contracción de las capas superiores debido al enfriamiento. El enfriamiento tiende a aumentar la densidad del aire.

Las presiones atmosféricas son muy grandes, pero en la mayoría de los casos prácticamente la misma presión está presente en todos los lados de los objetos, de manera que ninguna superficie está sujeta a una gran carga.

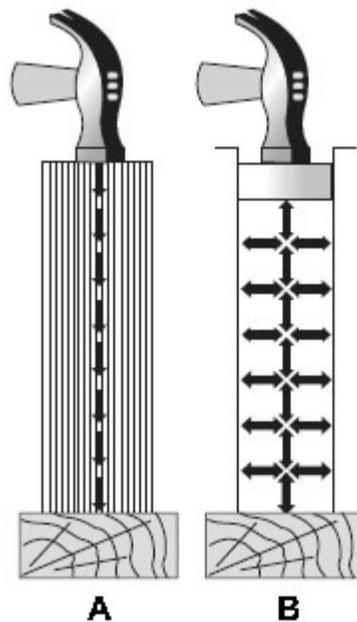


Figura 1.9 Transmisión de fuerza A: Sólido B: Líquido

La presión atmosférica que actúa en la superficie de un líquido (A en la figura superior) se transmite igualmente a través del líquido y de éste a las paredes del envase, pero es balanceada por la misma presión atmosférica que actúa las paredes externas del envase. En la vista B del cuadro, la presión atmosférica que actúa en la superficie de un pistón es balanceada por la misma presión que actúa en la superficie del otro pistón. Las diferentes áreas de las dos superficies no se diferencian, puesto que por cada unidad de área, las presiones son balanceadas.

1.9.1.5. Transmisión de fuerzas a través de líquidos

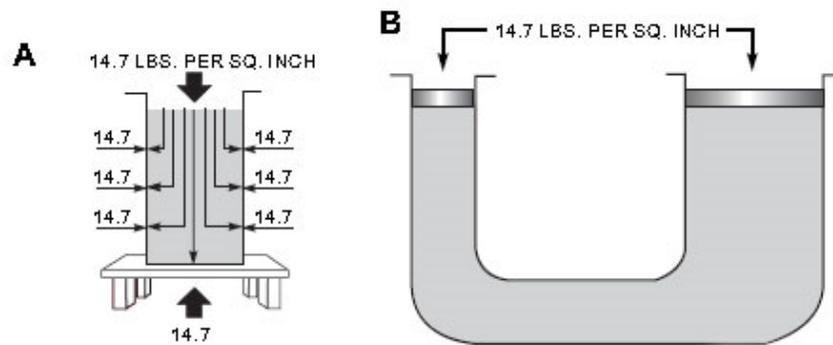


Figura 1.10 Efectos de la presión atmosférica

Cuando el extremo de una barra sólida se golpea, la fuerza del golpe se traslada directamente a través de la barra al otro extremo (figura 1.10 (A)). Esto sucede porque la barra es rígida. La dirección del golpe determina casi enteramente la dirección de la fuerza transmitida. Cuanto más rígida la barra, menos fuerza se pierde dentro de la barra o se transmite perpendicularmente hacia fuera de la dirección del golpe.

Cuando una fuerza se aplica al extremo de una columna del líquido confinado (figura 1.10 (B)), la misma es transmitida directamente al otro extremo, y a la vez igualmente, en cada dirección sin pérdidas a través de la columna – hacia adelante, atrás, y hacia los costados – de manera que el recipiente que contiene el fluido está; literalmente lleno de presión.

Un ejemplo de esta distribución de fuerza se ilustra en la figura 1.11. La manguera plana adquiere una sección representativa circular cuando se llena de agua bajo presión. El empuje exterior del agua es igual en cada dirección.



Figura 1.11 Distribución de fuerza

1.9.2. Ley de Pascal

La ley más elemental de la física referida a la hidráulica y neumática fue descubierta y formulada por Blas Pascal en 1653 y denominada **Ley de Pascal**, que dice:

“La presión existente en un líquido confinado actúa igualmente en todas direcciones, y lo hace formando ángulos rectos con la superficie del recipiente”.

La presión en un líquido sólo depende de la profundidad, cualquier incremento de presión en la superficie debe transmitirse a cada punto en el fluido. Esto lo reconoció por primera vez el científico francés Blaise Pascal y se conoce como **Ley de Pascal**. La figura 1.12 ilustra la **Ley de Pascal**. El fluido confinado en la sección de una tubería ejerce igual fuerza en todas direcciones, y perpendicularmente a las paredes.

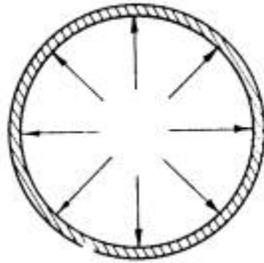


Figura 1.12

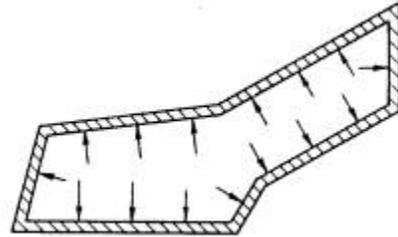


Figura 1.13

La figura 1-13 muestra la sección transversal de un recipiente de forma irregular, que tiene paredes rígidas. El fluido confinado en el ejerce la misma presión en todas las direcciones, tal como lo indican las flechas. Si las paredes fueran flexibles, la sección asumiría forma circular. Es entonces la Ley de Pascal que hace que una manguera contra incendios asuma forma cilíndrica cuando es conectada al suministro. Es importante la diferencia entre cómo actúa la fuerza sobre un fluido y cómo lo hace sobre un sólido. Puesto que el sólido es un cuerpo rígido, puede soportar que se le aplique una fuerza sin que cambie apreciablemente su forma. Por otra parte, un líquido puede soportar una fuerza únicamente en una superficie o frontera cerrada.

Nota que la fuerza que ejerce un fluido sobre las paredes del recipiente que lo contiene siempre actúa en forma perpendicular a esas paredes. Ésta es una característica propia de los fluidos que hace que el concepto de presión sea muy útil. Si se perforan agujeros a los lados y al fondo de un barril con agua, se demuestra que la fuerza ejercida por el agua es en cualquier parte perpendicular a la superficie del barril.

Cualquier persona que haya tratado de mantener una balsa por debajo de la superficie del agua se convence de inmediato de la existencia de una presión hacia arriba. En realidad nos damos cuenta que: Los fluidos ejercen presión en todas direcciones.

1.9.2.1. Aplicación de la Ley de Pascal por Bramah

En los primeros años de la Revolución Industrial, un mecánico de origen británico llamado **Joseph Bramah**, utilizó el descubrimiento de Pascal y por ende el llamado Principio de Pascal para fabricar una prensa hidráulica.

Bramah pensó que si una pequeña fuerza, actuaba sobre un área pequeña, ésta crearía una fuerza proporcionalmente más grande sobre una superficie mayor, el único límite a la fuerza que puede ejercer una máquina, es el área a la cual se aplica la presión.

Esto se puede apreciar en el siguiente ejemplo:

¿Qué fuerza F_1 se requiere para mover una carga K de 10.000 kg?

Considerar los datos del dibujo.

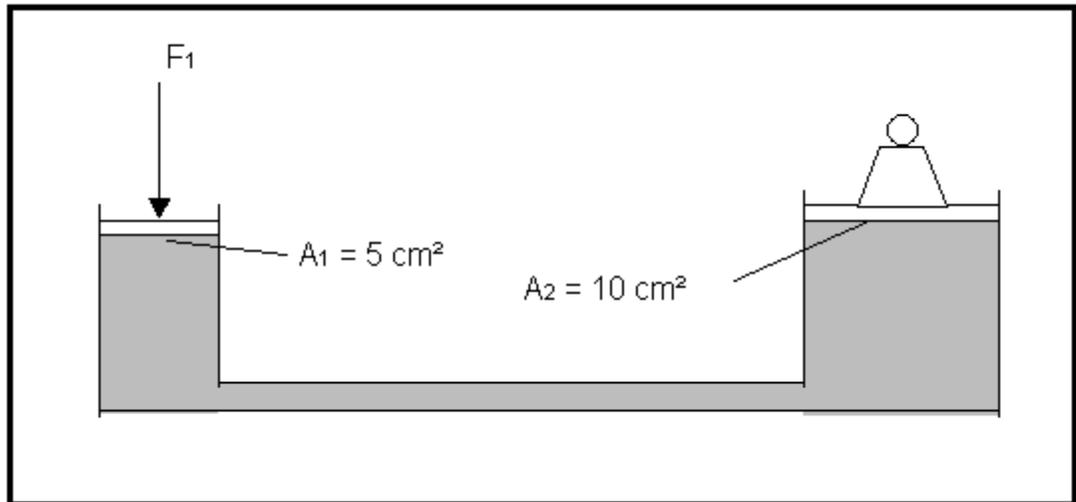


Figura 1.14

$$\text{Como } p = \frac{F}{A}$$

$$A_2 = 10 \text{ cm}^2$$

$$k = 10.000 \text{ kgf}$$

$$p_2 = \frac{10.000 \text{ kgf}}{10 \text{ cm}^2}$$

$$p_2 = 1.000 \text{ kgf/cm}^2$$

Como en un circuito cerrado, de acuerdo al principio de Pascal, la presión en todas direcciones normales a las superficies de medición, se puede decir que la presión aplicada al área 2 es igual que la aplicada al área 1.

$$p_1 = p_2$$

$$F_1 = \left(1.000 \text{ kgf/cm}^2 \right) \times (5 \text{ cm}^2)$$

$$F_1 = 5.000 \text{ kgf}$$

$$F = p \times A$$

De esto se concluye que el área es inversamente proporcional a la presión y directamente proporcional a la fuerza.

Para el ejemplo se tiene que el equilibrio se logra aplicando una fuerza menor que el peso ya que el área es menor que la que soporta el peso.

Un claro ejemplo de esto son las gatas hidráulicas.

1.9.3. Ley de Boyle

La relación básica entre la presión de un gas y su volumen esta expresada en la **Ley de Boyle** que establece que:

“La presión absoluta de un gas confinado en un recipiente varía de forma inversa a su volumen, cuando la temperatura permanece constante”

Para la resolución de problemas, la Ley de Boyle se escribe de la siguiente manera:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad \text{O transponiendo términos:}$$

$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} \quad \text{O,} \quad V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2}$$

En estas formulas, p_1 y V_1 son la presión y volumen inicial de un gas, y p_2 y V_2 la presión y volumen de que el gas haya sido comprimido o expandido.

Importante: Para aplicar esta fórmula es necesario emplear valores de presión “absoluta” y no manométrica.

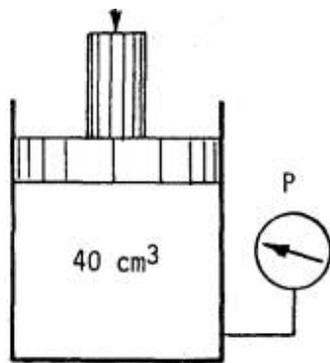


Figura 1.15 A

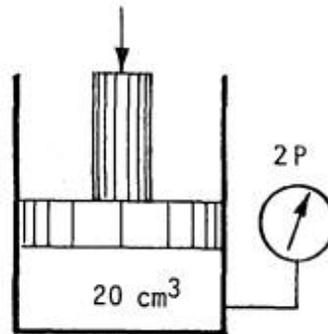


Figura 1.15 B

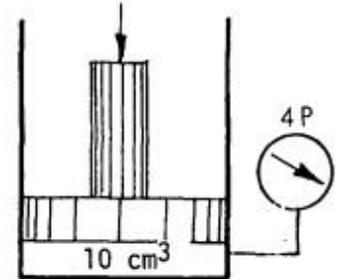


Figura 1.15 C

Las tres figuras ejemplifican la Ley de Boyle. En la figura 1.15 (A), 40 cm³ de gas están contenidos en un recipiente cerrado a una presión P. En la figura 1.15 (B) el pistón se ha movido reduciendo el volumen a 20 cm³, provocando un incremento de la presión 2P.

En la figura 1.15 (C) el pistón ha comprimido el gas a 10 cm³, provocando un incremento de cuatro veces la presión original 4P.

Existe entonces una relación inversamente proporcional entre el volumen y la presión de un gas siempre que la temperatura se mantenga constante, y que las lecturas de presión sean “absolutas” es decir referidas al vacío perfecto.

La Ley de Boyle, describe el comportamiento de un gas llamado “perfecto”. El aire comprimido se comporta en forma similar a la ley de un gas perfecto a presiones menores de 70 Kg/cm² y los cálculos empleando la Ley de Boyle ofrecen resultados aceptables. No ocurre lo mismo con ciertos gases, particularmente de la familia de los hidrocarburos como el propano y etileno.

Cálculo

Partiendo con 40 cm³ de gas confinado a una presión manométrica de 3 Kg/cm², fig. 1-8 A, ¿cuál será la presión final después de que el gas haya sido comprimido a un volumen cuatro veces menor?

Primero convertiremos la presión manométrica en absoluta:

$$3 + 1.033 = 4.033 \text{ Kp/cm}^2$$

A continuación aplicaremos la Ley de Boyle: Sí el volumen se redujo a 1/4, la presión habrá multiplicado por 4 es decir: 4,033 x 4 = 16,132 Kp / cm² (absoluta).

Finalmente convertimos esta lectura absoluta en manométrica:

$$13.132 - 1.033 = 15.099 \text{ Kg/cm}^2$$

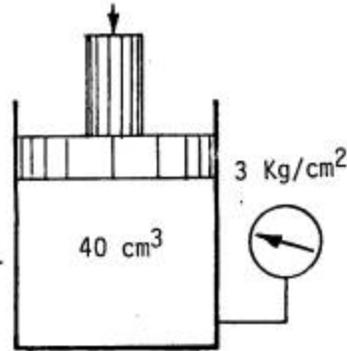


Figura 1.16 A

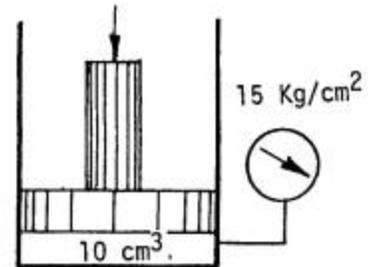


Figura 1.16 B

1.9.4. Ley de Charles

Esta ley define la relación existente entre la temperatura de un gas y su volumen o presión o ambas.

Esta ley muy importante es utilizada principalmente por matemáticos y científicos, y su campo de aplicación es reducido en la práctica diaria. La ley establece que: *“Si la temperatura de un gas se incrementa su volumen se incrementa en la misma proporción, permaneciendo su presión constante, o si la temperatura del gas se incrementa, se incrementa también su presión en la misma proporción, cuando permanece el volumen constante”*

Para la solución de problemas deben emplearse valores de presión y temperatura “absolutos”

1.9.4.1. Efecto de la temperatura en los fluidos

Es bien conocido el efecto de expansión de líquidos y gases por aumento de la temperatura. La relación entre la temperatura, volumen y presión de un gas podemos calcularla por la ley de Charles.

La expansión del aceite hidráulico en un recipiente cerrado es un problema en ciertas condiciones por ejemplo un cilindro hidráulico lleno de aceite en una de sus cámaras y desconectado mediante acoplamiento rápidos de las líneas de alimentación, no presenta lugar para una expansión cuando es expuesto al calor.

La presión interna puede alcanzar valores de 350 Kg / cm² y aún 1.400 Kg / cm² dependiendo del incremento de temperatura y características del cilindro.

1.9.5. Definiciones:

1.9.5.1. Compresibilidad de fluidos

Todos los materiales en estado gaseoso, líquido o sólido son compresibles en mayor o menor grado. Para las aplicaciones hidráulicas usuales el aceite hidráulico es considerado incompresible, si bien cuando una fuerza es aplicada la reducción de volumen será de 1/2 % por cada 70 Kg/cm² de presión interna en el seno del fluido.

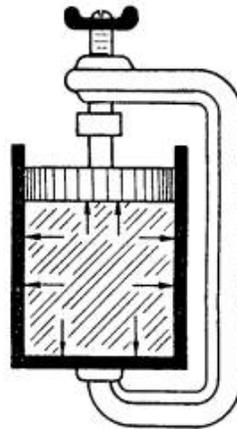


Figura 1.17

De la misma forma que los diseñadores de estructuras deben tener en cuenta el comportamiento del acero a la compresión y elongación, el diseñado hidráulico en muchas instancias debe tener en cuenta la compresibilidad de los líquidos, podemos citar como ejemplo, la rigidez en un servomecanismo, o el cálculo del volumen de descompresión de una prensa hidráulica para prevenir el golpe de ariete.

[1]

1.9.5.2. Cavitación

Cuando la velocidad del flujo líquido se incrementa localmente y el líquido fluye en una región donde la presión se reduce a la presión de vapor, el líquido hierve y se desarrollan bolsas de vapor. En esta situación, las burbujas de vapor son transportadas con el líquido hasta que se alcanza una región de más alta presión y estallan súbitamente. Cuando las bolsas de vapor estallan, las fuerzas ejercidas por el líquido que se precipita dentro de la cavitación crean una muy alta presión localizada y causan chapaletos de la superficie sólida, un proceso que se da acompañado de ruido y vibración. Este proceso de vaporización y estallido subsecuente de las burbujas de vapor en el flujo rápido de un líquido se llama *cavitación*. Los sistemas hidráulicos deben diseñarse para evitar la cavitación

eliminando zonas de baja presión local y/o utilizando materiales especiales resistentes a la cavitación o recubrimientos.

[2]

1.9.6. Transmisión de potencia

La figura 1.18 muestra el principio en el cual está basada la transmisión de potencia neumática e hidráulica. Una fuerza mecánica, trabajo o potencia es aplicada en el pistón A. La presión interna desarrollada en el fluido ejerciendo una fuerza de empuje en el pistón B.

Según la ley de Pascal la presión desarrollada en el fluido es igual en todos los puntos por que la fuerza desarrollada en el pitón B es igual a la fuerza ejercida en el fluido por el pistón A, asumiendo que los diámetros A y B son iguales.



Figura 1.18

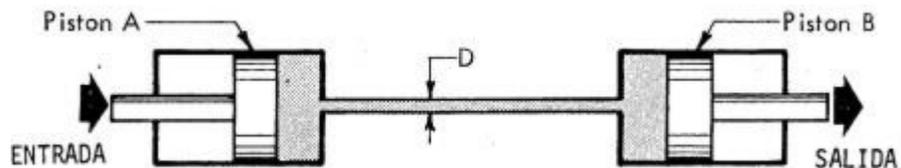


Figura 1.19

1.9.7. Transmisión de potencia a través de una tubería

El largo cilindro de la figura 1.18, puede ser dividido en dos cilindros individuales del mismo diámetro y colocados a distancia uno de otro conectados entre sí por una cañería. El mismo principio de transmisión de la fuerza puede ser aplicado, y la fuerza desarrollada en el pistón B va a ser igual a la ejercida por el pistón A.

La ley de Pascal no requiere que los dos pistones de la figura 1.19 sean iguales. La figura 1.20 ilustra la versatilidad de los sistemas hidráulicos y/o neumáticos al poder ubicarse los componentes aislantes no de otro, y transmitir las fuerzas en forma inmediata a través de distancias considerables con escasas pérdidas. Las transmisiones pueden llevarse a cualquier posición.

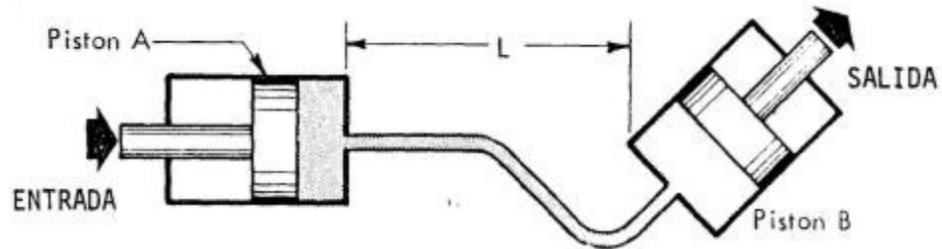


Figura 1.20

Aún doblando esquinas, pueden transmitirse a través de tuberías relativamente pequeñas con pequeñas pérdidas de potencia.

La distancia L que separa la generación, pistón A, del punto de utilización pistón B, es usualmente de 1.5 a 6 metros en los sistemas hidráulicos, y de 30 a 60 metros en aire comprimido.

1.9.8. Presión hidráulica

La presión ejercida por un fluido es medida en unidades de presión. Las unidades comúnmente utilizadas son:

- La libra por pulgada cuadrada = PSI
- El kilogramo por centímetro cuadrado = Kg/cm²
- El kilogramo fuerza por centímetro cuadrado = Kp/cm²
- El bar = bar

Existiendo la siguiente relación aproximada:

$$\text{Kg/cm}^2 \sim \text{Kp/cm}^2 \sim \text{bar}$$

En la figura 1.21 A se muestra que la fuerza total aplicada al vástago de un pistón se distribuye sobre toda la superficie de este. Por ello para encontrar la presión que se desarrollará en el seno de un fluido deberemos dividir el empuje total por la superficie del pistón.

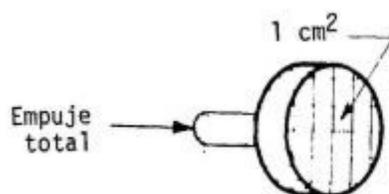


Figura 1.21 A

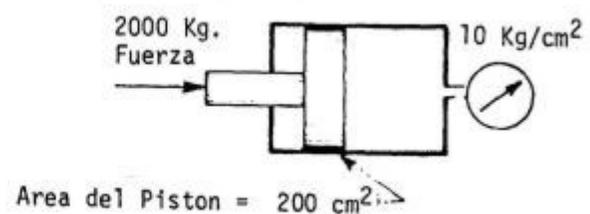


Figura 1.21 B

La figura 1.21 B, una fuerza de 2200 Kg ejercida en el extremo del vástago es distribuida sobre 200 cm² por lo que la fuerza por cm² será de 10 Kg y esto lo indica el manómetro.

Este principio tiene carácter reversible, en la figura 1.22 la presión interna del fluido actuando sobre el área del pistón produce una fuerza de empuje en el extremo del vástago.

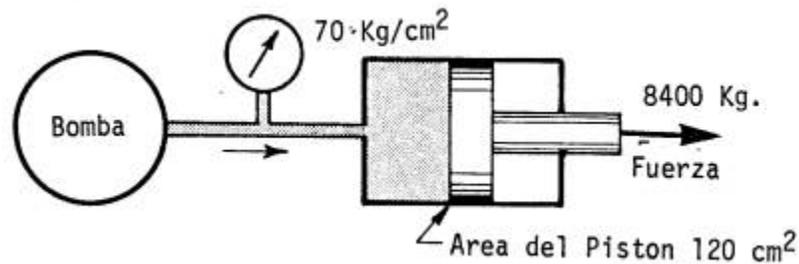


Figura 1.22

La presión interna indicada por el manómetro 70 Kg/cm² actúa sobre 120 cm² de área de pistón produciendo un empuje de 8400 Kg.

No olvidemos que para hallar la superficie de un pistón debemos aplicar la fórmula:

$$\text{Área} = \pi r^2$$

[1]

1.10. UNIDAD DE POTENCIA HIDRÁULICA

Una unidad de potencia hidráulica incluye componentes tales como un depósito, filtros, un motor eléctrico para impulsar una bomba o unas bombas y una válvula de control de presión máxima o válvula de alivio.

1.10.1. Depósito

El depósito, que funciona como fuente de fluido hidráulico, debe ser lo suficientemente grande para almacenar el mayor volumen de líquido que el sistema pueda necesitar. Además, debe estar completamente cerrado con el objeto de mantener el fluido limpio. Con frecuencia, el motor eléctrico, la bomba y las válvulas están montados sobre el depósito.

1.10.2. Filtros

Para remover partículas extrañas del fluido hidráulico, se utilizan rejillas, filtros y bujías magnéticas, asegurando de ese modo la larga vida y el funcionamiento sin

dificultades del sistema hidráulico. (Las bujías magnéticas localizadas usualmente en el depósito atrapan las partículas de hierro o acero del fluido hidráulico).

1.10.3. Bombas hidráulicas

Utilizadas para convertir energía mecánica en energía hidráulica, las bombas hidráulicas pueden clasificarse como *bombas de desplazamiento positivo* y *bombas de desplazamiento no positivo*. La figura 1.23 (A) y figura 1.23 (B) muestran diagramas esquemáticos de cada una de ellas. Una característica de las bombas de desplazamiento positivo es que su salida no se ve afectada por las variaciones de la presión del sistema a causa de la presencia de un sello interno contra fugas. Casi todas las bombas usadas en sistemas hidráulicos de potencia son del tipo desplazamiento positivo. (Debido a la ausencia de un sello interno positivo, la salida de una bomba de desplazamiento no positivo varía considerablemente con la presión).

Las bombas de desplazamiento positivo pueden clasificarse como *unidades de desplazamiento fijo o variable*. En las primeras, con objeto de variar la salida volumétrica, debe variarse la velocidad de la bomba. La salida volumétrica puede variarse en una bomba de desplazamiento variable ajustando las relaciones físicas de las partes operativas de la bomba.

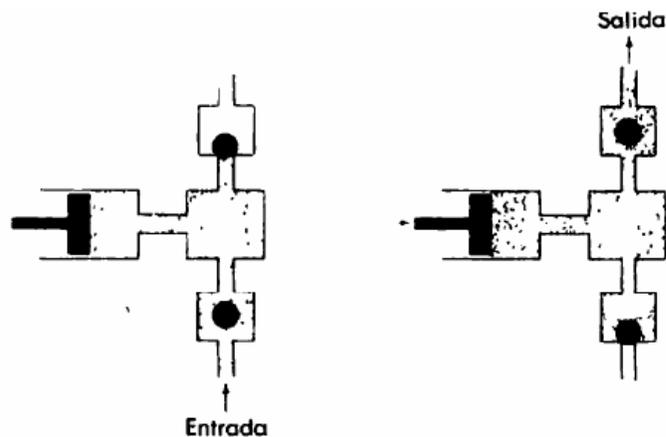


Figura 1.23 A Bomba de Desplazamiento Positivo

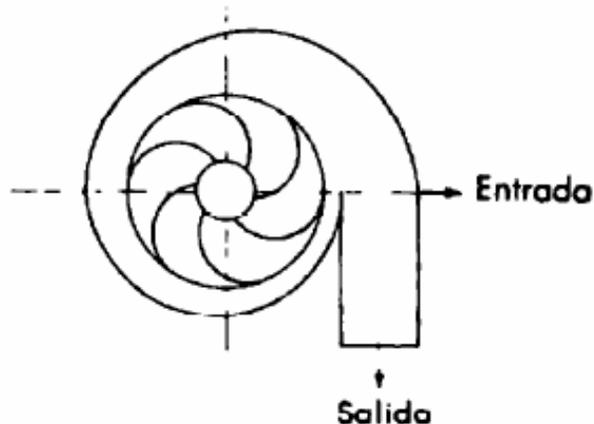


Figura 1.23 B Bomba de Desplazamiento No Positivo

Hay cuatro tipos básicos de bombas de desplazamiento positivo comúnmente usadas en los sistemas hidráulicos.

- Bomba de Pistón Axial
- Bomba de Pistón Radial
- Bomba de Aspas
- Bomba de Engranés

Debido a la semejanza en su construcción mecánica, las bombas hidráulicas pueden usarse como motores hidráulicos. La tabla 1.3 muestra las características de funcionamiento de las bombas y motores hidráulicos.

Tabla 1.4 CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS Y MOTORES HIDRAULICOS

	Presión (MPa)	Salida (m³/s)	Eficiencia Total
Bombas de Pistón Axial	7 ~ 70	$3 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-2}$	85 ~ 95
Bombas de Pistón Radial	5 ~ 50	$3 \times 10^{-4} \sim 1,2 \times 10^{-2}$	80 ~ 90
Bombas de Aspas	2 ~ 18	$3 \times 10^{-5} \sim 1,6 \times 10^{-2}$	80 ~ 90
Bombas de Engranés	2 ~ 18	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$	75 ~ 90
	Presión (MPa)	Frecuencia Angular (Hz)	Eficiencia Total
Motores de Pistón Axial	1 ~ 70	0,2 ~ 50	85 ~ 95
Motores de Pistón Radial	1 ~ 50	0,2 ~ 30	80 ~ 90
Motores de Aspas	1 ~ 18	2 ~ 50	80 ~ 90
Motores de Engranés	1 ~ 18	2 ~ 50	70 ~ 90

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10^6 \text{ N/m}^2 = 10,197 \text{ kg}_f/\text{cm}^2 = 145 \text{ lb}_f/\text{in}^2$$

$$1 \text{ m}^3/\text{s} = 10^6 \text{ cm}^3/\text{s} = 10^3 \text{ l/s} = 6 \times 10^4 \text{ l/min}$$

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ ciclo/s} = 60 \text{ ciclos/min} = 60 \text{ rev/min}$$

1.10.3.1. Bombas de Pistón Axial

La figura 1.24 es un diagrama esquemático de una *bomba de pistón axial*. El bloque del cilindro rotatorio contiene pistones que tienen libertad para moverse hacia adentro y hacia afuera de sus orificios. La flecha impulsora está colocada formando un ángulo con respecto al bloque de cilindros. La rotación de la flecha impulsora causa rotación de los pistones y del bloque de cilindros a la misma velocidad. Al moverse cada pistón adentro y afuera en sus orificios, la longitud del recorrido es $2R \tan(\alpha)$. (R está definido en la figura 1.24) Esta longitud depende del ángulo α , el ángulo de inclinación del bloque de cilindros. Al moverse cada pistón hacia afuera, el fluido hidráulico es absorbido a través de la válvula. En la carrera de retorno, el fluido es expulsado a través de la válvula bajo presión. En un ciclo, el flujo volumétrico es $2ZAR \tan(\alpha)$, donde Z es el numero de pistones (una bomba típica tiene 9 pistones), y A es el área del pistón.

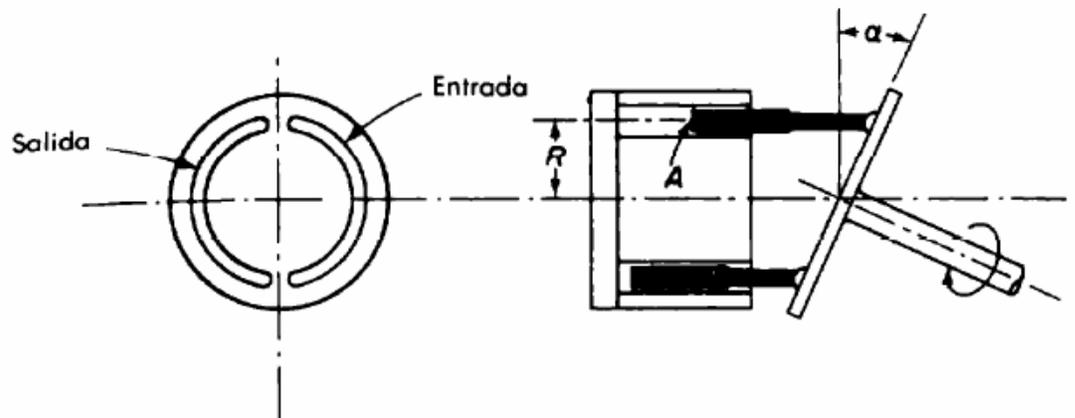


Figura 1.24 Bomba de Pistón Axial

1.10.3.2. Bombas de Pistón Radial

Se ilustra una *bomba de pistón radial* en la figura 1.25 (A) consta de un perno estacionario con lumbreras de entrada y salida del flujo, un bloque de cilindro que da vueltas alrededor del perno y alberga los pistones y un rotor que controla la carrera del pistón. El eje central del rotor está desviado del eje central del bloque del cilindro.

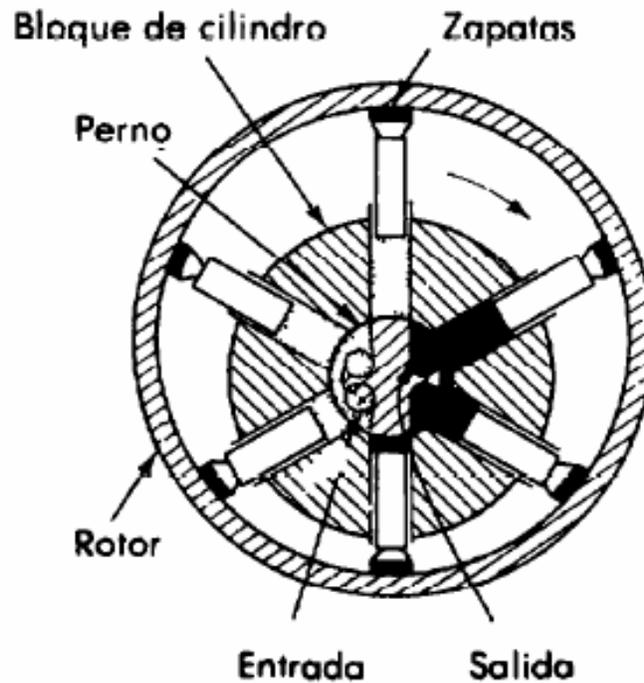


Figura 1.25 A Bomba de Pistón Radial

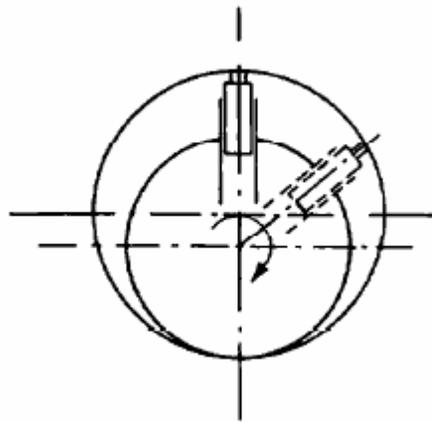


Figura 1.25 B Diagrama Esquemático de una Bomba de Pistón Radial

La figura 1.25 (B) es un diagrama esquemático de una bomba de pistón radial en la cual solo se muestra solo un pistón. Aquí, a medida que la flecha impulsora hace girar al bloque del cilindro, la fuerza centrífuga impulsa al émbolo sumergido hacia afuera de modo que presiona contra el rotor. Puesto que el eje central no coincide con el eje central del bloque del cilindro, el pistón se mueve hacia adentro durante la mitad de una revolución del bloque del cilindro y hacia afuera durante la otra mitad. El perno incluye lumbreras de entrada y salida que conectan los

extremos abiertos de los orificios de los cilindros. Durante la rotación, el pistón alimenta fluido hidráulico en el orificio del cilindro a medida que pasa por el lado de entrada del perno, y fuerza al fluido hacia afuera del orificio a medida que pasa por el lado de salida del perno. La salida volumétrica depende de la excentricidad entre los ejes centrales del rotor y del cilindro.

1.10.3.3. Bombas de Aspas

En la figura 1.26 (A) aparece un diagrama esquemático de una *bomba de aspas* simple. Un rotor cilíndrico con aspas móviles en ranuras radiales gira en una carga circular. El diagrama de la figura 1.26 (B) ilustra el principio de operación. Para simplificar la exposición, solo se muestra un aspa.

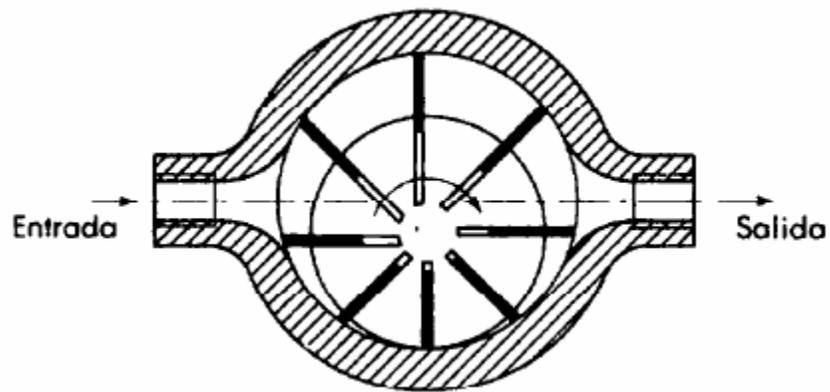


Figura 1.26 A Bomba de Aspas

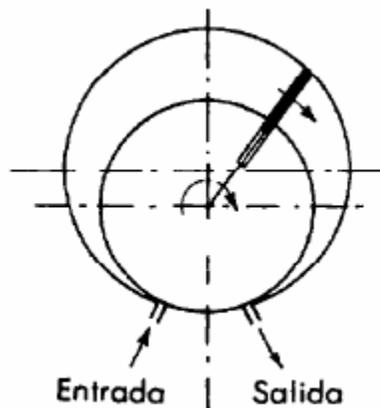


Figura 1.26 B Diagrama Esquemático de una bomba de aspas

A medida que el rotor da vuelta, la fuerza centrífuga impulsa al aspa hacia afuera de modo que esté siempre en contacto con la superficie interna de la carcasa. El aspa divide el área entre el rotor y la carcasa en dos cámaras. (La bomba de

aspas real incluye muchas aspas, que dividen el área entre el rotor y la carcasa en muchas cámaras que varían en tamaño, dependiendo de su posición alrededor de la carcasa.) La entrada a la bomba se localiza en un punto donde la cámara está expandiendo su tamaño. Un vacío parcial originado por la expansión alimenta fluido hidráulico dentro de la bomba. Luego el fluido es transportado a la salida de la bomba, donde la cámara lo toma y lo fuerza a través de la lumbrera de salida.

Esta bomba se llama de aspas *desbalanceada* porque la alta presión se genera solamente en un lado del rotor y la flecha.

Una bomba de aspas *balanceada* tiene una carcasa elíptica que forma dos cámaras de bombeo separadas en lados opuestos del rotor, de modo que las cargas laterales se cancelan mutuamente. Una bomba balanceada como la descrita se muestra en la figura 1.27. Las ventajas de este tipo consisten en que se incrementa la vida de los cojinetes y permite más altas presiones de operación.

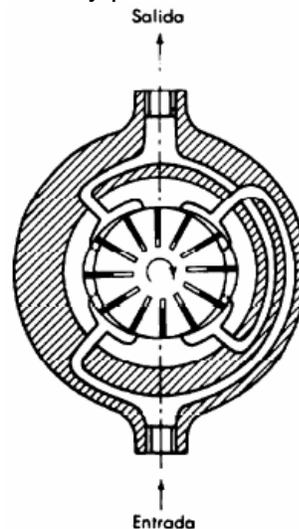


Figura 1.27 Bomba de aspas balanceada

1.10.3.4. Bombas de Engranés

La figura 1.28 presenta un diagrama esquemático de una *bomba de engranes*, la cual consta de un engrane impulsor y un engrane impulsado, encerrados dentro de una carcasa bien empaçada. Los engranes impulsor e impulsado giran en direcciones opuestas y se engranan en un punto dentro de la carcasa entre las lumbreras de entrada y de salida. El fluido hidráulico es alimentado por la entrada a la cámara A, al separarse los dientes de los engranes impulsor e impulsado. El fluido hidráulico queda atrapado entre los dientes del engrane y la carcasa, y es transportado a través de dos trayectorias separadas alrededor de la cámara de salida B. a medida que los dientes vuelven a engranar, el fluido es forzado a través de la lumbrera de salida. Nótese que el buen empaque de los dientes de engrane dentro de la carcasa se necesita para hacer mínimo el escurrimiento interno.

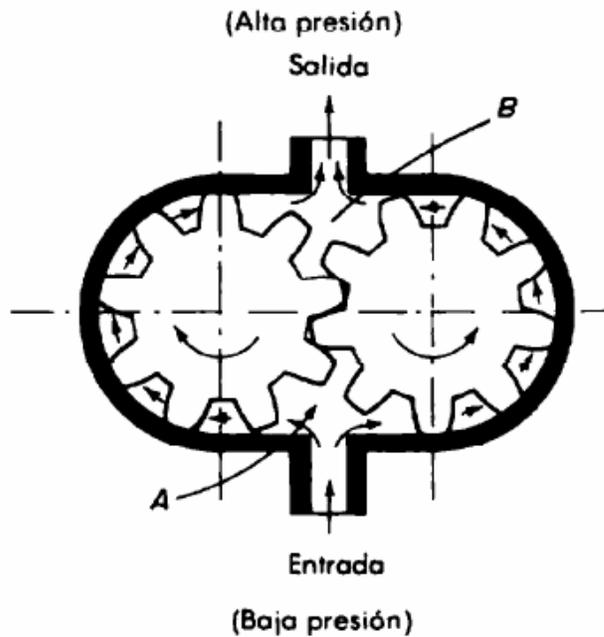


Figura 1.28 Bomba de engranes

- En razón de su bajo costo, su mantenimiento más simple y su gran tolerancia a la contaminación del fluido, la bomba de engranes se utiliza mucho en las industrias.
- La bomba de espas tiene amplias aplicaciones industriales, tales como las maquinas herramientas y la maquinaria automática. Las bombas de pistón axial y radial son más utilizadas donde se necesitan altas presiones.

1.10.4. Acumuladores

El *acumulador* almacena fluido a presión proveniente de una bomba hidráulica. Esta componente se usa a menudo en circuitos hidráulicos para tener disponible el fluido a presión ante la demanda y para suavizar las pulsaciones en el flujo.

1.10.5. Actuadores

Los *actuadores hidráulicos* se realizan la función opuesta que las bombas hidráulicas en el sentido de que convierten la energía hidráulica en energía mecánica con el objeto de permitir el trabajo útil. Enlazado mecánicamente a la carga de trabajo, este dispositivo es actuado por el fluido a presión de la bomba. Los actuadores pueden clasificarse como lineales y rotatorios.

1.10.5.1. Actuadores Lineales

Los *actuadores lineales* vienen en la forma de un ariete o cilindro. La figura 1.29 (A) y 1.29 (B) muestra unos cilindros de doble acción. En un cilindro de doble

acción la presión hidráulica puede aplicarse en cualquiera de los lados del pistón. (El pistón puede moverse en una u otra dirección.) El tipo mostrado en la figura 1.29 (A) se llama *cilindro diferencial* porque el área del pistón a la izquierda es mayor, proporcionando así una carrera de trabajo más lenta y más potente cuando se aplica la presión por el lado izquierdo. La carrera de retorno es más rápida debido al área del pistón más pequeña. La figura 1.29 (B) muestra un tipo de *cilindro no diferencial*. Se necesitan fuerzas iguales en ambas direcciones.

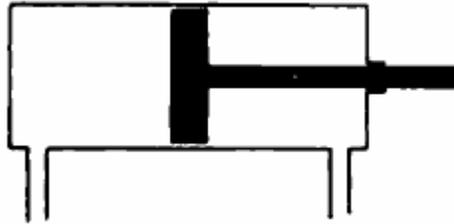


Figura 1.29 A Cilindro de doble acción diferencial

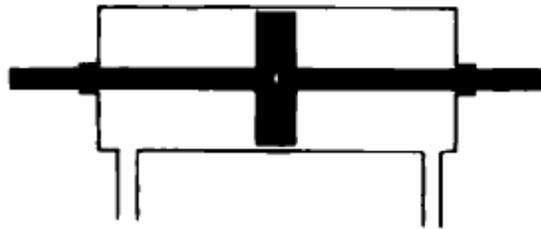


Figura 1.29 B Cilindro de doble acción no diferencial

1.10.5.2. Actuadores Rotatorios

Los *actuadores rotatorios* incluyen motores de pistón, motores de aspas y motores de engranes. Muchas de las bombas hidráulicas (como las bombas de pistón, las bombas de aspas y las bombas de engranes) pueden usarse como motores con una modificación pequeña o sin modificación.

La figura 1.30 es un diagrama esquemático de un motor de pistón axial. El pistón en el lado de alta presión es empujado hacia afuera por la fuerza Ap , donde A es el área del pistón y p la presión del fluido. Esta fuerza puede descomponerse en la fuerza normal y la paralela al plato impulsado. Para cada pistón, la fuerza paralela al plato es $Ap \sin(\alpha)$. Por lo tanto, el par τ que actúa sobre la flecha es

$$\tau = \sum_{i=1}^n Ap \sin(\alpha) x R \sin(\theta_i)$$

Donde θ_i es el ángulo entre la línea OY y la línea que conecta al punto O y el centro del n -ésimo émbolo sumergido y R está definido en la figura 1.30. En un

motor de pistón radial, el fluido de presión entra en la mitad de los orificios del bloque del cilindro, forzando radialmente los pistones respectivos desde el eje del bloque del cilindro. Estos pistones pueden moverse radialmente girando a un punto donde el contorno del rotor está más alejado del perno. Así pues, al impulsar los pistones radialmente se hace que el bloque del cilindro y los pistones giren. Este principio de operación se ilustra en la figura 1.31. El bloque del cilindro está conectado a la flecha de salida.

