



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la electrónica

Tesis para la obtención del grado de:

Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Automotrices



Análisis comparativo de métodos de síntesis de automatismos neumáticos de mediana complejidad

Alumno

Francisco Javier Peña Contreras

Asesor de tesis

Dr. Jorge Dionisio Fierro Rojas

Co-Asesor

Dr. Antonio Michua Camarillo

Puebla, Pue, septiembre de 2025

## Agradecimiento

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me acompañaron y brindaron su apoyo a lo largo de este importante camino. En primer lugar, a mi familia, por ser mi pilar fundamental y por estar siempre presentes con su amor incondicional, su comprensión y su paciencia. Su respaldo constante fue clave para mantenerme enfocado y motivado durante este proceso.

A mis amigos, gracias por sus palabras de aliento, por entender mis ausencias y por animarme en los momentos de dificultad. Su compañía y apoyo emocional fueron esenciales para seguir adelante.

A mi asesor de tesis, le agradezco sinceramente su orientación, su tiempo y sus valiosos comentarios que enriquecieron significativamente este trabajo. Su compromiso y dedicación fueron una guía firme en todo el proceso.

Quiero hacer un agradecimiento muy especial a mi hermana Emily, quien no solo estuvo presente en los momentos más retadores, sino que también me brindó palabras de ánimo, escucha atenta y una confianza inquebrantable. Su apoyo emocional fue una fuente constante de fuerza y motivación que me impulsó a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A todos ustedes, gracias por creer en mí.

## Índice

Lista de tablas.....	v
Lista de figuras.....	vi
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Definición del problema .....	2
1.3 Estado del arte .....	3
1.4 Justificación .....	4
1.5 Objetivo principal.....	5
1.6 Objetivos específicos.....	5
1.7 Metodología .....	5
1.8 Alcance y limitaciones.....	6
Capítulo 2 Estado del Arte.....	7
2.1 Importancia de la neumática .....	7
2.2 Características claves de los automatismos neumáticos.....	7
2.3 La electroneumática y su alcance.....	8
2.4 Automatismos con PLC .....	8
2.5 Métodos de diseño de automatismos.....	8
2.6 Simulación computacional.....	9
Capítulo 3 Componentes de un automatismo neumático .....	10
3.1 Definiciones y nomenclatura .....	10
3.2 Símbolos de componentes neumáticos .....	11
Capítulo 4 Síntesis de automatismos electroneumáticos .....	14
4.1 Componentes principales para un automatismo .....	14
4.2 Reglas de construcción del diagrama esquemático .....	15
4.3 Parte electroneumática del diagrama esquemático .....	15
4.4 Parte eléctrica del diagrama esquemático .....	16
4.5 Métodos de síntesis de automatismos .....	17
4.5.1 Método empírico o heurístico .....	17
4.5.2 Método de cascada .....	21
4.5.3 Máquinas de estados finitos .....	24
4.6 Discusión sobre los tres métodos de síntesis de automatismos.....	33

Capítulo 5 Cosimulación FluidSim CODESYS .....	35
5.1 Selección de puertos de entrada y salida. ....	36
5.2 Conexión de OPC/DDE .....	41
5.3 Selección de servidor OPC y puerto de comunicación.....	42
5.4 Definición de variables globales en CODESYS.....	43
5.5 Se establece la configuración de la comunicación OPC para CoDeSys .....	44
5.6 Configuración de las variables de acceso para el servidor OPC. ....	46
5.7 Creación del programa en lenguaje de Diagrama de Escalera en CODESYS.....	51
5.8 Habilidad del PLC virtual .....	50
5.9 Ejecución de la cosimulación.....	51
Capítulo 6 Resultados de simulación, de cosimulación y de experimentos de laboratorio .....	52
6.1 Síntesis implementadas en simulación y cosimulación .....	53
6.1.1 Automatismo sintetizado por el método heurístico .....	53
6.1.2 Automatismo sintetizado por el método de cascada .....	59
6.1.3 Automatismo sintetizado por el método de Máquinas de Estados Finitos .....	68
6.2 Resultados de experimentos de laboratorio .....	83
6.2.1 Implementación del automatismo electroneumático con secuencia A- B-   A- B+   A+ B- diseñado por el método heurístico.....	87
6.2.2 Automatismo electroneumático con secuencia A- B-   A- B+   A+ B- diseñado por el método de cascada.....	87
6.3 Análisis comparativo.....	92
6.3.1 Comparación de los automatismos cosimulados y simulados .....	92
6.3.2 Comparación de la implementación experimental de los automatismos.....	94
Capítulo 7 Conclusiones y trabajos futuros.....	96
7.1 Conclusiones .....	96
7.2 Trabajo futuro .....	97
Referencias.....	100