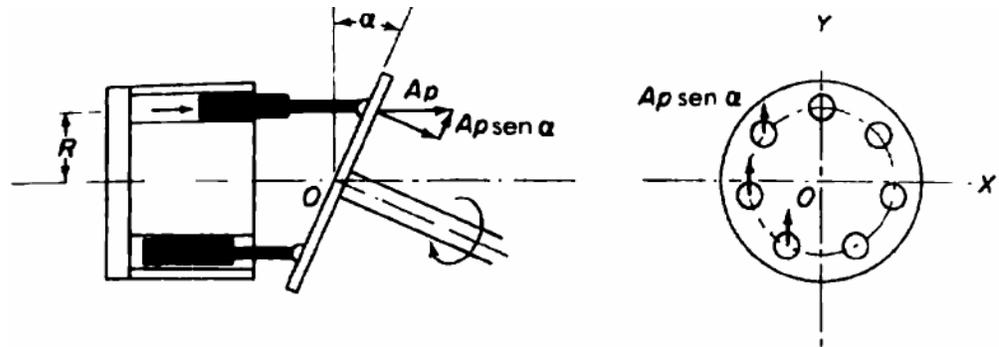


Figura 1.30 Motor de pistón axial

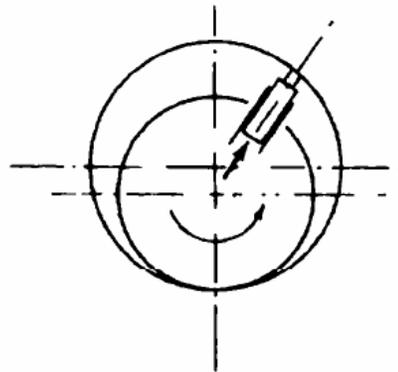


Figura 1.31 Motor de pistón radial

La figura 1.32 ilustra un motor de engranes. Puesto que este dispositivo es un motor, ambos engranes son engranes impulsados, pero solo uno está conectado a la flecha de salida. La operación es esencialmente la inversa de la bomba de engranes. El fluido hidráulico de la bomba entra a la cámara A y fluye en una y otra dirección alrededor de la superficie interna de la carcasa hacia la cámara B, forzando a los engranes a girar como se indica. Así, el movimiento rotatorio queda entonces disponible para el trabajo en la flecha de salida.

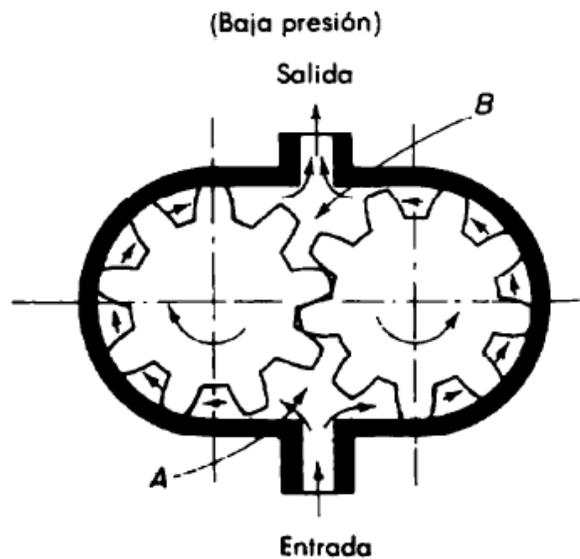


Figura 1.32 Motor de Engranes

1.10.6. Válvulas Hidráulicas de Control

La *válvula hidráulica de control* es un dispositivo que utiliza movimiento mecánico para controlar la dirección del flujo del fluido hacia el actuador. Las válvulas hidráulicas de control comúnmente usadas pueden dividirse en cuatro tipos:

- Válvula de Carretes Deslizantes
- Válvula de Batidor o de Aleta
- Válvula de tubo o de Chorro
- Válvula de Disco

1.10.6.1. Válvula de carretes deslizantes

Usadas bastante en los sistemas hidráulicos, las *válvulas de carretes deslizantes* usualmente se clasifican por el número de vías por donde el flujo puede entrar a la válvula o salir de ella.

En la figura 1.33 se muestra una válvula de cuatro vías de carretes deslizantes (o válvula deslizante de cuatro vías) conectada a un cilindro de potencia (o actuador). El principio de operación es el siguiente. El carrete puede ser corrido en una dirección o en la otra. Si se cambia a la derecha, como se muestra, el puerto *B* se abre a la entrada de presión *P* y el puerto *A* se abre al drenaje. El pistón de potencia (o actuador) se mueve a la izquierda. En forma similar, si el carrete se cambia a la izquierda, el punto *A* se abre a la entrada de presión *P*, el puerto *B* se abre al drenaje y el pistón de potencia se mueve hacia la derecha.

Esta válvula de 4 vías tiene dos discos en el carrete. (En la válvulas de carrete, el numero de discos varia de uno hasta 3 o cuatro). Si el ancho del disco es menor que el puerto en la manga de la válvula, se dice que la válvula es *subtraslapada*. Las válvulas *sobretraslapadas* tienen un ancho de disco mayor que el ancho del puerto cuando la manga está en posición neutral. Una válvula de traslape cero tiene un ancho de disco que es idéntico al ancho el puerto.

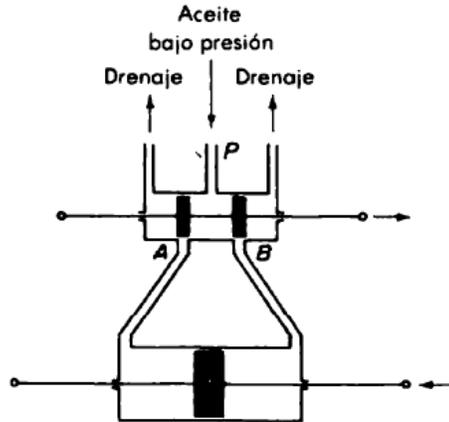


Figura 1.33 Válvula de carretes deslizantes de cuatro vías conectada a un cilindro de potencia

La figura 1.34 muestra una válvula de tres vías conectada a un cilindro de potencia. Requiere una presión sesgada actuando en un lado de un pistón de potencia de área desigual para invertir la dirección.

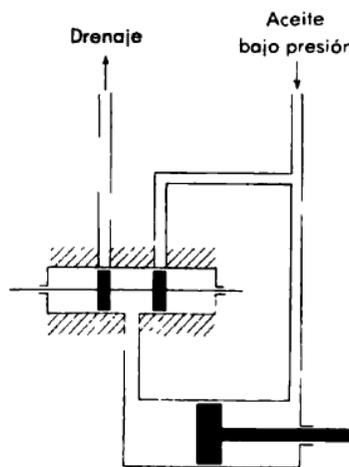


Figura 1.34 Válvula de tres vías conectada a un cilindro de potencia

1.10.7. Válvulas de aletas

Las *Válvulas de aletas* también son llamadas *Válvulas de tobera o aleta*, una aleta se coloca entre dos toberas opuestas (figura 1.35). Si la aleta se mueve ligeramente hacia la derecha, ocurre un desbalance en la presión en las toberas y el pistón de potencia se mueve a la izquierda, y viceversa.

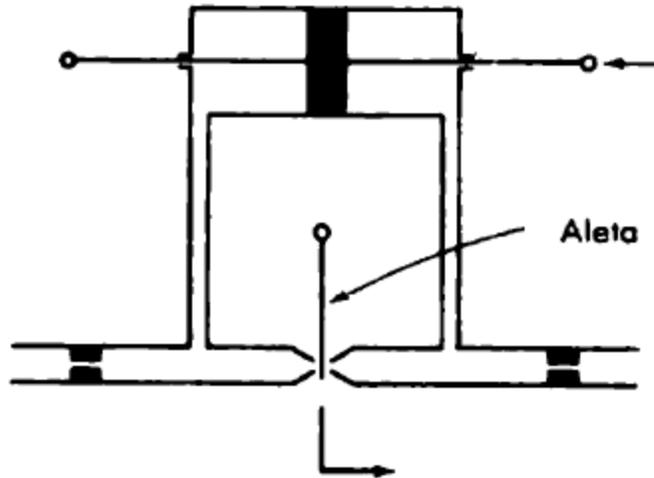


Figura 1.35 Válvula de aleta conectada a un cilindro de potencia

Estos dispositivos se usan frecuentemente en servos hidráulicos como válvula de primera etapa en servoválvulas de dos etapas. Esto es así porque puede necesitarse de una fuerza considerable para la carrera de las grandes válvulas de carretes que resulta de la fuerza que fluye en estado permanente. Para reducir o compensar esta fuerza a menudo se emplea una configuración de válvula de dos etapas; se usa una válvula de aleta en la primera etapa para proporcionar la fuerza necesaria para la carrera de la segunda válvula de carrete.

1.10.8. Válvulas de tubo de inyección

La figura 1.36 muestra una válvula de tubo de inyección conectada a un cilindro de potencia. El fluido hidráulico se introduce por el tubo de inyección. Si el tubo de inyección es cambiado hacia la derecha desde su posición neutral, el pistón de potencia se mueve hacia la izquierda y viceversa. La válvula de tubo de inyección no se usa tanto como la válvula de aleta debido al flujo nulo, respuesta más lenta y características más bien imprescindibles. Su principal ventaja está en su insensibilidad a los flujos sucios.

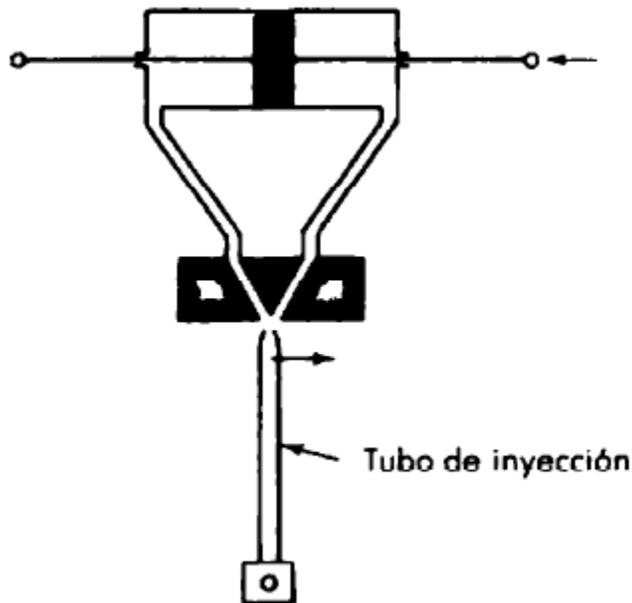


Figura 1.36 Válvula de tubo de inyección conectada a un cilindro de potencia

1.10.9. Válvula de movimiento vertical

Básicamente, las *válvulas de movimiento vertical* son válvulas de dos vías. Las válvulas de movimiento vertical típicas se encuentran en las válvulas de retención y en las válvulas de alivio, donde no se necesita invertir la dirección del flujo.

La válvula de retención es una válvula direccional de una vía en el sentido de que permite el flujo en una dirección y lo evita en la otra.

El propósito de la válvula de alivio es el de proporcionar protección contra la sobrecarga en las componentes de los circuitos o limitar la fuerza que pueda ejercer un actuador. Tales válvulas se necesitan en casi todos los circuitos hidráulicos con el objeto de controlar la presión. La figura 1.37 muestra una válvula de alivio simple en la cual un puerto está conectado a la línea de presión y otro al depósito. La fuerza del resorte mantiene a la válvula sobre su asiento. El tornillo de ajuste controla la presión de operación.

La válvula de alivio opera como sigue. Cuando la presión a la entrada excede la fuerza del resorte, se fuerza a la válvula a dejar su asiento y el fluido fluye de la línea de presión a través de la válvula de depósito. Cuando la presión cae por debajo de la fuerza del resorte, la válvula recupera su asiento y el flujo se detiene. La presión a la cual la válvula se fuerza primero a dejar su asiento y comienza a pasar fluido se llama *presión de descarga*. A medida que el flujo a través de la válvula se incrementa, la válvula es empujada más lejos de su asiento y la presión del flujo pleno se hace más alta que la presión de descarga. Este fenómeno de incremento de presión en la línea a medida que el flujo a través de la válvula de alivio se incrementa se llama *supresión de la presión*.

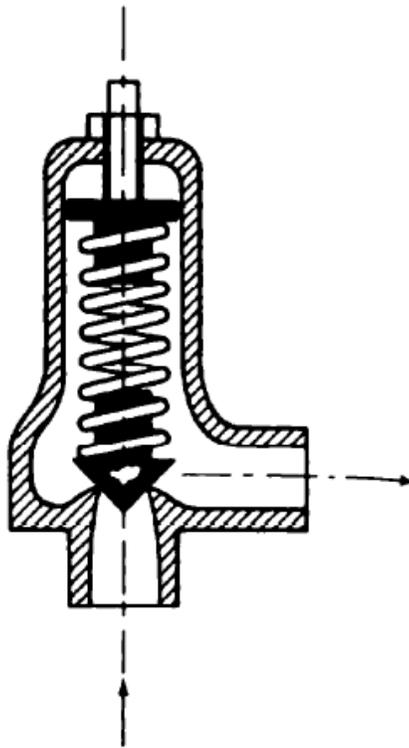


Figura 1.37 Válvula de alivio

[2]

1.11. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA HIDRÁULICO

1.11.1. Ecuación generalizada de la continuidad de flujo

Consideremos un fluido de volumen teniendo un caudal de entrada de masa m_i y un caudal de salida de masa m_o como se muestra en la figura 1.38.

La variación del flujo de masa se da:

$$\rho_i Q_i - \rho_o Q_o = \frac{d}{dt}(\rho V) \quad (1.13)$$

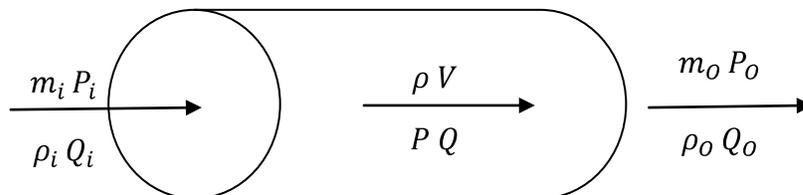


Figura 1.38 Flujo de volumen generalizado

Donde Q_i es el caudal de entrada y Q_o es el caudal de salida. Se asume que ρ es igual a la entrada y a la salida entonces de la ecuación (1.13) tenemos que:

$$Q_i - Q_o = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (1.14)$$

La ecuación de estado es luego requerida para cambiar la ecuación (1.14) a una forma más útil. Esta ecuación de estado incorpora la característica densidad/volumen en una definición simplificada del modulo de Bulk (ecuación (1.15)):

$$\beta = -V \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (1.15)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dP}{\beta_e} \quad (1.16)$$

Donde P es la presión y β_e el modulo de Bulk efectivo del fluido y de su contenedor. La combinación de las ecuaciones (1.14) y (1.16) resulta:

$$Q_i - Q_o = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\beta_e} \frac{dP}{dt} \quad (1.17)$$

La ecuación (1.17) es la ecuación de la continuidad del flujo requerida para el análisis de sistemas y se nota la diferencia entre los caudales de entrada y salida, obtenida de la teoría en estado estacionario, contiene dos componentes:

(A) Terminio del límite de deformación $\frac{dV}{dt}$

(B) Terminio de compresibilidad del fluido $\frac{V}{\beta_e} \frac{dP}{dt}$

Esta ecuación de la continuidad del flujo siempre será definida asumiendo ese límite de deformación por medio del pistón o del movimiento del cilindro, a diferencia de la deformación de la pared debido a los efectos de la presión que se asume que se deben contener en la definición del módulo efectivo de Bulk β_e .

1.11.2. Ecuación generalizada del momento

Aplicando la segunda Ley de Newton de movimiento, el volumen del fluido da:

Fuera aplicada - \sum *pérdidas mecánicas* = *masa* \times *aceleración*

$$(P_i A_i - P_o A_o) - \sum F_i = M \frac{du}{dt} \quad (1.18)$$

Donde A_i es el área transversal de entrada, A_o es el área transversal de salida. M es la masa del volumen de referencia y u es la velocidad promedio. La aplicación

de la ecuación (1.18) depende del componente que se considera, y ejemplos específicos que tienen que ser modelados.

1.11.3. Aplicación de la teoría de circuitos fluidos a una trayectoria

Si el volumen de referencia particular es un tubo circular de área transversal uniforme se deduce de la ecuación de continuidad de flujo que:

$$Q_i - Q_o = \frac{V}{\beta_e} \frac{dP}{dt} \quad (1.19)$$

Donde $V = a l$, $a = \frac{\pi d^2}{4}$

d es el diámetro interno del tubo y l su longitud. La ecuación de momento (1.19) queda:

$$(P_i - P_o)a - \sum F_i = \rho l \frac{dQ}{dt} \quad (1.20)$$

Las pérdidas mecánicas $\sum F_i$ se suponen que son por completo debido a los efectos de la viscosidad del fluido que crean una caída de presión ΔP expresada por la ecuación D'Arcy:

$$\sum F_i = \Delta P a$$

Donde $\Delta P = 4f \left(\frac{l}{d}\right) \frac{\rho u^2}{2}$ (1.21)

Para un tubo hidráulico liso es un fenómeno ya que el coeficiente de fricción Δf puede ser expresada en una de dos maneras dependiendo de si el flujo en el tubo laminar completamente desarrollado o es un flujo turbulento. Resulta experimentalmente que:

(A) Para un flujo laminar $4f = \frac{64}{Re}$

(B) Para un flujo turbulento $4f = \frac{0.316}{Re^{1/4}}$ (1.22)

Donde $Re = \frac{\rho u d}{\mu}$

La ecuación de caída de presión (1.21) entonces se puede escribir:

(A) Para un flujo laminar $\Delta P = KQ$ donde $K = K_1$ (1.23)

(B) Para un flujo turbulento $\Delta P = KQ^{1.75}$ donde $K = K_1$ (1.24)

ara un flujo laminar es fácil demostrar que:

$$K_1 = \frac{128\mu l}{\pi d^4} = R \quad (1.25)$$

Donde la ecuación (1.25) se requiere a menudo como la línea de resistencia, R ya que la caída de presión es proporcional al caudal Q . Tenga en cuenta que el signo de la caída de presión es atendido de forma automática por el signo del caudal Q .

Esto no es así para el flujo turbulento, y una solución a esto es escribir la fórmula (1.24) en la forma siguiente:

$$\Delta P = K_1 |Q|^{0.75} \cdot Q \quad (1.26)$$

A menudo una aproximación de la ecuación (1.26) se utiliza para simplificar el análisis en el computador de la siguiente manera:

$$\Delta P = K_1 |Q|Q \quad (1.27)$$

La ecuación general de momento (1.20) se convierte en:

$$(A) \text{ Para flujo laminar } (P_i - P_o) = RQ + \frac{\rho l}{a} \frac{dQ}{dt} \quad (1.28)$$

$$(B) \text{ Para flujo turbulento } (P_i - P_o) = K_1 |Q|^{0.75} \cdot Q + \frac{\rho l}{a} \frac{dQ}{dt} \quad (1.29)$$

Se observa que la parte derecha de la ecuación de la continuidad de flujo (1.19) no se especifican P_i o P_o , y al lado derecho de la ecuación de momento (1.28) o (1.29) no se especifican Q_i o Q_o . Este es uno de los problemas en la aplicación de la teoría fluidos a una trayectoria y hay muchas formas posibles de definir plenamente la ecuación adecuada. Para trayectorias muy largas este proceso de agrupamiento puede provocar errores si un procedimiento se utiliza modelos de computadora. Entonces puede ser necesario adoptar un enfoque más riguroso y exacto conocido como parámetros de análisis distribuido.

1.11.4. Cilindros

Considere el actuador asimétrico que se muestra en la figura (1.39). Aplicando la ecuación generalizada de la continuidad de flujo (1.17) da:

(A) Avance

$$Q_a - 0 = \frac{dV_a}{dt} + \frac{V_a}{\beta_e} \frac{dP_a}{dt}$$

$$0 - Q_b = \frac{dV_b}{dt} + \frac{V_b}{\beta_e} \frac{dP_b}{dt}$$

Simplificando resulta:

(B) Retroceso

$$Q_b - 0 = \frac{dV_b}{dt} + \frac{V_b}{\beta_e} \frac{dP_b}{dt}$$

$$0 - Q_a = \frac{dV_a}{dt} + \frac{V_a}{\beta_e} \frac{dP_a}{dt} \quad (1.30)$$

$$Q_a = A_1 U + \frac{V_a}{\beta_e} \frac{dP_a}{dt} \qquad Q_b = A_2 U + \frac{V_b}{\beta_e} \frac{dP_b}{dt} \qquad (1.31)$$

$$Q_b = A_2 U - \frac{V_b}{\beta_e} \frac{dP_b}{dt} \qquad Q_a = A_1 U - \frac{V_a}{\beta_e} \frac{dP_a}{dt}$$

Sin embargo, si se adopta una notación de tal manera que el flujo en la lado 1 y fuera del lado 2 se denomina positivo, y la velocidad de avance se denomina positiva, entonces un par de ecuaciones se pueden utilizar para definir tanto el avance como el retroceso de los casos a continuación:

$$Q_a = A_1 u + \frac{V_a}{\beta_e} \frac{dP_a}{dt} \qquad (1.32)$$

$$Q_b = A_2 u - \frac{V_b}{\beta_e} \frac{dP_b}{dt}$$

Dinámicamente ambos volúmenes V_1 y V_2 varían con el movimiento del pistón, aunque la variación del volumen promedio suelen ser olvidadas, sobre todo cuando se determinación el comportamiento transitorio en un punto particular de la carrera. En esta situación los transitorios importantes han decaído por lo general antes de que el volumen promedio en cada lado haya cambiado de manera significativa. Tenga en cuenta que hay dos términos de capacitancia, $C_a = V_a/\beta_e$ y $C_b = V_b/\beta_e$.

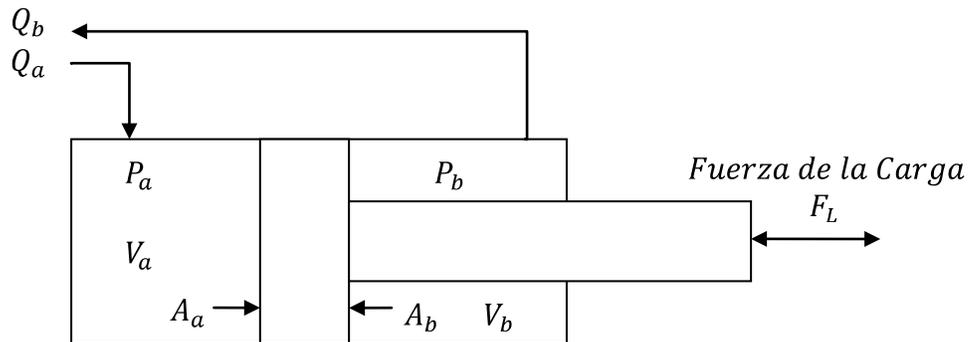


Figura 1.39 Actuador Lineal Asimétrico

Considere la siguiente ecuación generalizada de momento:

$$P_a A_1 - P_b A_2 = F_L + M \frac{du}{dt} \qquad (1.33)$$

La ecuación 1.33 puede ser modificada para dar así:

$$P_a \gamma - P_b = F_L + \frac{M}{A_1 A_2} \frac{d(u A_2)}{dt} \quad (1.34)$$

Donde $\gamma = A_1/A_2$, es la relación de las áreas y $P_L = F_L/A_2$

La carga inductiva $L_m = M/A_1 A_2$ es un parámetro útil porque puede ser comparado con la inductancia del fluido en la trayectoria $L = \rho l/a$ para deducir que componente es el que predomina. También es importante tener en cuenta que la trayectoria y las inductancias de carga sólo se pueden añadir en el más simple de los circuitos. En general la interacción de los elementos del circuito típico significa que todos los componentes del circuito tienen que ser modelados de forma individual y luego vinculados mediante procedimientos matemáticos. El actuador debe estar vinculado a un resorte con una rigidez $k [N/m]$, luego se debe adicionar el término ky , donde y es el desplazamiento del actuador. Lo que se deduce de la ecuación 1.34, es que un resorte puede ser representado como una capacitancia en serie $C_k = A_2^2/k$.

[7]

2. ROBOTICA

2.1. ORIGEN Y DESARROLLO DE LA ROBOTICA

El robot como máquina lleva un desarrollo independiente del término robot. Tras los primeros autómatas todos de aspecto humano, los progenitores más directos de los robots fueron los telemanipuladores (Fig. 2.1). En 1948 R.C. Goertz del Argonne National Laboratory desarrolló, con el objetivo de manipular elementos radioactivos sin riesgo para el operador, el primer telemanipulador. Este consistía en un dispositivo mecánico maestro-esclavo. El manipulador maestro, situado en la zona segura, era movido directamente por el operador, mientras que el esclavo situado en contacto con los elementos radioactivos y unido mecánicamente al maestro, reproducía fielmente los movimientos de este. El operador además de poder observar a través de un grueso cristal el resultado de sus acciones, sentía a través del dispositivo maestro, las fuerzas que el esclavo ejercía sobre el entorno.

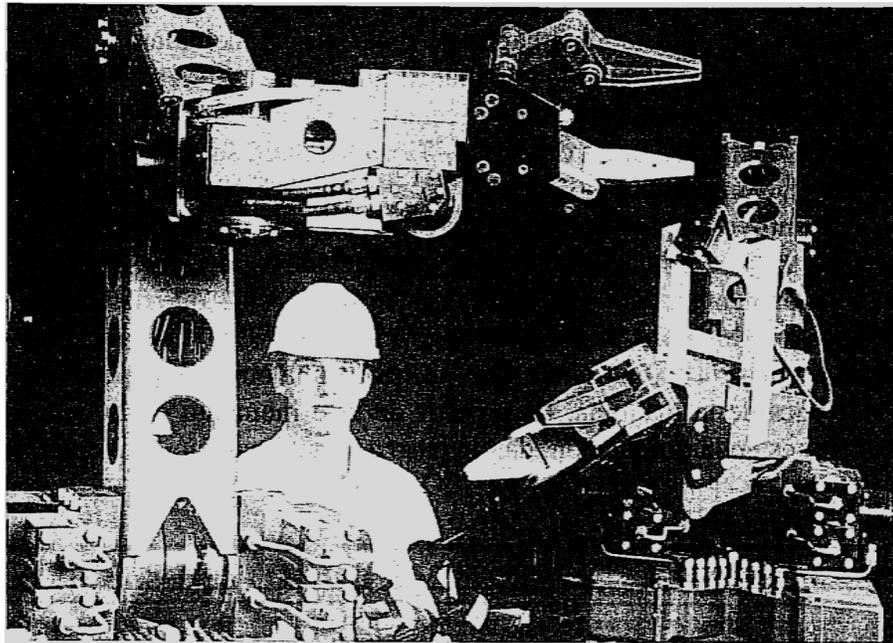


Figura 2.1 Sistema de telemanipulación bilateral

Años más tarde, en 1954, Goertz hizo uso de la tecnología electrónica y del servocontrol sustituyendo la transmisión mecánica por otra eléctrica y desarrollando así el primer telemanipulador con servocontrol bilateral. Otro de los

pioneros de la telemanipulación fue Ralph Mosher, ingeniero de la General Electric que en 1958 desarrolló un dispositivo denominado Handy-man, consiste en 2 brazos mecánicos teleoperados mediante un maestro del tipo del tipo denominado exoesqueleto. Junto a la industria a la industria nuclear, a lo largo de los años sesenta la industria submarina comenzó a interesarse por el uso de los telemanipuladores. A este interés se sumó la industria espacial en los años setenta.

La evolución de los telemanipuladores a lo largo de los últimos años no ha sido tan espectacular como la de los robots. Recluidos en un mercado selecto y limitado (industria nuclear, militar, espacial, etc.) son en general desconocidos y comparativamente poco atendidos por los investigadores y usuarios de robots. Por su propia concepción, un telemanipulador precisa del mando continuo de un operador, y salvo por las aportaciones incorporadas con el concepto del control supervisado y la mejora de la telepresencia promovida hoy en día por la realidad virtual, sus capacidades no han variado mucho respecto a las de sus orígenes.

La sustitución del operador por un programa de ordenador que controlase los movimientos del manipulador dio paso al concepto de robot.

La primera patente de un dispositivo robótico fue solicitada en marzo de 1954 por el inventor británico C.W. Kenward. Dicha patente fue emitida en el Reino Unido en 1957 con el número 781465. Sin embargo, fue George C. Devol, ingeniero norteamericano, inventor y autor de varias patentes, el que estableció las bases del robot industrial moderno. En 1954 Devol concibió la idea de un dispositivo de *transferencia de artículos programada* que se patentó en Estados Unidos en 1961 con el número 2988237. En 1956 pone esta idea en conocimiento de Joseph F. Engelberger (1952-), ávido lector de Asimov y director de ingeniería de la división aeroespacial de la empresa Manning Maxwell y Moore en Stamford, Connecticut. Juntos, Devol y Engelberger comienzan a trabajar en la utilización industrial de sus máquinas, fundando la Consolidated Controls Corporation, que más tarde se convierte en Unimation (Universal Automation), e instalando su primera máquina Unimate (1960) similar a la de la Figura 2.2 en la fábrica de General Motors de Trenton, Nueva Jersey, en una aplicación de fundición por inyección. Otras grandes empresas, como la AMF, emprendieron la construcción de máquinas similares (Versatran, 1963), que más tarde por motivos comerciales se denominaron con el término robot procedente de la ciencia ficción y a pesar de no contar con la apariencia humana de aquellos.

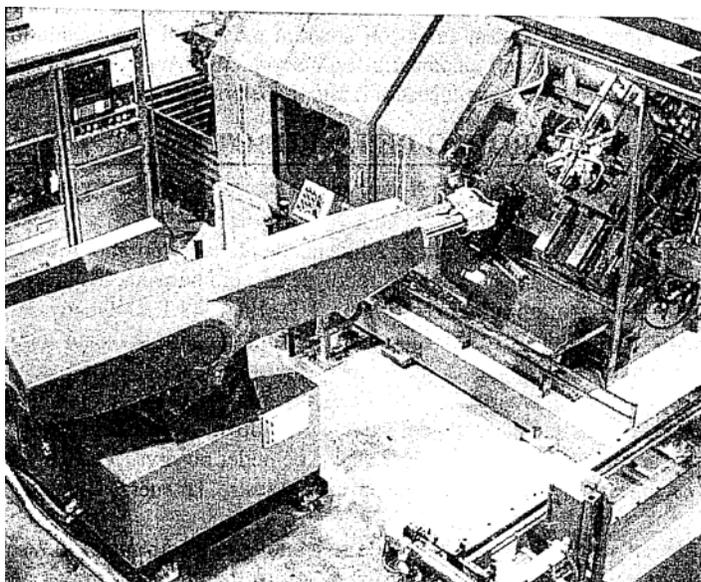


Figura 2.2 Robot Unimate 2000. Uno de los primeros modelos comerciales de Unimation

En 1968 J.F. Engelberger visitó a Japón y poco más tarde se firmaron acuerdos con Kawasaki para la construcción de robots tipo Unimate. El crecimiento de la robótica en Japón aventajó en breve a los Estados Unidos gracias a Nissan, que formó la primera asociación robótica del mundo, la *Asociación de Robótica Industrial de Japón* (JIRA) en 1972. Dos años más tarde se formó el *Instituto de Robótica de América* (RIA), que en 1984 cambió su nombre por el de *Asociación de Industrias Robóticas*, manteniendo las mismas siglas (RIA). Por su parte Europa tuvo un despertar más tardío. En 1973 la firma sueca ASEA construyó el primer robot con accionamiento totalmente eléctrico, el robot IRb6 (Fig. 2.3), seguido un año más tarde del IRb60. En 1980 se fundó la *Federación Internacional de Robótica* con sede en Estocolmo, Suecia.

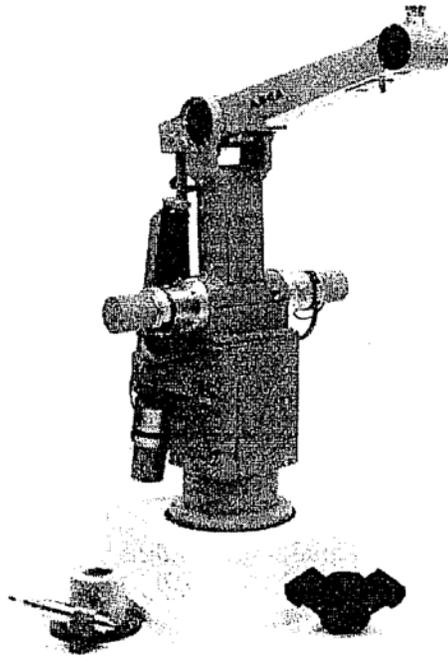


Figura 2.3 Robot IRb6 de la firma sueca ASEA.

La configuración de los primeros robots respondía a las denominadas configuraciones esférica y antropomórfica, de uso especialmente válido para la manipulación. En 1982, el profesor Makino de la Universidad Yamanashi de Japón, desarrolla en concepto el robot SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) que busca un robot con un número reducido de grados de libertad (3 o 4), un coste limitado y una configuración orientada al ensamblado de piezas.

La evolución de los robots industriales desde sus primeros balbuceos ha sido vertiginosa. En poco más de 30 años las investigaciones y desarrollos sobre robótica industrial han permitido que los robots tomen posiciones en casi todas las áreas productivas y tipos de industrias. En pequeñas o grandes fábricas, los robots pueden sustituir al hombre en aquellas tareas repetitivas y hostiles.

Los futuros desarrollos de la robótica apuntan a aumentar su movilidad, destreza y autonomía de sus acciones. La mayor parte de los robots actuales son con base estática, y se utilizan en aplicaciones industriales tales como ensamblado, soldadura, alimentación de máquinas herramientas, etc. Sin embargo, existen otro tipo de aplicaciones que han hecho evolucionar en gran medida tanto la concepción de los robots como su propia morfología. Entre estos robots dedicados a aplicaciones no industriales destacan los robots espaciales (brazos para lanzamiento y recuperación de satélites, vehículos de exploración lunar, robots para construcción y mantenimiento de hardware en el espacio); robots para aplicaciones submarinas y subterráneas (exploración submarina, instalación y mantenimiento de cables telefónicos submarinos, limpieza e inspección de tuberías y drenajes subterráneos, inspección de sistemas de refrigeración de centrales nucleares); robots militares (desactivación de bombas, robots centinelas

experimentales dedicados a patrullar áreas críticas); robots móviles industriales (robots bomberos para patrullar fábricas, robots bibliotecarios, robots andantes con piernas); aplicaciones médicas (prótesis robotizadas, sistemas de ayuda a discapacitados); aplicaciones agrícolas (sembrado y recogida de cosechas, robot para esquilar ovejas); y un largo etcétera. Parece como si la robótica y los telemanipuladores, volviendo los ojos hacia sus orígenes, y con la experiencia acumulada tras 30 años, reemprendiesen, esta vez juntos, el camino que un día tomaron de manera divergente.

Puede que en un futuro los robots industriales se parezcan a aquellos robots de las novelas de Asimov, Capek o Harbou, que dieron nombres a los actuales herederos del Unimate.

2.2. MORFOLOGÍA DEL ROBOT

Un robot está formado por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales.

Aquí examinaremos estos elementos constitutivos de un robot. Se estudia primero la estructura mecánica, haciendo referencia a los distintos tipos de articulaciones posibles entre dos eslabones consecutivos y a las configuraciones existentes. Seguidamente se analizan los sistemas de transmisión y reducción necesarios para transmitir a cada una de las articulaciones el movimiento generado por los actuadores, que como elementos con capacidad para desplazar la estructura mecánica, son examinados en el siguiente apartado.

Se repasan después los denominados sensores internos, necesarios para el control de los movimientos del robot. Finalmente, el último apartado se ocupa de los elementos terminales (pinzas, herramientas, dispositivos de sujeción, etc.), que situados generalmente en el extremo del robot, sirven para que este pueda interactuar con el mundo exterior realizando las operaciones que le han sido asignadas.

Aunque los elementos empleados en los robots no son exclusivos de estos (maquinas herramientas y otras muchas otras maquinas emplean tecnologías semejantes), las altas prestaciones que se exigen a los robots han motivado que en ellos se empleen elementos con características específicas.

La figura 2.4 muestra la estructura mecánica de un robot, sobre la que se ha indicado alguno de los elementos que se van a estudiar en este capítulo, examinando las necesidades particulares de cada uno y comparando las diversas alternativas existentes. Se señalarán además cuales son las tendencias actuales y los desarrollos que se prevén para el futuro.

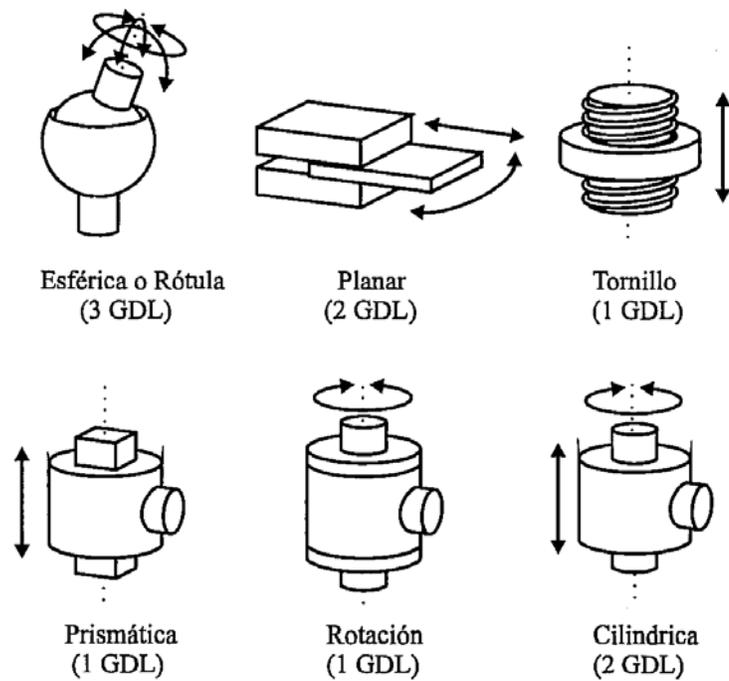


Figura 2.5 Distintos tipos de articulaciones para robots

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina **Grado De Libertad (GDL)**. En la figura 2.5 se indica el número de GDL de cada tipo de articulación. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen. Puesto que, como se ha indicado, las articulaciones empleadas son únicamente las de rotación y prismática con un solo GDL cada una, el número de GDL del robot suele coincidir con el número de articulaciones de que se compone.

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Las combinaciones más frecuentes son las representadas en la figura 2.6 donde se atiende únicamente a las tres primeras articulaciones del robot, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto del espacio.

En la figura 2.7 se muestran los seis GDL con que está dotado el robot ARC Mate 120/S-12 de Fanuc, así como sus articulaciones y eslabones.

En la práctica, a pesar de ser necesarios los seis GDL comentados para tener total libertad en el posicionado y orientación del extremo del robot, muchos robots industriales cuentan con solo cuatro o cinco GDL, por ser estos suficientes para llevar a cabo las tareas que se les encomiendan.

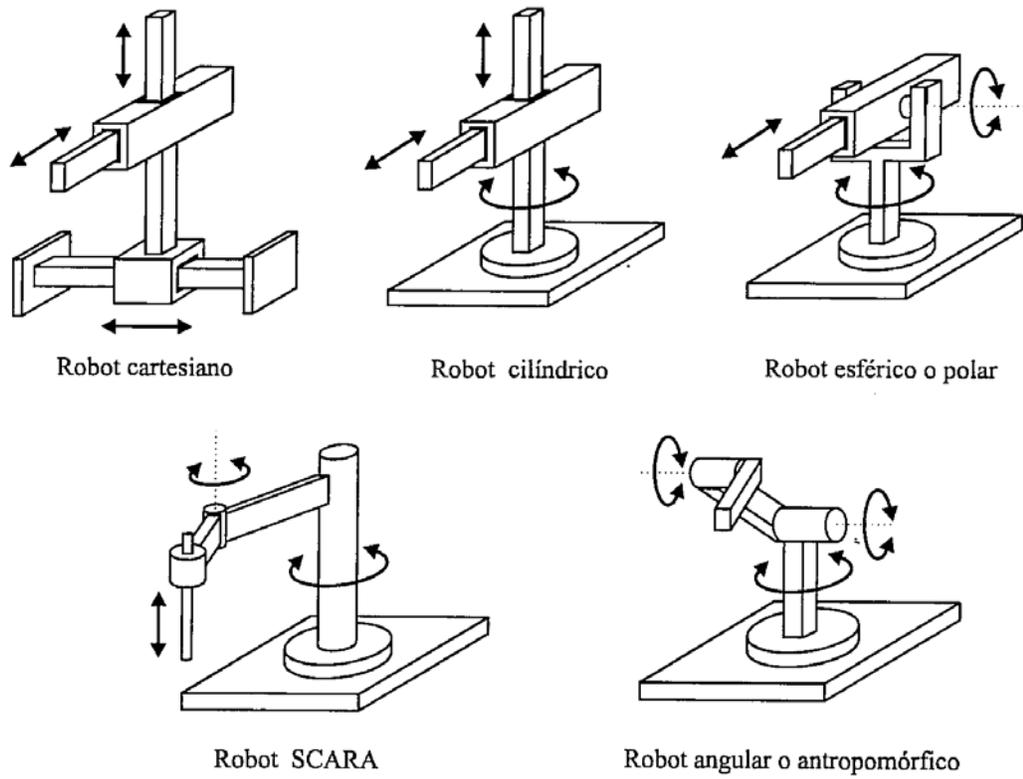


Figura 2.6 Configuraciones más frecuentes en robots industriales

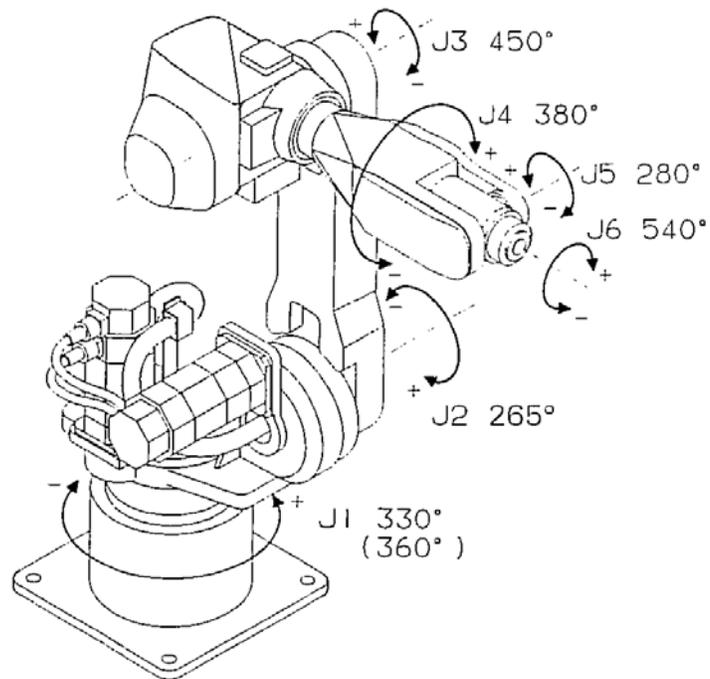


Figura 2.7 Grados de libertad del robot ARC Mate 120/S-12 (Cortesía de FANUC)

Existen también casos opuestos, en los que se precisan más de seis GDL para que el robot pueda tener acceso a todos los puntos de su entorno.

Así, si se trabaja en un entorno con obstáculos, el dotar al robot de grados de libertad adicionales le permitirá acceder a posiciones y orientaciones de su extremo a las que, como consecuencia de los obstáculos, no hubiera llegado con seis GDL. Otra situación frecuente es la dotar al robot de un GDL adicional que le permitirá desplazarse a lo largo de un carril, aumentando así el volumen del espacio al que puede acceder.

Cuando el número de grados de libertad del robot es mayor que los necesarios para realizar una determinada tarea se dice que el robot es redundante.

La figura 2.8 representa las dos situaciones comentadas para el caso de robots planares a los que les bastaría con 2 GDL para posicionar su extremo en cualquier punto del plano.

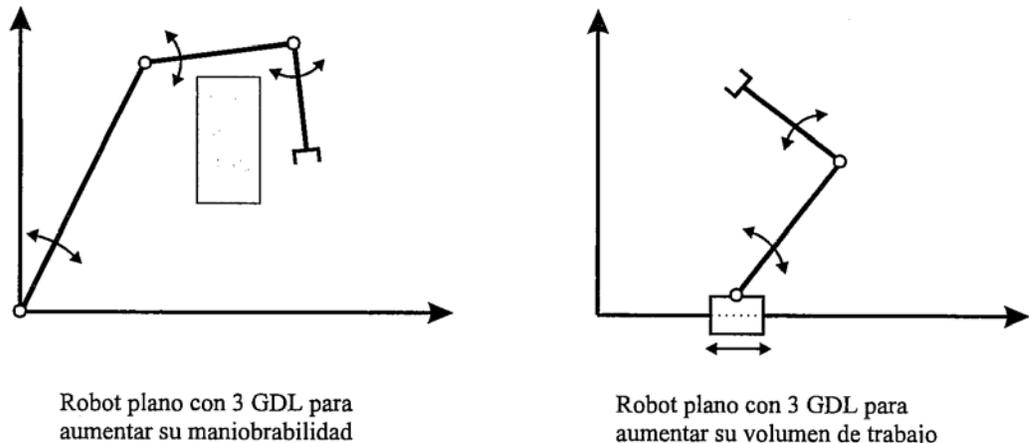


Figura 2.8 Robots planares redundantes.

2.2.2. Transmisiones y reductores

Las transmisiones son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Se incluirán junto con las transmisiones a los reductores, encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.

2.2.2.1. Transmisiones

Dado que un robot mueve su extremo con aceleraciones elevadas, es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia. Del mismo modo, los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen directamente de la distancia de las masas del actuador. Por estos motivos se procura que los actuadores, por

lo general pesados, estén lo más cerca posible de la base del robot. Esta circunstancia obliga a utilizar sistema de transmisión que traslade el movimiento hasta las articulaciones, especialmente en las situadas en el extremo del robot. Asimismo, las transmisiones pueden ser utilizadas para convertir movimiento circular en lineal o viceversa, lo que en ocasiones puede ser necesario.

Existen actualmente en el mercado robots industriales con acoplamiento directo entre accionamiento y articulación, ventajosos, tal y como se detalla más adelante, en numerosas ocasiones. Se trata, sin embargo, de casos particulares dentro de la generalidad que en los robots industriales actuales supone la existencia de sistemas de transmisión junto con reductores para el acoplamiento entre actuadores y articulaciones.

Es de esperar que un buen sistema de transmisión cumpla una serie de características básicas: debe tener un peso y un tamaño reducido, se ha de evitar que presente juegos u holguras considerables y se deben buscar transmisiones con gran rendimiento.

Aunque no existe un sistema de transmisión específico para robots, si existen algunos usados con mayor frecuencia y que se recogen clasificados en la Tabla 2.1. La clasificación se ha realizado en base al tipo de movimiento posible en la entrada y la salida: lineal o circular. En la citada tabla también quedan reflejadas algunas ventajas e inconvenientes propios de algunos sistemas de transmisión. Entre ellas cabe destacar la holgura o juego. Es muy importante que el sistema de transmisión a utilizar no afecte al movimiento que transmite, ya sea por el rozamiento inherente a su funcionamiento o por las holguras que su desgaste pueda introducir. También hay que tener en cuenta que el sistema de transmisión sea capaz de soportar un funcionamiento continuo a un par elevado, y a ser posible entre grandes distancias.

Tabla 2.1 Sistemas de transmisión para robots

Entrada - Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	-
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro Limitado
Circular-Lineal	Cable	-	Deformabilidad
	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
Lineal-Circular	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
	Paral. Articulado	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Las transmisiones más habituales son aquellas que cuentan con movimiento circular tanto a la entrada como a la salida. Incluidas en estas se hallan los engranajes, las correas dentadas y las cadenas. La figura 2.9 muestra un brazo articulado de un telemanipulador junto con los engranajes de transmisión que transmiten el par de los motores situados en su base a los eslabones.

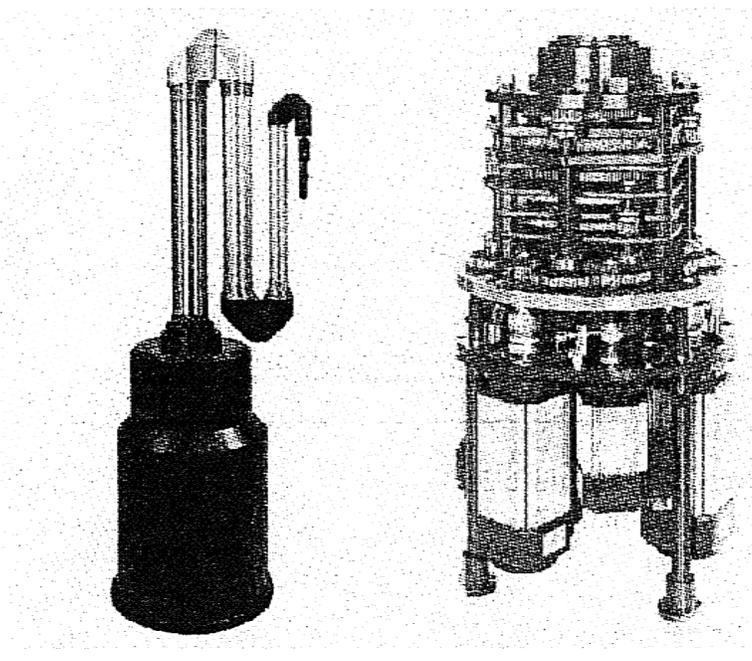


Figura 2.9 Telemanipulador TELBOT junto con la caja de transmisión por engranajes situada en su base. (Cortesía de Wälischmiller GmbH.)

2.2.2.2. Reductores

En cuanto a los reductores, al contrario que con las transmisiones, si que existen determinados sistemas usados de manera preferente en los robots industriales. Esto se debe a que los reductores utilizados en robótica se les exigen unas condiciones de funcionamiento muy restrictivas. La exigencia de estas características viene motivada por las altas prestaciones que se le piden al robot en cuanto a precisión y velocidad de posicionamiento. La tabla 2.2 muestra los valores típicos de los reductores para robótica actualmente empleados.

Se buscan reductores de bajo peso, reducido tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso. Se tiende también a minimizar su momento de inercia, de negativa influencia en el funcionamiento del motor, especialmente crítico en el caso de motores de baja inercia.

Los reductores, por motivos de diseño, tienen una velocidad máxima de entrada admisible, que como regla general aumenta a medida que disminuye el tamaño del

motor. También existe una limitación en cuanto al par de salida nominal permisible (T_2) que depende del par de entrada (T_1) y de la relación de transmisión a través de la relación:

$$T_2 = \eta T_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2.1)$$

Donde el rendimiento (η) puede llegar a ser cerca del 100% y la relación de reducción de velocidades

($\omega_1 = \text{velocidad de entrada}$; $\omega_2 = \text{velocidad de salida}$) varía entre 50 y 300.

Tabla 2.2. Características de reductores para robótica

Características	Valores típicos
Relación de reducción	50 ÷ 300
Peso y tamaño	0.1 ÷ 30kg
Momento de inercia	10^{-4} kg m^2
Velocidades de entrada máxima	6000 ÷ 7000 rpm
Par de salida nominal	5700 Nm
Par de salida máximo	7900 Nm
Juego angular	0 ÷ 2"
Rigidez torsional	100 ÷ 2000 Nm/rad
Rendimiento	85% ÷ 98%

Puesto que los robots trabajan en ciclos cortos que implican continuos arranques y paradas, es de gran importancia que el reductor sea capaz de soportar pares elevados puntuales. También se busca que el juego angular o *backlash* sea lo menor posible. Este se define como el ángulo que gira el eje de salida cuando se cambia su sentido de giro sin que llegue a girar el eje de entrada. Por último, es importante que los reductores para robótica posean una alta rigidez torsional, definida como el par que hay que aplicar sobre el eje de salida para que, manteniendo bloqueado el de entrada, aquel gire un ángulo unitario.

2.2.2.3. Accionamiento directo

Como se ha indicado anteriormente, desde hace unos años existen en el mercado robots que poseen lo que se ha dado en llamar **accionamiento directo** (*Direct Drive DD*), en el que el eje del actuador se conecta directamente a la carga o articulación, sin la utilización de un reductor intermedio. Este término suele utilizarse exclusivamente para robots con accionamiento eléctrico.

Este tipo de accionamiento aparece a raíz de la necesidad de utilizar robots en aplicaciones que exigen combinar gran precisión con alta velocidad. Los

reductores introducen una serie de efectos negativos, como son juego angular, rozamiento o disminución de la rigidez del accionador, que pueden impedir alcanzar los valores de precisión y velocidad requeridos.

Las principales ventajas que se derivan de la utilización de accionamientos directos son las siguientes:

- Posicionamiento rápido y preciso, pues se evitan los rozamientos y juegos de las transmisiones y reductores.
- Aumento de las posibilidades de controlabilidad del sistema a costa de una mayor complejidad.
- Simplificación del sistema mecánico al eliminarse el reductor.

El principal problema que existe para la aplicación práctica de un accionamiento directo radica en el motor a emplear. Debe tratarse de motores que proporcionen un par elevado (unas 50-100 veces mayor que el reductor) a bajas revoluciones (las del movimiento de la articulación) manteniendo la máxima rigidez posible.

Entre los motores empleados para accionamiento directo y que cumplan estas características, se encuentran los motores síncronos y de continua sin escobillas (*brushless*), ambos con imanes permanentes fabricados con materiales especiales (samario-cobalto). También se utilizan motores de inducción de reluctancia variable. La necesaria utilización de este tipo de motores encarece notablemente el sistema de accionamiento.

Otra cuestión importante a tener en cuenta en el empleo de accionamientos directos es la propia cinemática del robot. Colocar motores, generalmente pesados, junto a las articulaciones, no es factible para todas las configuraciones del robot debido a las inercias que se generan. El estudio de la cinemática con la que se diseña el robot ha de tener en cuenta estos parámetros, estando la estructura final elegida altamente condicionada por ellos. Por este motivo, los robots de accionamiento directo son generalmente de tipo SCARA, cuyo diseño se corresponde bien con las necesidades que el accionamiento directo implica. Al eliminar el reductor también se disminuye de forma considerable la resolución real del codificador de posición acoplado al eje, tal y como se detalla en el epígrafe dedicado a los sensores internos. Esto lleva a la utilización en los DD de codificadores de posición de muy alta resolución.

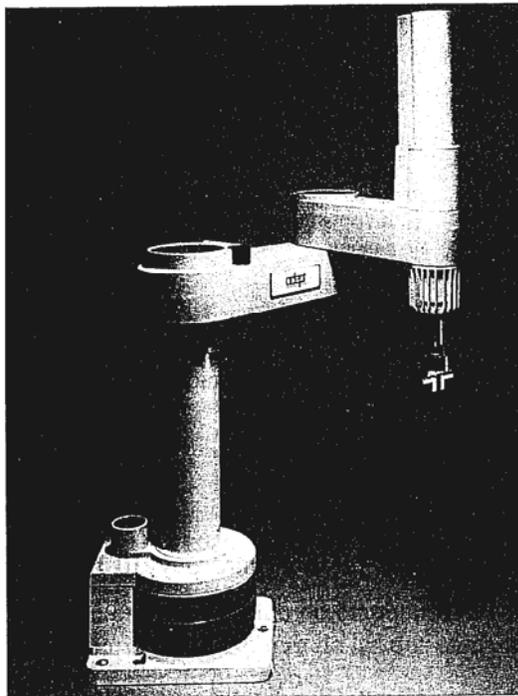


Figura 2.10. Robot AdeptThree de accionamiento directo. (Cortesía de Adept Technology)

2.2.3. Actuadores

Los actuadores tienen por misión generar el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la unidad de control. Los actuadores utilizados en robótica pueden emplear energía neumática, hidráulica o eléctrica. Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes, siendo preciso evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente. Las características a considerar son entre otras:

- Potencia.
- Controlabilidad.
- Peso y volumen.
- Precisión.
- Velocidad.
- Mantenimiento.
- Costo.

En este epígrafe se examinara el tipo de actuador que hemos elegido más conveniente, el actuador eléctrico.

2.2.3.1. Actuadores eléctricos

Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en los robots industriales actuales.

Dentro de los actuadores eléctricos pueden distinguirse tres tipos diferentes:

- Motores de corriente continua (DC):
 - Controlados por inducido.
 - Controlados por excitación.
- Motores de corriente alterna (AC):
 - Síncronos.
 - Asíncronos.
- Motores paso a paso.

2.2.3.1.1. Motores de corriente continua

Son los más usados en la actualidad debido a su facilidad de control. En la figura 2.11 se muestra un esquema de un motor DC seccionado, en el que se pueden apreciar sus distintos elementos. En este caso, el propio motor incluye un codificador de posición (encoder) para poder realizar su control.

Los motores DC están constituidos por dos devanados internos, inductor e inducido, que se alimentan con corriente continua:

- El inductor, también denominado devanado de excitación, está situado en el estator y crea un campo magnético de dirección fija, denominado excitación.
- El inducido, situado en el rotor, hace girar al mismo debido a la fuerza de Lorentz que aparece como combinación de la corriente circulante por él y del campo magnético de excitación. Recibe la corriente del exterior a través del colector de delgas, en el que se apoyan unas escobillas de grafito.

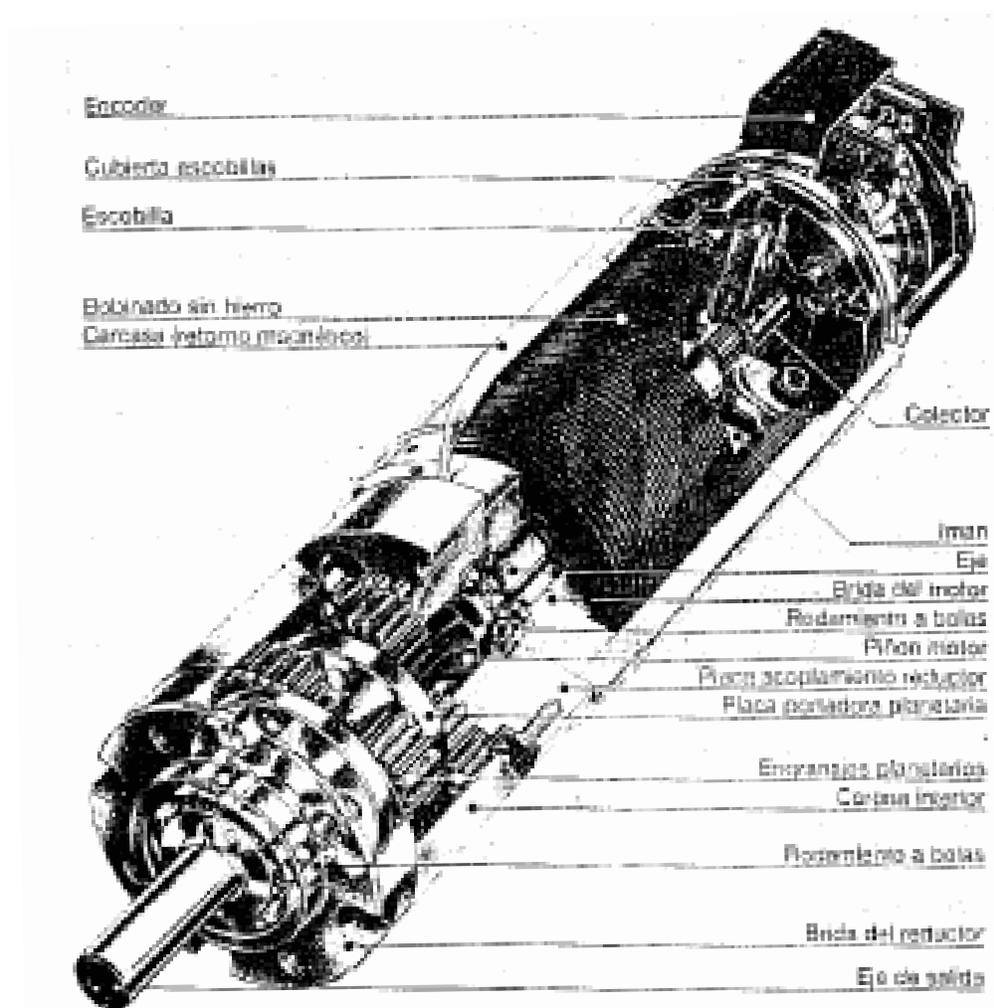


Figura 2.11 Esquema de motor DC seccionado con indicación de sus distintos componentes

Para que se pueda realizar la conversión de energía eléctrica en energía mecánica de forma continua es necesario que los campos magnéticos del estator y del rotor permanezcan estáticos entre sí. Esta transformación es máxima cuando ambos campos se encuentran en cuadratura. El colector de delgas es un conmutador sincronizado con el rotor encargado de que se mantenga el ángulo relativo entre el campo del estator y el creado por las corrientes rotóricas. De esta forma se consigue transformar automáticamente, en función de la velocidad de la maquina, la corriente continua que alimenta al motor en corriente alterna de frecuencia variable en el inducido. Este tipo de funcionamiento se conoce con el nombre de *autopilotado*.

Al aumentar la tensión del inducido aumenta la velocidad de la maquina. Si el motor está alimentado a tensión constante, se puede aumentar la velocidad disminuyendo el flujo de excitación. Pero cuanto más débil sea el flujo, menor será el par motor que se puede desarrollar para una intensidad de inducido constante.

En el caso de control por inducido, la intensidad del inductor se mantiene constante, mientras que la tensión del inducido se utiliza para controlar la velocidad de giro.

Del estudio de ambos tipos de motores, y realizándose las simplificaciones correspondientes, se obtiene que la relación entre tensión de control y velocidad de giro (función de transferencia), responde a un sistema de primer orden en los controlados por inducido, mientras que en el caso de los motores controlados por excitación, esta relación es la de un segundo orden (figura 2.12).

Además, en los motores controlados por inducido se produce un efecto estabilizador de la velocidad de giro originado por la realimentación intrínseca que posee a través de la fuerza contraelectromotriz. Por estos motivos, de los dos tipos de motores DC es el controlado por inducido el que se usa en el accionamiento de robots.

Para mejorar el comportamiento de este tipo de motores, el campo de excitación se genera mediante imanes permanentes, con lo que se evitan fluctuaciones del mismo. Estos imanes son de aleaciones especiales como samario-cobalto. Además, para disminuir la inercia que poseería un rotor bobinado, que es el inducido, se construye éste mediante una serie de espiras serigrafiadas en un disco plano (figura 2.13). En contrapartida, este tipo de rotor no posee apenas masa térmica lo que aumenta los problemas de calentamiento por sobrecarga.

Como se ha indicado, los motores DC son controlados mediante referencias de velocidad. Estas normalmente son seguidas mediante un bucle de realimentación de velocidad analógico que se cierra mediante una electrónica específica (accionador del motor). Sobre este bucle de velocidad se coloca otro de posición, en el que las referencias son generadas por la unidad de control (microprocesador) en base al error entre la posición deseada y la real.

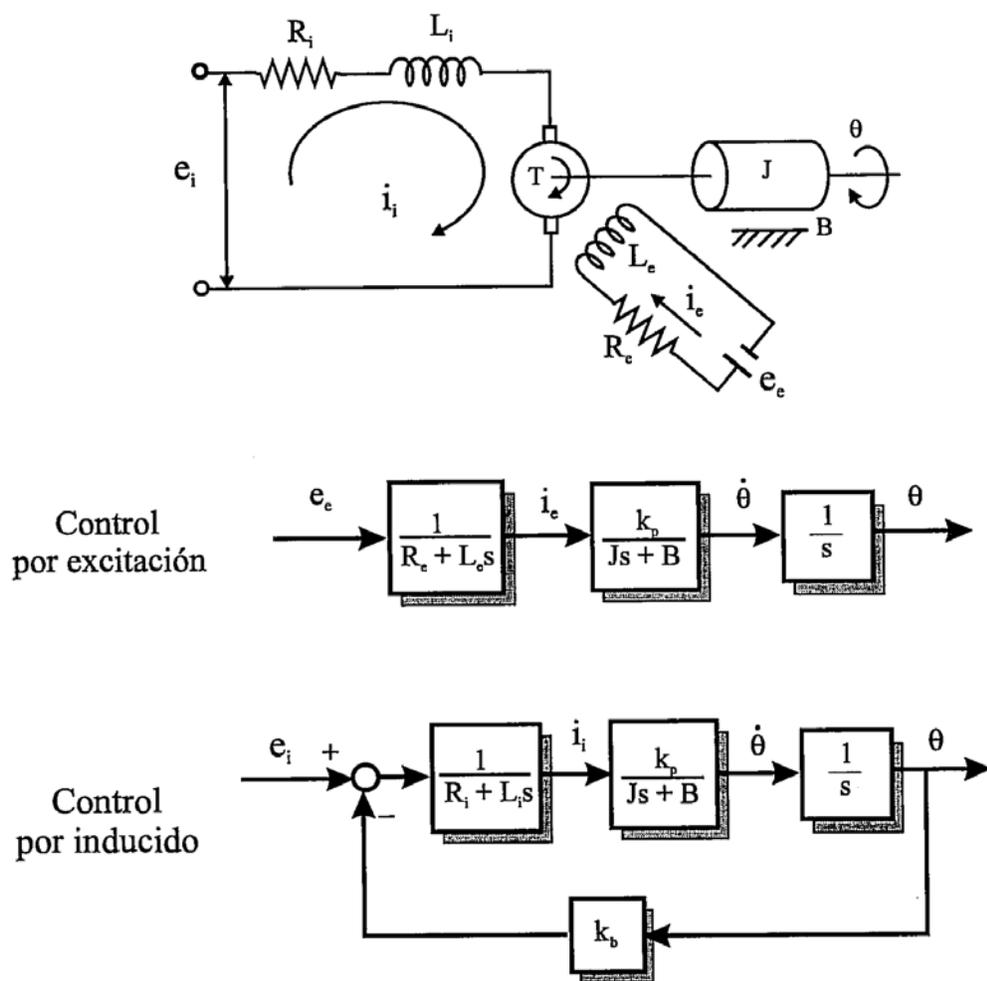


Figura 2.12 Motor DC. Esquema y funciones de transferencia.

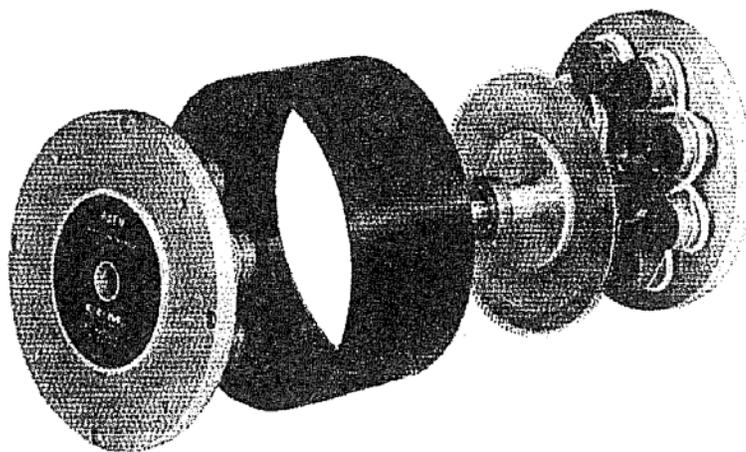


Figura 2.13 Motor DC de imanes permanentes controlado por inducido.

2.2.3.1.2. Motores paso a paso

Los motores paso a paso generalmente no han sido considerados dentro de los accionamientos industriales, debido principalmente a que los pares para los que estaban disponibles eran muy pequeños y los pasos entre las posiciones consecutivas eran grandes. Esto limitaba su aplicación a controles de posición simple. En los últimos años se han mejorado notablemente sus características técnicas, especialmente en lo relativo a su control, lo que ha permitido fabricar motores paso a paso capaces de desarrollar pares suficientes en pequeños pasos para su uso como accionamientos industriales.

Existen tres tipos de motores paso a paso:

- De imanes permanentes.
- De reluctancia variable.
- Híbridos.

En los primeros, de imanes permanentes (Figura 2.14), el rotor, que posee una polarización magnética constante, gira para orientar sus polos e acuerdo al campo magnético creado por las fases del estator. En los motores de reluctancia variable, el rotor está formado por un material ferromagnético que tiende a orientarse de modo que facilite el camino de las líneas de fuerza del campo magnético generado por las bobinas del estator. Los motores híbridos combinan el modo de funcionamiento de los dos tipos anteriores.

En los motores paso a paso la señal de control son trenes de pulsos que van actuando rotativamente sobre una serie de electroimanes dispuestos en el estator. Por cada pulso recibido, el rotor del motor gira un determinado número discreto de grados.

Para conseguir el giro del rotor en un determinado número de grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad de giro. Las inercias propias del arranque y parada (aumentadas por las fuerzas magnéticas en equilibrio que se dan cuando está parado) impiden que el rotor alcance la velocidad nominal instantáneamente, por lo que ésta, y por tanto la frecuencia de los pulsos que la fija, debe ser aumentada progresivamente.

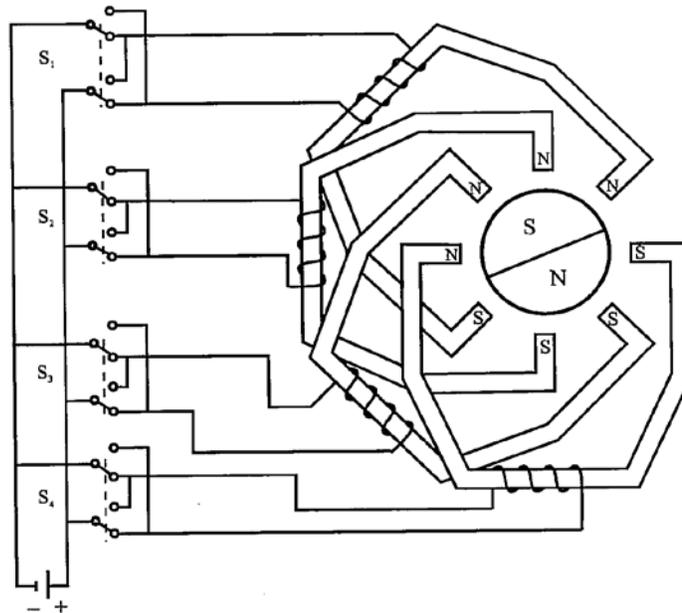


Figura 2.14 Esquema de un motor paso a paso de imanes permanentes con cuatro fases.

Para simplificar el control de estos motores existen circuitos especializados que a partir de tres señales (tren de pulsos, sentido de giro e inhibición) generan, a través de una etapa lógica, las secuencias de pulsos que un circuito de conmutación distribuye a cada fase.

Su principal ventaja con respecto a los servomotores tradicionales es su capacidad para asegurar un posicionamiento simple y exacto. Pueden girar además de forma continua, con velocidad variable, como motores síncronos, ser sincronizados entre sí, obedecer a secuencias complejas de funcionamiento, etc. se trata al mismo tiempo de motores muy ligeros, fiables y fáciles de controlar, pues al ser cada estado de excitación del estator estable, el control se realiza en bucle abierto, sin la necesidad de sensores de realimentación.

Entre los inconvenientes se puede citar que su funcionamiento a bajas velocidades no es suave, y que existe el peligro de pérdida de una posición por trabajar en bucle abierto. Tienden a sobrecalentarse trabajando a velocidades elevadas y presentan un límite en el tamaño que pueden alcanzar.

Su potencia nominal es baja y su precisión (mínimo ángulo girado) llega típicamente hasta $1,8^\circ$. Se emplean para el posicionado de ejes que no precisan grandes potencias (giro de pinza) o para robots pequeños (educacionales); también son muy utilizados en dispositivos periféricos del robot, como mesas de coordenadas.

2.2.3.1.3. Motores de corriente alterna

Este tipo de motores no ha tenido aplicación en el campo de la robótica hasta hace unos años, debido fundamentalmente a la dificultad de su control. Sin embargo, las mejoras que se han introducido en las maquinas síncronas hacen que se presenten como un claro competidor de los motores de corriente continua.

Esto se debe principalmente a tres factores:

- La construcción de motores síncronos sin escobillas.
- Uso de convertidores estáticos que permiten variar la frecuencia (y así la velocidad de giro) con facilidad y precisión.
- Empleo de la microelectrónica que permite una gran capacidad de control.

El inductor se sitúa en el rotor y está constituido por imanes permanentes, mientras que el inducido, situado en el estator, está formado por tres devanados iguales decalados 120° eléctricos y se alimenta con un sistema trifásico de tensiones. Es preciso resaltar la similitud que existe entre este esquema de funcionamiento y el del motor sin escobillas.

En los motores síncronos la velocidad de giro depende únicamente de la frecuencia de la tensión que alimenta el inducido. Para poder variar ésta con precisión, el control de velocidad se realiza mediante un convertidor de frecuencia. Para evitar el riesgo de pérdida de sincronismo se utiliza un sensor de posición continuo que detecta la posición del rotor y permite mantener en todo momento el ángulo que forman los campos del estator y del rotor. Este método de control se conoce como autosíncrono o autopilotado.

El motor síncrono autopilotado excitado con imán permanente, también llamado motor senoidal, no presenta problemas de mantenimiento debido a que no posee escobillas y tiene una gran capacidad de evaluación de calor, ya que los devanados están en contacto directo con la carcasa. El control de posición se puede realizar sin utilización de un sensor externo adicional, aprovechando el detector de posición del rotor que posee el propio motor.

Además permite desarrollar, a igualdad de peso, una potencia mayor que el motor de corriente continua. En la actualidad diversos robots industriales emplean este tipo de accionamientos con notables ventajas frente a los motores de corriente continua.

2.2.4. Sensores internos.

Para conseguir que un robot realice su tarea con la adecuada precisión, velocidad e inteligencia, será preciso que tenga conocimiento tanto de su propio estado como del estado de su entorno. La información relacionada con su estado (fundamentalmente la posición de sus articulaciones) la consigue con los

denominados sensores internos, mientras que la que se refiere al estado de su entorno, se adquiere con los sensores externos.

En este epígrafe se tratara únicamente de los sensores internos. Información sobre sensores externos puede verse en textos y bibliografía especializada en visión artificial, sensores de fuerza, tacto, distancia o telemetría. La información que la unidad de control del robot puede obtener sobre el estado de su estructura mecánica es fundamentalmente la relativa a su posición y velocidad.

En la tabla 2.3 se resumen los sensores más comúnmente empleados para obtener información de presencia, posición y velocidad en robots industriales. Se comentan a continuación los más significativos.

Tabla 2.3. Tipos de sensores internos de robots

Presencia	Posición		Velocidad
	Analógicos	Digitales	
Inductivo			Tacogeneratriz
Capacitivo	Potenciómetros	Encoders absolutos	
Efecto hall	Resolver	Encoders incrementales	
Célula Reed	Sincro	Regla óptica	
Óptico	Inductosyn		
Ultrasonido	LVDT		
Contacto			

2.2.4.1. Sensores de posición

Para el control de posición angular se emplean fundamentalmente los denominados encoders y resolvers. Los potenciómetros dan bajas prestaciones por lo que no se emplean salvo en contadas ocasiones (robots educacionales, ejes de poca importancia).

2.2.4.1.1. Codificadores angulares de posición.

Los codificadores ópticos o Encoders incrementales constan, en su forma más simple, de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí; de un sistema de iluminación en el que la luz es colimada de forma correcta, y de un fotorreceptor (figura 2.15). El eje cuya posición se requiere medir va acoplado al disco transparente. Con esta disposición, a medida que el eje gire se irán generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviere cada marca, y llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

Existe, sin embargo, el problema de no saber si en un momento dado se está realizando un giro en un sentido o en otro, con el peligro que se supone no estar contando adecuadamente. Una solución a este problema consiste en disponer de otra franja de marcas, desplazada de la anterior de manera que el tren de pulsos que con ella se genere esté desplazado 90° eléctricos con respecto al generado por la primera franja. De esta manera, con un circuito relativamente sencillo es posible obtener una señal adicional que indique cual es el sentido de giro, y que actúe sobre el contador correspondiente indicando que incremente o decremente la cuenta que se esté realizando.

Es necesario además disponer de una marca de referencia sobre el disco que indique que se ha dado una vuelta completa y que, por tanto, se ha de empezar la cuenta de nuevo. Esta marca sirve también para poder comenzar a contar tras recuperarse de una caída de tensión.

La resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco. Un método relativamente sencillo para aumentar esta resolución es, no solamente contabilizar los flancos de subida de los trenes de pulsos, sino contabilizar también los de bajada, incrementando así por cuatro la resolución de captador, pudiéndose llegar, con ayuda de circuitos adicionales, hasta 100.000 pulsos por vuelta.

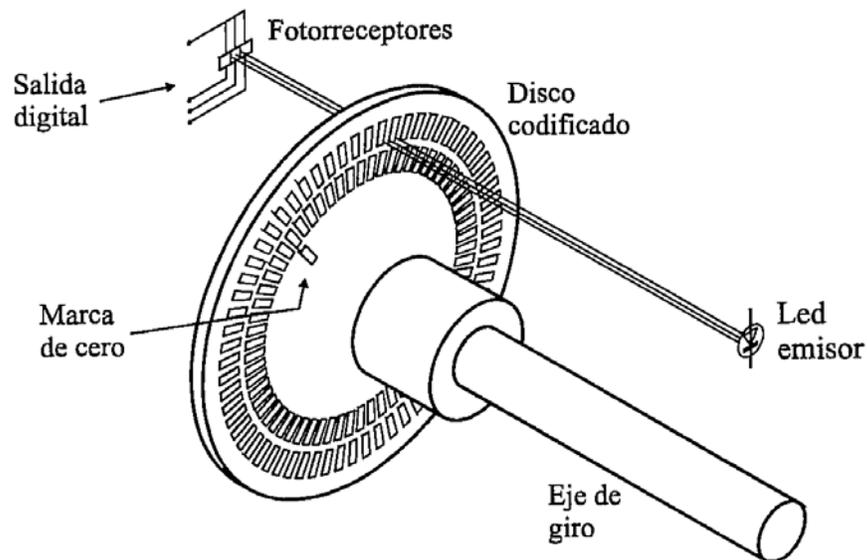


Figura 2.15. Disposición de un codificador óptico (encoder) incremental.

2.2.5. Sensores de presencia

Este tipo de sensor es capaz de detectar la presencia de un objeto dentro de un radio de acción determinado. Esta detección puede hacerse con o sin contacto con

el objeto. En el segundo caso se utilizan diferentes principios físicos para detectar la presencia, dando lugar a los diferentes tipos de captadores (tabla 2.3). En el caso de detección con contacto, se trata siempre de un interruptor, normalmente abierto o normalmente cerrado según interese, actuado mecánicamente a través de un vástago u otro dispositivo. Los detectores de presencia se utilizan en robótica principalmente como auxiliares de los detectores de posición, para indicar los límites de movimiento de las articulaciones y permitir localizar la posición de referencia de cero de éstos en el caso de que sean incrementales.

Además de esta aplicación, los sensores de presencia se usan como sensores externos, siendo muy sencillos de incorporar al robot por su carácter binario y su costo reducido. Los detectores inductivos permiten detectar la presencia o contar el número de objetos metálicos sin necesidad de contacto. Presentan el inconveniente de distinto comportamiento según el tipo de metal del que se trate. El mismo tipo de aplicación tiene los detectores capacitivos, más voluminosos, aunque en este caso los objetos a detectar no precisan ser metálicos. En cambio presentan problemas de trabajo en condiciones húmedas y con puestas a tierra defectuosas.

Los sensores basados en efecto Hall detectan la presencia de objetos ferromagnéticos por la deformación que estos provocan sobre un campo magnético. Los captadores ópticos, sin embargo, pueden detectar la reflexión del rayo de luz procedente del emisor sobre el objeto.

2.3. ELEMENTOS TERMINALES

Los elementos terminales, también llamados efectores finales (*end effector*) son los encargados de interactuar directamente con el entorno del robot.

Pueden ser tanto elementos de aprehensión como herramientas.

Si bien un mismo robot industrial es, dentro de unos límites lógicos, versátil y readaptable a una gran variedad de aplicaciones, no ocurre así con los elementos terminales, que son en muchos casos específicamente diseñados para cada tipo de trabajo.

Se puede establecer una clasificación de los elementos terminales atendiendo si se trata de un elemento de sujeción o de una herramienta. Los primeros se pueden clasificar según el sistema de sujeción empleado.

En la tabla 2.4 se representan estas opciones, así como los usos más frecuentes.

Tabla 2.4. Sistemas de sujeción para robots

Tipos de sujeción	Accionamiento	Uso
Pinza de Presión • Angular • Lineal	Neumático o eléctrico	Transporte y manipulación de piezas sobre las que no importe presionar.
Pinza de Enganche	Neumático o eléctrico	Piezas de grandes dimensiones o sobre las que no se puede ejercer presión.
Ventosas de Vacío	Neumático	Cuerpos con superficie lisa poco porosa (cristal, plástico, etc.).
Electroimán	Eléctrico	Piezas ferromagnéticas

Los elementos de sujeción se utilizan para agarrar y sostener los objetos y se suelen denominar pinzas. Se distingue entre las que utilizan dispositivos de agarre mecánico (Figura 2.16), y las que utilizan algún otro tipo de dispositivo (ventosas, pinzas magnéticas, adhesivas, ganchos, etc.).

En la elección o diseño de una pinza se han de tener en cuenta diversos factores. Entre los que afectan al tipo de objeto y de manipulación a realizar destacan el peso, la forma, el tamaño del objeto y la fuerza que es necesaria ejercer y mantener para sujetarlo. Entre los parámetros de la pinza cabe destacar su peso (que afecta a las inercias del robot), el equipo de accionamiento y la capacidad de control.

El accionamiento neumático es el más utilizado por ofrecer mayores ventajas en simplicidad, precio y fiabilidad, aunque presenta dificultades de control de posiciones intermedias. En ocasiones se utilizan accionamientos de tipo eléctrico.

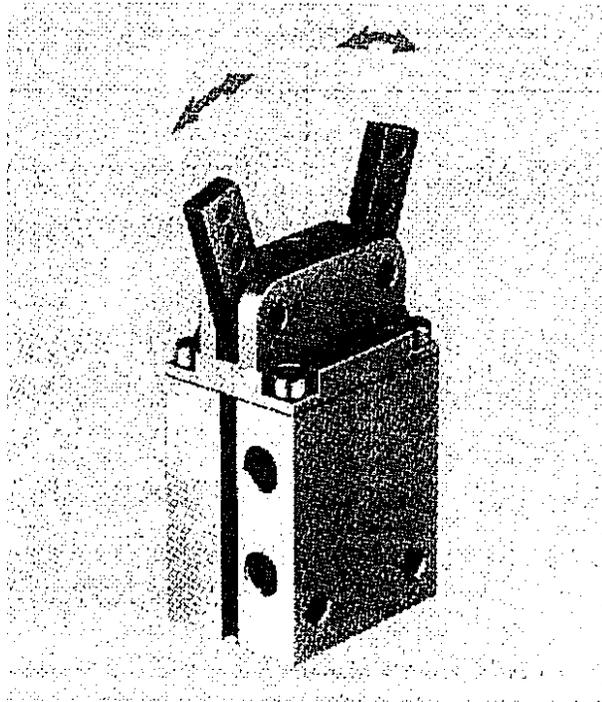


Figura 2.16. Pinza neumática de dedos paralelos. (Cortesía FESTO.)

En la pinza se suelen situar sensores para detectar el estado de la misma (abierto o cerrado). Se pueden incorporar a la pinza otro tipo de sensores para controlar el estado de la pieza, sistemas de visión que proporcionen datos geométricos de los objetos, detectores de proximidad, sensores fuerza-par, etc.

Como se ha indicado, el elemento terminal de aprehensión debe ser diseñado con frecuencia a medida para la aplicación. Existen ciertos elementos comerciales que sirven de base para la pinza, siendo posible a partir de ellos diseñar efectores válidos para cada aplicación concreta. Sin embargo, en otras ocasiones el efector debe ser desarrollado íntegramente, constituyendo su coste un porcentaje importante dentro del total de la aplicación.

En muchas aplicaciones el robot ha de realizar operaciones que no consisten en manipular objetos, sino que implican el uso de una herramienta. El tipo de herramientas con que puede dotarse a un robot es muy amplio. Normalmente la herramienta está fijada rígidamente al extremo del robot aunque en ocasiones se dote a éste de un dispositivo de cambio automático, que permita al robot usar diferentes herramientas durante la tarea. La tabla 2.5 enumera algunas de las herramientas más frecuentes.

Aparte de estos elementos de sujeción y herramientas más o menos convencionales, existen interesantes desarrollos e investigaciones, muchos de ellos orientados a la manipulación de objetos complicados y delicados. Por ejemplo, existen diversas realizaciones de pinzas dotadas de tacto o de dedos con falanges.

Tabla 2.5. Herramientas terminales para robots

Tipo de herramienta	Comentarios
Pinza soldadura por puntos	Dos electrodos que se cierran sobre la pieza a soldar
Soplete soldadura al arco	Aportan el flujo de electrodo que se funde
Cucharon para colada	Para trabajos de fundición
Atornillador	Suelen incluir la alimentación de tornillos
Fresa-lija	Para perfilar, eliminar rebabas, pulir, etc.
Pistola de pintura	Por pulverización de la pintura
Cañón laser	Para corte de materiales, soldadura o inspección
Cañón de agua a presión	Para corte de materiales

2.4. CINEMATICA DEL ROBOT

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que tomen sus coordenadas articulares.

Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot (Figura 2.17); el primero de ellos se conoce como el problema cinemático directo, y consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot; el segundo, denominado **problema cinemático inverso**, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.

Denavit y Hartenberg propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, y en particular de un robot, con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método utiliza una matriz de transformación homogénea para describir la relación espacial entre dos elementos rígidos adyacentes, reduciéndose el problema cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea 4 x 4 que relacione la localización espacial del extremo del robot respecto al sistema de coordenadas de su base.

Por otra parte, la cinemática del robot trata también de encontrar las relaciones entre las velocidades del movimiento de las articulaciones y las del extremo. Esta relación viene dada por el modelo diferencial expresado mediante la matriz Jacobiana.

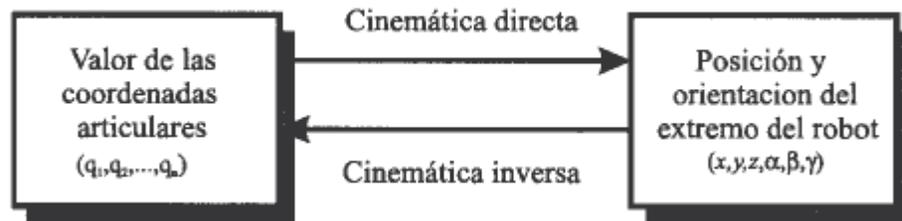


Figura 2.17 Diagrama de relación entre cinemática directa e inversa

2.4.1. El problema cinemático directo

Se utiliza fundamentalmente el álgebra vectorial y matricial para representar y describir la localización de un objeto en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de referencia fijo. Dado que un robot se puede considerar como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o *eslabones* unidos entre sí mediante *articulaciones*, se puede establecer un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia. De esta forma, el problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz homogénea de transformación **T** que relacione la posición y orientación del extremo del robot respecto del sistema de referencia fijo situado en la base del mismo. Esta matriz **T** será función de las coordenadas articulares.

2.4.1.1. Resolución del problema cinemático directo mediante matrices de transformación homogénea

La resolución del problema cinemático directo consiste en encontrar las relaciones que permiten conocer la localización espacial del extremo del robot a partir de los valores de sus coordenadas articulares.

Así, si se han escogido coordenadas cartesianas y ángulos de Euler para representar la posición y orientación del extremo de un robot de dos grados de libertad (GDL), la solución al problema cinemático vendrá dada por las relaciones:

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ y &= l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) \end{aligned}$$

Para robots de más grados de libertad puede plantearse un método sistemático basado en la utilización de las matrices de transformación homogénea.