## Lista de tablas

Tabla 1: Análisis comparativo de los métodos de síntesis de los automatismos neumáticos Paso a Paso y Máquinas de Estados Finito .....	3
Tabla 2: Combinación de los relevadores para la activación de los estados del automatismo .....	18
Tabla 3: Elementos de la secuencia según el método de cascada .....	21
Tabla 4: Activación y desactivación de grupos .....	21
Tabla 5: Activación de solenoides .....	22
Tabla 6: Transición de estados .....	28
Tabla 7: Tabla de variables del PLC .....	30
Tabla 8: Elementos de la secuencia según el método de Cascada.....	59
Tabla 9: Activación y desactivación de grupos .....	60
Tabla 10: Activación de solenoides .....	60
Tabla 11: Elementos de la secuencia según el método de cascada .....	64
Tabla 12: Activación y desactivación de grupos .....	64
Tabla 13: Activación de solenoides .....	65
Tabla 14: Transición de estados .....	71
Tabla 15: Variables del PLC .....	71
Tabla 16: Transición de estados .....	77
Tabla 17: Variables del PLC .....	78
Tabla 18: Valoración subjetiva (criterio personal del autor) de los pasos de los métodos de síntesis de automatismos .....	93
Tabla 19: Tabla de ponderación de criterios .....	94
Tabla 20: Tabla de Pugh con los pesos o ponderaciones .....	95
Tabla 21: Precio unitario de los componentes principales del automatismos .....	96
Tabla 22: Costo aproximado de los componentes principales del automatismo heurístico .....	97
Tabla 23: Costo aproximado de los componentes principales del automatismo de cascada .....	97

## Lista de figuras

Figura 3.2.1 Unidad de mantenimiento .....	11
Figura 3.2.2 Componentes neumáticos [13]. De izquierda a derecha y de arriba abajo: sensor, compresor para aire comprimido, deposito neumáticos, motor neumático de un sentido de giro, motor neumático de dos sentidos de giro, válvula OR, válvula and, cilindro basculante de dos sentidos de giro, válvula de cierre, válvula de bloqueo y válvula de retención pilotada. ....	12
Figura 3.2.3 De izquierda a derecha y de arriba abajo: válvula 2/2 vías en posición normalmente cerrada, válvula 2/2 vías en posición normalmente abierta, válvula 5/3 vías en posición normalmente cerrada y válvula 5/3 vías en posición normalmente abierta .....	13
Figura 3.2.4 Partes de un cilindro .....	14
Figura 3.2.5 Cilindro de simple efecto, retorno por esfuerzos externos .....	14
Figura 3.2.6 Cilindro de doble efecto .....	14
Figura 4.1.1 Elementos de trabajo y válvulas de mando del automatismo .....	18
Figura 4.1.2 Control eléctrico de automatismo sintetizado por el método heurístico .....	20
Figura 4.1.3 Cilindros, válvulas de control y finales de carrera del automatismo .....	22
Figura 4.1.4 Diagrama de Escalera de la activación y desactivación del grupo I .....	23
Figura 4.1.5 Diagrama de Escalera de la activación y desactivación de los grupos .....	24
Figura 4.1.6 Conexión de los relevadores a los solenoides de las válvulas de control .....	25
Figura 4.1.7 Diagrama de estados .....	27
Figura 4.1.8 Control de los estados del automatismo parte 1 .....	30
Figura 4.1.9 Control de los estados del automatismo parte 2 .....	31
Figura 4.1.10 Diagrama de Escalera de las condiciones de transición parte 1 .....	31
Figura 4.1.11 Diagrama de Escalera de las condiciones de transición .....	32
Figura 4.1.12 Diagrama de Escalera de los solenoides de las válvulas de control activados por los estados del automatismo .....	33
Figura 4.1.13 Automatismo electroneumático controlado por PLC .....	34
Figura 5.1.1 Automatismo simple antes de su conexión al PLC virtual .....	37
Figura 5.1.2 Puertos de entrada y salida .....	38
Figura 5.1.3 Fuente de energía y referencia eléctrica .....	39
Figura 5.1.4 Sensores de finales de carrera .....	40
Figura 5.1.5 Solenoides de las válvulas de control .....	41
Figura 5.1.6 Puertos de entrada y salida .....	41
Figura 5.1.7 Conexión de OPC/OCD .....	42
Figura 5.1.8 Opciones de OPC/OCD .....	42