En general, un robot de n grados de libertad está formado por n eslabones unidos por n articulaciones, de forma que cada par articulación-eslabón constituye un grado de libertad. A cada eslabón se le puede asociar un sistema de referencia solidario a él y, utilizando las transformaciones homogéneas, es posible

representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot. Normalmente, la matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación relativa entre los sistemas asociados a dos eslabones consecutivos del robot se suele denominar matriz ${}^{i-1}A_i$. Así pues, 0A_1 describe la posición y orientación del sistema de referencia solidario al primer eslabón con respecto con respecto al sistema de referencia solidario a la base, 1A_2 describe la posición y orientación del segundo eslabón respecto al primero, etc. Del mismo modo, denominado 0A_k a las matrices resultantes del producto de las matrices ${}^{i-1}A_i$ con i desde 1 hasta k , se puede representar de forma total o parcial la cadena cinemática que forma el robot. Así, por ejemplo, la posición y orientación del sistema solidario con el segundo eslabón del robot con respecto al sistema de coordenadas de la base se puede expresar mediante la matriz 0A_2 :

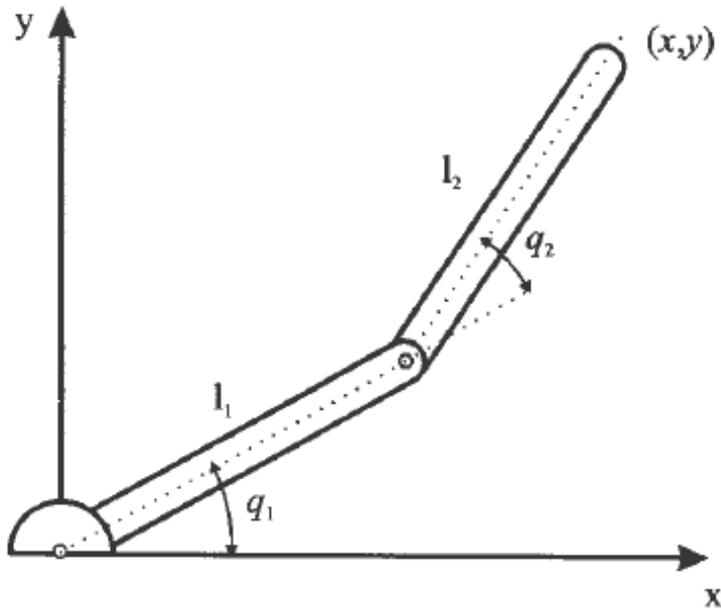


Figura 2.18 Robot planar de 2 grados de libertad

$${}^0A_2 = {}^0A_1 {}^1A_2$$

De manera análoga, la matriz 0A_3 representa la localización del sistema del tercer eslabón:

$${}^0A_3 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3$$

Cuando se consideran todos los grados de libertad, a la matriz 0A_D se le suele denominar **T**. Así, dado un robot de dos grados de libertad, se tiene que la posición y orientación del eslabón final vendrá dada por la matriz **T**:

$$\mathbf{T} = {}^0A_2 = {}^0A_1 {}^1A_2$$

Aunque para describir la relación que existe entre dos elementos contiguos se puede hacer uso de cualquier sistema de referencia ligado a cada elemento, la forma habitual que se suele utilizar en robótica es la representación de Denavit-Hartenberg (D-H). Denavit y Hartenberg propusieron en 1955 un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas $\{S_i\}$ ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.

Según la representación de D-H, escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón, será posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

Estas transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permiten relacionar el sistema de referencia del elemento $i-1$. Las transformaciones en cuestión son las siguientes (es importante recordar que el paso del sistema $\{S_{i-1}\}$ al $\{S_i\}$ mediante estas 4 transformaciones está garantizado solo si los sistemas $\{S_{i-1}\}$ y $\{S_i\}$ han sido definidos de acuerdo a unas normas determinadas):

- Rotación alrededor del eje z_{i-1} un ángulo θ_i .
- Traslación a lo largo de z_{i-1} una distancia d_i ; vector $\mathbf{d}_i (0,0, d_i)$.
- Traslación a lo largo de x_i a una distancia a_i ; vector $\mathbf{a}_i (0,0, a_i)$
- Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i .

Dado que el producto de matrices no es conmutativo, las transformaciones se han de realizar en el orden indicado. De este modo se tiene que:

$${}^{i-1}A_i = T(\mathbf{z}, \theta_i) T(0,0, d_i) T(a_i, 0,0) T(\mathbf{x}, \alpha_i)$$

Y realizando el producto entre matrices:

$$\begin{aligned} {}^{i-1}A_i &= \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & -S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i S\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Donde $\theta_i, a_i, d_i, \alpha_i$ son los parámetros D-H del eslabón i . De este modo, basta con identificar los parámetros $\theta_i, a_i, d_i, \alpha_i$ para obtener las matrices A y relacionar así todos y cada uno de los eslabones del robot.

Como se ha indicado, para que la matriz ${}^{i-1}A_i$, definida en (2.1) relaciones los sistemas $\{S_i\}$ y $\{S_{i-1}\}$, es necesario que los sistemas se hayan escogido de acuerdo a unas determinadas normas. Éstas, junto con la definición de los 4 parámetros de Denavit Hartenberg, conforman el siguiente algoritmo para la resolución del problema cinemático directo:

2.4.1.2. Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo

DH 1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 a la base fija del robot.

DH 2. Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n.

DH 3. Localizar el eje de cada articulación. Si ésta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.

DH 4. Para i de 0 a n-1 situar el eje z_i sobre el eje de la articulación i+1.

DH 5. Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situaran de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .

DH 6. Para i de 1 a n-1, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación i+1.

DH 7. Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .

DH 8. Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .

DH 9. Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que z_0 coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .

DH 10. Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.

DH 11. Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} queden alineados.

DH 12. Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiese con $\{S_i\}$.

DH 13. Obtener α_i como el ángulo que habría de girar en torno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), para el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$.

DH 14. Obtener las matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$ definidas en (2.1).

DH 15. Obtener la matriz de transformaciones que relaciona el sistema de la base con el extremo del robot $T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot \dots \cdot {}^{n-1}A_n$.

DH 16. La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

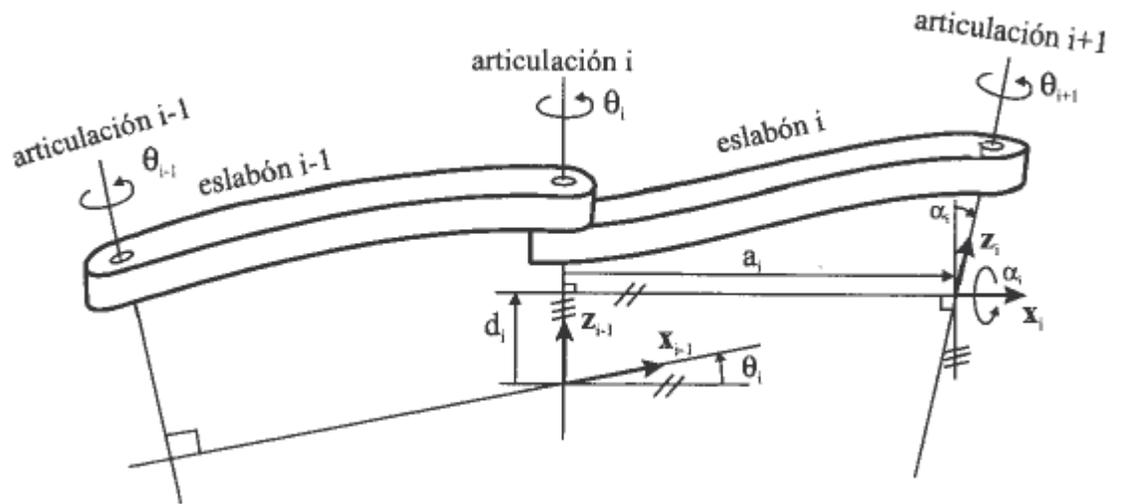


Figura 2.19 Parámetros D-H para un eslabón giratorio

Los parámetros de D-H ($\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$) dependen únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que le unen con el anterior y siguiente. En concreto estos representan (Figura 2.19):

θ_i Es el ángulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} , utilizando la regla de la mano derecha. Se trata de un parámetro variable en articulaciones giratorias.

d_i Es la distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas (i-1)-ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i . Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.

a_i Es la distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i-ésimo, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .

α_i Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} y del eje z_i , medido en un plano perpendicular al eje x_i , utilizando la regla de la mano derecha.

Una vez obtenidos los parámetros D-H, el cálculo de las relaciones entre los eslabones consecutivos del robot es inmediato, ya que vienen dadas por las matrices **A**, que se calculan según la expresión general (2.2). Las relaciones entre eslabones no consecutivos vienen dadas por las matrices **T** que, como ya se comenzó anteriormente, se obtienen como producto de un conjunto de matrices **A**.

Obtenida la matriz **T**, ésta expresará la orientación (submatriz (3 x 3) de rotación) y posición (submatriz (3 x 1) de traslación) del extremo del robot en función de sus coordenadas articulares, con lo que quedará resuelto el problema cinemático directo.

2.4.2. Cinemática inversa

El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial.

Así como es posible abordar el problema cinemático directo de una manera sistemática a partir de la utilización de matrices de transformación homogéneas, e independientemente de la configuración del robot, no ocurre lo mismo con el problema cinemático inverso, siendo el procedimiento de obtención de las ecuaciones fuertemente dependiente de la configuración del robot.

Se han desarrollado algunos procedimientos genéricos susceptibles de ser programados, de modo que un computador pueda, a partir del conocimiento de la cinemática del robot (con sus parámetros de Denavit-Hartenberg, por ejemplo) obtener la n-upla de valores articulares que posicionan y orientan su extremo. El inconveniente de estos procedimientos es que se trata de métodos numéricos iterativos, cuya velocidad de convergencia e incluso su convergencia en sí no está siempre garantizada.

A la hora de resolver el problema cinemático inverso es mucho más adecuado encontrar una solución cerrada. Esto es, encontrar una relación matemática explícita de la forma:

$$q_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \\ k = 1 \dots n \text{ (GDL)}$$

Este tipo de solución presenta, entre otras, las siguientes ventajas:

- a. En muchas aplicaciones, el problema cinemático inverso ha de resolverse en tiempo real (por ejemplo, en el seguimiento de una determinada trayectoria). Una solución de tipo iterativo no garantiza tener la solución en el momento adecuado.
- b. Al contrario de lo que ocurría en el problema cinemático directo, con cierta frecuencia la solución del problema cinemático inverso no es única; existiendo

diferentes n-uplas $[q_1, \dots, q_n]^T$ que posicionan y orientan el extremo del robot del mismo modo. En estos casos una solución cerrada permite incluir determinadas reglas o restricciones que aseguren que la solución obtenida sea la mas adecuada de entre las posibles (por ejemplo, límites en los recorridos articulares).

No obstante, a pesar de las dificultades comentadas, la mayor parte de los robots poseen cinemáticas relativamente simples que facilitan en cierta medida la resolución de su problema cinemático inverso. Por ejemplo, si se consideran sólo los tres primeros grados de libertad de muchos robots, éstos tienen una estructura planar, esto es, los tres primeros elementos quedan contenidos en un plano. Esta circunstancia facilita la resolución del problema. Asimismo, en muchos robots se da la circunstancia de que los tres grados de libertad últimos, dedicados fundamentalmente a orientar el extremo del robot, corresponden a giros sobre ejes que se cortan en un punto. De nuevo esta situación facilita el cálculo de la n-upla $[q_1, \dots, q_n]^T$ correspondiente a la posición y orientación deseadas. Por lo tanto, para los casos citados y otros, es posible establecer ciertas pautas generales que permitan plantear y resolver el problema cinemático inverso de una manera sistemática.

Los métodos geométricos permiten obtener normalmente los valores de las primeras variables articulares, que son las que consiguen posicionar el robot (prescindiendo de la orientación de su extremo). Para ello utilizan relaciones trigonométricas y geométricas sobre los elementos del robot. Se suele recurrir a la resolución de triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot.

Como alternativa para resolver el mismo problema se puede recurrir a manipular directamente las ecuaciones correspondientes al problema cinemático directo. Es decir, puesto que éste establece la relación:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [t_{ij}] \quad (2.3)$$

Donde los elementos t_{ij} son función de las coordenadas son función de las coordenadas articulares $[q_1, \dots, q_n]^T$, es posible pensar que mediante ciertas combinaciones de las 12 ecuaciones planteadas en (2.2) se puedan despejar las n variables articulares q_i en función de las componentes de los vectores \mathbf{n} , \mathbf{o} , \mathbf{a} y \mathbf{p} .

Por último, si se consideran robots con capacidad de posicionar su extremo en el espacio, esto es, robots con g GDL, el método de desacoplamiento cinemático permite, para determinados tipos de robots, resolver los primeros grados de libertad, dedicados a la orientación. Cada uno de estos dos problemas más simple podrá ser tratado y resuelto por cualquier procedimiento.

2.4.2.1. Resolución del problema cinemático inverso por métodos geométricos

Como se ha indicado, este procedimiento es adecuado para robots de pocos grados de libertad o para el caso de que se consideren sólo los primeros grados de libertad, dedicados a posicionar el extremo.

El procedimiento en sí se basa en encontrar suficiente número de relaciones geométricas en las que intervendrán las coordenadas del extremo del robot, sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus elementos.

Para mostrar el procedimiento a seguir se va aplicar el método a la resolución del problema cinemático inverso de un robot de 3 GDL de rotación (estructura típica articular). La Figura 2.20 muestra la configuración del robot. El dato de partida son las coordenadas (p_x, p_y, p_z) referidas a $\{S_0\}$ en las que se quiere posicionar su extremo.

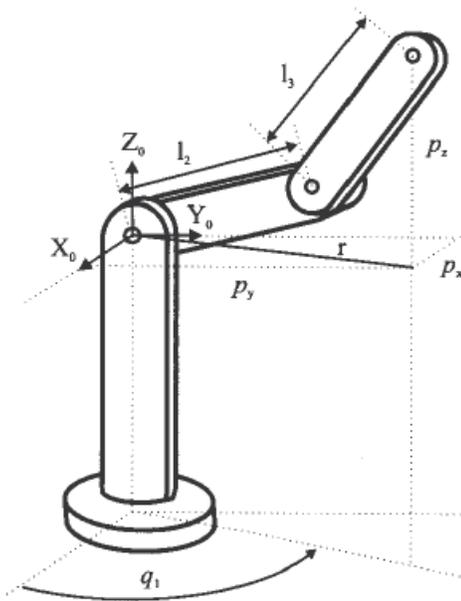


Figura 2.20 Robot articular

Como se ve, este robot posee una estructura planar, quedando este plano definido por el ángulo de la primera variable articular q_1 .

El valor de q_1 se obtiene inmediatamente como:

$$q_1 = \arctg\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \quad (2.4)$$

Considerando ahora únicamente los elementos 2 y 3 que están situados en un plano (Figura 2.21 (A)), y utilizando el teorema del coseno, se tendrá:

$$\left. \begin{aligned} r^2 &= P_x^2 + P_y^2 \\ r^2 + P_z^2 &= l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos q_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \cos q_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 + l_2^2 + l_3^2}{2l_2l_3}$$

(2.5)

Esta expresión permite obtener q_3 en función del vector de posición del extremo \mathbf{p} . No obstante, y por motivos de ventajas computacionales, es más conveniente utilizar la expresión del arcotangente en lugar del coseno.

Puesto que

$$\sin q_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3} \quad (2.6)$$

Se tendrá que

$$q_3 = \arctan\left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3}}{\cos q_3}\right)$$

Con:

$$\cos q_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

(2.7)

Como se ve, existen 2 posibles soluciones para que q_3 según se tome el signo positivo o el signo negativo en la raíz. Éstas corresponden a las configuraciones de codo arriba (ver Figura 2.21 (B)) del robot.

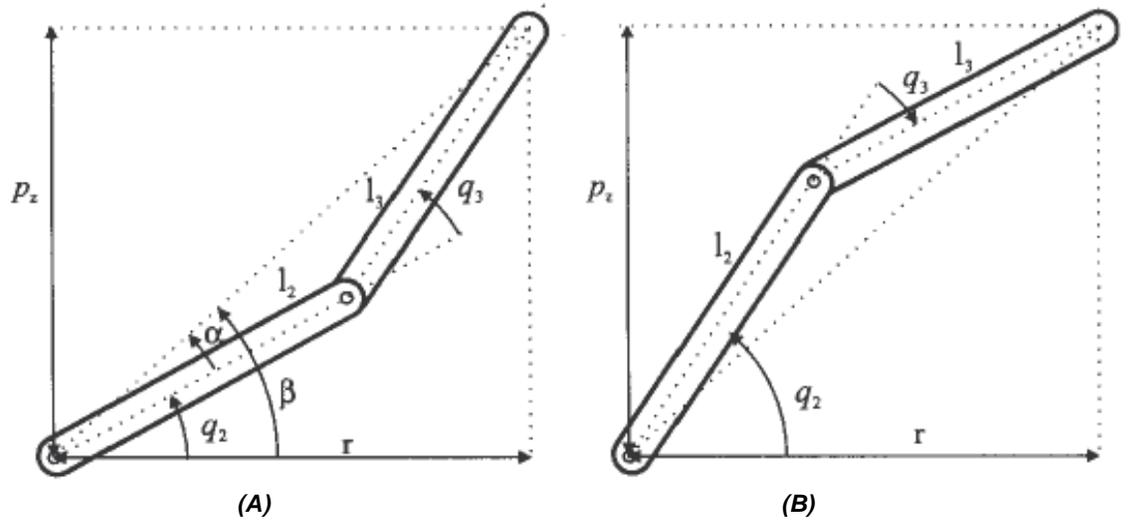


Figura 2.21 Elementos 2 y 3 del robot de la Figura 2.20 contenidos en un plano y en A) Configuración codo abajo y B) configuración codo arriba.

El cálculo de q_2 se hace a partir de la diferencia entre β y α :

$$q_2 = \beta - \alpha \quad (2.8)$$

Siendo:

$$\beta = \arctan\left(\frac{P_z}{r}\right) = \arctan\left(\frac{P_z}{\pm\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l_3 \sin q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3}\right)$$

$$(2.9)$$

Luego, finalmente

$$q_2 = \arctan\left(\frac{P_z}{\pm\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) - \arctan\left(\frac{l_3 \sin q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3}\right)$$

$$(2.10)$$

De nuevo los dos posibles valores según la elección del signo dan lugar a dos valores diferentes de q_2 correspondientes a las configuraciones codo arriba y abajo. Las expresiones (2.4) (2.7) (2.10) resuelven el problema cinemático inverso para el robot de 3 GDL considerado.

2.4.2.2. Desacoplo cinemático

Los procedimientos vistos anteriormente permiten obtener los valores de las 3 primeras variables articulares del robot, aquellas que posicionan su extremo en unas coordenadas (P_x, P_y, P_z) determinadas, aunque pueden ser igualmente utilizadas de las 6 a costa de una mayor complejidad.

Ahora bien, como es sabido, en general no basta con posicionar el extremo del robot en un punto del espacio, sino que casi siempre es preciso también conseguir que la herramienta que aquél porta se oriente de una manera determinada. Para ello, los robots cuentan con otros tres grados de libertad adicionales, situados al final de la cadena cinemática y cuyos ejes, generalmente, se cortan en un punto, que informalmente se denomina *muñeca del robot*. Si bien la variación de estos tres últimos grados de libertad origina un cambio en la posición final del extremo real del robot, su verdadero objetivo es poder orientar la herramienta del robot libremente en el espacio.

El método de desacoplo cinemático saca partido de este hecho, separando ambos problemas: posición y orientación. Para ello, dada una posición y orientación final deseadas, establece las coordenadas del punto de corte de los 3 últimos ejes (*muñeca del robot*) calculándose los valores de las tres primeras variables (q_1, q_2, q_3) que consiguen posicionar este punto. A continuación, a partir, de los datos de orientación y de los ya calculados (q_1, q_2, q_3) obtiene los valores del resto de las variables articulares.

[8]

3. ARQUITECTURA INTERNA DE UN AUTÓMATA PROGRAMABLE

3.1. LOS AUTÓMATAS PROGRAMABLES

3.1.1. Arquitectura y configuración

Un autómata es una máquina industrial susceptible de ser programada (autómata programable industrial API) al estar basada en un sistema de microprocesador dotado de un hardware estándar independiente del proceso a controlar. Se adapta a tal proceso mediante un programa de usuario específico (software), escrito en algún lenguaje de programación y que contiene la secuencia de operaciones a realizar.

El programa, realizado y depurado en una unidad de programación propia o ajena al autómata, se incorpora a la memoria de programa del mismo, para su ejecución por la Unidad Central de Proceso (CPU) del autómata.

La secuencia de operaciones del programa se realiza sobre señales de entrada y salida del proceso, llevadas al bus interno del autómata a través de las correspondientes interfaces de entrada y salida (E/S). El autómata gobierna las señales de salida según el programa de control previamente almacenado en su memoria de programa, a partir del estado de las señales de entrada. Los tipos de interfaces de E/S son muy variados, según las características de las señales procedentes del proceso o las que se van a aplicar al mismo (señales analógicas de tensión o corriente, pulsos de 0/5 V, 0/24 V, tensiones alternas 110 V, 220 V, tensiones continuas 12/24/48 V, etc.). En la mayoría de los API's, el número (hasta la capacidad permitida por la CPU), tipo y ubicación de las interfaces lo define el usuario, adaptando así el autómata, junto con su programa, a las necesidades de su proceso.

Ejemplos de señales de entrada son las procedentes de elementos digitales, como interruptores, finales de carrera y detectores de proximidad, o analógicos, como tensiones de dinamos tacométricas, tensiones de termopares, etc.

Ejemplos de señales de salida son las órdenes digitales todo o nada o analógicas en tensión o corriente, que se envían a los elementos indicadores y actuadores del proceso, tales como lámparas, contactores, válvulas, etc.

Ha de hacerse constar como característica esencial de los API's, el disponer de un hardware estándar que posibilita la realización de sistemas de control de acuerdo con las necesidades del usuario. La elección del API (gama baja, media o alta)

será función de las necesidades de potencia de cálculo y número y tipo de señales de entrada y de salida.

La configuración del autómata, llamada arquitectura interna, como en todo sistema microprocesador, incluye fundamentalmente los siguientes cuatro bloques básicos: una CPU o unidad central de proceso, una memoria interna de trabajo (RAM), una memoria de programa (RAM, EPROM, EEPROM), y las interfaces de entradas y salidas conectadas al bus interno. A su vez, tanto la CPU como la memoria de programa están conectadas a dicho bus interno.

Las instrucciones de un programa de usuario almacenado en la memoria de un API son ejecutadas correlativamente generando unas órdenes o señales de control a partir de las señales de entrada leídas de la planta. Cuando se detectan cambios en las señales, el autómata reacciona de acuerdo con el programa hasta que obtiene las órdenes de salida necesarias. Esta secuencia se ejecuta continuamente a fin de conseguir el control actualizado del proceso.

Además de ejecutar las instrucciones del programa, el autómata realiza un conjunto de acciones que aseguran su funcionamiento correcto: test de CPU y memoria, comprobación del reloj de guarda, etc. La secuencia o ciclo de operación consta básicamente de las siguientes etapas:

- Test del sistema.
- Lectura de señales desde la interface de entrada.
- Escritura de señales en la interface de salida.
- Procesado del programa a fin de obtener las señales de control.

Para reducir los tiempos de acceso a las interfaces de E/S, la lectura y escritura de las entradas y salidas involucradas se realiza a la vez, guardando las entradas leídas en una memoria temporal o imagen de entradas a la que accede la CPU mientras ejecuta el programa, en tanto que los resultados o señales de control se van guardando en otra memoria temporal o imagen de salidas a medida que se van obteniendo. Al terminar la ejecución del programa los resultados se colocan de una sola vez en la interface de salida.

Aparte de las cuatro etapas descritas anteriormente, el autómata eventualmente puede establecer comunicación con periféricos exteriores, por ejemplo para sacar datos por impresora, comunicación con otros autómatas u ordenadores, conexión con la unidad de programación, etc.

Las anteriores acciones, repitiéndose periódicamente, definen un ciclo de operación que requiere un cierto tiempo (dependiendo del número de entradas y salidas, y de la longitud del programa) para ser ejecutado, de modo que el autómata no puede responder en tiempo real a sucesos que ocurren en el sistema exterior. Este tiempo será determinante cuando con el autómata se pretendan controlar procesos rápidos, con señales de muy corta duración o alta frecuencia de conmutación.

Los retardos aportados por entradas o salidas son debidos, respectivamente, al filtrado de señal que incorporan (filtro pasa bajo), y a los tiempos de respuesta del interruptor (relé, transistor, etc.) o convertidor digital/analógico.

Para las entradas, los retardos típicos oscilan entre 10 ms y 100 ms, aunque hay autómatas que permiten ajustes del tiempo de filtro menores.

Para los tiempos típicos, la frecuencia máxima de señal de entrada queda limitada entre 100 Hz y 10 Hz, de forma que cualquier señal de frecuencia superior, o de periodo T menor que el tiempo de filtro, no podrá ser leída desde las entradas estándar del autómata.

Los anteriores problemas debidos a los retardos pueden reducirse de las siguientes maneras:

- Para las entradas, con elementos de entrada de proceso rápido: filtrado débil asociado a programa de ejecución rápida, entradas detectoras de flancos o entradas de contador rápido.
- Para el tiempo de procesado del programa: escribiendo subprogramas rápidos contenidos en el principal asociados a algún elemento de proceso rápido y activados periódicamente.
- Para las salidas: utilizando elementos semiconductores en sustitución de relés electromecánicos.

En general se dice que un autómata es capaz de controlar en tiempo real un proceso, cuando sus tiempos de respuesta o retardo son muy pequeños comparados con los tiempos de reacción del mismo.

La configuración del autómata es la estructura que tiene su sistema físico (hardware), fundamentalmente la unidad de control, el sistema de E/S y la memoria, de modo que pueda adaptarse a las características particulares de la aplicación industrial en que vaya a usarse.

Siendo la modularidad una de las características fundamentales de los autómatas, la elección de la configuración adecuada resulta fácil al ofrecer sus fabricantes una amplia variedad de módulos y ampliaciones.

En cuanto a la unidad de control las configuraciones son:

- a. Unidad de control compacta (control centralizado). Es el caso en el que una única CPU gestiona tanto el programa como las entradas y salidas asociadas, agrupadas en módulos que contienen exclusivamente interfaces E/S. Esta configuración se usa en aplicaciones de poca complejidad, dando lugar a los llamados microautómatas y miniautómatas.
- b. Unidad de control modular (control distribuido). En aplicaciones de mayor complejidad, en lugar de una única CPU, existen varios módulos con tarjetas o

unidades de proceso propias e incluso con sus interfaces de E/S. Es lo que se denomina estructura de multiprocesadores o con control distribuido. Cada procesador trabaja sobre subprogramas (partes del programa de usuario) o específicamente sobre otras aplicaciones concretas (regulación, posicionamiento, etc.) con su propio programa de tratamiento. En la estructura de multiprocesadores las unidades de proceso están conectadas a una unidad central (CPU maestra o principal) que gestiona el sistema en conjunto y permite el intercambio de datos entre el resto de las unidades e interfaces. En algunas aplicaciones es interesante duplicar la CPU o algún otro elemento del autómata, configuración de seguridad, de modo que esta redundancia permite un funcionamiento ininterrumpido aún en caso de avería, por conmutación al elemento de reserva.

El sistema de entradas-salidas de un autómata es el conjunto de interfaces E/S que hacen posible la conexión de la CPU con la planta y la identificación de las señales de ésta mediante una tabla de direcciones. Dada la modularidad característica de los autómatas, en casi todos ellos puede ampliarse el número de E/S mediante la conexión a la CPU de módulos de expansión con interfaces de E/S adicionales. En cuanto al sistema de entradas/salidas, las configuraciones pueden ser:

- Sistema de E/S centralizado. Es aquel en el que las interfaces de E/S se comunican con el autómata directamente a través de su bus interno, o a lo sumo mediando un amplificador de bus si se emplea un bastidor de ampliación, pero sin mediar procesadores de comunicación.
- Sistema de E/S distribuido. Es aquel en el que se necesitan procesadores de enlace de E/S conectados sobre el bus interno para la comunicación entre los módulos de E/S y la CPU. Estos procesadores de enlace son los encargados de amplificar, serializar y transmitir las informaciones entre las expansiones y la CPU del autómata base, mediante una línea común. En función de las distancias de conexión y de las prestaciones del enlace distribuido, éste puede ser local o remoto.

En cuanto a la capacidad de almacenamiento (memorias), en general los autómatas disponen de suficiente memoria como para realizar el mando y control de la mayoría de los procesos industriales, si bien en casos de aplicaciones con gran volumen de información a gestionar puede ser necesaria la instalación de una memoria de masa adicional que, conectada directamente a las unidades de programación y bajo el control de la CPU puede intercambiar datos con la memoria de trabajo.

En resumen, dada la amplia gama de autómatas existente en el mercado y la modularización de sus elementos, es posible en cualquier caso encontrar la configuración adecuada para una determinada aplicación.

3.1.2. Interfaces de entrada/salida

Son muchos los automatismos industriales que necesitan de una cadena de realimentación para poder ejecutar un control en lazo cerrado con una regulación precisa y rápida.

La cadena de realimentación se alimenta de las magnitudes de la planta a controlar (entradas), que son captadas mediante sensores o transductores y cuyas salidas han de adaptarse en unos circuitos llamados de interface para su procesamiento por el autómata.

Por otra parte, las débiles señales de control generadas por el autómata han de actuar, generalmente previa amplificación, sobre la parte de potencia de la planta.

A los elementos finales que actúan sobre la parte de potencia de la planta se les denomina accionamientos, y a los elementos intermedios que interpretan las señales de control y las amplifican se les denomina preaccionamientos.

En el control de cualquier proceso ha de existir un diálogo entre el operador y la máquina a controlar (diálogo hombre-máquina), y una comunicación entre el sistema de control y la máquina a controlar.

Traducido lo anterior a un autómata, supone que a éste le lleguen un conjunto de señales, de mando y de realimentación que se denominan entradas.

Por otra parte, el operador ha de conocer ciertos datos sobre la evolución del proceso y los accionamientos han de recibir las órdenes precisas para controlarlo, a todo lo cual se denominan salidas.

A todo el conjunto de entradas-salidas (E/S), es a lo se le denomina comúnmente "medios de diálogo operador-máquina y máquina-controlador".

Tanto las entradas como las salidas pueden consistir en señales todo-nada (final de carrera, electroválvula, etc.), señales analógicas (velocidades, temperaturas, presiones) y señales digitales (contadores).

Una característica ventajosa y esencial de los autómatas programables, frente a otros controladores digitales, es el disponer de un bloque de interfaces E/S muy potente que les capacita para conectarse directamente con los sensores y accionamientos del proceso. De ahí que de la adecuada elección de las interfaces E/S se derive una alta fiabilidad y disponibilidad del sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, es frecuente que sistemas de control complejos que incorporan un ordenador central con gran potencia de cálculo, utilicen como elemento de interface con el proceso industrial un autómata programable.

Además de los tipos de interface que intervienen en el proceso industrial propiamente dicho, existen otros tipos de interface dedicados a funciones específicas que incluso incluyen su propia CPU.

Además de las interfaces estándar digitales y analógicas, disponibles para todas las gamas de autómatas, existen otros tipos de interfaces llamadas específicas que, de modo opcional, pueden ser incorporadas al autómata base como tarjetas o módulos en las máquinas de las gamas media y alta.

Tales interfaces específicas hacen posible la conexión con elementos o procesos particulares de la planta, pudiendo realizar funciones muy variadas: manejo de señales particulares (códigos binarios, impulsos, señales analógicas débiles, etc.), regulación (PID, comparadores, control numérico), presentación de sinópticos y control (SCADA), posicionamiento de ejes, contadores rápidos, etc.

Por la función que realizan, las interfaces específicas pueden clasificarse como: de E/S especiales, de E/S inteligentes, y procesadores periféricos inteligentes.

Las interfaces con E/S especiales son interfaces análogas a las estándar pero que tratan señales particulares por su forma o por su aplicación, pero sin ningún control sobre las variables de la planta. El tratamiento de las señales está predeterminado y no es modificable por el usuario que sólo puede actuar sobre los modos de trabajo o algún parámetro de la tarjeta mediante instrucciones de programa o por micro-switchs externos.

Las interfaces con E/S inteligentes permiten diferentes modos de configuración ordenados por programa, e incorporan un control elemental que posibilita, utilizando señales binarias propias de la tarjeta, establecer lazos de regulación ON-OFF sobre variables de la planta, en funcionamiento transparente para la CPU. Desde la CPU y por el programa de usuario se envían las consignas y controles necesarios a estas interfaces.

Tal forma de actuar descarga de trabajo a la unidad central y mejora de paso la capacidad de direccionamiento al poder acceder a señales de E/S que no han de aparecer en su memoria imagen.

Finalmente, los procesadores periféricos inteligentes son tarjetas o módulos que disponen de su propio procesador, memoria y puntos auxiliares de E/S. Tales procesadores incorporan de origen un programa o intérprete de programa especializado para la ejecución de una tarea específica, al que sólo se le han de fijar las consignas y los parámetros de aplicación para que, de forma autónoma y sin intervención de la CPU principal ejecute el programa de control.

Los procesadores periféricos, de uso mucho más general que las interfaces con E/S inteligentes, necesitan de mucha más información para definir, además de la configuración del periférico: las condiciones de aplicación y de entorno, las condiciones de control (respuesta en función de la evolución del proceso) y las consignas a seguir. A todos los anteriores valores, que en definitiva no programan

sino que parametrizan la tarjeta, se les denomina programa de la interface y son enviados al periférico desde la CPU principal o desde la unidad de programación.

Aunque las tareas que realizan las interfaces específicas podrían realizarse por el programa de usuario desde la CPU principal, su especialización permite evitar o minimizar problemas tales como: a) Parte de las E/S estándar del autómata serían ocupadas para el tratamiento, a veces sin éxito, de señales específicas que por su naturaleza (por ejemplo tiempo de respuesta), pueden requerir un tratamiento especial, b) El aumento de la dificultad de programación, y c) El incremento del tiempo de ciclo del autómata que retardaría las reacciones del mismo ante el proceso y que, en el caso de procesamiento rápido de señales causaría problemas.

3.1.3. Programación

El autómata es una máquina electrónica integrando elementos de hardware que son capaces de comunicarse físicamente con un proceso para:

- Recibir desde el proceso algunas variables (analógicas o digitales) que determinan su estado y que se denominan señales de entrada.
- Enviar otras variables que modifiquen tal estado en un determinado sentido, y que se denominan señales de salida.

Por su condición de programable, es necesaria la intervención de un operador humano que defina cómo ha de evolucionar el proceso y que intercambie información con el autómata para:

- Establecer mediante una secuencia de instrucciones (programa), cuál ha de ser la ley general de mando. De la ejecución de tal programa se obtienen las señales de salida o de control; y b) Intervenir, esporádica o continuamente sobre el proceso a efectos de informarse de su estado o de modificar su evolución. Al apartado a) se le denomina programación del autómata y a la secuencia de instrucciones programa de la aplicación.
- Se le llama comúnmente explotación de la aplicación, mediante la cual se pueden modificar ciertos parámetros (consignas, tiempos, módulos de cuenta, etc.), pero no modificar el programa.

Las intervenciones sobre la planta se realizan normalmente mediante el autómata, si bien en casos de fuerza mayor (parada de emergencia por motivos de seguridad), el operador puede actuar directamente sobre el proceso.

El intercambio de información entre autómata y proceso corre a cargo de las interfaces de E/S, en tanto que la comunicación con el operador para programación/explotación requiere de un software que haga de intérprete entre el sistema real y los deseos del usuario.

De este modo puede decirse que este software es "el conjunto de programas que posibilitan la utilización del hardware para el control y la explotación de las aplicaciones".

De acuerdo con la anterior definición, las herramientas de software son clasificables como:

- a) Sistemas operativos residentes en el propio autómata que tienen la misión de establecer las secuencias de intercambios de información, interpretar y ejecutar las instrucciones del usuario y vigilar el correcto funcionamiento del equipo
- b) Software de edición/depuración de programas, que permite al usuario introducir su propio programa sobre soportes físicos tipo cinta, disco, etc., modificarlo para perfeccionarlo, obtener la documentación que se precise del proceso y, en su caso sacar copias de seguridad.

Según los casos, el software de edición/depuración puede ser residente, es decir está instalado en la máquina o, es instalable sobre un terminal denominado unidad de programación que a su vez puede ser autónoma o dependiente de la CPU. Las misiones de la unidad de programación son fundamentalmente:

- Permitir la edición, depuración y modificación del programa
- Servir de interface física entre el usuario y el autómata, a fin de poder transferir programas y realizar la supervisión y el control del equipo.

Las instrucciones u órdenes que el usuario introduce en el programa han de ser entendibles por el autómata, es decir que han de ser codificadas mediante los lenguajes de programación y explotación prefijados por el fabricante.

Por tanto, el lenguaje de programación puede definirse como "el conjunto de símbolos y textos, entendibles por la unidad de programación, que utiliza el usuario para codificar sobre un autómata las leyes de control que desea".

Asimismo, el lenguaje de explotación se definiría como "el conjunto de comandos y órdenes que, desde la CPU u otro terminal adecuado, puede enviar el usuario para conocer el estado del proceso, y en su caso para modificar alguna variable".

En esencia, el usuario introduce su secuencia de instrucciones (programa) en la unidad de programación, en un lenguaje que entienden ambos. La unidad de programación compila (convierte) las instrucciones del programa a unos códigos binarios, únicos que entiende el autómata (código máquina del autómata) y los almacena en la memoria.

Finalmente el sistema operativo residente interpreta tales códigos binarios para activar los recursos físicos que requiere la ejecución del programa (procesador, interfaces E/S, etc.).

En la tarea de programación del autómata, es decir de establecer el programa a introducir en la unidad de programación, han de seguirse los siguientes pasos:

- a. Establecer mediante un diagrama de flujo, una descripción literal o gráfica (GRAFSET, RdP, etc.) que indique qué es lo que se quiere que haga el sistema y en qué orden.
- b. Identificar las señales de E/S del autómata.
- c. Representar de forma algebraica (instrucciones literales o de textos) o gráfica (símbolos gráficos) un modelo del sistema de control con las funciones que intervienen, con las relaciones entre las mismas y con la secuencia a seguir.
- d. Asignar a cada uno de los elementos que figuran en el modelo direcciones de E/S o internas.
- e. Codificar la representación del paso 3 en instrucciones o símbolos entendibles por la unidad de programación (lenguaje de programación). Cada instrucción del programa consta de dos partes: el código de operación, que dice qué se ha de hacer y el código de los operandos (identificados por su dirección) que dicen sobre qué variables, o constantes, se ha de operar.
- f. Transferir el conjunto de instrucciones escrito en la unidad de programación a la memoria del autómata.
- g. Depurar, poner a punto el programa y guardar una copia de seguridad.

En cuanto a los lenguajes de programación a utilizar: literales o gráficos ha de decirse que depende de la aplicación a que se destina e incluso de la costumbre o hábito del programador. No obstante seguidamente se comentan las características fundamentales de ambos:

- Lenguajes literales: Formados por instrucciones elementales del programa, cada una de las cuales es una secuencia de textos. Las instrucciones disponibles dependen de la complejidad del lenguaje y van desde muy sencillas funciones lógicas (AND, OR, NOR) hasta las estructuras complejas de programación de alto nivel (FOR, NEXT, DO, WHILE, etc.), o instrucciones de manipulación de textos y valores numéricos, o instrucciones de acceso a bloques secuenciales (TIM, CNT, etc.).
- Lenguajes gráficos: Tienen su origen en los esquemas eléctricos de relés y utilizan símbolos de contactos y bobinas para las instrucciones básicas y símbolos de bloques lógicos para las extensiones al lenguaje, con una potencia similar a la de los lenguajes literales de alto nivel y con la ventaja de visión de conjunto que proporciona la representación gráfica.

En la automatización de procesos usuales, de no mucha complejidad (cadenas de montaje, control de máquinas, etc.), puede utilizarse indistintamente un programa a base de lista de instrucciones o uno a base de diagrama de contactos, lenguajes básicos para la mayoría de autómatas. Tanto es así que varios fabricantes prevén en su software de programación sobre PC la posibilidad de transcodificación entre ellos con sencillas operaciones de compilación/descompilación.

Para aplicaciones complejas que requieran manipular largas cadenas de caracteres, realizar muchos cálculos, utilizar subrutinas o bloques de programación específicos (regulación PID, posicionamiento de ejes, contaje rápido, etc.), podría ser necesaria la utilización de lenguajes literales de alto nivel que también permiten programar sencillas sentencias booleanas o manejar contadores y temporizadores como listas de instrucciones.

La tendencia actual de los fabricantes en cuanto a los lenguajes de programación se centra en integrar los lenguajes antedichos en un lenguaje mixto que une la claridad de los lenguajes gráficos para las funciones combinatorias y secuenciales con la compacidad de los literales para el manejo de textos y los cálculos matemáticos.

Para el logro del mencionado lenguaje mixto se ha de actuar en los siguientes campos:

- a. Potenciar el uso de estructuras de programación avanzada en los lenguajes gráficos (GRAFSET a menor nivel y RdP a nivel superior) y aumentar el número de las actuales instrucciones de expansión.
- b. Permitir el uso de instrucciones literales dentro de un programa gráfico, tratándolas como tales instrucciones dentro del programa o como subrutinas accesibles desde él.
- c. Desarrollar herramientas de edición con las que el usuario pueda almacenar sus sentencias en un bloque de expansión dentro de la librería disponible.

En definitiva y en lo referente a los lenguajes de programación, se prevé una evolución de los lenguajes gráficos en el sentido de hacerlos más potentes, más abiertos y de más fácil manejo por el usuario que, progresivamente podrá desarrollar sus aplicaciones sobre terminales tipo PC.

Los bloques funcionales, de mayor o menor complejidad, añaden al lenguaje básico instrucciones preprogramadas por el fabricante, de uso general en automatización (contadores, temporizadores, transferencias, registros, etc.) aumentando así la potencia de cálculo del autómatas y simplificando su programación.

Tales bloques, que pueden introducirse en programas escritos en lenguajes literales, lenguajes de alto nivel y lenguajes gráficos, se clasifican en dos grupos en función de su forma de operar y su disponibilidad en el programa:

- Bloques secuenciales básicos: Aquellos que son de uso generalizado en todo tipo de autómatas, incluidos los de la gama baja (contadores, biestables, temporizadores y registros de desplazamiento).
- Bloques de expansión o funciones: Son los que hacen posible el tratamiento de variables numéricas y el registro de datos, con sentencias aritméticas (comparación, transferencias, etc.), aumentando así la potencia del lenguaje.

Los bloques secuenciales básicos se pueden considerar parte de los lenguajes básicos del autómata, en tanto que los bloques de expansión son extensiones de aquellos.

El usuario ha de adaptar los anteriores bloques funcionales a sus particulares necesidades fijando las condiciones de trabajo: nombre de los registros con los que desea operar (direcciones), valores de temporizaciones en los temporizadores, direcciones de origen y destino en las transferencias, etc...

Los bloques funcionales, en su caso más general hacen intervenir tres tipos de variables asociadas:

- a. Condiciones de operación (entradas).- Son las que definen la habilitación y control del bloque.
- b. Operandos de función.- Son aquellos sobre los que actúan las sentencias preprogramadas del bloque funcional.
- c. Salidas asociadas cuyo estado depende de la ejecución del bloque.

A su vez, los operandos de función pueden ser:

- a. Parámetros iniciales que normalmente permanecen inalterados una vez fijados por programa o transferidos desde consola.
- b. Datos de operación (constantes o variables expresadas en palabras de 8/16 bits y que muestran el estado de valores internos, E/S, resultados, etc.

Los datos (numéricos o alfanuméricos) que se usan como operandos pueden corresponder a:

- a. Constantes (números o caracteres ASCII) definidos en el programa.
- b. Textos preprogramados escritos en alguna unidad de memoria o dispositivo exterior.
- c. Variables numéricas (caso más usual) en: contadores o temporizadores (valores actuales), registros internos, canales de datos de 8/16 bits de E/S (p.e. resultado binario de una conversión A/D).