Figura 5.1.9 Puerto de salida.....	43
Figura 5.1.10 Direcciones de memoria de entradas y salidas.....	43
Figura 5.1.11 Barra de herramientas de la parte inferior en el IDE de CODESYS .....	44
Figura 5.1.12 Pestaña Resources.....	44
Figura 5.1.13 Recursos de variables globales.....	44
Figura 5.1.14 Creación de las variables globales.....	45
Figura 5.1.15 Online .....	45
Figura 5.1.16 Ventana de Communication Parameters .....	46
Figura 5.1.17 Selección de un nuevo canal Tcp/Ip (Level 2 Route).....	46
Figura 5.1.18 Opciones de la pestaña Project.....	47
Figura 5.1.19 Selección de Symbol configuration .....	48
Figura 5.1.20 Ventana Set object attributes .....	49
Figura 5.1.21 Barra de herramientas del IDE de CODESYS para Diagramas de Escalera .....	50
Figura 5.1.22 Programa del PLC .....	50
Figura 5.1.23 Icono del PLC virtual de CoDeSys .....	51
Figura 5.1.24 Ventana de configuración del PLC virtual .....	51
Figura 5.1.25 Login y Run activados secuencialmente desde la pestaña Online .....	52
Figura 5.1.26 Ejecución de la simulación del automatismo en FluidSim .....	52
Figura 6.1.1. Cilindros y válvulas del automatismo con secuencia A- B-   A- B+   A+ B- sintetizado por el método heurístico.....	54
Figura 6.1.2. Control eléctrico del automatismo con secuencia A- B-   A- B+   A+ B- sintetizado por el método heurístico .....	55
Figura 6.1.3. Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B-   A- B+   A+ B- sintetizada por el método heurístico.....	56
Figura 6.1.4 Cilindros y válvulas del automatismo electroneumático con secuencia A- B- C-   A+ B- C-   A+ B+ C-   A- B+ C-   A- B+ C+   A- B+ C- diseñado por el método heurístico .....	57
Figura 6.1.5 Control del automatismo electroneumático con secuencia A- B- C-   A+ B- C-   A+ B+ C-   A- B+ C-   A- B+ C+   A- B+ C- sintetizado por el método heurístico .....	57
Figura 6.1.6 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B- C-   A+ B- C-   A+ B+ C-   A- B+ C-   A- B+ C+   A- B+ C- sintetizada por el método heurístico.....	58
Figura 6.1.7 Cilindros, válvulas y finales de carrera del automatismo de dos cilindros con secuencia A- B-   A- B+   A+ B- diseñado por el método de cascada .....	61
Figura 6.1.8 Diagrama de Escalera de la activación y desactivación de los grupos .....	62
Figura 6.1.9 Conexión de los relevadores a los solenoides de las válvulas de control .....	62

Figura 6.1.10 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B-   A- B+   A+ B- sintetizada por el método de cascada .....	63
Figura 6.1.11 Cilindros del automatismo de la secuencia A- B- C-   A+ B- C-   A+ B+ C-   A- B+ C-   A- B+ C+   A- B+ C- por el método de cascada .....	65
Figura 6.1.12 Circuito de activación y desactivación de los grupos parte 1 .....	66
Figura 6.1.13 Circuito de activación y desactivación de los grupos parte 2 .....	67
Figura 6.1.14 Conexión de los relevadores a los solenoides de las válvulas de control .....	67
Figura 6.1.15 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B- C-   A+ B- C-   A+ B+ C-   A- B+ C-   A- B+ C+   A- B+ C- por el método de cascada .....	68
Figura 6.1.16 Diagrama de estados.....	70
Figura 6.1.17 Control de los estados del automatismo .....	72
Figura 6.1.18 Diagrama de Escalera de las condiciones de transición.....	73
Figura 6.1.19 Diagrama de Escalera de los solenoides de las válvulas de control activados por los estados del automatismo.....	73
Figura 6.1.20 Automatismo electroneumático de dos cilindros controlados por PLC .....	74
Figura 6.1.21 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B-   A- B+   A+ B- por el método de máquinas de estados finitos .....	75
Figura 6.1.22 Diagrama de estados.....	77
Figura 6.1.23 Activación de los estados del automatismo parte 1 .....	79
Figura 6.1.24 Activación de los estados del automatismo parte 2 .....	80
Figura 6.1.25 Diagrama de Escalera con funciones de detección de flanco para el botón START y los sensores de final de carrera .....	80
Figura 6.1.26 Diagrama de Escalera de las condiciones de transición.....	81
Figura 6.1.27 Diagrama de Escalera de los solenoides de las válvulas de control activados por los estados del automatismo.....	82
Figura 6.1.28 Automatismo electroneumático de tres cilindros controlados por PLC.....	83
Figura 6.1.29 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B- C-   A+ B- C-   A+ B+ C-   A- B+ C-   A- B+ C+   A- B+ C- sintetizada por el método de máquinas de estados finitos .....	84
Figura 6.2.1 Cilindro de doble efecto del laboratorio de neumática .....	85
Figura 6.2.2 Unidad de mantenimiento del laboratorio de neumática .....	85
Figura 6.2.3 Válvulas de control de 5/2 vías del laboratorio de neumática .....	86
Figura 6.2.4 Tablero de entrenamiento electroneumático del laboratorio de neumática.....	86
Figura 6.2.5 Sensores de final carrera magnéticos .....	86
Figura 6.2.6 Relevadores.....	87
Figura 6.2.7 Protoboard .....	87

Figura 6.2.8 Dos botones pulsadores, uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado .....	87
Figura 6.2.9 Manguera genérica de aire .....	88
Figura 6.2.10 Automatismo diseñado por el método heurístico.....	89
Figura 6.2.11 Parte neumática del automatismo .....	90
Figura 6.2.12 Unidad de memoria de los grupos del automatismo.....	90

# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se presentan los antecedentes históricos de los automatismos, se discute su síntesis, se define el problema de la tesis y se especifica el tipo de automatismos estudiados al igual que el software de simulación empleado.

### 1.1 Antecedentes

La automatización industrial, en sentido estricto, no comenzó sino hasta el siglo XVIII, con la Primera Revolución Industrial. Su objetivo principal fue facilitar el trabajo humano, mejorar la precisión y fiabilidad de los procesos, y aumentar tanto la productividad como la calidad de los productos. Esta etapa inicial se caracterizó por el uso de grandes máquinas impulsadas mecánicamente, que reemplazaron al trabajador como el elemento central del proceso productivo [1].

Las primeras aplicaciones de esta automatización ocurrieron en fábricas textiles, acerías y plantas de fabricación de maquinaria. Debido a la simplicidad de los procesos, las máquinas realizaban únicamente ciclos repetitivos como perforar y cortar usando como energía primaria el vapor de agua. Estas máquinas dieron lugar a los primeros automatismos [2].

No fue sino hasta la Segunda Revolución Industrial que se comenzaron a aplicar automatismos más avanzados, principalmente en la industria automotriz, la cual dio origen a la producción industrial al implementar la línea de ensamblaje para fabricar de forma eficiente el automóvil Modelo T en 1913, innovación de Henry Ford que revolucionó la industria en general. En este nuevo entorno de producción fue necesario integrar sistemas de control más complejos debido al incremento de variables de proceso y a la exigencia cada vez mayor de aumentar la producción sin sacrificar la calidad de los productos y el costo operativo. Esta situación junto con el desarrollo de tecnologías como los relevadores eléctricos, impulsó la conformación de automatismos más sofisticados capaces de satisfacer las nuevas demandas de producción [1].

Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, surgieron los automatismos neumáticos con el objetivo de satisfacer la creciente demanda de producción de armamento. Estos avances hicieron necesaria la adopción de métodos sistemáticos para la síntesis de automatismos, que inicialmente se valieron de la intuición y de la experiencia de los diseñadores y evolucionaron hasta convertirse en técnicas analíticas consolidadas, como el sistema en cascada, los diagramas de Karnaugh-Veitch, entre otros, vigentes hasta el día de hoy [3].

## **1.2 Definición del problema**

Este proyecto de tesis se centró en el estudio del diseño de automatismos electroneumáticos, los cuales permiten hacer más eficientes los procesos de producción porque se evitan los errores humanos, reduciendo tanto el tiempo de realización como los costos operativos, sin comprometer la calidad del producto.

El tamaño del automatismo está en función de las entradas y salidas de los diferentes procesos y de la lógica de movimientos, lo cual impacta directamente en la dificultad de su síntesis. Para lograr un diseño óptimo, es fundamental aplicar métodos estructurados, entre los cuales destacan el de cascada y el heurístico o empírico, por su sencillez. Sin embargo, presentan complicaciones en las síntesis de automatismos con más de tres actuadores, o en secuencias donde ciertas acciones se repiten en diferentes momentos del proceso.

Debido a estos inconvenientes, se optó por estudiar el método de Máquinas de Estados Finitos aplicado a la síntesis de automatismos electroneumáticos. Si bien este método se usa habitualmente en el diseño de circuitos digitales, sus reglas también permiten aplicarlo al diseño de automatismos fuera de la electrónica, capaces de superar las limitaciones arriba mencionadas.

### 1.3 Estado del arte

El diseño de un automatismo debe partir de la selección del método de síntesis más conveniente de acuerdo a sus requerimientos de desempeño, su tamaño y la tecnología empleada.

Según [4], comparado con un automatismo neumático un automatismo electroneumático es más eficiente en cuestión de tiempo de reacción, costo de materiales y cantidad de aire utilizado. Esto puede tomarse como criterio de selección de tecnología siempre que se requiera.

En cuanto al tiempo de realización, la claridad de los diagramas y la cantidad de errores de diseño, la eficiencia del método de Grafcet es superior a la de los métodos de cascada y paso a paso, sobre todo cuando se trata de secuencias electroneumáticas largas y complejas [5]. Esto es relevante para nuestra investigación debido a la similitud entre el método de Grafcet y el método de Máquinas de Estados Finitos que se estudia en esta tesis.

En trabajos más cercanos al tema de investigación se consideran estudios sobre la utilización del método de Máquinas de Estados Finitos como herramienta para la síntesis de automatismos. Por ejemplo, en [6] se comparan el Método de Máquinas de Estados Finitos con el de paso a paso, y se llega a la conclusión que el primero es más fácil de analizar, y permite la detección de errores y las modificaciones con mayor facilidad. Los resultados del análisis comparativo se observan en la tabla 1.