A pesar de que el usuario puede definir en su programa los anteriores datos en cualquier base (decimal, BCD, hexadecimal, etc.), siendo que los datos internos que maneja el autómata son siempre binarios, han de ser convertidos automáticamente por el intérprete a tal base.

Según los fabricantes, un bloque funcional es considerado como elemento de un diagrama de contactos o como una sentencia literal en lista de instrucciones (con ciertas reglas de sintaxis).

Los programas de autómata para un proceso determinado pueden escribirse según estructuras monotarea y multitarea.

Si se define la tarea como "un conjunto de sentencias ejecutables que describen un tratamiento limitado y concreto sobre ciertas variables de un proceso", una estructura monotarea sobre una aplicación determinada es la que se desarrolla sobre una tarea única incluyendo la totalidad del programa, con todas sus variables de E/S y todas las sentencias de operación. Por el contrario, una estructura multitarea es aquella en que el programa está integrado por subprogramas, independientes o no, dando lugar a tareas aisladas referidas a tratamientos parciales y particulares de la aplicación (comunicaciones, supervisión, etc.).

Cuando la estructura es monotarea, la totalidad del programa (tarea única) se ejecuta periódicamente siguiendo un ciclo único de operación, en tanto que en estructuras multitarea se desarrollan varios ciclos a la vez durante la ejecución, uno por tarea, pudiendo además ejecutarse periódicamente o no las distintas tareas.

En cualquier caso, el ciclo de operación de cualquier tarea (tanto en estructuras mono como multi), recorre la típica secuencia de cuatro pasos:

- a. Recogida de entradas.
- b. Escrutinio del programa (de la tarea en operación).
- c. Actualización de salidas.
- d. Servicio a terminales de explotación y/o periféricos.

Como puede verse, en una estructura multitarea cada tarea constituye una unidad de programación completa, con sus propias E/S, variables internas e instrucciones de control, lo cual permite optimizar la ejecución cuando se dispone de un hardware con varios procesadores adaptados a los distintos tipos de tratamiento de la información (tratamiento de textos, booleano, regulación, etc.). Como contrapartida, este hardware multiprocesador ha de ser coordinado por un gestor de recursos (software) que asegure a cada tarea el acceso a los mismos y evite la conflictividad en su uso compartido.

En efecto, el gestor de recursos es un ente software que puede ser parametrizado por el usuario a fin de fijar las prioridades de las tareas de su programa, y que dependiendo del fabricante puede correr sobre una CPU coordinadora (específica) o sobre la CPU principal.

Del mismo modo que los procesadores periféricos montados en bastidor pueden considerarse como parte de una misma unidad de control, los programas que se ejecutan sobre ellos (con lectura y generación de señales sin intervención de la CPU principal) pueden también considerarse como parte de un tratamiento multitarea.

La clasificación anterior de estructuras de programación (mono y multitarea), fuertemente dependiente de la configuración del hardware de la unidad de control, no ha de confundirse con las metodologías de programación a utilizar.

En efecto, una vez elegida para la aplicación a desarrollar un tipo de estructura mono o multitarea para su programación, cada una de las tareas parciales ha de ser programada en una secuencia de sentencias que puede obedecer a una metodología de programación lineal o estructurada.

En cuanto a la metodología a utilizar se dice que la programación es lineal cuando las sentencias están ordenadas en el mismo orden en que se van a consultar, y en su caso a ejecutar. Por el contrario, se dice que la programación es estructurada cuando la tarea de control está repartida en módulos o subprogramas relativos a distintas funciones y cuya ejecución puede ser necesaria varias veces dentro de un mismo ciclo de ejecución del autómata.

A pesar de que la programación estructurada de una tarea se realiza con mayor eficiencia en autómatas con coprocesadores en su CPU que estén especializados en las funciones de cada subprograma, resulta también posible sobre autómatas con CPU única, que ejecutará los subprogramas o módulos en el orden en que sean llamados por el programa principal. En este sentido ha de hacerse constar que existen módulos pregrabados por el fabricante (para realizar tareas concretas o gobernar interfaces específicas) que pueden ser adaptados por el usuario a su aplicación concreta con sólo parametrizarlos adecuadamente.

En resumen, puede decirse que si bien, tanto los tratamientos monotarea como los multitarea pueden desarrollarse en autómatas con un solo procesador o con varios procesadores, ha de ser el programador quien según la complejidad de la aplicación, la estructure o subdivida de la forma más eficiente posible de acuerdo con los recursos hardware de que disponga.

Finalmente, obsérvese como la programación en lenguajes gráficos (GRAFSET o RdP) también puede ser considerada como una programación estructurada especialmente útil para la programación de los procesos secuenciales.

En cualquier aplicación con autómata programable, tanto durante la fase de concepción, edición y depuración del programa como durante la fase de operación o explotación del sistema, es necesaria una comunicación o diálogo hombre-máquina. En la primera fase el hombre (programador) carga el programa en la memoria del autómata, verifica su funcionamiento observando la evolución de las variables (monitorización) y en su caso modifica su estado en variables lógicas o su valor en variables alfanuméricas (forzado).

En la segunda fase o fase de explotación, sigue siendo conveniente y a menudo imprescindible la comunicación entre el hombre (operador) y la planta, a fin de conocer (monitorizar) a través del autómata los valores de ciertas variables claves para el correcto desarrollo del proceso y su control, variables que en su caso pueden modificarse (forzado).

Las comunicaciones descritas entre el hombre (programador/operador/usuario) y el autómata se realizan mediante dispositivos específicos o mediante la utilización de un entorno software que corre sobre un PC. Los dispositivos específicos, genéricamente denominados "Unidades de Programación y Servicio" proporcionan

la comunicación entre el programador y la máquina en la fase de programación y la comunicación entre la planta y el usuario en la fase de observación y control (explotación).

Las anteriores comunicaciones se realizan siempre sobre el autómatas, que para ello dispone de los conectores adecuados, en la CPU para la programación y en la CPU o procesadores auxiliares de comunicaciones para la explotación y el servicio.

En general existe una gran variedad de dispositivos conectables a un autómatas, bien directamente o vía modem, aportando soluciones a necesidades del proceso muy dispares: unidades específicas de programación o entornos software sobre PC, para la edición y puesta a punto de programas de autómatas; unidades de explotación desde un visualizador de baja funcionalidad hasta un terminal gráfico interactivo pasando por visualización de mensajes asociados a la evolución del programa, impresión de textos, intercambio de datos con otros equipos, etc.

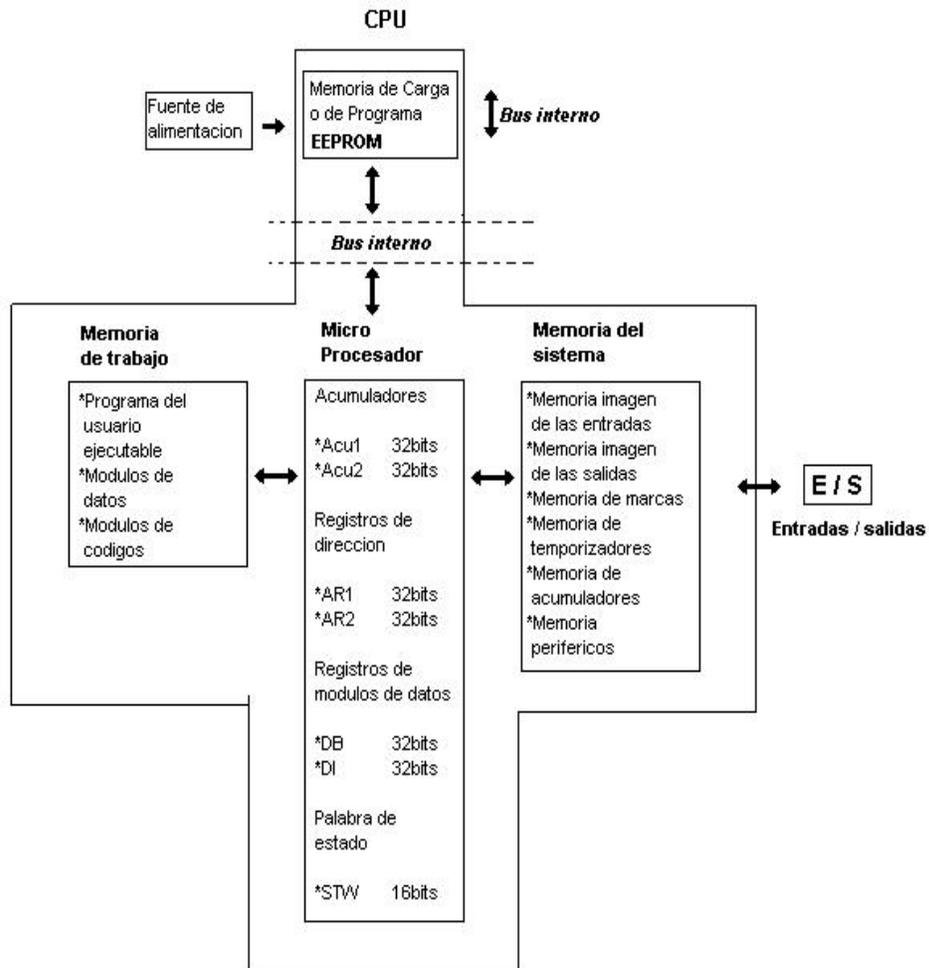


Figura 3.1 Arquitectura interna de un autómatas programable.

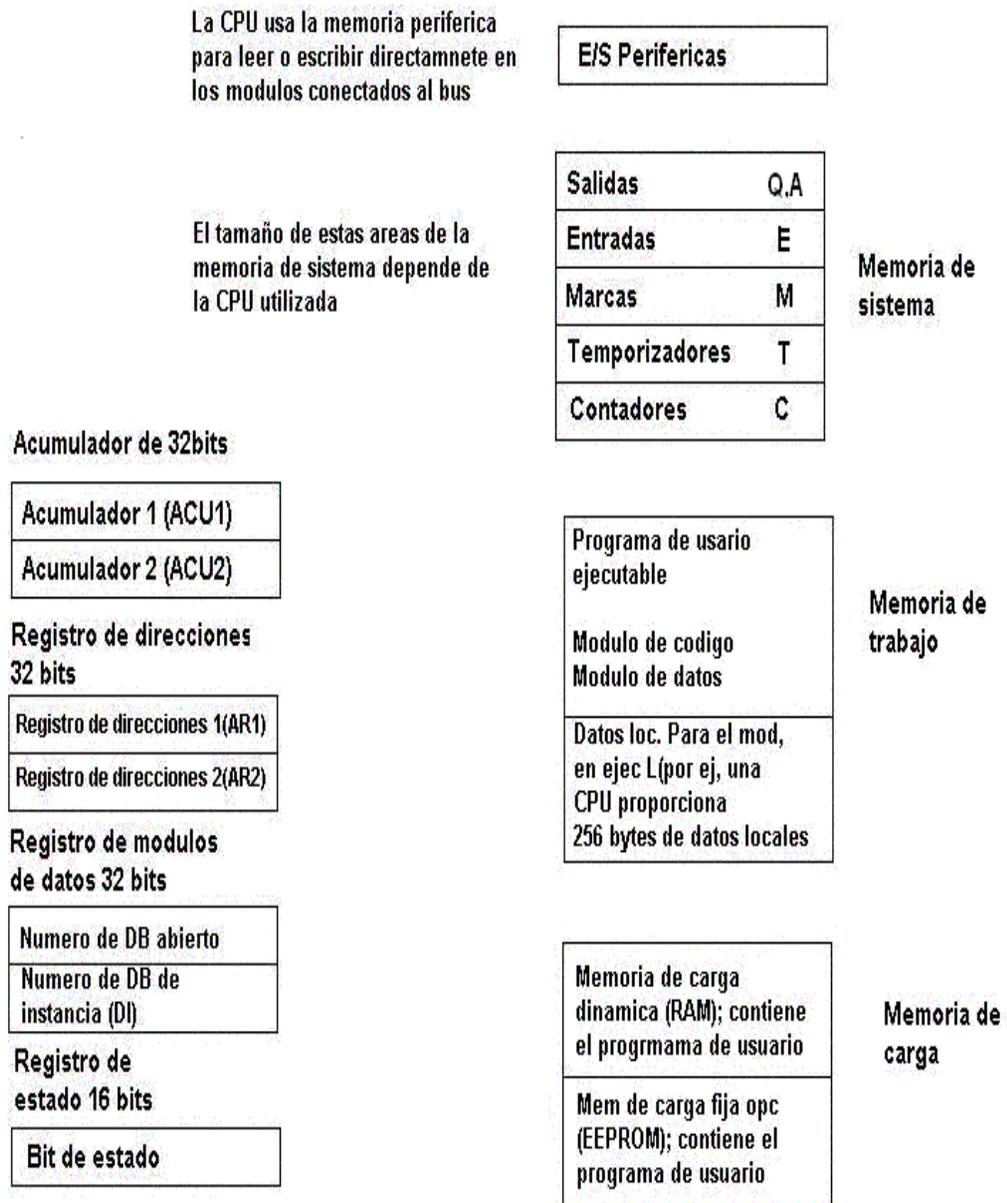


Figura 3.2 Arquitectura interna de un autómata programable.

En las figuras 3.1 y 3.2 se puede observar las partes de la **CPU** del autómata **Simatic S7**. Como se observa la unidad central de procesamiento contiene los siguientes registros:

3.2. REGISTROS

Todas las CPU Simatic S7 disponen de una serie de registros que se emplean durante la ejecución del programa de usuario. No vamos a comentar todos ellos, sólo los que realmente empleemos en la programación:

3.2.1. Acumuladores (ACU1 y ACU2)

El acumulador 1 (ACU 1) y el acumulador 2 (ACU 2) son dos registros universales de 32 bits que se emplean para procesar bytes, palabras y palabras dobles. En estos acumuladores se pueden cargar constantes o valores depositados en la memoria como operandos y ejecutar operaciones lógicas con ellos. También es posible transferir el resultado en ACU 1 a una dirección (un módulo de datos, una salida, etc.).

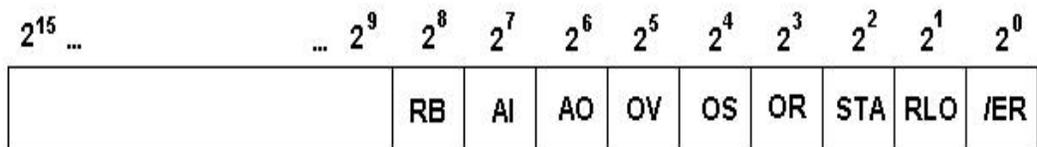
Cada acumulador puede descomponerse en dos palabras de 16 bits (palabra baja y alta). La palabra baja contiene los bits de menor peso y la alta los de mayor peso lógico.

Todas las posibles operaciones que pueden realizarse son:

- Cargar: que siempre actúa sobre ACU 1 y guarda el antiguo contenido en ACU 2 (perdiéndose el valor antiguo de ACU 2). La carga de una palabra actúa sobre la palabra baja del ACU 1.
- Transferir: copia el contenido de ACU 1 en una dirección de memoria, sin perder el valor de los acumuladores.
- Intercambiar el contenido de los acumuladores: Mediante la instrucción TAK.
- Realizar una operación entre los acumuladores, almacenando el resultado en ACU 1 sin variar ACU 2. Las operaciones pueden ser de comparación, de lógica digital y de aritmética.

3.1.1. Registro o palabra de estado

La palabra de estado contiene bits que pueden accederse en él operando de las operaciones lógicas con bits y con palabras, la siguiente figura muestra la estructura de la palabra de estado.



- BIT 0 (ER): el bit 0 de la palabra de estado se denomina bit de primera consulta (bit/ER). Si la señal del bit /ER es 0 significa que la siguiente operación lógica da inicio a otra cadena lógica (la barra delante de ER significa su negación), cada operación lógica consulta el estado del bit/ER, así como el

estado de señal del operando, si el bit/ER es 0 la operación almacenara el resultado en el bit RLO de la palabra de estado (bit RLO) y se pone el bit/ER a 1 este proceso se denomina primera consulta. Cada operación lógica comprueba el estado de señal del bit /ER así como el estado de señal del contacto direccionado, El estado de señal del bit /ER determina en qué lugar debe almacenar la operación el resultado de la consulta del contacto direccionado. Si el bit /ER es "0" la operación almacena el resultado en el bit RLO de la palabra de estado. Este proceso se denomina primera consulta. El "1" o "0" almacenado en el bit RLO tras la primera consulta de denomina resultado de la primera consulta.

Programa AWL	Estado de señal en la entrada (E) o salida (A)	Resultado consulta de memoria	Bit RLO	Bit /ER	Explicación
				0	Bit /ER=0, indica que la próxima operación inicia una cadena lógica
U	E	1.0	1	1	El resultado de la primera consulta se almacena en el bit RLO, el bit /ER se pone a "1"
UN	E	1.1	0	1	El resultado de la consulta se combina con el RLO precedente de acuerdo con la tabla de verdad "Y". El bit /ER permanece en "1"
=	A	4.0	1	0	El RLO se asigna a la bobina de salida El bit /ER se pone a "0"

- BIT 1 (RLO): este bit se conoce como bandera de resultado lógico este bit almacena el resultado de una operación lógica binaria o de una comparación aritmética. La operación SET coloca en 1 lógico el bit RLO y la instrucción CLR borra el estado lógico.
- BIT 2 (STA): este bit se conoce como de estado, se coloca en 1 con las operaciones de escritura en memoria como:
 - Operaciones de almacenamiento de memoria (set-reset)
 - Operaciones de transferencia o escritura en memoria del contenido del ACC, el bit STA se coloca en 1 con las operaciones de lectura en memoria: U, UN, O, ON, X, XN
- BIT 3 (OR): se requiere para el proceso Y delante de O. Este bit indica que una operación Y ha dado valor 1, en las restantes operaciones es 0.
- BIT 4 (OV): bit de desbordamiento. Se activa (1) por una operación aritmética o de comparación de coma flotante tras producirse un error (desbordamiento, operación no admisible, o relación incorrecta).
- BIT 5 (OS): bit de desbordamiento memorizado. Se activa junto con OV e indica que previamente se ha producido un error. Solo puede cambiar a cero con la instrucción SPS, una operación de llamada a módulo, o porque se ha alcanzado el fin del módulo.

- BITS 6 (A0) y 7 (A1): códigos de condición. Dan información sobre los resultados o bits siguientes:
 - Resultado de una operación aritmética.
 - Resultado de una comparación.
 - Resultado de una operación digital.
 - Bits desplazados por una instrucción de desplazamiento o rotación.
- BIT 8 (RB): resultado binario. Permite interpretar el resultado de una operación de palabras como resultado binario e integrarlo en la cadena de combinaciones lógicas binarias.

3.2.2. Registros 1 y 2 de direcciones

Son dos registros de 32 bits cada uno. Se emplean como punteros en operaciones que utilizan un direccionamiento indirecto de registros

3.2.3. Registros de módulos de datos (DB)

2 registros con los números de los DB abiertos (activos). Se puede n abrir 2 DB a la vez; uno como modulo de datos y el otro como modulo de datos de instancia (un DB global es el de uso general para todos los módulos de código de programa mientras un DB “de instancia” proporciona la memoria utilizada por una llamada especifica o “instancia”, de un FB). Por ejemplo, se abre un modulo de datos global con la instrucción u operación de AWL “abrir DB” y se abre un DB de instancia llamado un FB y asignándolo un DB como su DB de instancia. La instrucción “abrir DI” permite abrir otro DB distinto como DB de instancia.

3.3. TEMPORIZADORES Y CONTADORES

3.3.1. Temporizadores (T):

En el Simatic S7 vamos a disponer de una serie de temporizadores que nos van a permitir realizar una serie de acciones:

- Realizar tiempos de espera.
- Supervisar acciones durante un tiempo determinado (tiempo de vigilancia).
- Generar impulsos.
- Medir tiempos de proceso.

3.3.2. Contadores (Z):

Al igual que los temporizadores vamos a disponer de una serie de contadores que nos permitirán efectuar contajes, tanto hacia adelante como hacia atrás.

3.4. CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES ÁREAS DE MEMORIA DE ACUERDO A SU FUNCIÓN

Las áreas de memoria interna a la CPU de un autómeta programable (en nuestro caso un S7) posee las siguientes áreas de memoria

- Memoria de sistema
- Memoria de trabajo
- Memoria de carga

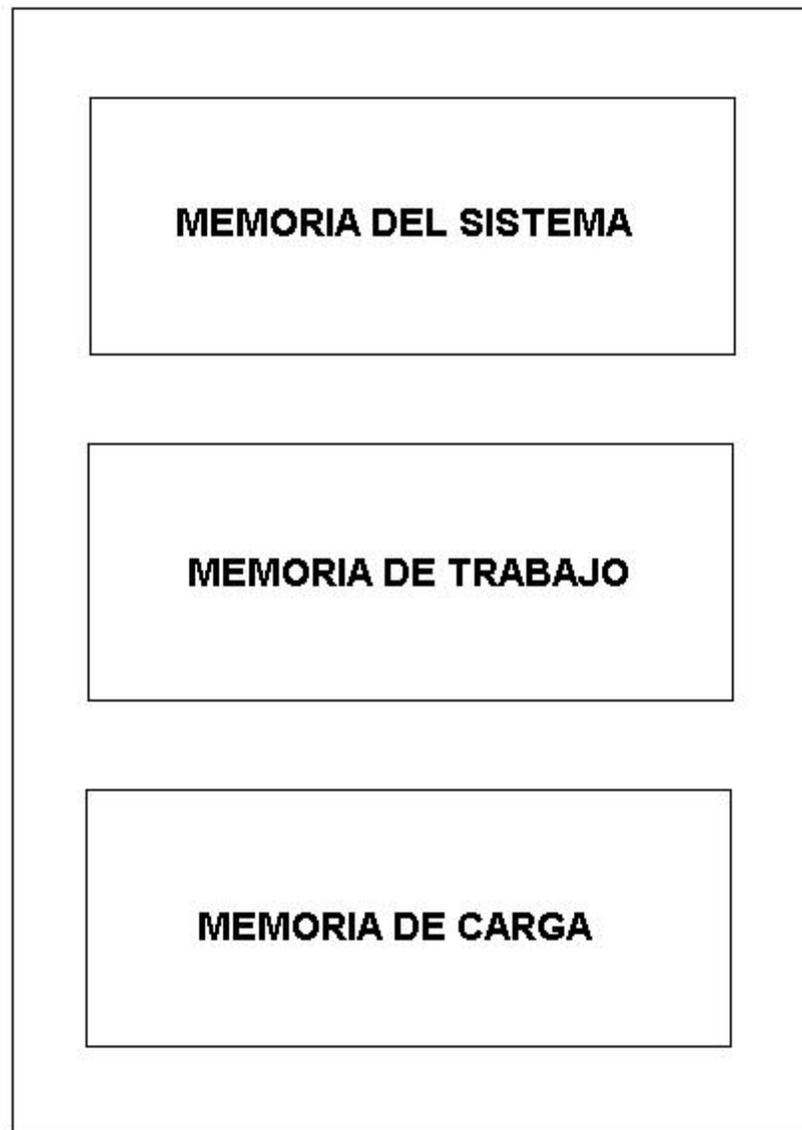


Figura 3.3 Tipos de memorias del autómeta.

3.4.1. Áreas de memoria de la CPU S7

Las áreas de memoria básicas están organizadas en grupos funcionales. La tabla describe estas áreas de memoria. Las instrucciones en su programa utilizan estas áreas de memoria para direccionar o manejar los datos:

Tabla 3.1 Descripción de las áreas de memoria

Nombre	Área de memoria	Descripción
Entrada(E)	Imagen de proceso de las entradas	Al principio del ciclo de trabajo, el sistema operativo lee las entradas del proceso y almacena los valores en esta imagen del proceso. El programa utiliza estos valores durante su procesamiento normal En cada ciclo de trabajo de CPU se almacena el estado de las entradas en la imagen de proceso correspondiente, la cual corresponde a los 128 primeros bytes de la memoria de entradas periféricas.
Salida (A)	Imagen de proceso de las salidas	Durante el ciclo de trabajo, el programa calcula los valores de salida y los escribe en esta imagen de proceso. Al final del ciclo de trabajo, el sistema operativo lee en esta imagen los valores de salida calculados y los transfiere a las salidas del proceso La imagen del proceso de las salidas corresponde a los 128 primeros bytes de la memoria de salidas periféricas
Marca(M)	Marcas	Esta área sirve para almacenar los resultados intermedios calculados por el programa. El usuario define si hay que acceder a los datos en formato de bit, byte, palabra, etc. Como ejemplos de esta memoria se tienen los relés de control o las marcas internas usadas por el programa
Entrada periférica(PE) Salida periférica(PA)	E/S: Entradas internas E/S: Salidas externas	La memoria periférica permite acceso directo a los dispositivos de campo (físicos o entradas y salidas externas) La memoria periférica puede ser direccionada en formato de byte, palabra y palabra doble, pero no como bits.
Temporizador (T)	Temporizadores	Esta área sirve para almacenar las celdas de tiempo. El temporizador accede a las celdas en esta área para actualizarse disminuyendo el valor

		de tiempo existente en ellas. Las instrucciones de temporización acceden aquí a las celdas de tiempo.
Contador(Z)	Contadores	Esta área sirve para almacenar valores de contadores, las instrucciones de contaje acceden aquí a ellas
Datos locales temporales (L)	Pila de datos locales (pila L)	Esta área es asignada cuando se ejecuta un FB, FC u OB. El tamaño de esta área está definido en parte por las variables temporales (TEMP) expresadas en la tabla de declaración de variables del modulo y que sirven como búferes intermedios. La pila L proporciona también espacio para transferir ciertos tipos de parámetros así como para el almacenamiento provisional de los resultados de segmentos KOP. Cuando acaba la ejecución del modulo la memoria temporal vuelve a ser asignada. Las diversas CPU ofrecen diferentes tamaños de memoria local por lo que si desea más información habrá de consultar las hojas de datos para su CPU
Modulo de datos (DB)	Parte del programa	Los módulos de datos (DB) almacenan información para el programa. Pueden ser diseñados para uso general por cualquier modulo de código (DB globales) o específicamente para un FB (DB de instancia).

Rangos o márgenes máximos de direcciones. La siguiente tabla relaciona los rangos o márgenes máximos de direcciones para las diferentes áreas de memoria.

Tabla 3.2 Rangos máximos de direcciones para las diferentes áreas de memoria

Nombre del área	Acceso al área vía unidades del siguiente tamaño	Abreviación	Máximo
Imagen de proceso de entradas	Bit de entrada	E	0.0 a 65,535.7
	Byte de entrada	EB	0 a 65,535
	Palabra de entrada	EW	0 a 65,534
	Palabra doble de entrada	ED	0 a 65,532
Imagen de proceso de salidas	Bit de salida	A	0.0 a 65,535.7
	Byte de salida	AB	0 a 65,535
	Palabra de salida	AW	0 a 65,534
	Palabra doble de salida	AD	0 a 65,532
Marcas	Bit de memoria	M	0.0 a 255.7
	Byte de memoria	MB	0 a 255

	Palabra de memoria Palabra doble de memoria	MW MD	0 a 254 0 a 252
E/S entradas externas	Byte de entrada periférica Palabra de entrada periférica Palabra doble de entrada periférica	PEB PEW PED	0 a 65,535 0 a 65,534 0 a 65,532
E/S salidas externas	Byte de salida periférica Palabra de salida periférica Palabra doble de salida periférica	PAB PAW PAD	0 a 65,535 0 a 65,534 0 a 65,532
Temporizadores	Temporizadores	T	0 a 255
Contadores	Contadores	Z	0 a 255
Módulos de Datos	Bit modulo de datos abierto con la instrucción "AUF DB" Bit de datos Byte de datos Palabra de datos Palabra doble de datos Modulo de datos abierto con la instrucción "AUF DI" Bit de datos Byte de datos Palabra de datos Palabra doble de datos	DBX DBB DBW DBD DIX DIB DIW DID	0.0 a 65,535.7 0 a 65,535 0 a 65,534 0 a 65,532 0.0 a 65,535.7 0 a 65,535 0 a 65,534 0 a 65,532
Datos locales temporales	Bit de temporales Byte de temporales Palabra de temporales Palabra doble de temporales	L LB LW LD	0.0 a 65,535.7 0 a 65,535 0 a 65,534 0 a 65,532
Módulos de datos	Modulo de datos	DB 1	1 a 65,532

3.4.2. Direccionamiento físico de los puertos de entrada y salida

La dirección de las posiciones de memoria se pueden asignar por defecto teniendo en cuenta la posición del modulo con respecto a la posición de la CPU del sistema, suponiendo que el hardware sistema se encuentra configurado.

Direcciones digitales E/S por defecto		Fila 3	IM recepcion + Alimen- tacion	96.0 a 99.7	100.0 a 103.7	104.0 a 107.7	108.0 a 111.7	112.0 a 115.7	116.0 a 118.7	120.0 a 123.7	121.0 a 127.7
		Fila 2	IM recepcion + Alimen- tacion	64.0 a 67.7	68.0 a 72.0	72.0 a 75.7	76.0 a 79.7	80.0 a 83.7	84.0 a 87.7	88.0 a 91.7	92.0 a 95.7
		Fila 1	IM recepcion + Alimen- tacion	32.0 a 35.7	36.0 a 39.7	40.0 a 43.7	44.0 a 47.7	48.0 a 51.7	52.0 a 55.7	56.0 a 59.7	60.0 a 63.7
		Fila 0	CPU + Alimen- tacion	IM emisión	0.0 a 3.7	4.0 a 7.7	8.0 a 11.7	12.0 a 15.7	16.0 a 19.7	20.0 a 23.7	24.0 a 27.7

Figura 3.4 Esquema de direccionamiento por defecto E/S digitales

Direcciones analogicas E/S por defecto		Fila 3	IM recepcion + Alimen- tacion	640 a 655	656 a 671	672 a 687	688 a 703	704 a 719	720 a 735	736 a 751	752 a 767
		Fila 2	IM recepcion + Alimen- tacion	512 a 527	528 a 543	544 a 559	560 a 575	575 a 591	592 a 607	608 a 623	624 a 639
		Fila 1	IM recepcion + Alimen- tacion	394 a 399	400 a 415	416 a 431	432 a 447	448 a 453	467 a 479	480 a 495	496 a 511
		Fila 0	CPU + Alimen- tacion	IM emisión	256 a 271	272 a 287	288 a 303	304 a 319	320 a 335	336 a 351	352 a 367

Figura 3.5 Esquema de direccionamiento E/S análogas

3.5. TIPOS DE DATOS

Los operandos de las instrucciones se componen de un dato que puede ser de distintos tipos. Los tipos de datos posibles son:

E → Entrada

A → Salida

M → Marca

P → Periferia (acceso directo)

L → Datos locales

T → Temporizador

Z → Contador

DB → Módulo de datos

Cada uno de estos tipos se puede direccionar en 4 posibles modos (salvo T y Z):

- Por defecto (X para DB): Bit.
- B: byte (8 bits).
- W: palabra (16 bits).
- D: palabra doble (32 bits).

3.5.1. Memoria de marcas

Cuando realicemos nuestro programa y operemos en el ámbito de bit en operaciones lógicas (and, or, etc.) puede que nos aparezca la necesidad de almacenar el resultado lógico que tengamos en un determinado momento. Para ello disponemos de 256 marcas de memoria de 1 byte, es decir un total de 2048 marcas de 1 bit, que podemos direccionar como:

Tabla 3.3 Memorias de marca

Marcas	M	0,0 a 255.7
Byte de marcas	MB	0 a 255
Palabra de marcas	MW	0 a 254
Palabra doble de marcas	MD	0 a 252

3.5.2. Entradas y salidas

Tal y como comentamos anteriormente, manejaremos una imagen de las entradas y las salidas. El número de e/s disponibles dependerá del tipo de CPU que empleemos, además de los módulos externos que tengamos conectados. Como máximo el autómata puede manejar hasta 65536 bytes para cada tipo de e/s. En cada caso podemos direccionar como:

Tabla 3.4 Imagen del proceso de las entradas (PAE)

Entrada	E	0,0 a 65535.7
Byte de entrada	EB	0 a 65535
Palabra de entrada	EW	0 a 65534
Palabra doble de entrada	ED	0 a 65532

Tabla 3.5 Imagen del proceso de las salidas (PAA)

Salida	A	0,0 a 65535.7
Byte de salida	AB	0 a 65535
Palabra de salida	AW	0 a 65534
Palabra doble de salida	AD	0 a 65532

Tabla 3.6 Entradas externas

Byte de entrada de la periferia	PEB	0 a 65535
Palabra de entrada de la periferia	PEW	0 a 65534
Palabra doble de entrada de la periferia	PED	0 a 65532

Tabla 3.7 Salidas externas

Byte de salida de la periferia	PAB	0 a 65535
Palabra de salida de la periferia	PAW	0 a 65534
Palabra doble de salida de la periferia	PAD	0 a 65532

Todas estas entradas y salidas pueden ser de tres tipos:

- E/S digitales: son las e/s más frecuentes y que en mayor cantidad vamos a tener. Ocupan 4 bytes de memoria de direcciones, comenzando desde la 0.0 hasta la 127.7.

- E/S digitales de alarma/error: no son e/s adicionales, se configuran dentro de Step7 y ocupan una de las e/s digitales normales.
- E/S analógicas: estas si son e/s adicionales, pero no obstante hay que configurarlas también desde Step7 para especificar el rango de direcciones que van a ocupar. Ocupan 2 bytes de memoria de e/s (16 bytes por módulo) y se sitúan en el rango de direcciones 256 a 383.

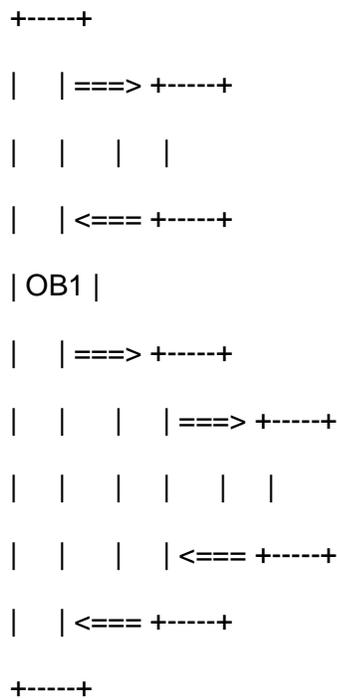
3.6. REGISTROS DE MÓDULOS DE DATOS

El Simatic S7 dispone de una serie de módulos que dividen la memoria de programa y la de datos en secciones, permitiendo una programación estructurada y un acceso ordenado a los datos. El número de módulos va a depender del tipo de CPU empleada, disponiendo en general de los siguientes:

3.6.1. Módulos de organización (OB)

Constituyen la forma de comunicación entre el sistema operativo de la CPU y el programa de usuario. Existen 3 tipos de OB, los cuales están accesibles o no según el tipo de CPU:

- OB 1 (ciclo libre): es el módulo principal, el que se ejecuta cíclicamente y del que parten todos los saltos a otros módulos.



- OB de error y alarma: son los que contienen la secuencia de acciones a realizar en caso de que se produzca una alarma o error programado (ver 3.5).

- OB de arranque: en este modulo podemos introducir valores por defecto que permiten el arranque definido a la instalación, bien en un arranque inicial o tras un fallo en la alimentación.

3.6.2. Módulos de código (FC)

Son módulos en los que podemos incluir parte del programa de usuario con lo que obtenemos un programa mucho más estructurado. A estos módulos se pueden acceder desde otro módulo FC o desde un módulo OB.

En total podemos manejar hasta 128 módulos de código.

3.6.3. Módulos de funciones (FB)

Son módulos de programa especiales. Aquí se introducen las partes de programa que aparecen con frecuencia o poseen gran complejidad. Posee una zona de memoria asignada para guardar variables (módulo de datos de instancia). Lo que se hace es enviar parámetros al FB y guardar algunos de los datos locales en el módulo de datos de instancia.

En total podemos manejar hasta 128 módulos de funciones.

3.6.4. Módulos de datos (DB)

Son áreas de memoria destinadas a contener datos del programa de usuario. Existen módulos de datos globales y de instancia. A los datos contenidos en un módulo de datos es posible acceder de forma absoluta o simbólica. Los datos complejos o compuestos pueden depositarse en forma de estructura. Los módulos de datos pueden ser de dos tipos:

- Módulos de datos globales: se pueden utilizar por cualquier módulo del programa.
- Módulos de datos de instancia: se asignan a un determinado modulo de función y solo pueden manejarse desde dicho módulo. Pueden asignarse varios módulos de datos de instancia a un módulo de función.

En total podemos manejar hasta 127 módulos de datos.

3.6.5. Módulos de funciones especiales (SFB)

Se tratan de módulos ya programados, los cuales están preparados para realizar acciones complejas como regulación PID (lazo cerrado), medida de frecuencia, etc.

3.6.6. Módulos de funciones del sistema (SFC)

Son funciones integradas en el sistema operativo de la CPU y que se pueden llamar en caso de necesidad desde el programa de usuario.

La serie Simatic S7 dispone de la capacidad de poder interrumpir el programa de usuario para poder atender de forma inmediata o retardada a un determinado evento. Las respuestas a las alarmas se deben programar, para definir los módulos OB a los cuales se saltará cuando se produzcan.

Se puede definir la prioridad de las alarmas, dando un orden de preferencia en la respuesta de las mismas, lo cual es imprescindible en aquellas situaciones en que se presenten varias alarmas.

También se puede bloquear el tratamiento de las alarmas y eventos de error, aunque no puede ser desactivado por la llamada de una FC estándar, si esta FC estándar incluye también los citados eventos que se habilitan nuevamente.

Para la programación de los eventos de alarma y error asíncrono se emplean las SFC 39 a 42 (ver Manual STEP7 Diseño de programas).

Las alarmas están subdivididas en diferentes clases. La siguiente tabla contiene todas las clases de alarmas y sus OB correspondientes:

Tabla 3.8 Clases de alarmas

Clase de alarma	OB
Alarmas horarias	OB 10 a OB 17
Alarmas de retardo	OB 20 a OB 23
Alarmas cíclicas	OB 30 a OB 38
Alarmas de proceso	OB 40 a OB 47
Alarmas de comunicación	OB 50 y OB 51
Alarmas de error asíncrono	OB 80 a OB 87 (siguiente tabla)
Alarmas de error síncrono	OB 121 y OB 122 El tratamiento de las alarmas de error asíncrono se enmascara o desenmascara con las SFC 36 a 38.

La siguiente tabla contiene los eventos de error asíncrono, a los cuales se puede reaccionar llamando el OB correspondiente en el programa de usuario.

Tabla 3.9 Eventos de error asíncrono y OB correspondiente

EVENTOS DE ERROR ASÍNCRONO	OB
Error de tiempo (ej. sobrepasar el tiempo de ciclo)	OB 80
Fallo de la alimentación (ej. pila agotada)	OB 81
Alarma de diagnóstico (ej. fusible defectuoso en un módulo de señales)	OB 82
Fallo de inserción del módulo (ej. módulo sacado o mal insertado)	OB 83
Error de hardware de la CPU (ej. cartucho de memoria sacado)	OB 84
Error de proceso del programa (ej. OB no fue cargado)	OB 85
Ha fallado toda la fila	OB 86
Error de comunicación (ej. error de datos globales)	OB 87

3.7. DIRECCIONAMIENTO DE LA MEMORIA DE LOS AUTOMATAS

Los programas se almacenan siempre en la memoria, esto es, los datos y los códigos de las instrucciones del programa. La forma como se transfieren los datos y códigos del programa fuente entre la memoria y los registros internos de la CPU se conoce con el nombre de direccionamiento de la memoria.

Existen varios tipos de direccionamiento de la memoria para autómatas programables:

- Direccionamiento inmediato
- Direccionamiento directo
- Direccionamiento indirecto
- Direccionamiento indexado
- Direccionamiento interárea
- Direccionamiento intraárea

La mayor parte de la lógica de un programa establece la transferencia de datos entre la memoria y los registros de la C.P.U, una vez se establece esta transferencia se ejecuta una o varias operaciones utilizando estos datos y el resultado final se envía a la memoria. El campo del operando para muchas instrucciones contiene información que identifica las localizaciones de memoria. La forma como estas localidades de memoria se identifican se conoce como direccionamiento de la memoria; entonces un direccionamiento, es la forma como la operación descrita en la instrucción indica en qué dirección se encuentra el dato con el cual ejecutar la operación. Esta dirección puede ser un bit, un byte, una palabra (W) o una palabra doble (DD).

El operando puede ser absoluto o simbólico y referirse a uno de los siguientes elementos:

- Un identificador de operando (por ejemplo: “EB” para byte de entrada, “AW” palabra de salida etc. y una dirección dentro de dicha área de memoria. (por ejemplo: L EB[AR2,P#4.8]; leer o cargar en el acumulador el byte de entrada cuya dirección se encuentra en el área de memoria, imagen de entrada salida, señalada por el contenido del registro AR2 mas 4 bytes y 3 bits a partir de esta dirección.
- Una dirección dentro de un modulo de datos (por ejemplo: EB [DBD5]), cargar o leer en el ACC el byte de datos de entrada cuya dirección se encuentra en la palabra doble de datos de entrada cuya dirección se encuentra en la palabra doble de datos, 5 del modulo de datos actual.
- Una función (FC).
- Un modulo de función (FB)
- Una función del sistema (SFC).
- Un modulo de funciones (SFB).
- Un temporizador o un contador.
-

3.7.1. Direccionamiento inmediato

El direccionamiento inmediato permite cargar directamente un dato entero en un registro, alterar el estado de un bit de la palabra de estado STW, memoria de imagen de entradas y salidas, memoria de marcas, transferir datos entre los registros acumuladores, establecer operaciones lógicas en forma inmediata con el contenido del acumulador. Las siguientes instrucciones utilizan direccionamiento inmediato:

S → Poner el RLO a 1

OW → *W#16#A320* O con palabras

L'ABCD' → Cargar los caracteres ASCII ABCD en el ACC1.

L'B#(100,2)' → Cargar una constante de dos bytes (100 y 12) en el ACC1

L C#0100 → Cargar el valor BCD 0100 en el ACC1

3.7.2. Direccionamiento directo

Una instrucción que direcciona directamente la memoria, ella misma entrega la dirección de memoria a ser referida como parte del código de la instrucción.

Ejemplo 3.1: Se desea leer en el acumulador el estado del byte N°2 de la memoria de imagen de las entradas (estado lógico de las entradas EB2).

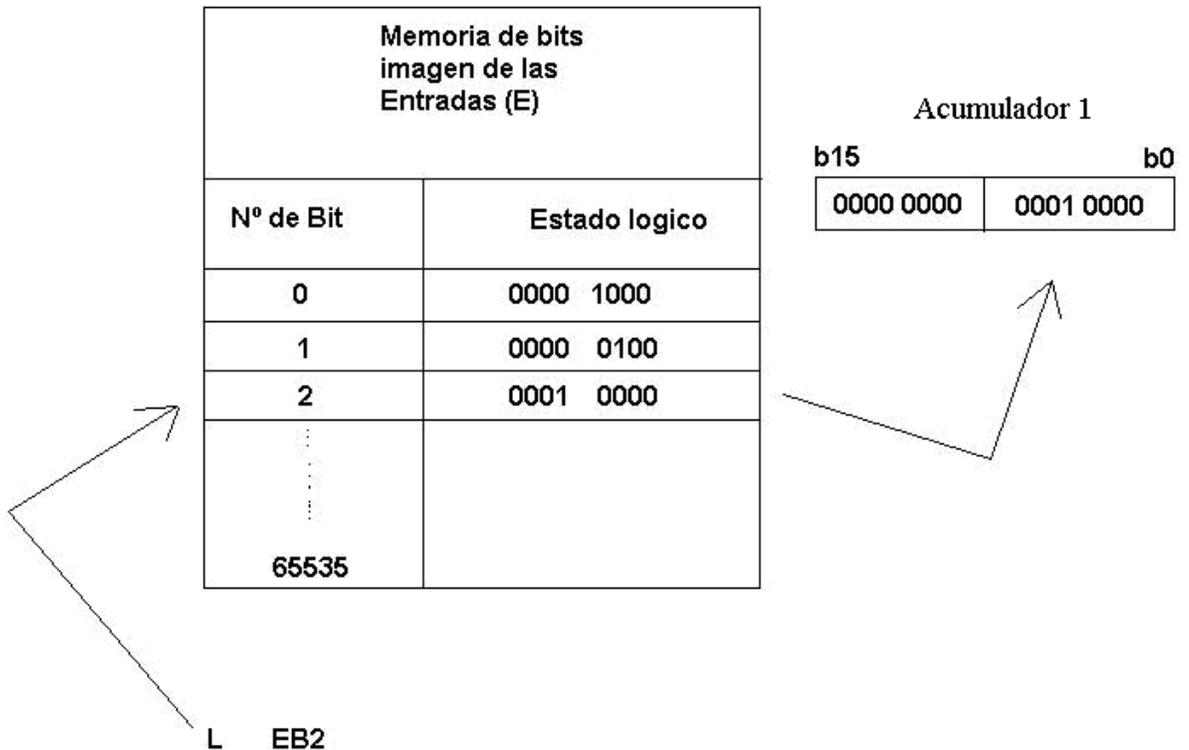


Figura 3.6 Ilustración del ejemplo 3.1

La instrucción L EB2 señala directamente el byte N°2 del área de memoria de imagen de las entradas y transfiere o lee su contenido en el byte bajo de la palabra baja del ACC1. Como se puede apreciar en la figura anterior.