**Tabla 1 Análisis comparativo de los métodos de síntesis de los automatismos neumáticos Paso a Paso y Máquinas de Estados Finitos [6].**

<b>Criterios</b>	<b>Método Paso a Paso</b>	<b>Máquinas de Estados Finitos</b>
Facilidades para analizar las necesidades del sistema neumático	=	=
Facilidad para su implementación con PLC	=	=
Fácil detección de errores		+
Fácil modificación		+
Fácil implementación de sistemas de paro de emergencia, con opción a reanudar el sistema desde un punto deseado		+
Existencia de casos especiales en la aplicación de la metodología de acuerdo con el funcionamiento del sistema	+	

Otro trabajo que aborda la comparación de métodos de síntesis de automatismos es [7], el cual estudia los métodos de Grafcet, Máquinas de Estados Finitos y Redes de Petri para sintetizar un automatismo electroneumático con acceso remoto vía internet a una celda de manufactura que procesa cajas. El autor concluye que los métodos de Máquinas de Estados Finitos y Grafcet fueron menos eficientes en comparación con las Redes de Petri.

## **1.4 Justificación**

De la revisión del estado del arte observamos que los trabajos estudiados sobre síntesis de automatismos siguiendo el método de Máquinas de Estados Finitos no sustentan sus resultados experimentalmente, sino sólo mediante simulaciones computacionales; además, el criterio de comparación que usaron se limitó a la evaluación de la complejidad del método.

Por nuestra parte, en esta tesis respaldamos nuestro análisis comparativo con experimentos de laboratorio, además de simulaciones computacionales, y usamos como criterios de evaluación el costo y los materiales requeridos para una implementación, además de la complejidad del método.

En las empresas de ensamblaje de vehículos los automatismos electroneumáticos tienen una alta incidencia en el área de manejo de materiales [8]. Esta tecnología es preferida por que puede manipular materia prima o productos terminados con mayor rapidez, sin propensión a errores y sin poner en riesgo la integridad física de los operadores humanos. En este contexto, la síntesis de automatismos cobra importancia en el análisis, mantenimiento y puesta en marcha de líneas de producción que demanden la modificación de un automatismo o su diseño desde cero.

Con el propósito de ahorrar tiempo y componentes en la síntesis de un automatismo es necesario definir desde el principio el método que brinda mejores resultados para un problema dado. Nuestra contribución va, entonces, en ese sentido: proporcionar elementos técnicos que faciliten la toma de decisiones.

## **1.5 Objetivo principal**

Realizar un análisis comparativo de los métodos de síntesis de automatismos de cascada, heurístico y diagramas de estado usando como criterios el costo aproximado y cantidad de materiales requeridos para la implementación, la cantidad de recursos gráficos y textuales para representar la evolución de los automatismos y sus posibles errores, y el número de pasos para realizar modificaciones.

## **1.6 Objetivos específicos**

1. Estudiar las ventajas y desventajas de los automatismos neumáticos y electroneumáticos.
2. Estudiar los métodos de síntesis de automatismos neumáticos.
3. Estudiar el software FluidSim y CoDeSys e implementar cosimulaciones entre ambos.
4. Aplicar los métodos de síntesis estudiados en el diseño de automatismos de dos y tres cilindros de baja complejidad y realizar simulaciones computacionales.
5. Implementar físicamente algunos de los automatismos sintetizados.

## **1.7 Metodología**

Se inicia con la determinación del grado de dificultad que presentan los métodos de síntesis de automatismos heurístico, de cascada y de diagramas de estado. Para ello, se hace uso de tres procedimientos: simulaciones en FluidSIM, software enfocado al diseño de automatismos neumáticos y electroneumáticos, cosimulaciones de FluidSIM y CODESYS, software gratuito enfocado a la configuración y simulación de varias marcas comerciales de PLC, y experimentos de laboratorio.

Para ello, se realizó un estudio de las ventajas y desventajas de los automatismos neumáticos y electroneumáticos así como de sus diferentes métodos de síntesis. Luego, mediante un enfoque de lo simple a lo complejo, se realizaron simulaciones y cosimulaciones empezando con secuencias de 2 cilindros y terminando con secuencias de 3 cilindros. Los resultados de las simulaciones se usaron como base de algunos experimentos a fin de comprobar prácticamente el desempeño teórico de los automatismos y la complejidad en su implementación.

Una vez realizado el proceso anteriormente descrito, se definió el número de componentes de cada automatismo con el propósito de determinar los costos económicos de los mismos, y así tener un criterio más para la comparación entre las diferentes tecnologías de automatismos sintetizados.

## 1.8 Alcance y limitaciones

En el proyecto de tesis se compara el método de síntesis de automatismos neumáticos y electroneumáticos de Máquinas de Estados Finitos (MEF) con los métodos de cascada y heurístico, tomando, principalmente, como parámetros de comparación el grado de estructuración y el número de componentes que resulta de la aplicación de cada método.