Ejemplo 3.2: Escribir o transferir el contenido del ACC (10000000) en el byte N°1 de la memoria imagen de las salidas. La figura 3.7 muestra que las instrucciones:

L 2#10000000; Cargar el acumulador con el numero binario 10000000

T AB1; Escribir el contenido del acumulador en el byte 1 de la memoria de imagen de salida.

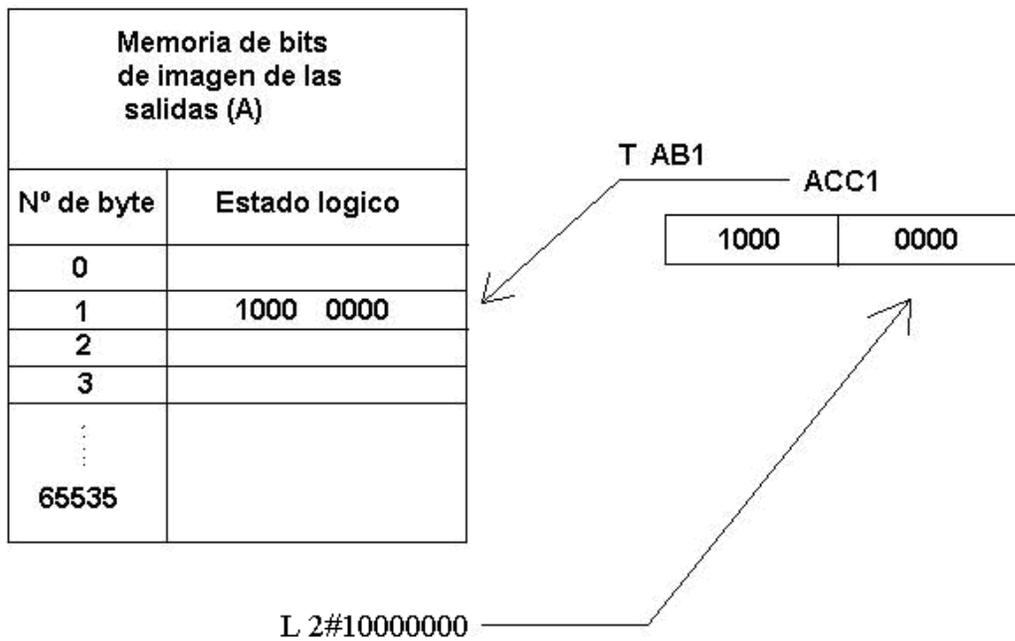


Figura 3.7 Ilustración ejemplo 3.2

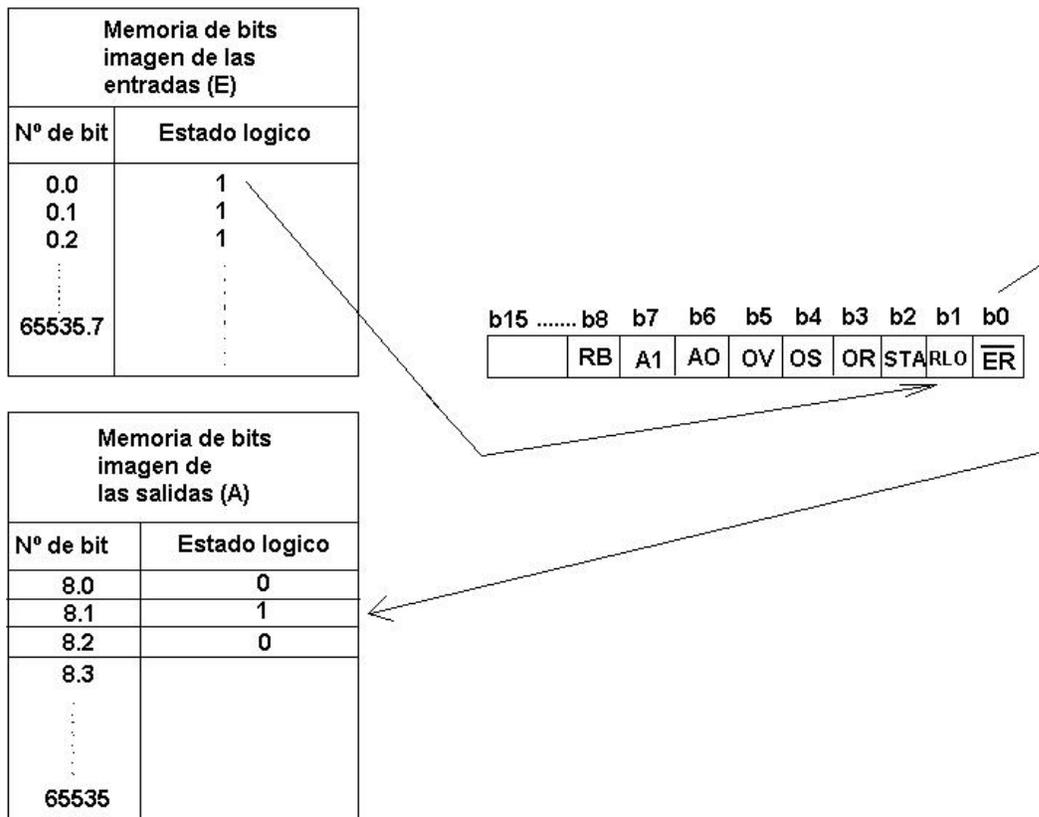


Figura 3.8 Ilustración ejemplo 3.2

La figura 3.8 nos permite ilustrar la secuencia de operaciones que suceden cuando se ejecutan las instrucciones U E 0.0 y = A 8.1.

Como se puede apreciar en la figura las instrucciones:

U E0.0; lee el estado lógico de la entrada 0.0 y se lo asigna al bit RLO de la palabra de estado (bit1) del registro STW (registro de estado).

= A8.1; consulta el estado del bit 1 (RLO) del registro de estado STW y se lo asigna a la dirección de la memoria imagen de las salidas.

3.7.3. Operandos en el direccionamiento indirecto

El operando, siempre, se compone de dos partes:

Un identificador y una dirección, ejemplos de identificador:

E → Para bits de entrada.

AB → Para bytes de salida.

EB → Para bytes de entrada.

AW → Para palabras de salida.

EW → Para palabra de entrada.

ED → Para doble palabra de salida.

L → Para bits de datos locales temporales.

LW → Para palabra de datos locales temporales.

LD → Para palabra doble de datos locales temporales.

M → Para bits de marca.

MB → Para bytes de marca.

MW → Para palabra de marcas.

MD → Para palabra doble de marcas.

DIX → Para bit de datos de módulos de datos de instancia.

DIB → Para byte de datos de módulos de datos de instancia.

DIW → Para palabra de datos de modulo de datos reinstancia.

DID → Para doble palabra de datos de modulo de instancia.

PEB → Para byte de entrada de periferia.

PEW → Para palabra de entrada de periferia.

PED → Para palabra doble de entrada de periferia.

PAB → Para byte de salida de periferia.

PAW → Para byte de salida de periferia.

PAD → Para palabra doble de salida de periferia.

DBX → Para bit de datos de modulo de datos locales.

DBB → Para byte de datos de modulo de datos locales.

DBW → Para palabra de datos de modulo de datos locales.

DBD → Para doble palabra de datos locales.

Ejemplos de identificador más dirección:

	direccion
E	0.0
identificador	
	direccion
AB	8
identificador	
	direccion
AW	30
identificador	
	direccion
EW	28
identificador	

Figura 3.9 ejemplo de identificador mas dirección

Ejemplo de direccionamiento directo:

```
U E 0.0
= M 100.4
BE
```

El programa anterior permite direccionar directamente la memoria de marca 100.4 utilizando direccionamiento directo y asignarle el estado lógico de la entrada cuya dirección es la E 0.0. La grafica siguiente nos permite observar que el estado lógico de la entrada E 0.0 corresponde al contenido de la dirección de la memoria de marca 100.4.



Figura 3.10 Visualización del estado de la memoria de marca en Simatic S7

3.7.4. Direccionamiento indirecto de la memoria

Un direccionamiento indirecto especifica, en el operando, una dirección de memoria efectiva, indicada en corchetes [] donde se encuentra el dato que va a procesar la operación.

En la figura 3.11 se muestra que la dirección del dato a procesar se encuentra en una dirección de memoria especificada en las instrucciones de programa.

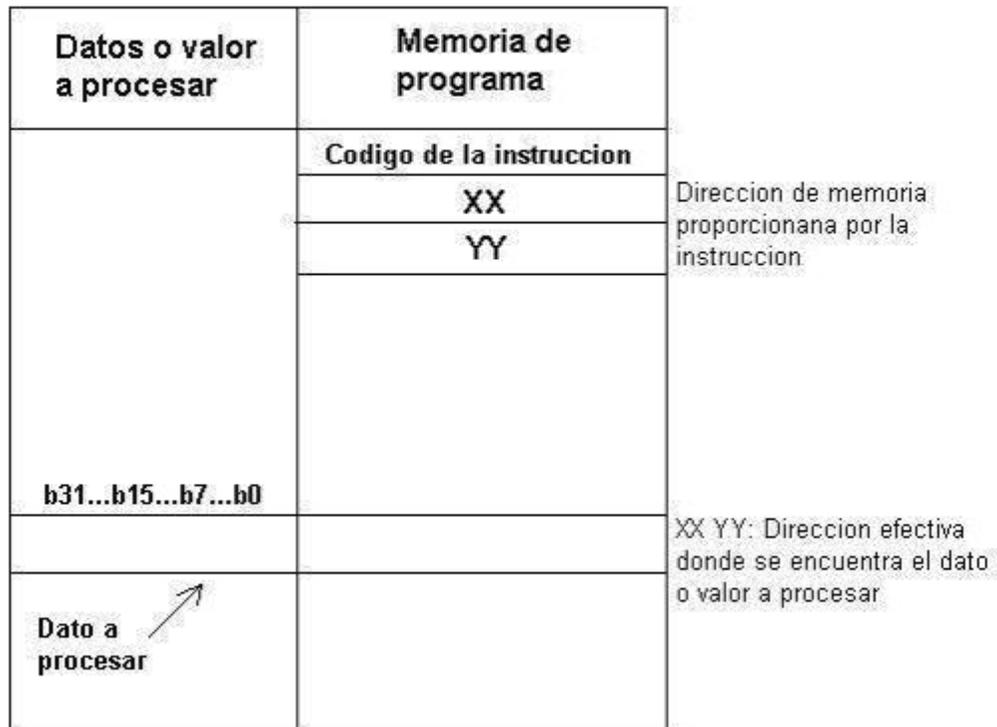


Figura 3.11 Direccionamiento indirecto de la memoria

3.7.4.1. Operandos en el direccionamiento indirecto de la memoria.

En el direccionamiento indirecto de la memoria el operando se compone de las siguientes partes:

- Un identificador (por ejemplo "EB" para byte de entrada).
- Una palabra doble que contiene la dirección exacta de un valor del área de memoria, indicada por el identificador. Esta palabra doble puede encontrarse en una de las siguientes áreas.
- Marca (M).
- Modulo de datos (DB).
- Modulo de datos de instancia (DI).
- Datos locales (L)

Si se trabaja con áreas de memoria de módulos de datos, se debe abrir primero el modulo de datos, utilizando la operación abrir modulo de datos y luego se puede utilizar la palabra de datos y la palabra doble de datos como operando indirecto. Como se muestra en los siguientes ejemplos:

Ejemplo 3.3:

AUF DB10; abrir el modulo de datos global #10.

LEB [DBD20]; cargar en el ACC1 el byte de entrada cuya dirección exacta se encuentra en la palabra doble de datos global 20.

Ejemplo 3.4:

U [MD2]: Leer o ejecutar una operación lógica AND con el bit de entrada cuya dirección se encuentra en la palabra doble de marca 2.

U E [Pedro]: Ejecutar o leer la operación lógica AND con el bit de entrada cuya dirección se encuentra en la dirección denominada Pedro.

AUF DB [LW3]: Abrir el modulo de datos cuyo número se encuentra en la palabra de datos local 3.

En el direccionamiento indirecto se utilizan los mismos identificadores que se utilizan en el direccionamiento directo pero la memoria de datos, de marca; la memoria de datos locales o de instancia; deben ir indicadas por un corchete [], como se indica en los ejemplos arriba descritos.

3.7.4.2. Direccionamiento indirecto de la memoria con doble palabra (DW) de marca.

El puntero o apuntador de memoria es un registro de instrucciones, P#, que contiene el desplazamiento necesario para direccionar la siguiente posición de memoria en el segmento de memoria activo actualmente. El puntero puede ser de 16 o 32 bits, es decir, de una palabra o de una palabra doble. El puntero de formato doble para el direccionamiento de la memoria termina con una D y posee el siguiente formato.

b31	b24	b16 b15	b8 b7	b0
0000 0000	0000 0bb	bbbb bbbb	bbbb bXXX	

Los bits 3 al 18 (bbbb bbbb bbbb bbbb) determinan el numero de byte a direccionar, con 16 bits podemos direccionar desde el byte 0 hasta el byte 65535. Los bits 0 al 2 (XXX) de la figura determinan el numero de bits del byte direccionado.

La potencialidad de este tipo de direccionamiento, direccionamiento indirecto de la memoria, con puntero en formato de doble palabra, radica en la facilidad con la cual se puede tener acceso al estado de cualquier entrada mapeada en la memoria de imagen de las entradas, sin tener en cuenta la posición del modulo a que pertenezcan.

Ejemplo 3.5

El programa siguiente nos permite leer el estado del bit 1 y asignarlo a la salida A 8.0, cambiando, en el mismo programa la dirección con la cual se carga el registro P#, podemos leer el estado de los bits de entrada desde el 0.0 hasta el bit 65535.7.

L P#1.3: Cargar en ACC1 la dirección
 2#0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000_1011

T MD2: Almacena en la dirección 8.0 en la palabra doble de marca 2 un apuntador doble de marca.

U E [MD2]: Lee el bit de la entrada E0.1.

= A8.0: El estado del bit 0 asignarlo a la salida A8.0

La tabla siguiente nos permite ilustrar la forma en que se puede direccionar en forma indirecta con puntero doble de marca un bit de entrada cualquiera en la memoria imagen de entradas.

Tabla 3.10 Direccionamiento indirecto de las memorias de marca con punteros dobles

Apuntador de doble palabra	Memoria de imagen de las entradas					
	Direccionamiento del byte de memoria direccionado				Numero del bit direccionado	Bit de entrada
	b18...b16	b15...b12	b11...b8	b7...b3	b2...b0	
MD1	0000	0000	0000	0000	000	0.0
MD2	0000	0000	0000	0000	001	0.1
MD3	0000	0000	0000	0000	010	0.2
MD4	0000	0000	0000	0000	100	0.3
MD5	0000	0000	0000	0000	101	0.4
MD6	0000	0000	0000	0000	111	0.5
MD7	0000	0000	0000	0000	000	0.6
MD8	0000	0000	0000	0000	001	0.7
MD9	0000	0000	0000	0000	010	1.0
⋮						
MDn	1111	1111	1111	1111	111	65535.7

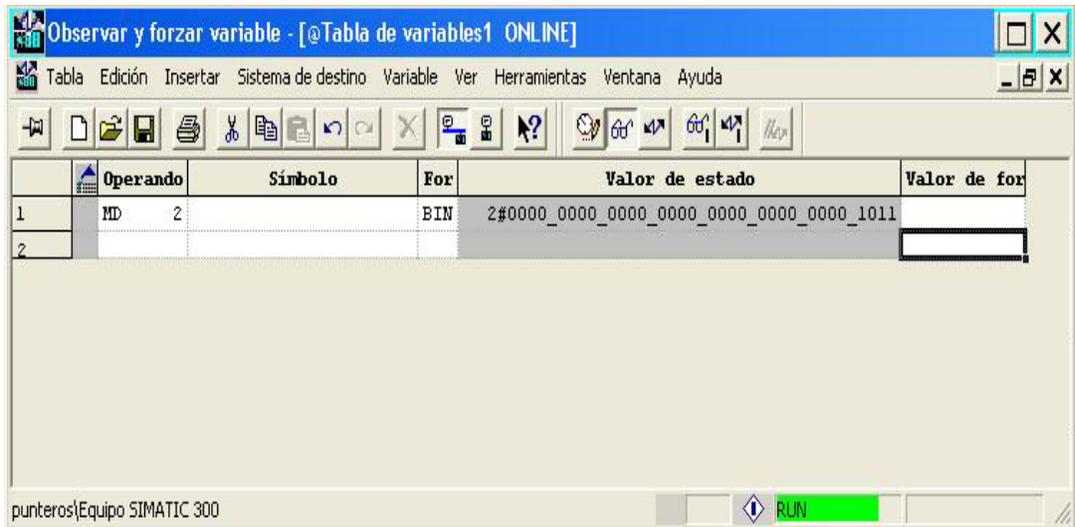


Figura 3.12 Grafica tabla de variables estado interno de la CPU

La grafica 3.12 muestra la tabla de variables que muestra el estado interno de la CPU, una vez ejecutado el ejemplo 3.5, en esta podemos observar el contenido de la palabra doble de marca MD 2, que corresponde exactamente a la dirección E 1.3. Si leemos el contenido de esta dirección de memoria con la instrucción U E [MD2], en el bit de resultado lógico (RLO) del registro de estado, en él queda consignado el contenido de la dirección de memoria E 1.3 como se puede apreciar en la grafica 3.12 (para observar y forzar variables). En esta grafica también se puede observar el estado de cada uno de los bits de la palabra de estado, en ella el bit correspondiente al RLO debe estar en “1” lógico. La instrucción (= A 8.0) transfiere este estado a la dirección de salida A 8.0.

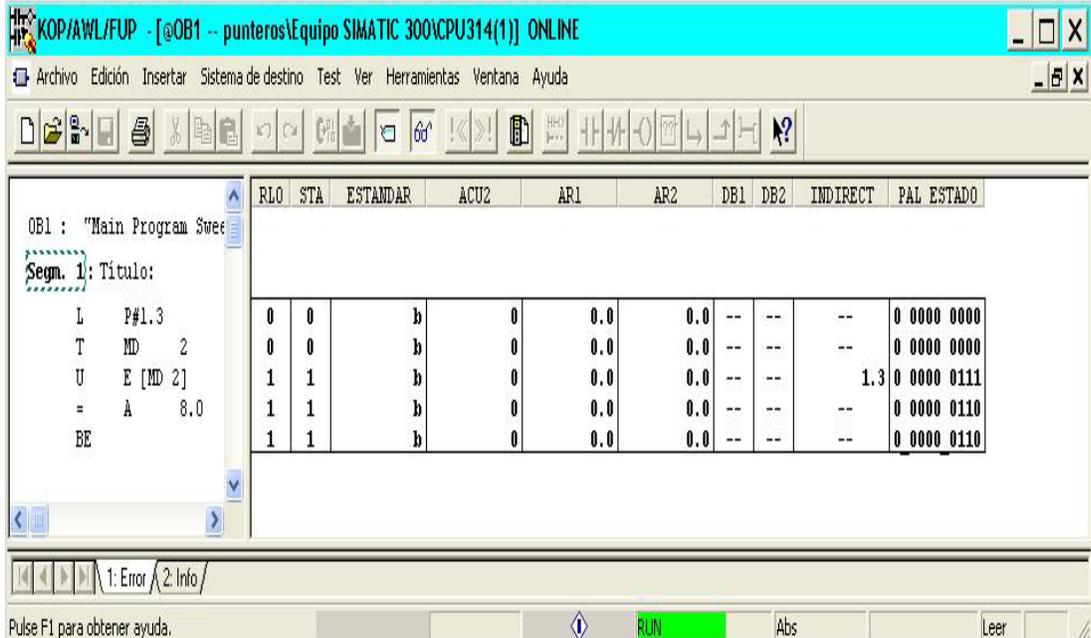
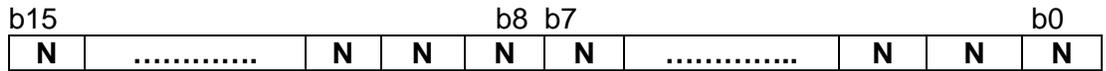


Figura 3.13 Ilustración del ejemplo 3.5

3.7.4.3. Direccionamiento indirecto con palabra de marca

El puntero de marca termina con una W y no utiliza el registro de punteros P#, Este formato tiene la siguiente estructura.



Los bits del 0 al 15 se cargan en una palabra de marca o en una dirección de memoria de 16bits de la memoria de datos DB registro de modulo de datos global).

Ejemplo 3.6

El programa siguiente nos permite abrir, utilizando direccionamiento indirecto el modulo de datos 3.

```
L    +7; cargar el valor entero 7 al ACC1
T    MW3; transferir el contenido del ACC1 a la palabra de marca 3
AUF  DB [mw3]; abrir el modulo de datos 3.
```

Ejemplo 3.7

El programa siguiente nos permite consultar el estado del temporizador 50, cambiando el valor entero cargado en el ACC1 y transferido al modulo de datos DB abierto.

```
AUF  DB11: Abrir el modulo de datos DB11.
L    +50: Cargar el valor 50 como entero en el ACC1
T    DBW20: Transferir el contenido del ACC1 a la palabra de datos 20.
U    T [DBW20]: Consultar el estado del temporizador T50.
```

3.7.4.4. Direccionamiento indirecto utilizando punteros internos de áreas

En este tipo de direccionamiento el operando indica la dirección del dato que va a procesar la operación. El operando se compone de dos partes:

- Un identificador.
- Un registro de direcciones AR1 o AR2.
- Un puntero que se puede mover dentro del área de memoria señalado por uno de los registros de direcciones que además de indicar el byte y el bit direccionado indican el desplazamiento que se debe sumar al contenido del

registro para encontrar la dirección exacta donde se encuentra el dato que va a procesar la operación.

Se puede incluir que el direccionamiento indirecto de la memoria con puntero interno de área de los autómatas, que poseen este tipo de direccionamientos, se comporta como un direccionamiento de tipo indexado, esto es:

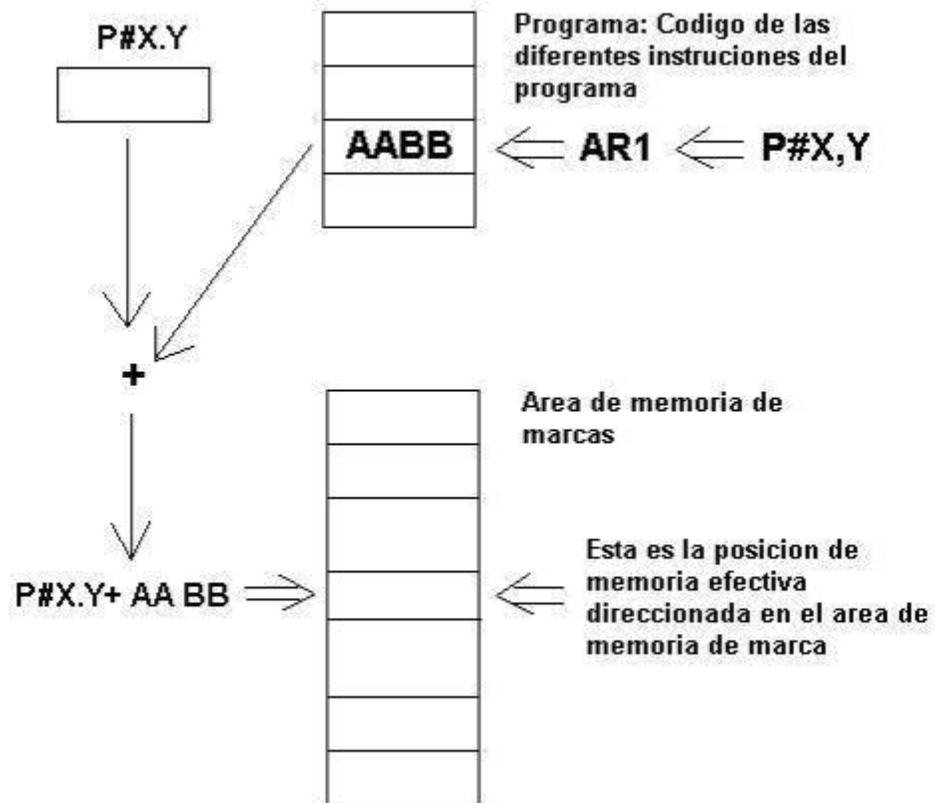


Figura 3.14 Direccionamiento tipo indexado

Como sigue:

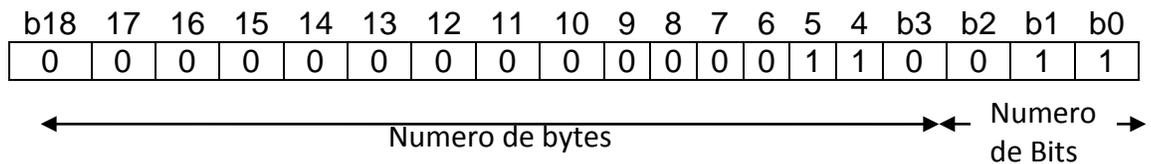
- a. Se carga el puntero de formato doble con una dirección de formato doble, a partir de la cual se desea leer o transferir datos desde la memoria.
- b. Se carga el puntero de formato doble en uno de los registros de área AR1 o AR2, el registro cargado queda con la dirección base a partir de la cual se va a efectuar la transferencia.
- c. Se carga nuevamente el puntero de formato doble (P#), esta vez, con un offset o desplazamiento equivalente al número de posiciones de memoria, a partir de la memoria base, en la que se quiere guardar o transferir el dato.

- d. La posición de memoria efectiva posicionada se obtiene sumando a la dirección de memoria base el contenido, el offset o desplazamiento cargado en el puntero P#.

3.7.4.5. Cálculo de la posición de memoria en el direccionamiento indirecto con puntero interno de área en formato doble

Para ilustrar el cálculo de la posición de memoria utilizaremos el siguiente ejemplo: Leer el estado lógico del bit de entrada E 20.1; utilizando direccionamiento indirecto con puntero interno de área y visualizarlo en la salida A 8.7; una solución podría ser la siguiente:

- a. L P#10.3; Cargar un puntero en formato de palabra doble en la dirección de bit.



- b. LAR2; almacenar el puntero de palabra doble 10.3 en el registro de direcciones AR2.
- c. U E[AR2,#P9.6]; el procesador suma un desplazamiento de 9 bytes más 6 bits al registro de direcciones y utiliza el resultado para obtener una dirección efectiva donde se encuentra el bit de entrada E 20.1; la dirección se calcula en la siguiente forma:

$$AR2\ 10.3 + P\#9.6 = E\ 20.1$$

AR2 10.3 (10 Bytes, 3 Bits) → Contenido del registro de direcciones:

P#9.6 (9 Bytes, 6 Bits) → Desplazamiento

E 20.1 (20Bytes, 1 Bits) → Dirección efectiva (byte de salida)

- d. A =A 8.7; asignar el estado lógico del bit RLO del registro de estado a la salida de estado A 8.7

Nota: Corra el programa anterior y compruebe el estado lógico del bit de entrada E 20.1 en la salida A 8.7

Ejemplo 3.8

Leer en el ACC1 el estado lógico del byte de entrada 30 y guardarlo en la palabra de marca MW280, utilizando direccionamiento indirecto con puntero interno de área tanto para leer su estado como para guardarlo en la palabra de marca MW280

La figura 3.15 muestra la solución grafica del problema

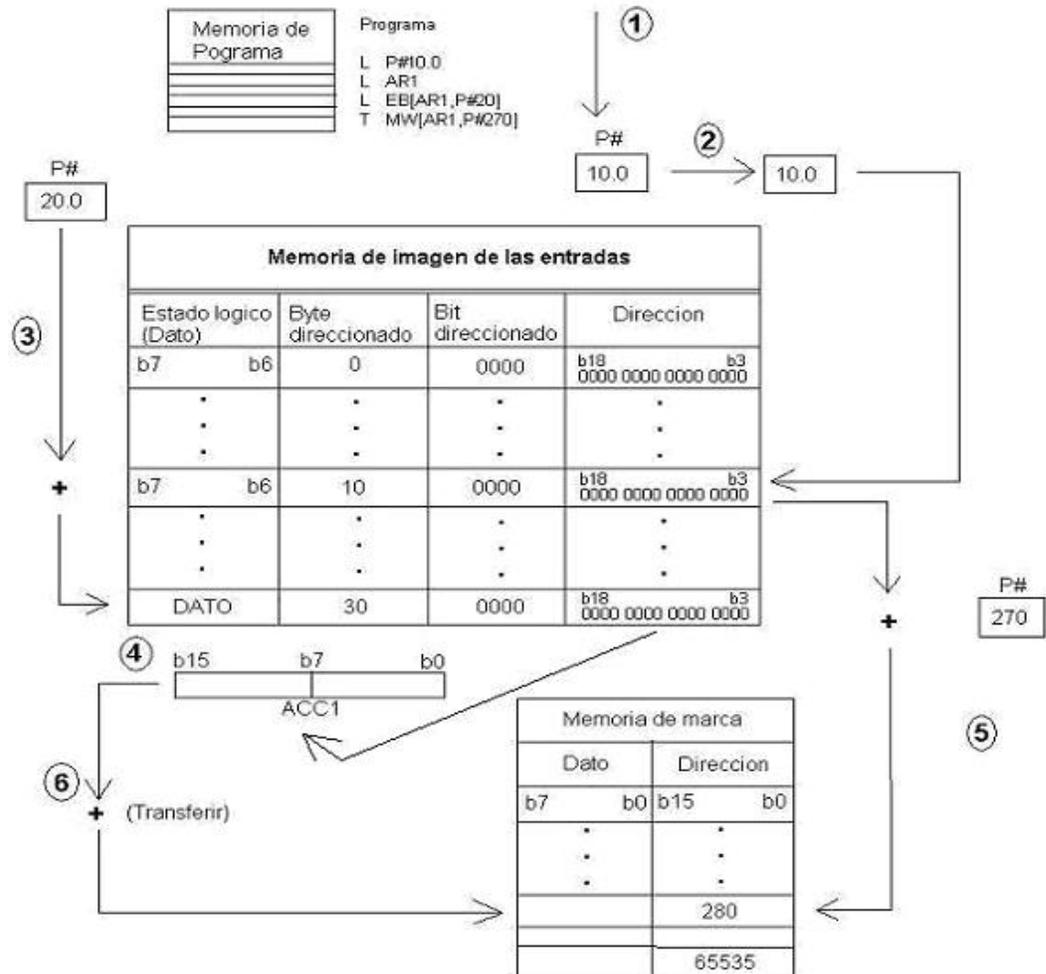


Figura 3.15 Solución grafica ejemplo 3.8

- Se carga el puntero P# con la dirección 10.0.
- Almacena el puntero en formato de doble palabra 10.0 en el registro de área AR1, esto es, AR1 señalada la dirección base $AR \leftarrow 10.0$.
- Para leer el byte 30 del área de memoria imagen de las entradas, basta sumarle a la memoria base (contenido del registro AR1) el puntero P#20.0, como resultado se direcciona el byte 30.

- d. Se lee el contenido del byte 30 en le ACC1
- e. Se le suma el contenido del puntero P#270 a la dirección base 10.0, obteniéndose así la dirección 280 en la memoria de marca.
- f. Se transfiere el contenido del ACC1 A LA DIRECCION 280.
- g. A estas alturas del programa cualquier dirección de memoria a la que se quiera hacer referencia, ya sea para leer su contenido o para transferir o escribir un dato, basta solo, sumar el puntero adecuado a la memoria base.

Ejemplo 3.9

El siguiente programa permite asignar el estado lógico del bit de entrada E 0.0 de la memoria de imagen de entrada de bit y asignarla al bit de salida A 8.0 de la memoria de imagen de salida de bit.

```

L   P#E 0.0           //cargar en el acumulador el puntero de memoria de
entrada

LAR1                    //cargar el registro de área AR1 con el contenido del
acumulador (puntero de memoria de entrada)

L   P#A 0.0           //cargar en el acumulador el puntero de memoria de
salida

LAR2                    //cargar el registro de área AR2 con el contenido del
acumulador (puntero de memoria de Salida)

U   [AR1, P#0.0]      //leer en el bit RLO el contenido de la dirección de
imagen de las entradas

=   [AR2, P#8.0]      //y asignárselo a la memoria de imagen de salida
indicada por la dirección [AR2, P#8.0]

BE

[7]

```

4. REDES DE PETRI

4.1. INTRODUCCIÓN

Las Redes de Petri fueron inventadas por el alemán Karl Adam Petri en 1962. En su tesis doctoral "*kommunikation mit automaten*" (Comunicación con autómatas), establece los fundamentos para el desarrollo teórico de los conceptos básicos de las redes de Petri.

Las redes de Petri son consideradas una herramienta para el estudio de los sistemas. Con su ayuda podemos modelar el comportamiento y la estructura de un sistema, y llevar el modelo a condiciones límite, que en un sistema real son difíciles de lograr o muy costosas.

La teoría de red de Petri ha llegado a ser reconocida como una metodología establecida en la literatura de la robótica para modelar los sistemas de manufactura flexibles.

Comparada con otros modelos de comportamiento dinámico gráficos, como los diagramas de las máquinas de estados finitos, las redes de Petri ofrecen una forma de expresar procesos que requieren sincronía. Y quizás lo más importante es que las redes de Petri pueden ser analizadas de manera formal y obtener información del comportamiento dinámico del sistema modelado.

Para modelar un sistema se usan representaciones matemáticas logrando una abstracción del sistema, esto es logrado con las redes de Petri, que además pueden ser estudiadas como autómatas e investigar sus propiedades matemáticas.

¿Qué tipo de sistemas podemos modelar con las redes de Petri? Y ¿Cómo logramos la analogía entre el sistema real y el modelo usando una red de Petri? son dos de las preguntas a las que debemos atender. Para esto pongamos atención a los sistemas: una idea fundamental en un sistema es que se compone de módulos que interactúan entre sí, los cuales pueden ser considerados por si mismos un sistema, y podríamos estudiar su comportamiento por separado y de esta manera aislarlos, pero siempre teniendo en cuenta la interacción que guardan con los otros módulos.

Ahora deseamos conocer en qué condiciones se encuentran los módulos, es como si detuviéramos al sistema en el tiempo, las condiciones internas de los módulos determinarían el estado en el que se encuentran, para esto entendemos que un

sistema es un arreglo dinámico que en el transcurso del tiempo tiene variaciones y no permanece estático. El estado de un módulo con frecuencia depende de su historia, es decir de las acciones dadas en un tiempo anterior.

Hablemos de dos conceptos importantes: acciones y estados, las acciones nos conducen a un estado determinado del módulo en el tiempo, las acciones de un módulo en un sistema pueden ocurrir simultáneamente con las acciones de otros módulos, dado que ellos interactúan entre sí, es necesario sincronizar los eventos.

Esto puede resultar en que las condiciones de un módulo en el tiempo necesitan como entradas las salidas de otro, el cual necesita más tiempo para generar las salidas, es entonces cuando pensamos en paralelismo y concurrencia. Las redes de Petri fueron diseñadas específicamente para modelar este tipo de sistemas.

Tomemos dos conceptos más: eventos y condiciones, los eventos son las acciones que se dan en el sistema y nos llevan a un estado, podemos describir un estado como un conjunto de condiciones. Es útil, para nuestro caso, representar dichas condiciones por medio de predicados.

Para que cierto evento ocurra es necesario que ciertas condiciones se cumplan, estas son llamadas pre-condiciones del evento, la ocurrencia del evento nos puede llevar a otras condiciones y es entonces cuando se dan las post-condiciones.

Para modelar un sistema en una red de Petri debemos reconocer las condiciones y los eventos que se dan en él, de esta manera podemos hacer la analogía entre el sistema y el modelo, al conocer las condiciones que se necesitan para dar cierto evento podemos diseñar los módulos y relacionarlos con otras condiciones, y para esto necesitamos saber la estructura de una RP para saber que corresponde a una condición y un evento en la red.

4.2. ESTRUCTURA DE UNA RED DE PETRI

Se diseñaron para modelar sistemas con componentes concurrentes interactuantes o asíncronos. Petri las usa para describir las relaciones causales entre eventos.

Aplicar las redes de Petri al diseño y análisis de sistemas puede hacerse de dos formas:

- a. Se usan técnicas convencionales para especificar un sistema. Luego se modela como red de Petri y se analiza y corrige de ser necesario.
Requiere técnicas para transformar la especificación a red de Petri y para "ejecutar" el modelo.
- b. En el análisis se crea un modulo en red de Petri que se analiza y revisa. Luego el problema es transformarlo en un sistema real de trabajo. Requiere un implementador para transformar la red de Petri en sistema o software.

Ambos enfoques requieren técnicas de análisis para determinar las propiedades de redes de Petri.

Una RP tiene cuatro partes (P, T, I, O)

- $P \rightarrow$ Conjunto de sitios (places) (condiciones).
- $T \rightarrow$ Conjunto de transiciones (acciones), tales que P y T sean ajenos.
- $I \rightarrow$ Función de entrada, conjunto de sitios de entrada de la transición $I: T \rightarrow P_\alpha$
- $O \rightarrow$ Función de salida, conjunto de sitios de salida de la transición $O: T \rightarrow P_\alpha$

Ejemplo 4.1:

$C = (P, T, I, O)$

$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6\} \rightarrow$ Conjunto de sitios de la red.

$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\} \rightarrow$ Conjunto de transiciones de la red.

Funciones de entrada-salida de la red:

- Transición t_1
 - Función de entrada.
 $I(t_1) = \{P_2, P_3\}$ Conjunto de sitios de entrada de la transición.
 - Función de salida.
 $O(t_1) = \{P_5, P_6\}$ Conjunto de sitios de salida de la transición.
- Transición t_2
 - Función de entrada.
 $I(t_2) = \{P_4\}$ Conjunto de sitios de entrada de la transición.
 - Función de salida.
 $O(t_2) = \{P_3\}$ Conjunto de sitios de salida de la transición.
- Transición t_3
 - Función de entrada
 $I(t_3) = \{P_1, P_2\}$ Conjunto de sitios de entrada de la transición.

- Función de salida

$O(t_3) = \{P_2\}$ Conjunto de sitios de salida de la transición.

- Transición t_4

- Función de entrada

$I(t_4) = \{P_5, P_3\}$ Conjunto de sitios de entrada de la transición.

- Función de salida.

$O(t_4) = \{P_2, P_3\}$ Conjunto de sitios de salida de la transición.

- Transición t_5

- Función de entrada.

$I(t_5) = \{P_6\}$ Conjunto de sitios de entrada de la transición.

- Función de salida

$O(t_5) = \{P_4, P_5, P_6\}$ Conjunto de sitios de salida de la transición.

Una RP es una multigráfica bipartida dirigida.

- Múltiple: permite arcos múltiples de un nodo a otro.
- Dirigida: Arcos dirigidos.
- Bipartida: Los nodos son de dos tipos (sitios y transiciones) y cada arco se dirige de uno al otro.

Para dibujar una red de Petri se usa la siguiente notación:

- Para los sitios 
- Para las transiciones 
- Los sitios y transiciones se conectan por arcos 

La grafica de la red de Petri anterior es:

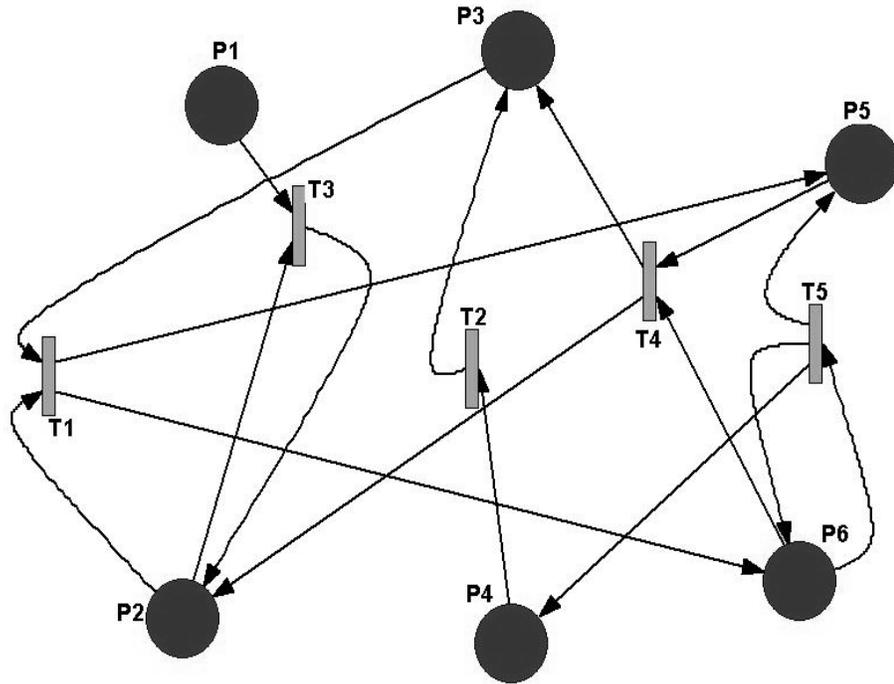


Figura 4.1: Diseño de la Red de Petri descrita en el ejemplo 4.1.

Una red de Petri se puede representar fácilmente por medio de dos matrices, la llamada *matriz de incidencia previa* y *matriz de incidencia posterior*.

$A(P_i, t_j)$ Es la función de incidencia previa. Existe un arco que va del sitio P_i a la transición t_j si $A(P_i, t_j)$ es diferente de cero. Los valores de $A(P_i, t_j)$ son números enteros e indican el peso del arco.

Tomando el ejemplo 4.1 tenemos:

$A(P_3, t_1) = 1$, existe un arco orientado del sitio P_3 a la transición t_1 .

$A(P_5, t_2) = 0$, no existen arcos orientados de P_5 a t_2 .

$B(t_j, P_i)$ Es la función de incidencia posterior, existe un arco que va de la transición t_j al sitio P_i si $B(t_j, P_i)$ es diferente de cero. Los valores de $B(t_j, P_i)$ Son números enteros e indican el peso del arco.

Tomando el ejemplo 4.1 tenemos:

$B(t_3, P_2) = 1$, existe un arco orientado de la transición t_3 al sitio P_2 .

$B(t_4, P_1) = 0$, no existen arcos orientados de la transición t_4 al sitio P_1 .

Sea $|P| = n$, ó numero de sitios de la red de Petri. Sea $|t| = m$, o numero de transiciones de la red de Petri.

- IPR es la matriz de incidencia previa de dimensiones $n \times m$.
- IPO es la matriz de incidencia posterior de dimensiones $n \times m$.

Para la red anterior tenemos:

- IPR : matriz de incidencia previa de dimensiones 6×5

$$\begin{array}{c}
 P_1 \\
 P_2 \\
 P_3 \\
 P_4 \\
 P_5 \\
 P_6
 \end{array}
 \begin{array}{ccccc}
 t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 \\
 \left[\begin{array}{ccccc}
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

- IPO : matriz de incidencia posterior de dimensiones 6×5

$$\begin{array}{c}
 P_1 \\
 P_2 \\
 P_3 \\
 P_4 \\
 P_5 \\
 P_6
 \end{array}
 \begin{array}{ccccc}
 t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 \\
 \left[\begin{array}{ccccc}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Las estructuras básicas disponibles para el modelado de sistemas de eventos discretos son:

4.2.1. Secuencia

Una acción es seguida de otra. Adecuada para modelar maquinas y submáquinas secuenciales.