Se usa software comercial especializado para probar el desempeño de cada automatismo. En el caso puramente neumático fue suficiente con realizar simulaciones, mientras que en el caso de automatismos electroneumáticos se recurrió a cosimulaciones, recurso indispensable por la inclusión de un PLC virtual.

La prueba de desempeño de los automatismos electroneumáticos también se llevó al plano experimental en el Laboratorio de Neumática de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP. En dichas prácticas, se utilizaron los tableros de entrenamiento de automatismos neumáticos propios del laboratorio, así como relevadores genéricos de 24 V de cd, válvulas 5/2 vías y cilindros de doble efecto, con una presión de trabajo de 6 bares.

Los automatismos con los que se trabajó se consideran de mediana complejidad porque tienen un máximo de tres cilindros y no incluyen dispositivos de conteo o de temporización, aunque con el MEF es posible trabajar esos casos.

No se consideran otros métodos de síntesis como el de Grafset o el de Redes de Petri por ser menos comunes.

# Capítulo 2

## Estado del Arte

### 2.1 Importancia de la neumática

La neumática como tecnología de control de procesos productivos ofrece algunas ventajas como utilizar como fuente de energía el aire que se encuentra en abundancia en la atmósfera, lo que hace que los componentes de un sistema neumático no presenten el riesgo de explosiones e incendios. Otras de sus ventajas son el control relativamente sencillo de la carrera de los actuadores a la vez que su mantenimiento es mucho más fácil y, en general, se realiza a un costo más bajo en comparación con otras tecnologías como la hidráulica y la eléctrica. Sin embargo, en el mismo tenor presenta ciertas desventajas, como, por ejemplo, ser más ruidosa y mucho menos precisa. Aún así, debido a sus ventajas son muy utilizados en la industria tanto nacional como extranjera cuando es necesario manipular diferentes objetos de peso relativamente bajo y sin requerimientos de alta precisión en el posicionamiento.

### 2.2 Características claves de los automatismos neumáticos.

Los automatismos neumáticos requieren de sencillos sistemas de mando y actuación conformados por dispositivos cuyo número varía de acuerdo a la complejidad del automatismo, aunque su integración típicamente es rápida y económica, lo que resulta una opción sencilla y rentable para resolver problemas de movimientos repetitivos de objetos de peso ligero sin restricciones estrictas de precisión. Su implementación se enmarca por una red de aire comprimido que debe mantenerse siempre perfectamente limpia y seca para evitar daños en los componentes y un mal funcionamiento, aspectos que se logran mediante una unidad de mantenimiento.

## **2.3 La electroneumática y su alcance**

En la electroneumática, a diferencia de la neumática que utiliza únicamente el aire como fuente de energía para el funcionamiento completo del sistema, se utiliza energía eléctrica en los elementos de control y mando, lo cual resulta de gran ayuda ya que reduce el número de componentes que se tendrían que utilizar si fuera un sistema puramente neumático. Su naturaleza mixta neumática-eléctrica demanda la incorporación de dispositivos adicionales como los interruptores limitadores, interruptores por presión, interruptores de final de carrera y relevadores, entre otros, que sirven para resolver problemas de control retroalimentado, y tienen la ventaja de requerir menor mantenimiento, ofrecer mayor duración y menor desperdicio de energía. Una de sus desventajas, además de requerir de elementos de mayor costo, es que los automatismos electroneumáticos no se deberían utilizar en los casos de riesgo por chispa eléctrica.

## **2.4 Automatismos con PLC**

En los automatismos neumáticos y electroneumáticos la parte de control puede realizarse mediante lógica cableada, haciendo uso de cables, mangueras, relés y otros componentes físicos, lo que constituye una opción económica y fácil de implementar cuando se trata de sistemas simples; esto es, aquellos que manejan un bajo número de variables de sistema y realizan movimientos con una lógica sencilla. Sin embargo, cuando el sistema maneja muchas variables de proceso o los movimientos que realiza suponen una lógica secuencial más compleja, la lógica cableada pierde su practicidad, pues la cantidad de componentes de la parte de control aumenta en proporción directa al número de variables del sistema, lo cual dificulta la modificación del diseño y la localización de errores.

En contraste, en los sistemas de lógica programada, típicamente basados en PLC (Controladores Lógicos Programables), el diseñador construye la lógica del funcionamiento del automatismo mediante código de programación, lo cual facilita su aplicación a procesos con muchos sensores y actuadores, con modificaciones frecuentes en el diseño y requerimientos de espacio reducido.