Figura 4.2: Red de Petri secuencial.

4.2.2. Conflicto

Modela el caso en que a partir de un estado el sistema pueda ejecutar uno u otro proceso según las transiciones cuya receptividad sea cierta. Si hay más de una transición con la receptividad cierta se produce un conflicto.

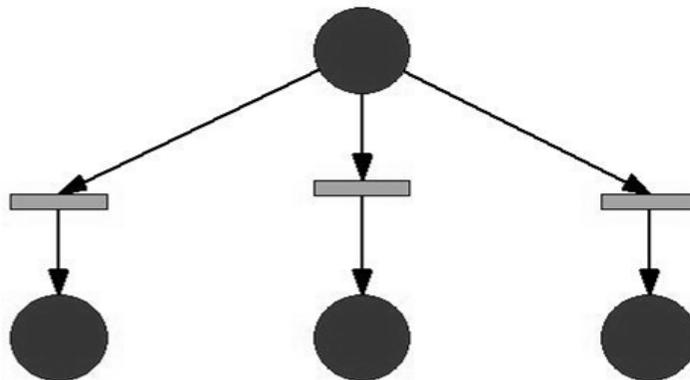


Figura 4.3: Red de Petri en conflicto.

4.2.3. Sincronización

Modela el caso de sincronización entre dos o más procesos que se ejecutan en paralelo.

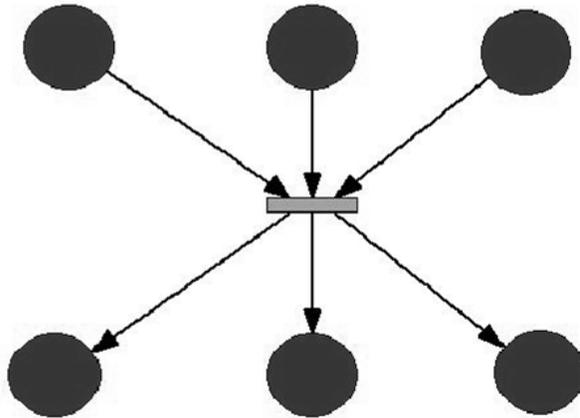


Figura 4.4: Ejemplo de una red de Petri sincronizada.

4.2.4. Atribución

Esta estructura se da después de una elección cuando terminan las posibles alternativas y el sistema continúa en un solo proceso.

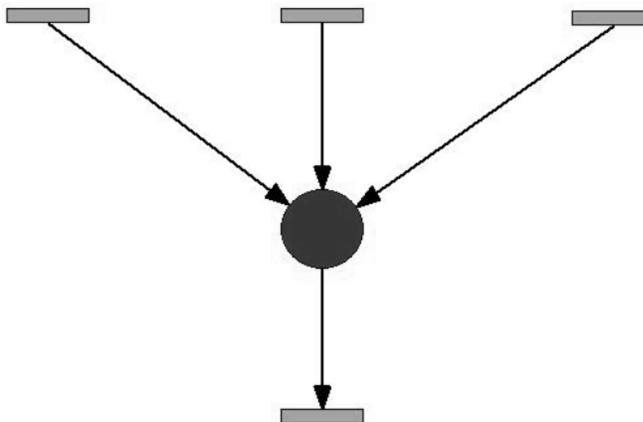


Figura 4.5: Esquema donde se presenta un caso de atribución en una red de Petri.

4.3. CLASES DE REDES DE PETRI.

4.3.1. Redes de Petri ordinarias.

En las redes de Petri ordinarias, las funciones de incidencia solo pueden tomar los valores 0 y 1.

Subclases de redes de Petri ordinarias:

4.3.1.1. Grafo de estados.

Toda transición de la red tiene un sitio de entrada y uno de salida. Consecuentemente un grafo de estados no posee sincronizaciones.

Un grafo de estados binario permite modelar los sistemas secuenciales pero no puede modelar los sistemas concurrentes, es decir no modela los sistemas que presentan evoluciones paralelas. Un grafo de estados modela sistemas con número de estados finitos.

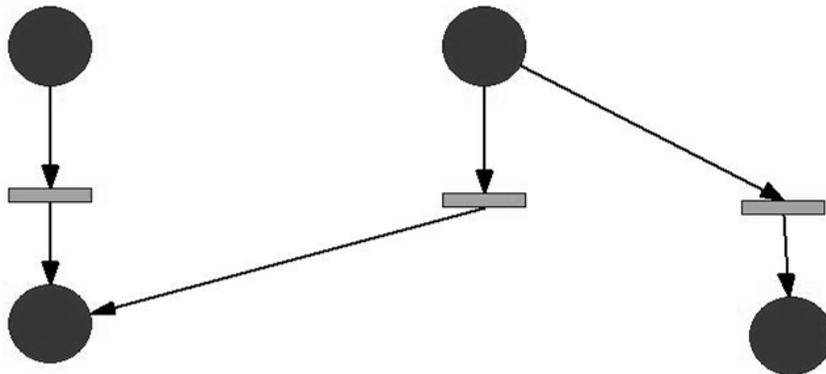


Figura 4.6: Grafo de estados de una red de Petri.

4.3.1.2. Grafo marcado.

Para todo sitio de la red de Petri tiene como máximo una transición de entrada y una transición de salida. En los grafos de marcado no se permiten nudos cero.

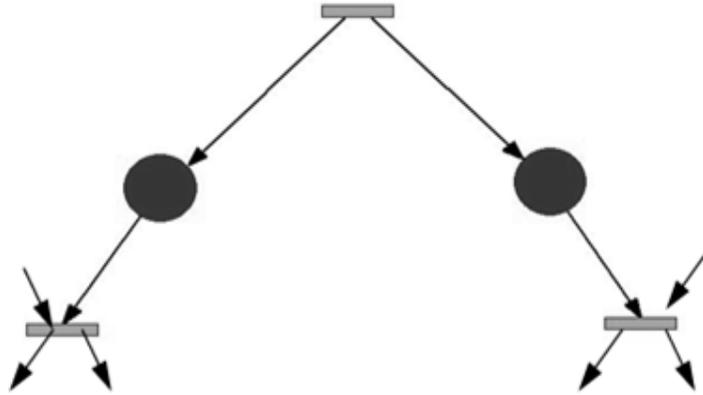


Figura 4.7: Grafo marcado de una red de Petri.

4.3.2. Red de Petri de libre elección.

Si dos transiciones tienen un sitio P de entrada en común, P será el único lugar de entrada P en común, P será el único lugar de entrada de la transición t_i y t_j .

En las redes de Petri de libre elección no existen conflictos.

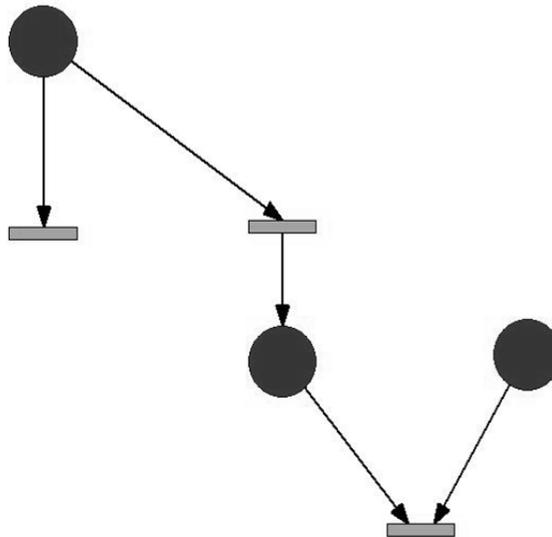


Figura 4.8: Red de Petri de libre elección.

4.3.3. Red de Petri simple.

En una red de Petri simple toda transición tiene como máximo un lugar de entrada compartido con otras transiciones.

Muchos sistemas se pueden modelar mediante redes de Petri simples, por ejemplo, un recurso compartido entre dos o más usuarios.

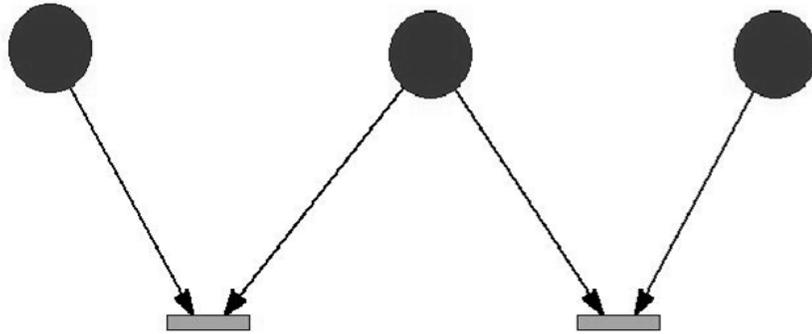


Figura 4.9: Red de Petri simple.

4.3.4. Red de Petri binaria.

Es aquella en la que el marcado de los lugares es menor o igual a 1.

4.3.5. Red de Petri generalizada.

Las funciones de incidencia pueden tomar valores en todos los números naturales. Los arcos tienen peso.

4.3.6. Redes de Petri con capacidad limitada.

Debemos tener en cuenta que los lugares pueden tener una capacidad limitada (un palet puede contener tantos objetos, un almacén tiene la capacidad limitada...). Para modelar estos sistemas existen las llamadas redes de Petri con lugares de capacidad limitada.

4.3.7. Redes de Petri con arcos inhibidores.

Todos los sistemas no se pueden modelar mediante redes de Petri convencionales. Por ejemplo, en un cruce llegan los trenes por los lados A y B, teniendo preferencia los del lado A, obviamente solo podremos dar permiso a los trenes que llegan por B si no hay ningún tren esperando en A, para lo cual tendríamos que detectar la ausencia de marcas del lugar que modela el número de trenes que están esperando para cruzar en el lado A. Pero en las redes de Petri convencionales no se podría modelar esta condición, las redes con arcos inhibidores permitirán simular este tipo de sistemas. Para remediar esto se utilizan

los llamados arcos inhibidores que impiden la activación de una transición si el lugar con que la une esta marcado. Los arcos inhibidores se representan mediante una línea y un círculo.

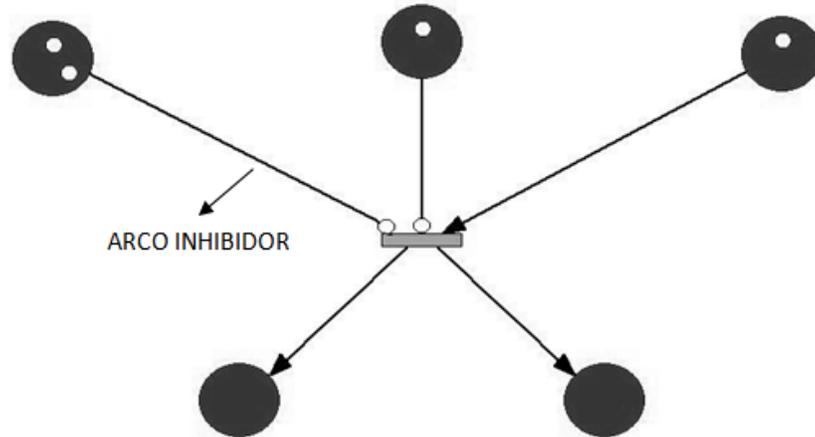


Figura 4.10: Ejemplo de una red de Petri con arcos inhibidores.

4.4. MARCAJE EN UNA RED DE PETRI.

Marcar significa asignar marcas (tokens) a los sitios de una red de Petri. El número y posición de las marcas van cambiando durante la ejecución de las marcas.

4.5. REGLAS DE EJECUCIÓN DE UNA RED DE PETRI.

- La ejecución se controla por el número y distribución de las marcas.
- Las marcas residen en los sitios y controlan la ejecución de las transiciones.
- Una transición se “dispara” al remover las marcas de los sitios de entrada y crear marcas distribuyéndolas en sus sitios de salidas.
- Si cada sitio de entrada de una transición están marcados, se le llama transición habilitada.
- El estado de una red de Petri se define por su marcaje.
- Si hay n sitios, el espacio de estados es el conjunto de todos los marcajes N^n .

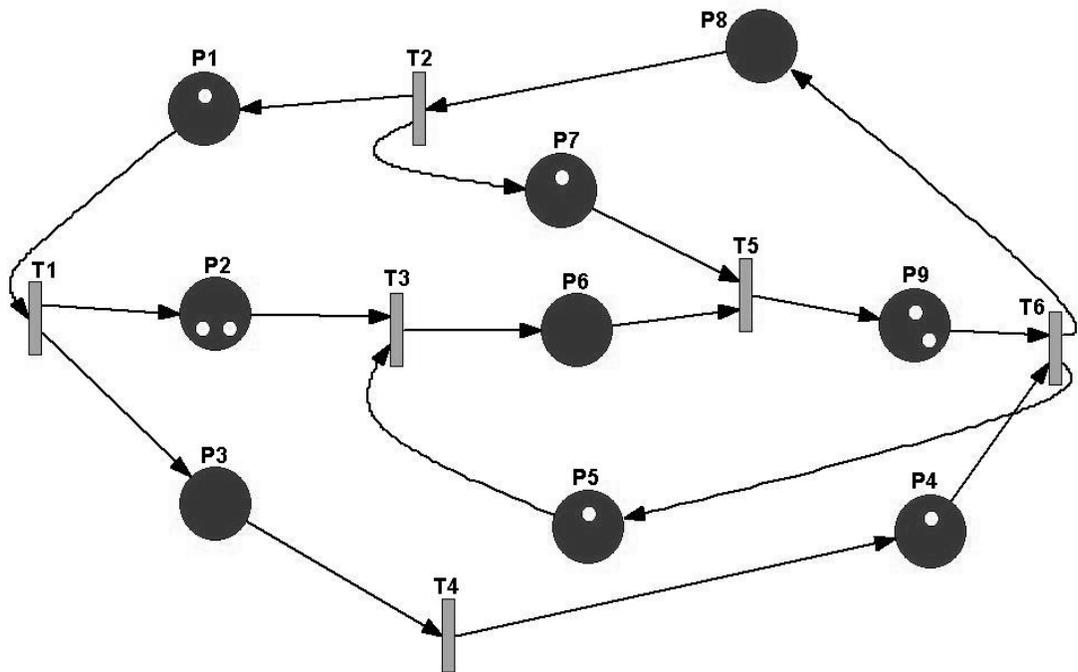


Figura 4.11: Ejemplo de una RP para aplicar las reglas de ejecución.

En esta grafica las transiciones habilitadas son: t_1, t_3, t_5 .

Si se activa t_3 se pasa una marca de P_2 a P_6 , lo que ocasiona que se active t_5 .

4.6. MODELADO CON RED DE PETRI.

Muchos sistemas como los que tienen componentes independientes pueden modelarse con una RP, considerando la ocurrencia de diversos eventos y actividades como flujo de información u otros recursos.

4.6.1. Conceptos para el modelo:

Para hacer el modelado se requiere de identificación de los siguientes elementos:

Eventos: acciones que tienen lugar en el sistema, las cuales se modelan por transiciones.

Un conjunto de condiciones, modelados por los sitios, proporcionan el estado de un sistema. Con las marcas se modela la forma en que van volviéndose verdaderas las condiciones. Para que ocurra un evento, se requiere que las condiciones de entrada a las transiciones sean ciertas todas.

4.7. PROCESOS CONCURRENTES O DE RECURSOS COMPARTIDOS.

Sin duda el modelo de un sistema de eventos discretos donde se comparten recursos o concurrencia es uno de los elementos más importantes de las redes de Petri. Dos vehículos que comparten una sola trayectoria, un brazo robot que alimenta de piezas una máquina, y de la salida de esta a otra máquina. Si está disponible para una máquina no podrá estar disponible para la otra, aunque la idea es trivial su verificación no siempre lo es. Observemos la figura 4.12:

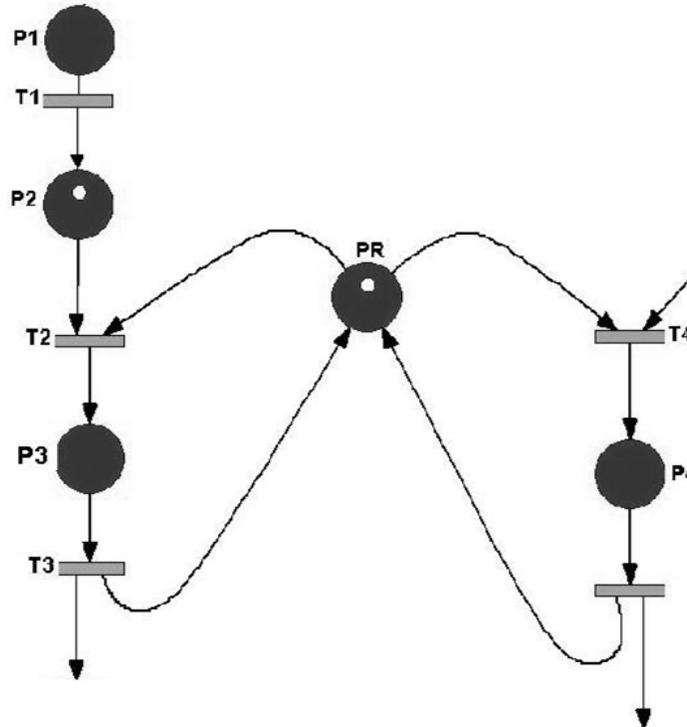


Figura 4.12: Aplicación de un recurso compartido en una red de Petri que representa una máquina de taladrado y un brazo robotizado que trabajan en conjunto.

Para completar la realización de la actividad P_1 es necesario ejecutar una operación que requiere recurso disponible r , representado por el lugar PR de la figura 4.12. El lugar PR marcado corresponde al estado del recurso disponible. La transición t_2 toma el recurso disponible e inicia la fase P_3 .

Para modelar el proceso es necesario introducir, después de la transición t_1 , asociado con la actividad P_1 un lugar de espera (P_2), hasta que el recurso compartido se encuentre disponible, si lo está, termina la operación de lo contrario sigue en espera hasta que este se libere, una vez liberado se apodera del recurso, termina la operación pero tiene obligación de liberarlo para que se ejecute la actividad P_4 .

[7]

5. IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo mostraremos las diferentes simulaciones que se hicieron para poder llevar a cabo el proceso de taladrado completo, las simulaciones se hicieron por separado, es decir, simulamos el brazo robot aparte del sistema de taladrado. El sistema completo se integra con una herramienta de programación llamada Redes de Petri, la cual nos permite observar la simulación del funcionamiento en conjunto del sistema de taladrado y el brazo robotizado.

En las simulaciones utilizamos diferentes tipos de programas, tales como el AUTOMATION ESTUDIO 5.0 ®, SIMATIC S7 (GRAFSET) SIEMENS ®.

5.1. Implementación del brazo robot en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®

A continuación se observará la implementación del brazo robot en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®

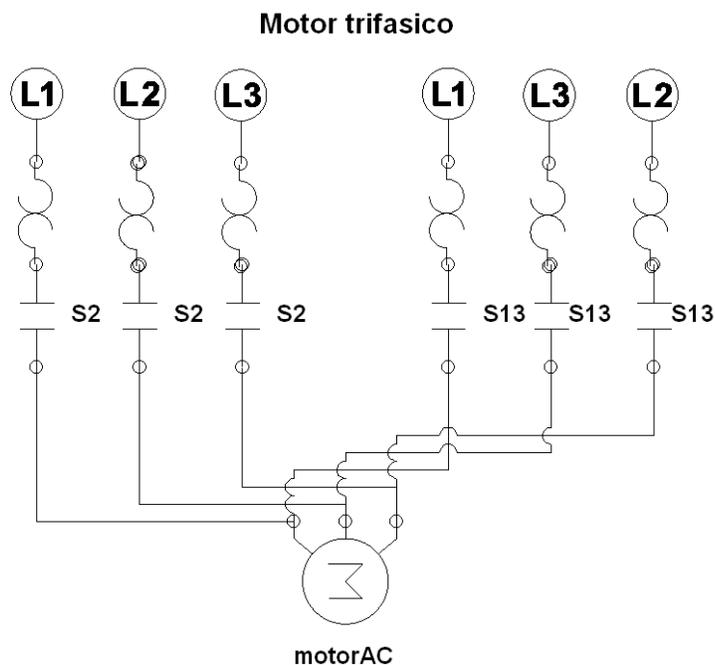


Figura 5.1 Representación del control de giro del motor AC en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®

En la figura 5.1 podemos observar la representación esquemática del control de giro del motor de la base del manipulador. La velocidad del motor es controlada por un variador de velocidad que no puede ser representado en este simulador, así que omitiremos esta parte del control.

Parte hidráulica del brazo

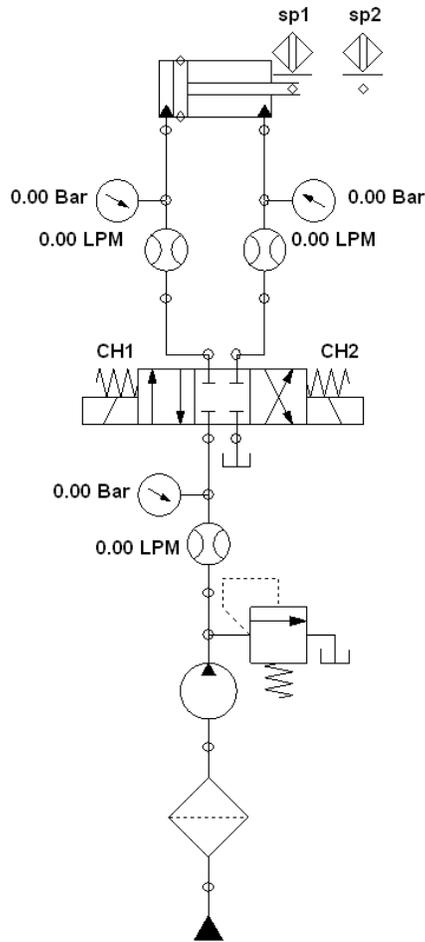


Figura 5.2 Representación de la parte hidráulica del manipulador en AUTOMATION STUDIO 5.0®

En la figura 5.2 podemos observar la representación esquemática de la parte hidráulica del manipulador. Esta parte hidráulica posee dos sensores CNY70 (SP1 y SP2) uno al principio de carrera del embolo y el otro en el lugar de paro para empezar a funcionar la parte neumática.

Esta parte hidráulica está constituida por:

- Tanque.
- Filtro.
- Motobomba unidireccional.
- Válvula de alivio.
- Electroválvula hidráulica de tres posiciones y cinco vías, controlado por dos solenoides.
- Manómetros.

- Caudalímetros.
- Cilindro hidráulico de doble efecto.

Parte neumática del brazo

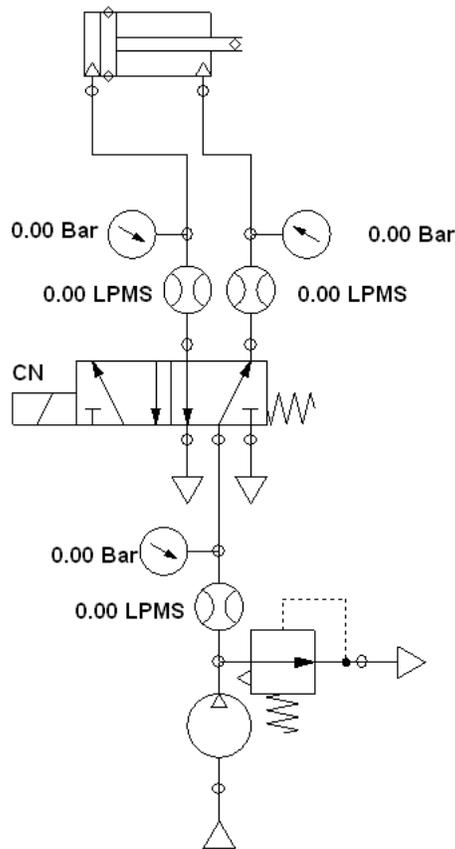


Figura 5.3 Representación de la parte neumática del manipulador en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®

En la figura 5.3 podemos observar la representación esquemática de la parte neumática del manipulador. El cilindro neumático lleva a la ventosa al buffer de salida para sujetar la pieza y la transporta al almacén de piezas procesadas.

Esta parte neumática posee:

- Compresor de aire.
- Motobomba.
- Válvula de seguridad.
- Electroválvula neumática de dos posiciones y cuatro vías, controlado por un solenoide y muelle de recuperación.
- Manómetros.
- Caudalímetros.

- Cilindro neumático de doble efecto.

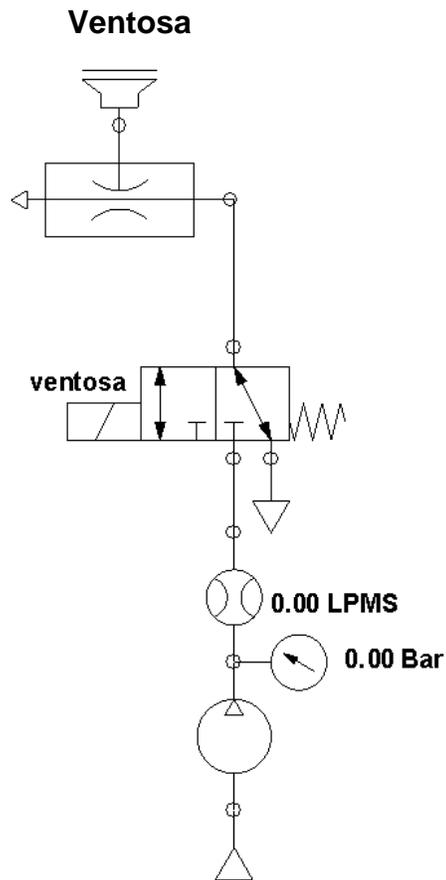


Figura 5.4 Representación de la ventosa del manipulador en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®

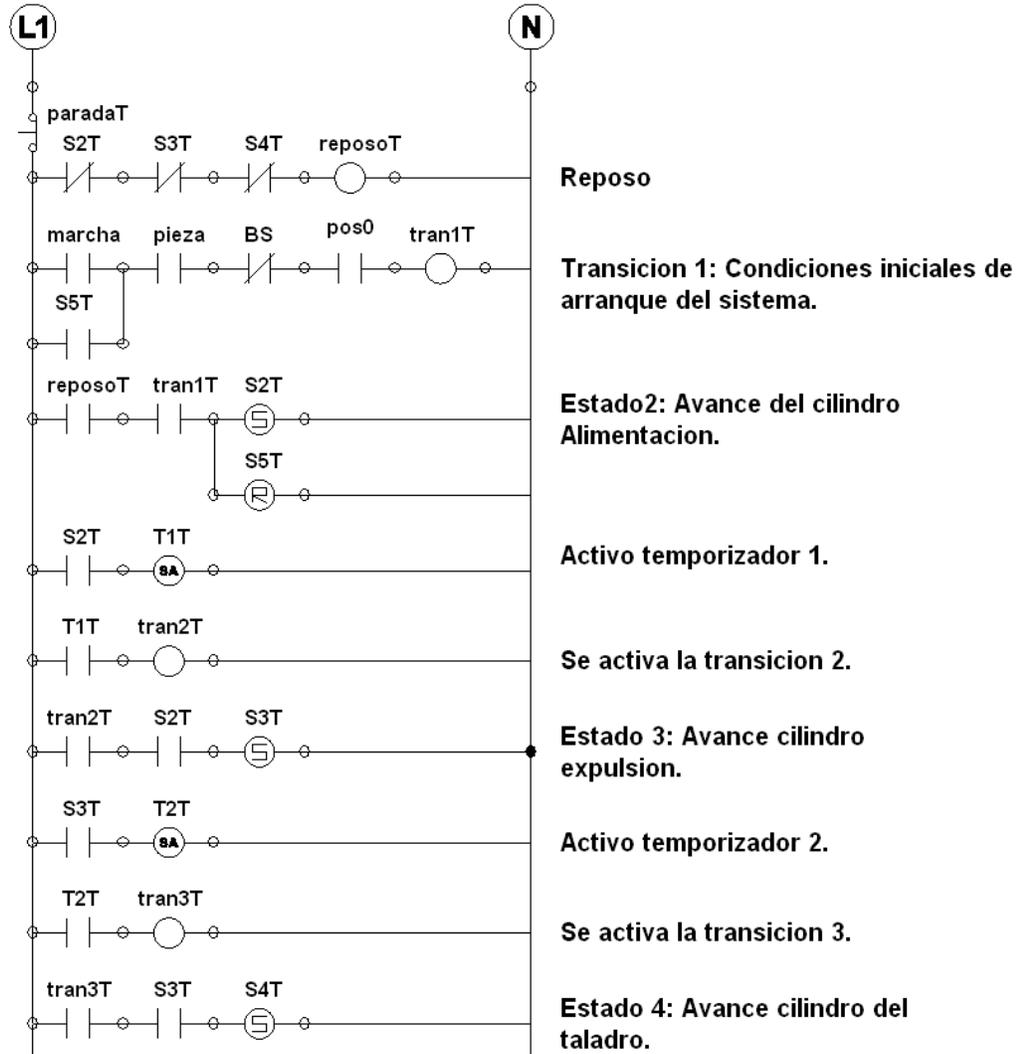
En la figura 5.4 podemos observar la representación esquemática de la ventosa del manipulador. La ventosa es la encargada de sujetar la pieza.

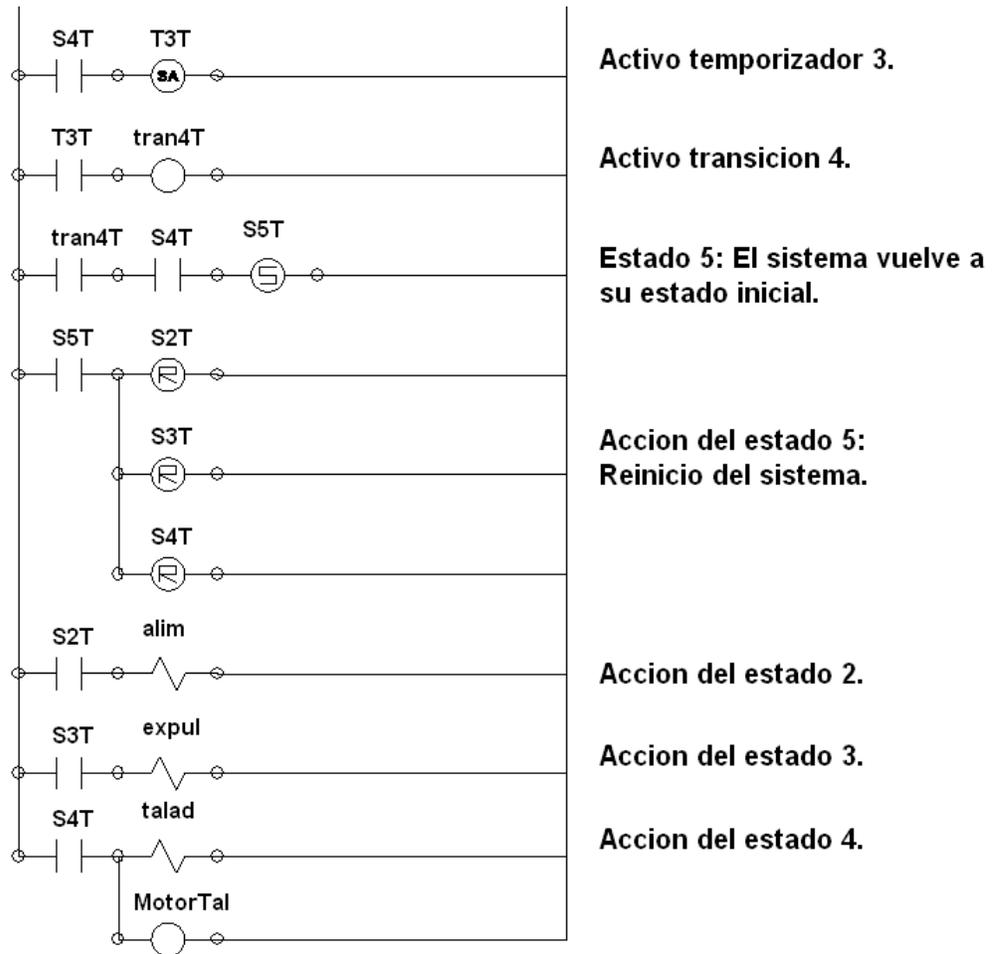
La ventosa posee:

- Compresor de aire.
- Motobomba.
- Electroválvula neumática de 1 vía y dos posiciones, controlado por un solenoide y muelle de recuperación.
- Manómetros.
- Caudalímetros.
- Ventosa.
- Generador de vacío.

5.1.1. Programa máquina de taladrar en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®

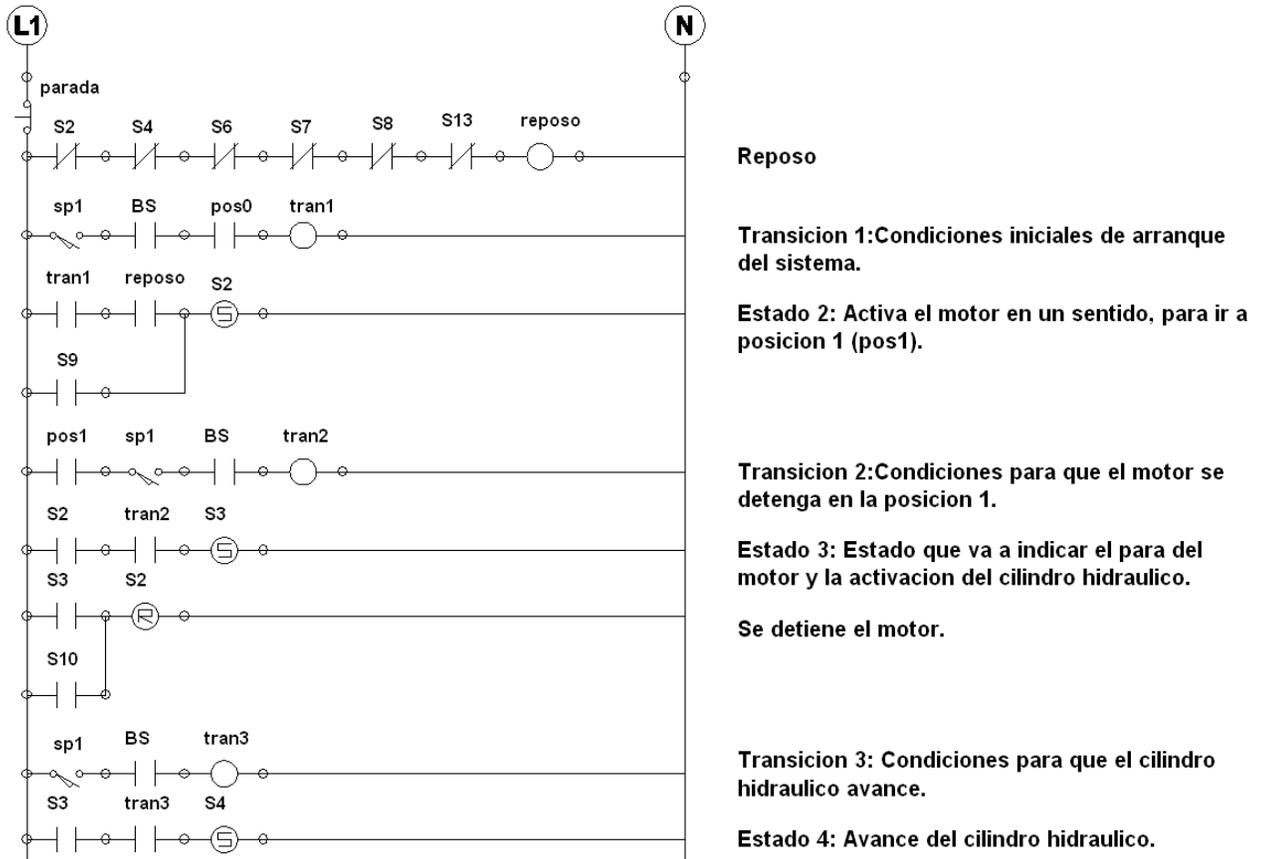
PROGRAMA MAQUINA DE TALADRAR





5.1.2. Programa del manipulador en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®

PROGRAMA DEL MANIPULADOR



Reposo

Transicion 1: Condiciones iniciales de arranque del sistema.

Estado 2: Activa el motor en un sentido, para ir a posicion 1 (pos1).

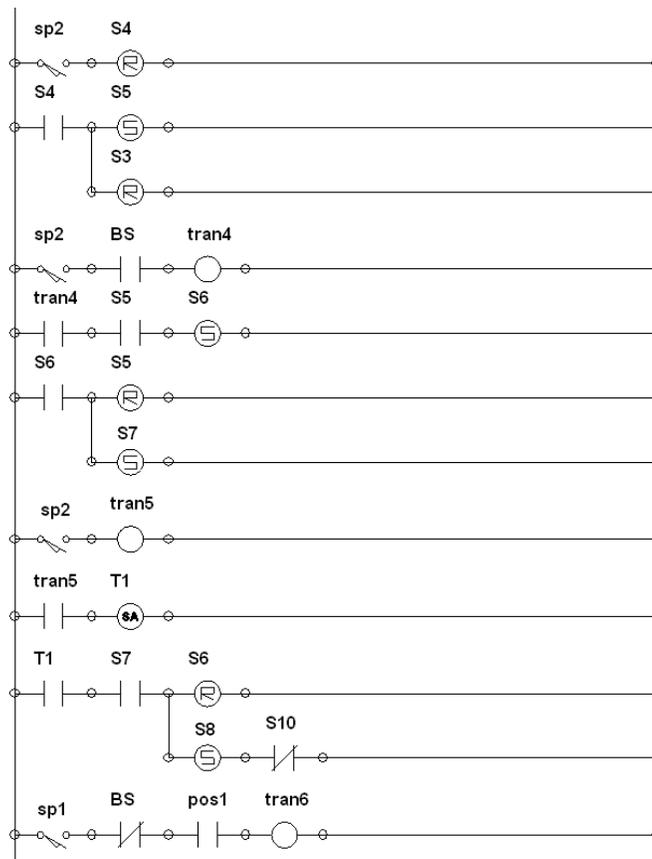
Transicion 2: Condiciones para que el motor se detenga en la posicion 1.

Estado 3: Estado que va a indicar el para del motor y la activacion del cilindro hidraulico.

Se detiene el motor.

Transicion 3: Condiciones para que el cilindro hidraulico avance.

Estado 4: Avance del cilindro hidraulico.



Se detiene el cilindro hidraulico.

Activo estado 5.

Transicion 4: Condiciones para que el cilindro neumatico avance.

Estado 6: Avance del cilindro neumatico.

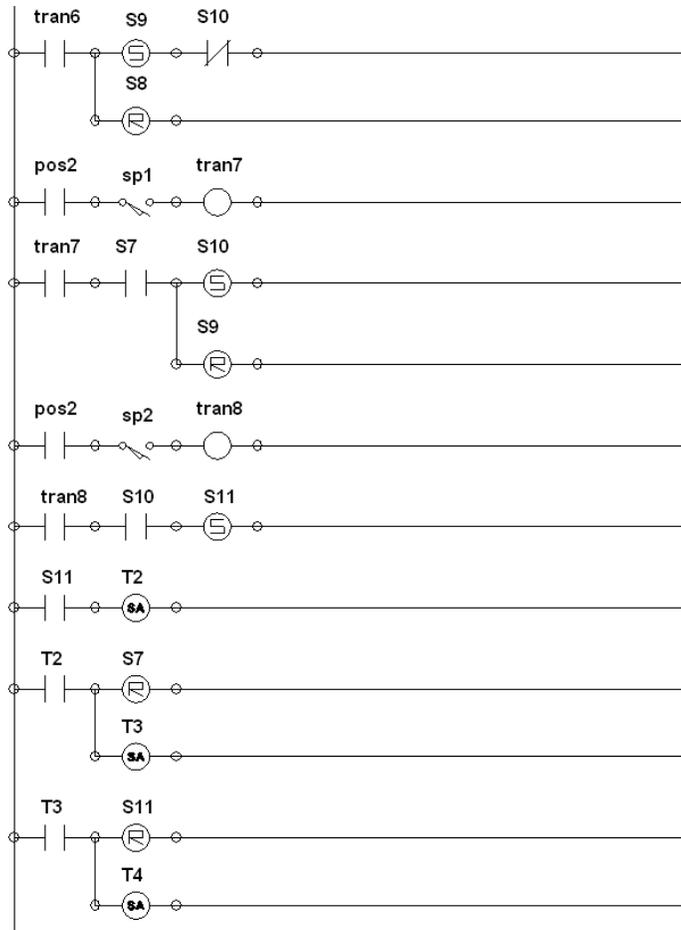
Estado 7: Activo la ventosa.

Transicion 5: Condiciones para activar un temporizador T1.

Temporizador T1: Define un tiempo necesario para que el brazo suete la pieza.

Estado 8: El cilindro hidraulico y el neumatico regresan a su estado inicial, quedando la ventosa activada sujetando la pieza.

Transicion 6: Condiciones para activar el motor.



Estado 9: Activo el motor en un sentido, de posición (pos1) a posición 2(pos2), para hacerlo se regresa al

Transición 7: Condiciones para detener el motor.

Estado 10: Se detiene el motor en la posición 2 (pos2) y activa el avance cilindro hidráulico.

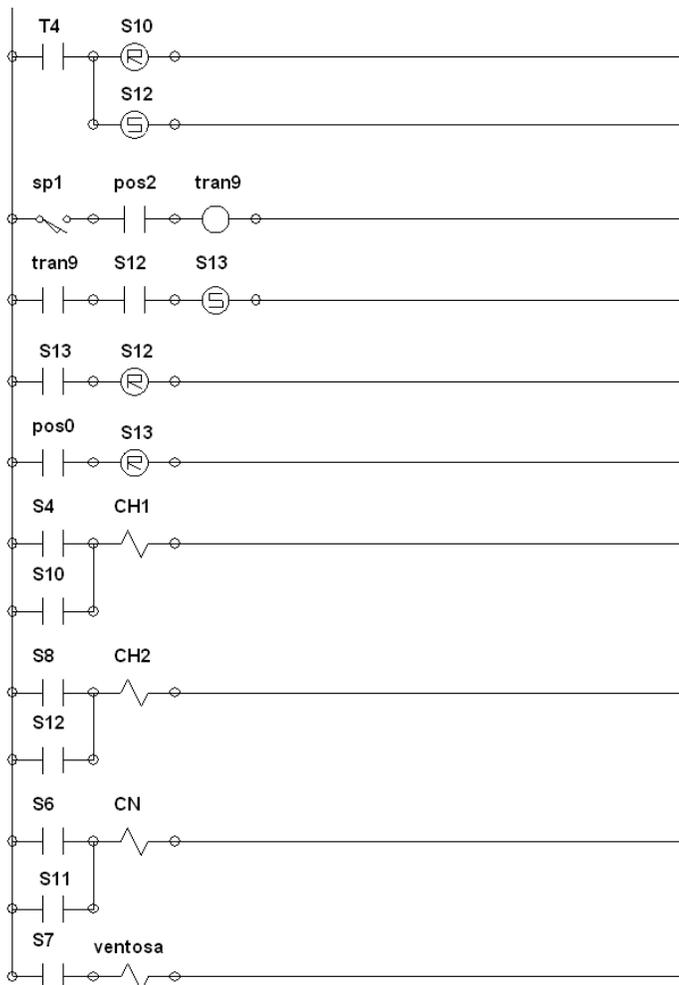
Transición 8: Condiciones para el avance del cilindro neumático.

Estado 11: avance del cilindro neumático.

Temporizador T2: Define un tiempo necesario para que la ventosa se desactive y suelte la pieza.

Temporizador T3: Define un tiempo para desactivar cilindro neumático.

Temporizador T4: Define un tiempo para desactivar el cilindro hidráulico y el cilindro neumático regresa a su estado inicial.



El cilindro hidraulico regresa a su estado inicial.

Transicion 9: Condiciones para activar el motor

Estado 13: Activo el motor en sentido contrario de posicion 2 (pos2) a posicion 0 (pos0) para empezar un nuevo proceso.

El motor se detiene en posicion 0 (pos0).

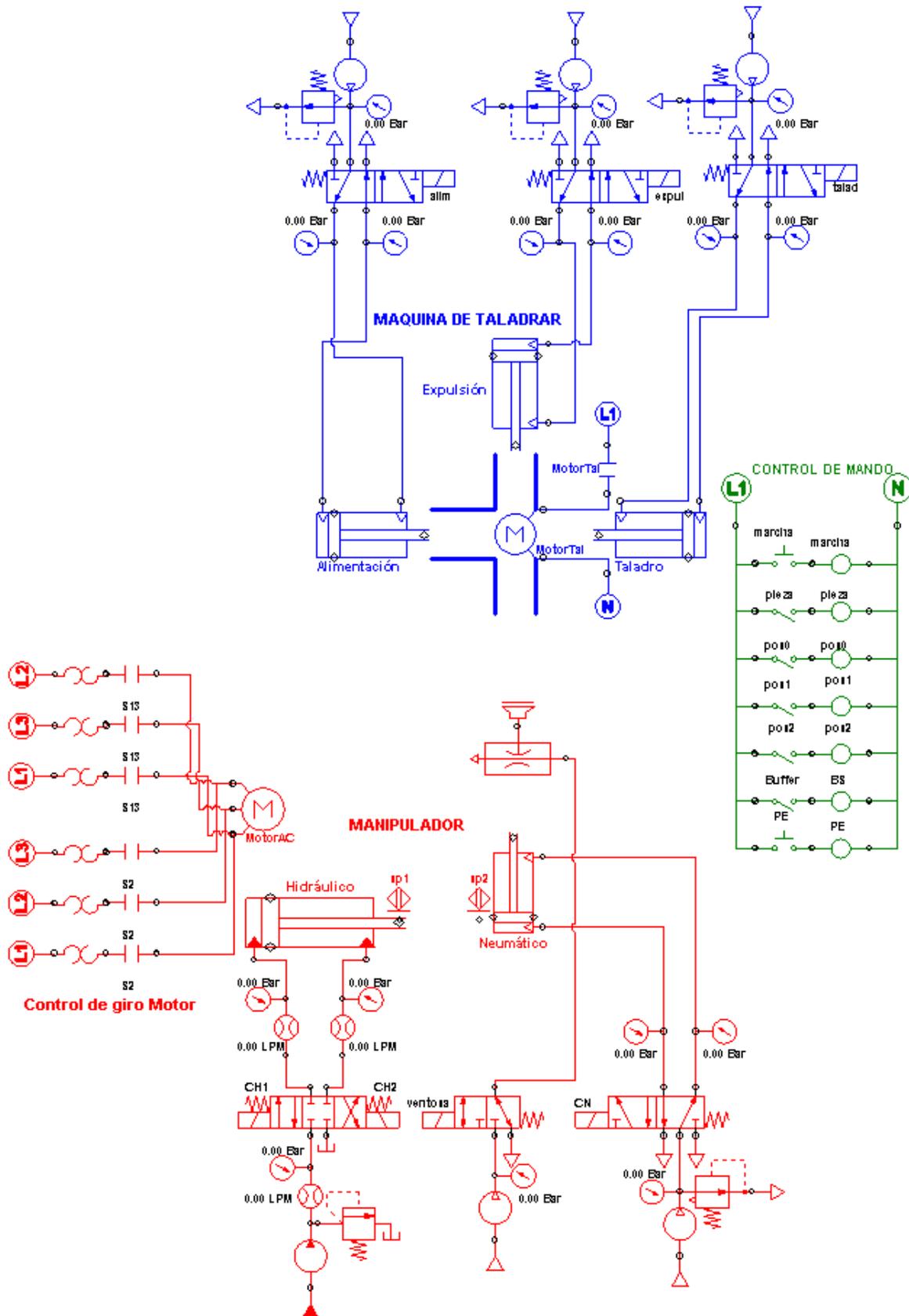
Accionamiento de la posicion de avance de la electrovalvula del cilindro hidraulico.

Accionamiento de la posicion de retorno de la electrovalvula del cilindro hidraulico.

Accionamiento de la electrovalvula del cilindro neumatico.

Accionamiento de la electrovalvula de la ventosa.

5.1.3. Sistema integrado implementado en AUTOMATION STUDIO 5.0 ®



5.2. Implementación del sistema de taladrado integrado con el manipulador SIMATIC S7 SIEMENS ®.

A continuación se observará la implementación del sistema de taladrado integrado con el manipulador en SIMATIC S7 SIEMENS ®.

Esta es la parte principal del programa, se puede observar que tanto el programa de la máquina de taladrar como el del manipulador están “independientes” y se integran mediante algo que es llamado recurso compartido, el cual es representado físicamente por la pieza procesada de madera.

OB1 : "Main Program Sweep (Cycle)"

```
PROGRAMA PRINCIPAL
```

Segm. 1: Título:

```
Llamamos cada bloque de función donde estan los programas correspondientes al sistema de taladrado y del manipulador
```

```
CALL "Maq Taladrar" , DB1      FB1  
CALL "Manipulador" , DB2      FB2  
BE
```

5.2.1. Programa de la máquina de taladrar SIMATIC S7 SIEMENS ®.

FBI : MAQUINA DE TALADRAR

Comentario:

Segm. 1 : Título:

ESTADO INICIAL DE REPOSO DE LA MAQUINA DE TALADRAR.

UN	"s2T"	MO.1
UN	"s3T"	MO.2
UN	"s4T"	MO.3
=	"repositoT"	MO.0

Segm. 2 : Título:

CONDICIONES INICIALES PARA QUE LA MAQUINA DE TALADRAR ARRANQUE.

U(
0	"marcha"	E4.0
0	"s5T"	MO.4
)		
U	"pieza"	E5.6
U	"BS"	M1.6
U	"pos0"	E5.1
=	"tr1T"	MO.6

Segm. 3 : Título:

ACTIVACIÓN DE LA ELECTROVÁLVULA QUE ACTIVA EL CILINDRO DE ALIMENTACIÓN.

U	"tr1T"	MO.6
U	"repositoT"	MO.0
S	"s2T"	MO.1
R	"s5T"	MO.4

Segm. 4 : Título:

ACTIVACIÓN DEL TEMPORIZADOR 1.

U	"s2T"	MO.1
L	S5T#2S	
SE	T 1	

Segm. 5 : Título:

SE DETECTA EL ESTADO DEL TEMPORIZADOR 1.

U	T 1	
=	"esperal"	M6.0

Segm. 6 : Título:

ESPERAL ME GENERA LA TRANSICIÓN 2 LA CUAL ES LA CONDICIÓN PARA PASAR AL SIGUIENTE ESTADO.

U	"esperal"	M6.0
=	"tr2T"	MO.7

Segm. 7 : Título:

SE ACTIVA EL ESTADO 3 CUMPLIENDO LAS CONDICIONES ANTERIORES: ST2 Y TR2T

U	"s2T"	MO.1
U	"tr2T"	MO.7
S	"s3T"	MO.2

Segm. 8 : Título:

EL ESTADO 3 ME ACCIONA EL TEMPORIZADOR 2 EL CUAL ME VA A ACTIVAR EL SIGUIENTE ESTADO CUMPLIDO EL TIEMPO DE ESPERA DE ÉSTE

U	"s3T"	MO.2
L	S5T#2S	
SE	T	2

Segm. 9 : Título:

SE DETECTA EL ESTADO DEL TEMPORIZADOR T2

U	T	2	
=	"espera2"		M6.1

Segm. 10 : Título:

ESPERAZ ME GENERA LA TRANSICIÓN 3 LA CUAL ES LA CONDICIÓN PARA PASAR AL SIGUIENTE ESTADO.

U	"espera2"	M6.1
=	"tr3T"	M1.0

Segm. 11 : Título:

SE ACTIVA EL ESTADO 4 CUMPLIENDO LAS CONDICIONES ANTERIORES: S3T Y TR3T

U	"s3T"	MO.2
U	"tr3T"	M1.0
S	"s4T"	MO.3

Segm. 12 : Título:

EL ESTADO 4 ME ACCIONA EL TEMPORIZADOR 3 EL CUAL ME VA A ACTIVAR EL SIGUIENTE ESTADO CUMPLIENDO EL TIEMPO DE ESPERA DE ÉSTE

U	"s4T"	MO.3
L	S5T#2S	
SE	T	3

Segm. 13 : Título:

SE DETECTA EL EL ESTADO DEL TEMPORIZADOR T3

U	T	3	
=	"espera3"		M6.2

Segm. 14 : Título:

ESPERA3 M3 GENERA LA TRANSICIÓN 4 LA CUAL ES LA CONDICIÓN PARA PASAR AL SIGUIENTE ESTADO

U	"espera3"	M6.2
=	"tr4T"	M1.1

Segm. 15 : Título:

SE ACTIVA EL ESTADO 5 CUMPLIENDO LAS CONDICIONES ANTERIORES: S4T Y TR4T

U	"s4T"	MO.3
U	"tr4T"	M1.1
S	"s5T"	MO.4

Segm. 16 : Título:

EL ESTADO S2T ACTIVA LA ELECTROVÁLVULA QUE ACCIONA EL CILINDRO DE ALIMENTACIÓN

U	"s2T"	MO.1
=	"alim"	A12.0

Segm. 17 : Título:

EL ESTADO S3T ACTIVA LA ELECTROVÁLVULA QUE ACCIONA EL CILINDRO DE EXPULSIÓN

U	"s3T"	MO.2
=	"expul"	A12.1

Segm. 18 : Título:

EL ESTADO S4T ACTIVA LA ELECTROVÁLVULA QUE ACCIONA EL CILINDRO DEL TALADRO Y SIMULTANEAMENTE EL MOTOR DC DEL TALADRO

U	"s4T"	MO.3
=	"tal"	A12.2
=	"motorDC"	A12.3

Segm. 19 : Título:

EL ESTADO S5T LLEVA AL SISTEMA A SU ESTADO INICIAL

U	"s5T"	MO.4
R	"s2T"	MO.1
R	"s3T"	MO.2
R	"s4T"	MO.3

5.2.2. Programa del manipulador: SIMATIC S7 SIEMENS ®.

FB2 : MANIPULADOR

Comentario:

Segm. 1: Título:

ESTADO INICIAL DE REPOSO DEL MANIPULADOR

UN	"s2"	M10.1
UN	"s4"	M10.3
UN	"s6"	M10.5
UN	"s7"	M10.6
UN	"s8"	M10.7
UN	"s13"	M11.4
=	"repositoB"	M10.0

Segm. 2: Título:

TRANSICION 1: CONDICIONES INICIALES PARA QUE EL MANIPULADOR ARRANQUE

U	"spl"	E4.4
U	"BS"	M1.6
U	"pos0"	E5.1
=	"tran1"	M20.0

Segm. 3: Título:

ESTADO 2: ACTIVACION DEL MOTOR EN UN SENTIDO

U	"tran1"	M20.0
U	"repositoB"	M10.0
O	"s9"	M11.0
S	"s2"	M10.1

Segm. 4: Título:

TRANSICION 2: CONDICIONES PARA QUE EL MOTOR PARE EN LA POSICION 1

U	"pos1"	E5.2
U	"spl"	E4.4
U	"BS"	M1.6
=	"tran2"	M20.1

Segm. 5: Título:

ACTIVACION DEL ESTADO 3

U	"s2"	M10.1
U	"tran2"	M20.1
S	"s3"	M10.2

Segm. 6 : Título:

CONDICIONES QUE ME DESACTIVAN EL ESTADO 2

O	"s3"	M10.2
O	"s10"	M11.1
R	"s2"	M10.1

Segm. 7 : Título:

TRANSICION 3: CONDICIONES PARA QUE EL CILINDRO HIDRAULICO DEL MANIPULADOR AVANCE

U	"spl"	E4.4
U	"BS"	M1.6
=	"tran3"	M20.2

Segm. 8 : Título:

ACTIVACION DEL ESTADO 4

U	"tran3"	M20.2
U	"s3"	M10.2
S	"s4"	M10.3

Segm. 9 : Título:

"SP2" ES LA CONDICION DE PARADA DEL CILINDRO HIDRAULICO DEL MANIPULADOR

U	"sp2"	E4.5
R	"s4"	M10.3

Segm. 10 : Título:

EL ESTADO 4 REALIZA DOS ACCIONES: ACTIVA EL ESTADO 5 Y SIMULTANEAMENTE ME DESACTIVA EL ESTADO 3

U	"s4"	M10.3
S	"s5"	M10.4
R	"s3"	M10.2

Segm. 11 : Título:

TRANSICION 4: CONDICIONES PARA QUE EL CILINDRO NEUMATICO DEL MANIPULADOR SE AVANCE

U	"sp2"	E4.5
U	"BS"	M1.6
=	"tran4"	M20.3

Segm. 12 : Título:

ACTIVACION DEL ESTADO 6

U	"tran4"	M20.3
U	"s5"	M10.4
S	"s6"	M10.5

Segm. 13 : Título:

ACCIONES DEL ESTADO 6: SE DESACTIVA EL ESTADO 5 Y SE ACTIVA EL ESTADO 7 SIMULTANEAMENTE

U	"s6"	M10.5
R	"s5"	M10.4
S	"s7"	M10.6

Segm. 14 : Título:

TRANSICION 5: CONDICIONES PARA LA ACTIVACION DEL TEMPORIZADOR 1

U	"sp2"	E4.5
=	"tran5"	M20.4

Segm. 15 : Título:

TEMPORIZADOR 1: EL TIEMPO PROGRAMADO EN ESTE TEMPORIZADOR SERA PARA QUE EL CILINDRO NEUMATICO Y LA VENTOSA PUEDAN SUJETAR LA PIEZA EN EL BUFFER DE SALIDA

U	"tran5"	M20.4
L	SST#5S	
SE	T	1

Segm. 16 : Título:

ACTIVACION DEL ESTADO 8: SE ENCARGA DE RETORNAR A SU ESTADO INICIAL EL CILINDRO HIDRAULICO Y EL NEUMATICO, ESTANDO AUN LA VENTOSA ACTIVADA SUJETANDO LA PIEZA

U	T	1	
U	"s7"		M10.6
=	L	20.0	
U	L	20.0	
BLD	102		
R	"s6"		M10.5
U	L	20.0	
UN	"s10"		M11.1
S	"s8"		M10.7

Segm. 17 : Título:

TRANSICION 6: CONDICIONES PARA ACTIVAR NUEVAMENTE EL MOTOR.

U	"sp1"	E4.4
UN	"BS"	M1.6
U	"pos1"	E5.2
=	"tran6"	M20.5

Segm. 18 : Título:

ESTADO 9: SE ACCIONA EL MOTOR EN SENTIDO DE POSICION 1 A POSICION 2

U	"tran6"	M20.5
=	L	20.0
U	L	20.0
UN	"s10"	M11.1
S	"s9"	M11.0
U	L	20.0
BLD	102	
R	"s8"	M10.7

Segm. 19 : Título:

TRANSICION 7: CONDICIONES PARA DETENER EL MOTOR EN LA POSICION 2

U	"sp1"	E4.4
U	"pos2"	E5.3
=	"tran7"	M20.6

Segm. 20 : Título:

ESTADO 10: INICIA EL AVANCE DEL CILINDRO HIDRAULICO Y SIMULTANEAMENTE SE DETIENE EL MOTOR

U	"tran7"	M20.6
U	"s7"	M10.6
S	"s10"	M11.1
R	"s9"	M11.0

Segm. 21 : Título:

TRANSICION 8: CONDICIONES PARA AVANCE DEL CILINDRO NEUMATICO

U	"sp2"	E4.5
U	"pos2"	E5.3
=	"tran8"	M20.7

Segm. 22 : Título:

ESTADO 11: AVANZA EN CILINDRO NEUMATICO

U	"tran8"	M20.7
U	"s10"	M11.1
S	"s11"	M11.2

Segm. 23 : Título:

TEMPORIZADOR 2: TIEMPO DE ESPERA PARA QUE LA VENTOSA SUELTE LA PIEZA

U	"s11"	M11.2
L	SST#5S	
SE	T	2

Segm. 24 : Título:

CUANDO EL TIEMPO DE ESPERA CUMPLE, EL TEMPORIZADOR 2 ME DESACTIVA LA VENTOSA

U	T	2
R	"s7"	M10.6

Segm. 25 : Título:

TEMPORIZADOR 3: TIEMPO DE ESPERA PARA DESACTIVAR EL CILINDRO NEUMATICO LUEGO DE QUE LA VENTOSA HAYA SOLTADO LA PIEZA

U	T	2
L	SST#2S	
SE	T	3

Segm. 26 : Título:

RETORNA EL CILINDRO NEUMATICO A SU ESTADO INICIAL

U	T	3	
R	"s11"		M11.2

Segm. 27 : Título:

TEMPORIZADOR 4: TIEMPO DE ESPERA PARA DESACTIVAR EL CILINDRO HIDRAULICO LUEGO DE QUE EL CILINDRO NEUMATICO HAYA RETORNADO COMPLETAMENTE.

U	T	3	
L	S5T#2S		
SE	T	4	

Segm. 28 : Título:

RETORNA EL CILINDRO HIDRAULICO A SU ESTADO INICIAL Y SIMULTANEAMENTE SE ACTIVA EL ESTADO 12 EL CUAL ME ASEGURA QUE EL MANIPULADOR ESTA RECOGIDO COMPLETAMENTE SIN PIEZA EN LA POSICION 2

U	T	4	
R	"s10"		M11.1
S	"s12"		M11.3

Segm. 29 : Título:

TRANSICION 9: CONDICIONES PARA QUE EL MOTOR ARRANQUE EN SENTIDO CONTRARIO DE POSICION 2 A POSICION 0

U	"sp1"		E4.4
U	"pos2"		E5.3
=	"tran9"		M21.0

Segm. 30 : Título:

ESTADO 13: SE ACTIVA EL MOTOR EN SENTIDO CONTRARIO

U	"tran9"		M21.0
U	"s12"		M11.3
S	"s13"		M11.4

Segm. 31 : Título:

EL MANIPULADOR DEJA DE ESTAR EN LA POSICION 2

U	"s13"		M11.4
R	"s12"		M11.3

Segm. 32 : Título:

EL MOTOR LLEGA A POSICION 0 Y SE DETIENE

U	"pos0"		E5.1
R	"s13"		M11.4

Segm. 33 : Título:

ACCIONES DEL ESTADO 4 Y DEL ESTADO 10: AVANCE CILINDRO HIDRAULICO

0	"s4"	M10.3
0	"s10"	M11.1
=	"CH1"	A13.0

Segm. 34 : Título:

ACCIONES DEL ESTADO 8 Y DEL ESTADO 12: RETORNO DEL CILINDRO HIDRAULICO

0	"s8"	M10.7
0	"s12"	M11.3
=	"CH2"	A13.1

Segm. 35 : Título:

ACCIONES DEL ESTADO 6 Y DEL ESTADO 11: ACCIONAMIENTO DEL CILINDRO NEUMATICO

0	"s6"	M10.5
0	"s11"	M11.2
=	"CN"	A13.2

Segm. 36 : Título:

ACCION DEL ESTADO 7: ACCIONAMIENTO DE LA VENTOSA

U	"s7"	M10.6
=	"VENTOSA"	A13.3

Segm. 37 : Título:

ACCION DEL ESTADO 2: ACCIONAMIENTO DEL MOTOR EN SENTIDO POSICION 0 A POSICION 1 Y DE POSICION 1 A POSICION 2

U	"s2"	M10.1
=	"MDer"	A13.4

Segm. 38 : Título:

ACCION ESTADO 13: ACCIONAMIENTO DEL MOTOR EN SENTIDO DE POSICION 2 A POSICION 0

U	"s13"	M11.4
=	"MIzq"	A13.5

Segm. 39 : Título:

PARADA DE EMERGENCIA DE TODO EL SISTEMA

U	"PE"	E5.5
R	"s2"	M10.1
R	"s4"	M10.3
R	"s6"	M10.5
R	"s8"	M10.7
R	"s10"	M11.1
R	"s11"	M11.2
R	"s12"	M11.3
R	"s13"	M11.4

Segm. 40 : Título:

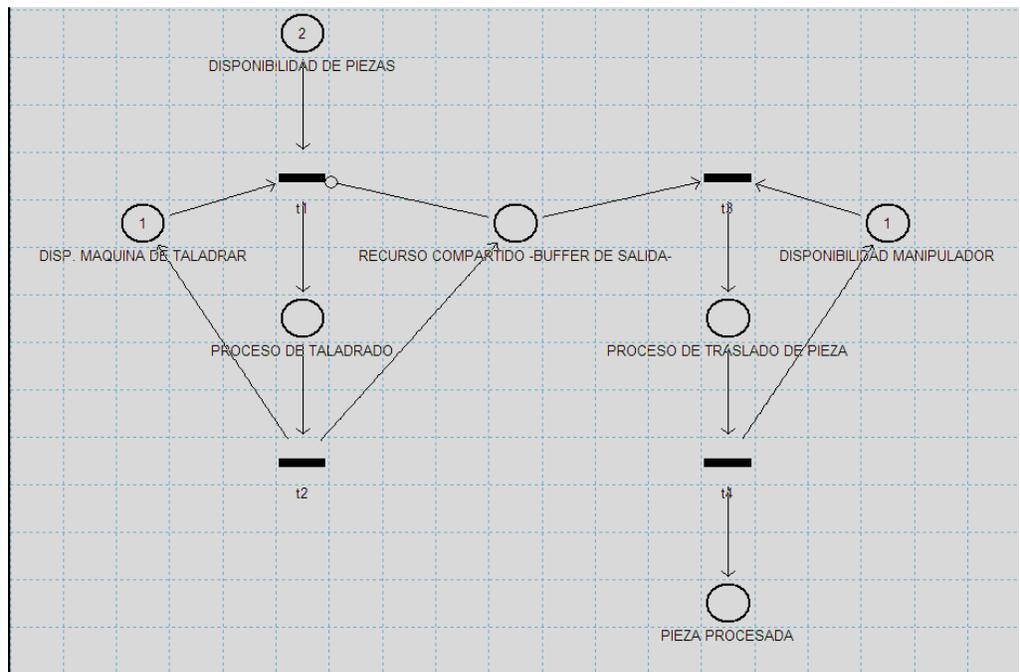
MANDO QUE CONTROLA BS

U	"buffer"	E5.0
=	"BS"	M1.6

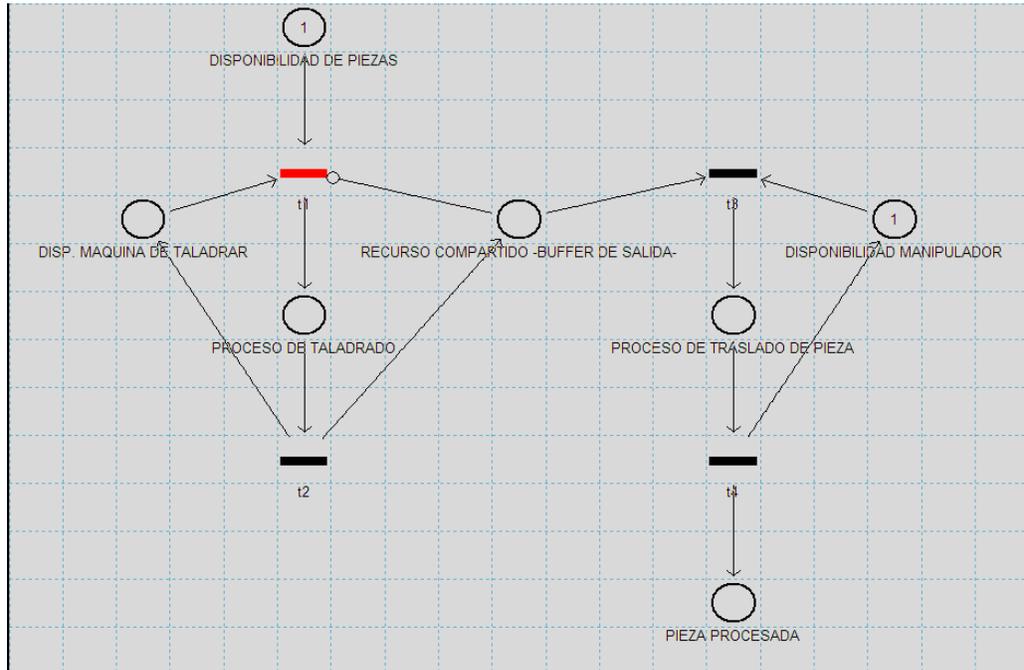
5.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TALADRADO Y DEL BRAZO ROBOT EN REDES DE PETRI.

Aquí se presenta el sistema de taladrado integrado con el manipulador en red de Petri simulado en el toolbox de MATLAB® pntool v3.2 y se mostrara paso a paso como funciona el sistema en conjunto:

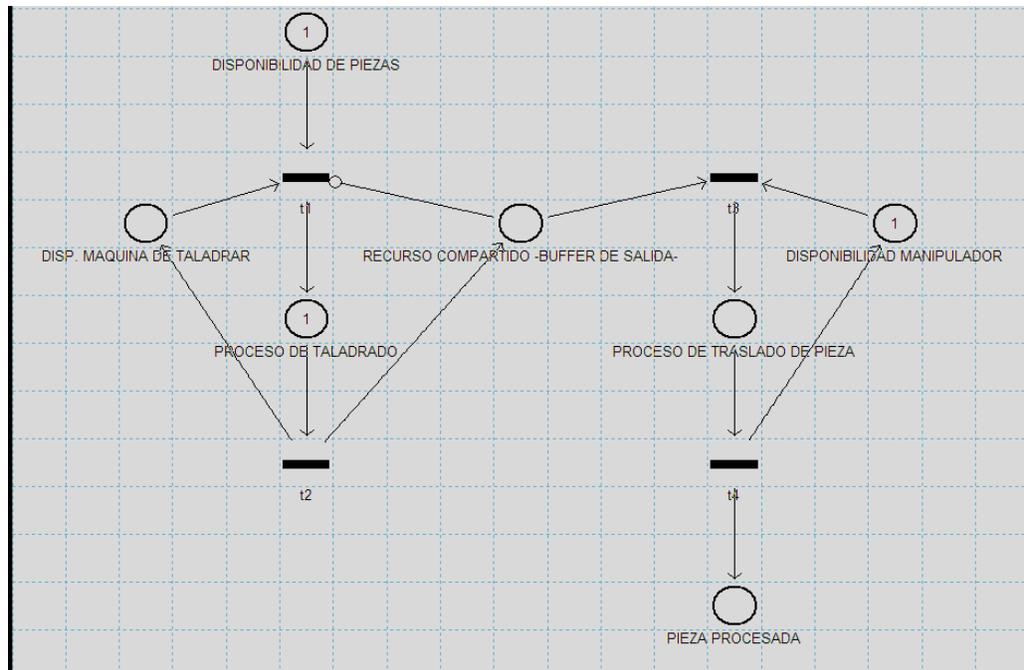
- **Paso 1:** Tanto la máquina de taladrar como el manipulador están en estado de reposo y están a la espera de que las condiciones de la transición 1 y la transición 4 cumplan para poder arrancar.



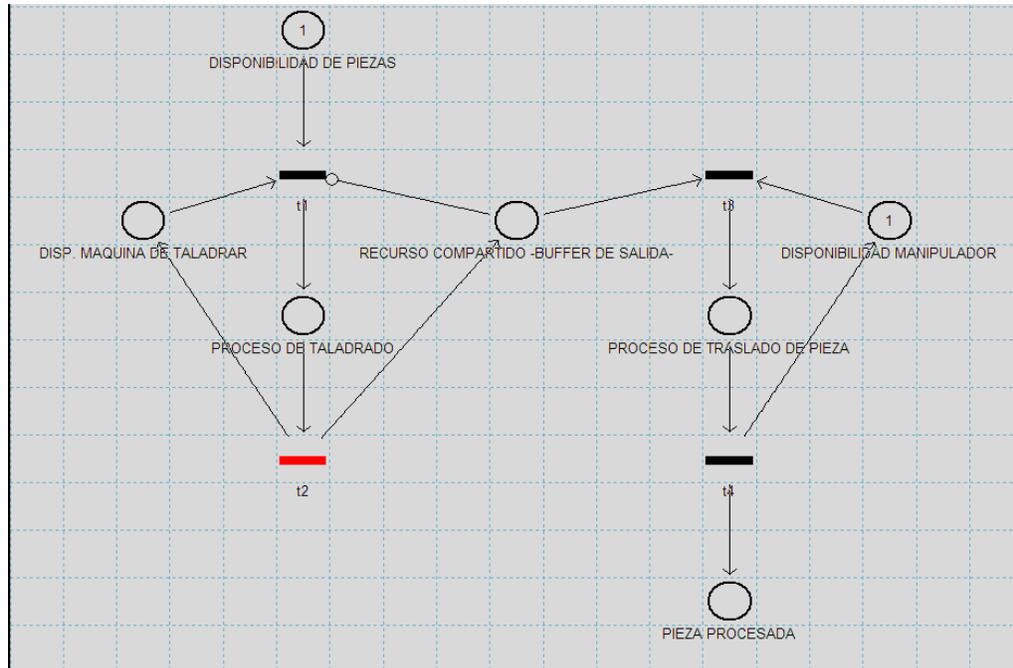
- **Paso 2:** Se cumplen las condiciones de la transición 1 y es activada.



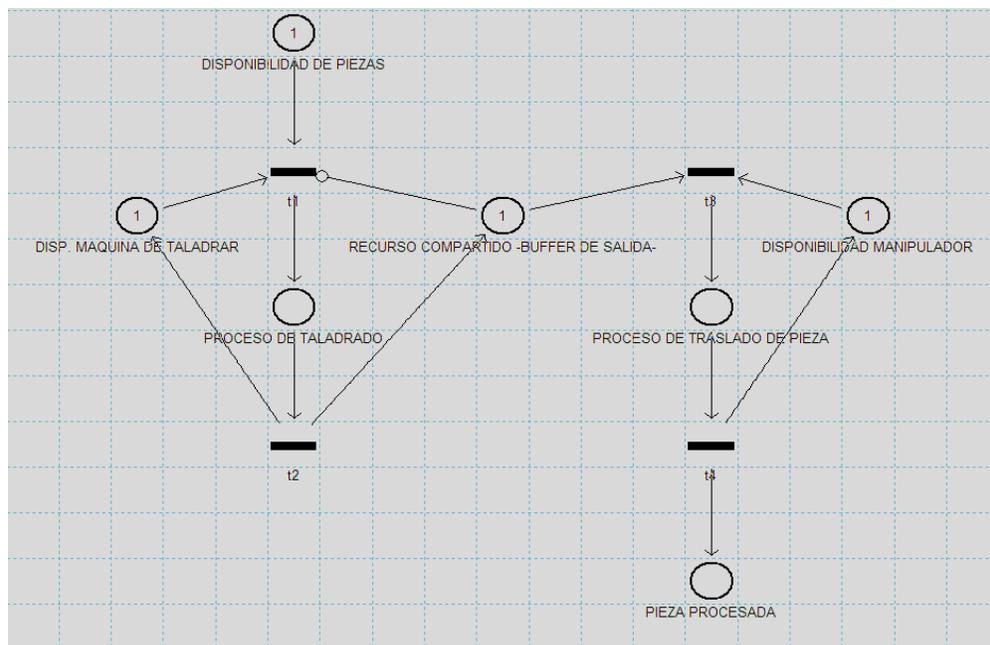
- **Paso 3:** La pieza pasa a ser procesada por la máquina de taladrar.



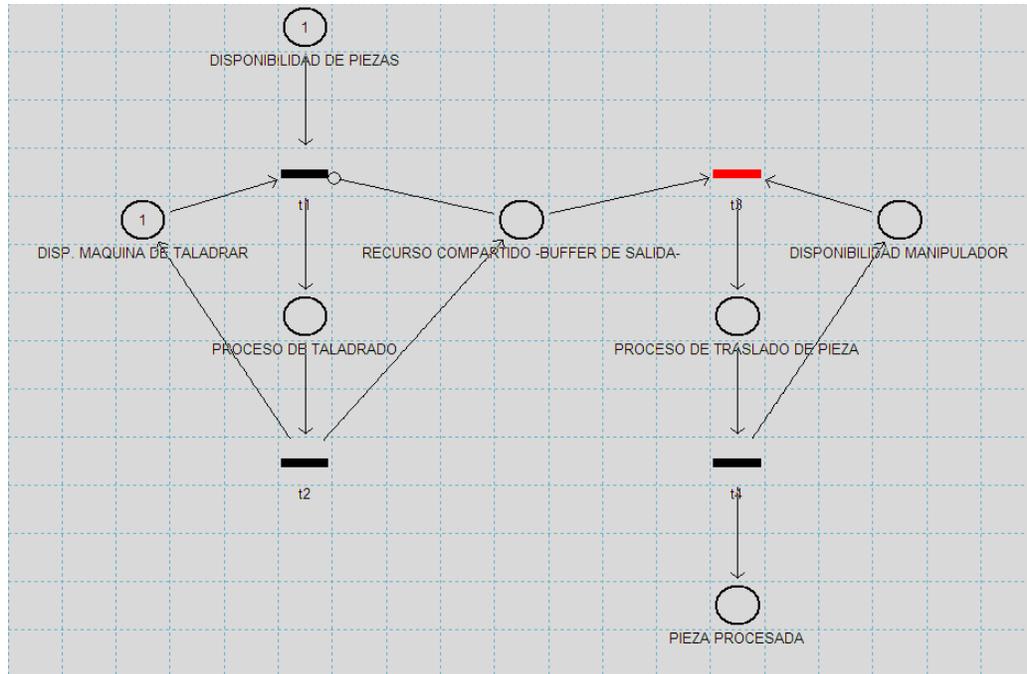
- **Paso 4:** La pieza ha sido taladrada y se cumplen las condiciones de la transición 2.



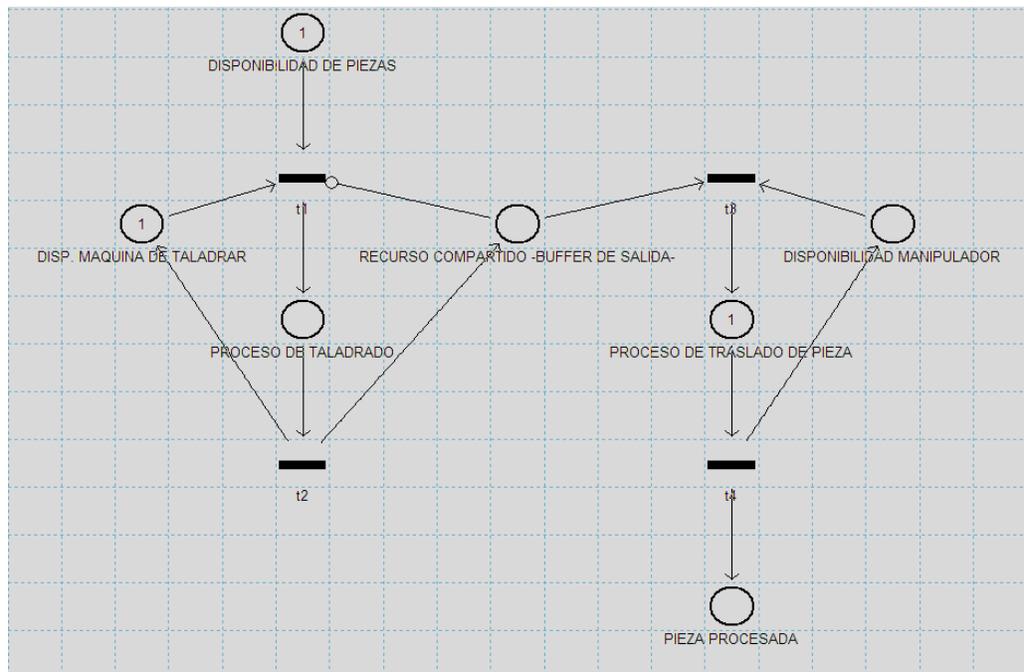
- **Paso 5:** La máquina de taladrar está disponible y la pieza llega al buffer de salida el cual es el recurso compartido de ambos sistemas. Mientras haya pieza en este sitio la máquina de taladrar espera a que el manipulador mueva ésta a su destino final el cual es el sitio de pieza procesada.



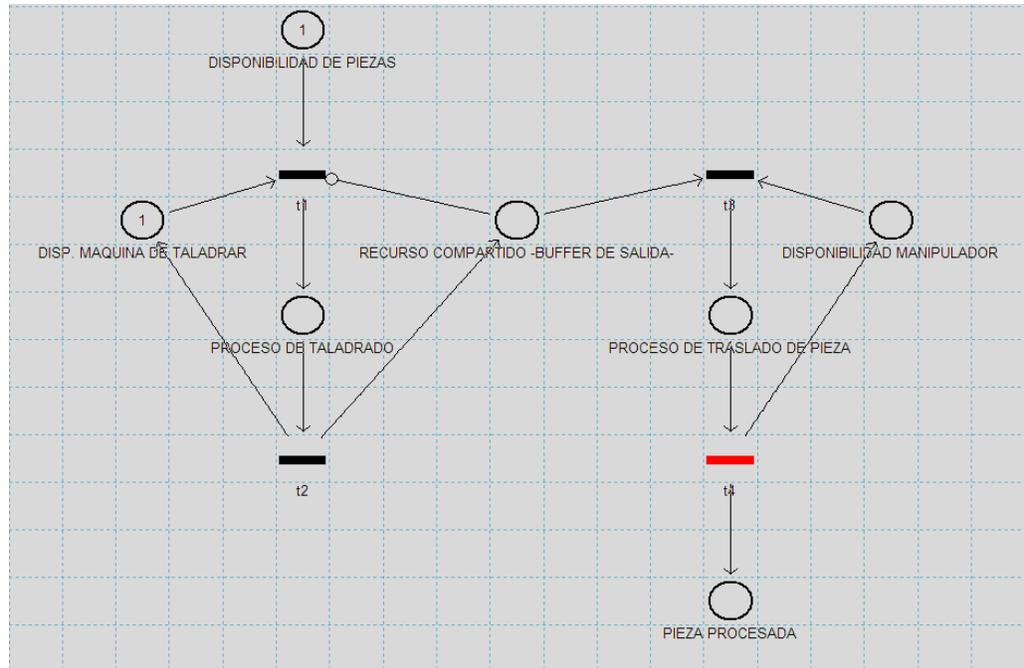
- **Paso 6:** Las condiciones para que la pieza sea transportada por el manipulador cumplen en la transición 3.



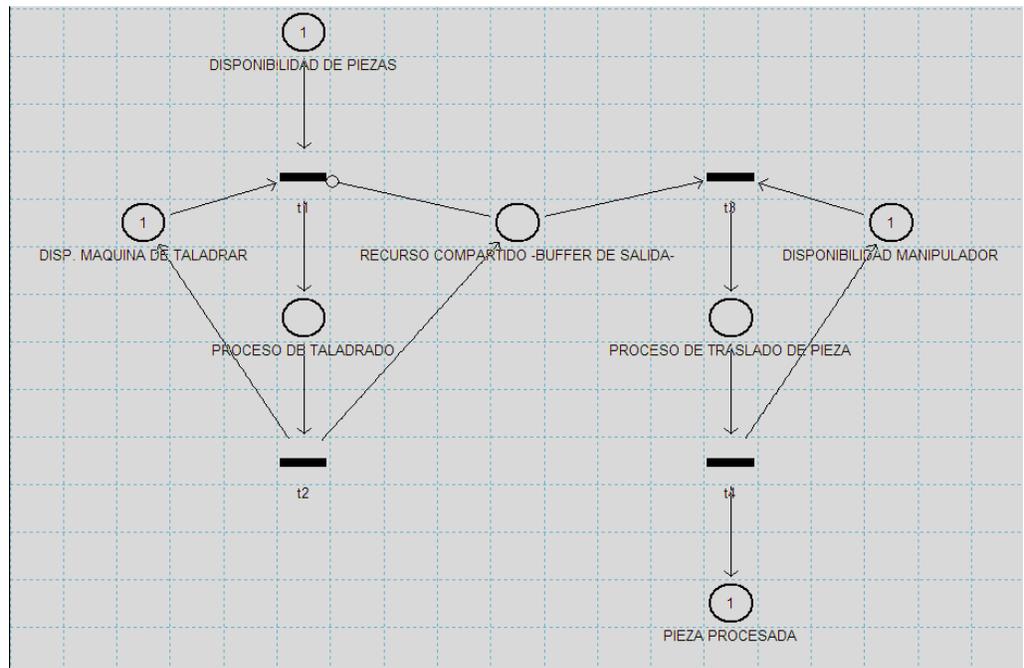
- **Paso 7:** La pieza es trasladada por el manipulador.



- **Paso 8:** El manipulador acaba su proceso y pone la pieza en su sitio final dando así las condiciones para que se cumplan las condiciones de la transición 4



- **Paso 9:** El manipulador vuelve a su condición inicial y está a la espera de que haya pieza disponible procesada por la máquina de taladrar.



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En este proyecto mencionamos dos métodos para el estudio y parametrización del espacio de trabajo del manipulador, el primero es el método de Denavit-Hartenberg, el cual sirve para manipuladores con muchos grados de libertad, y el segundo es el método geométrico, el cual es mucho más útil para manipuladores con pocos grados de libertad.

En cuanto al posicionamiento de los cilindros, implementamos los sensores de proximidad electrónicos CNY70, en el cilindro hidráulico sensando el inicio de carrera y la posición final del émbolo de éste. El cilindro neumático hace de función de esclavo del cilindro hidráulico, siendo éste activado justo después de haber finalizado la carrera del émbolo del cilindro hidráulico.

- La morfología del manipulador es un modelo híbrido, ya que constituye la morfología de un manipulador cartesiano junto con la de un manipulador cilíndrico.

El manipulador posee tres grados de libertad lo cual hace posible el desplazamiento en el espacio tridimensional.

- Por los resultados obtenidos en la simulación del sistema propuesto, encontramos que las redes de Petri son una herramienta muy útil cuando hablamos de integrar un sistema de manufactura automatizado junto con un manipulador robotizado, ya que nos permite visualizar el funcionamiento en conjunto de ambos sistemas, y así podemos enterarnos de los posibles errores y de las dificultades que puede presentar la implementación de un proyecto de este tipo.

Esta es una de las principales aplicaciones de las redes de Petri, tener la capacidad de integrar cualquier tipo de sistemas automatizados de variables discretas.

- La programación de todo el sistema se realizó en SIMATIC STEP7 SIEMENS® en lenguaje de instrucciones, pero el programa mantiene la estructura del GRAPH, lo cual respeta los estados, las transiciones y las acciones de los estados, dando así una estructura ordenada y entendible para el lector.
- La programación y el montaje en AUTOMATION STUDIO 5.0® nos ha facilitado: la simulación del modelo completo del brazo manipulador, permite la visualización del funcionamiento de todo el sistema integrado y facilita la identificación de posibles fallas en su funcionamiento. También se pudieron sincronizar los tiempos de temporización del sistema de taladrado de la pieza ya que esta requiere de un tiempo suficiente para ser procesada y así el manipulador sujetarla y llevarla al punto de descarga, obteniendo así un sistema eficiente y estable al momento de llevar a cabo el proceso completo.

- Se recomienda para su posible montaje:
 - Basarse en las distintas simulaciones realizadas en este trabajo.
 - Hacer un estudio de las variables físicas que determinan el par requerido para mover el brazo.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] CONCEPTOS BÁSICOS DE NEUMÁTICA E HIDRÁULICA.

http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica.htm

Autor: Desconocido.

[2] DINÁMICA DE SISTEMAS.

Editorial Prentice Hall Hispanoamérica, S.A, México, 1987.

Autor: Ogata Katsuhiko.

[3] SHELL TELLUS ®: FLUIDOS HIDRÁULICOS DE ALTO RENDIMIENTO.

<http://apps-shellmexico.com/productos/pdf/Shell%20Tellus.pdf>

Autor: García Alberto.

[4] PRESIÓN ABSOLUTA.

http://www.predic.com/mediawiki/index.php/Presi%C3%B3n_absoluta

[5] PRESIÓN MANOMÉTRICA.

http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n_manom%C3%A9trica

[6] PRESIÓN ATMOSFÉRICA.

http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica

[7] NOTAS DE CLASE: CILINDRO HIDRÁULICO, MODULO DE BULK, REDES DE PETRI Y ARQUITECTURA DEL AUTÓMATA.

Autor: Arregocés C., Sigilfredo C.

[8] FUNDAMENTOS DE ROBOTICA

Autores: Aracil S., Rafael (Universidad Politécnica de Madrid)
Balaguer, Carlos (Universidad Politécnica de Madrid)
Peñín, Luis F. (Universidad Politécnica de Madrid)
Barrientos, Antonio (Universidad Politécnica de Madrid)