## **2.5 Métodos de diseño de automatismos**

La conformación de un automatismo, es decir, la definición de los elementos que lo conforman y sus interconexiones se logra mediante procesos de síntesis a partir de la secuencia deseada. Existe una amplia variedad de métodos con este propósito, desde los informales hasta los bien estructurados, variando en complejidad y en las tecnologías que usan. Entre los más populares se encuentran el heurístico y el de cascada preferidos por su sencillez. Sin embargo, tienen la limitación de manejar secuencias simples, obligando al usuario a buscar métodos de síntesis de mayor

alcance. Uno de estos métodos es el de Máquina de Estados Finitos, bien conocido en el campo de la electrónica digital, por su capacidad de trabajar con secuencias lógicas más complejas. Los métodos antes mencionados se abordarán con mayor detalle en el capítulo 4.

## **2.6 Simulación computacional**

Fluidsim es un software comercial de la compañía Festo empleado para la simulación y prueba de los automatismos electroneumáticos antes de su posible implementación en forma práctica. Entre sus ventajas se encuentran el permitir observar su funcionamiento con un alto grado de precisión, ayudando a la detección y corrección de errores, examinar los efectos de las modificaciones de diseño y conocer sus consecuencias inmediatas, ahorrando así tanto tiempo como materiales y permitiendo comparar diferentes automatismos con la finalidad de elegir la mejor opción.

Para la realización de simulaciones que incluyen un PLC, además de Fluidsim se usó en este trabajo de investigación el software CODESYS, el cual permite simular un PLC de manera virtual. La comunicación entre ambas aplicaciones de software se realiza mediante la tecnología [9] OPC (Open Platform Communications), estándar de interoperabilidad empleado en el ámbito de la automatización industrial y en otras industrias que permite que diferentes aplicaciones se comuniquen de forma segura y fluida, sin importar que pertenezcan a diferentes marcas.

# Capítulo 3

## Componentes de un automatismo neumático

La neumática es una rama de la ingeniería muy extendida en la industria debido a su bajo costo, robustez y confiabilidad. Se define como [10] una disciplina del área tecnológica utilizada para el control, en la que interviene aire a presión como fuente de energía, cilindros, válvulas, elementos de lógica de control, etc, que se interconectan entre sí a través de tuberías o mangueras y conectores.

### 3.1 Definiciones y nomenclatura

En la neumática se necesita de un estándar que permita la fácil identificación de los diferentes componentes que conforman los automatismos, como lo son los cilindros, las válvulas de control, las unidades de mantenimiento, entre otros; esto con el propósito del diagnóstico de fallas y análisis de desempeño.

En esta tesis se adoptó [11] la norma ISO 1219-1 y 1219-2 las cuales tienen el propósito de representar los símbolos que se deben utilizar en los esquemas neumáticos e hidráulicos.

En este contexto normativo, en los esquemas neumáticos, los cuales, son planos donde se especifica el diseño de los automatismos, se pueden emplear diferentes tipos de nomenclaturas, para el etiquetamiento de los diferentes componentes, como por ejemplo [11]:

*identificación por cifras con una numeración continua.*

*identificación por cifras con una numeración compuesta.*

*identificación por letras.*

*identificación por cifras y letras*

Resalta entre todos los diferentes tipos, la nomenclatura por letras debido a que permite observar de manera rápida y clara el comportamiento de los automatismos.

Esto facilita el estudio de su funcionamiento, la realización de simulaciones y su implementación.

En esta tesis se sigue la siguiente nomenclatura [12]:

- *Los elementos de trabajo (motores, cilindros, etc.) se designan por letras mayúsculas a partir de la letra A siguiendo un orden alfabético (A, B, C, etc.).*
- *Si la carrera de un vástago de cilindro es de salida a la letra correspondiente se le agregara un signo más, y si es de entrada un signo menos.*
- *Las válvulas con accionamiento mecánico actuadas por los cilindros (elementos de trabajo) se designan por las mismas letras, pero minúsculas del cilindro al que corresponden, con un subíndice 0 o menos (-) si el vástago está colocado en la posición de reposo, o por un subíndice 1 o más (+) si el vástago está en la posición de trabajo.*

### 3.2 Símbolos de los componentes neumáticos

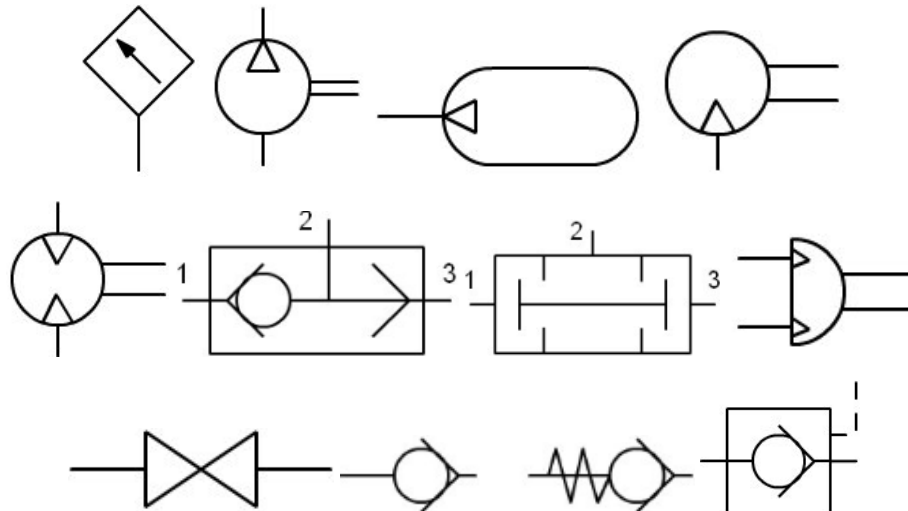
Los automatismos neumáticos pueden ser conformados por una amplia variedad de componentes, cada uno con una función particular. Los símbolos de los componentes neumáticos utilizados en esta tesis están basados en la norma ISO 1219. En primer lugar, está la unidad de mantenimiento que mínimamente se conforma por un filtro de aire y un regulador de presión, aunque puede tener adicionalmente un filtro de partículas, una trampa de humedad y un lubricador. Su función [12] es tratar el aire antes de ser utilizado por los demás componentes neumáticos: primero se filtra el aire de partículas de polvo, posteriormente se regula la presión de trabajo, y finalmente se proporciona una pequeña capa de lubricante para el correcto funcionamiento de los demás elementos del automatismo.



**Figura 3.2.1 Unidad de mantenimiento [13].**

Otros componentes que conforman un automatismo neumático son la planta compresora, tuberías, válvulas de control y relevadores o PLC para automatismos electroneumáticos. Otros componentes menos comunes que pueden extender las

capacidades de un automatismo son, por ejemplo, sensores, depósitos neumáticos, compresores para aire comprimido, válvulas Y (AND), válvulas o (OR), motores neumáticos de un sentido de giro y motores neumáticos de dos sentidos de giro, entre otros, algunos de los cuales se muestran en la figura 3.2.2.

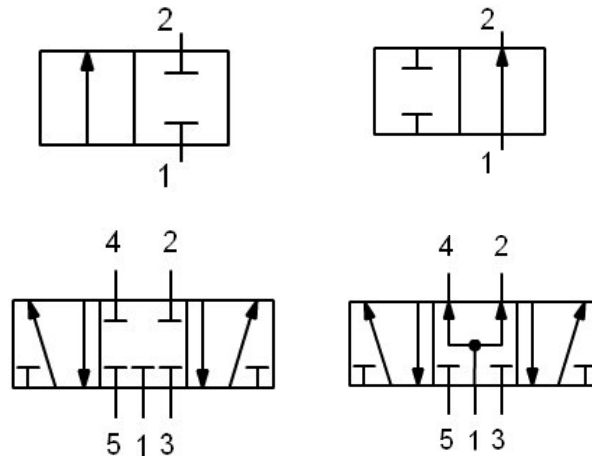


**Figura 3.2.2 Componentes neumáticos [13]. De izquierda a derecha y de arriba abajo: sensor, compresor para aire comprimido, depósito neumático, motor neumático de un sentido de giro, motor neumático de dos sentidos de giro, válvula OR, válvula AND, cilindro basculante de dos sentidos de giro, válvula de cierre, válvula de bloqueo y válvula de retención pilotada.**

A continuación, se muestran los símbolos de los elementos neumáticos que se emplearon en la síntesis de los automatismos estudiados en esta tesis.

## Válvulas

Las válvulas [14] son elementos que mandan o regulan la puesta en marcha, el paro y la dirección de los elementos de trabajo o actuadores, así como la presión o el caudal del fluido enviado por el compresor o almacenado en un depósito. Su nomenclatura está en función del número de vías que tiene y de las posiciones que puede adoptar, y su símbolo toma en cuenta la función particular de la válvula.

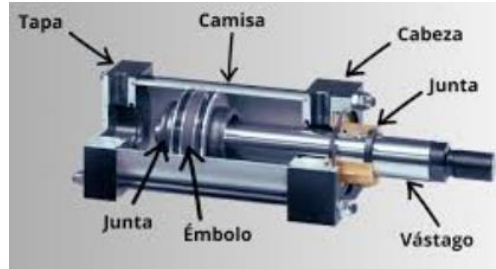


**Figura 3.2.3 De izquierda a derecha y de arriba abajo: válvula 2/2 vías en posición normalmente cerrada, válvula 2/2 vías en posición normalmente abierta, válvula 5/3 vías en posición normalmente cerrada y válvula 5/3 vías en posición normalmente abierta [13].**

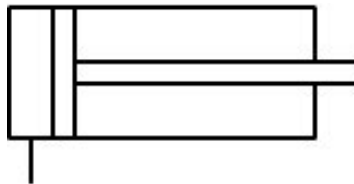
## Cilindros

Los cilindros [15] son actuadores neumáticos lineales que transforman la energía del aire comprimido en movimiento mecánico. Están compuestos (figura 2.2.4) principalmente por un cuerpo cilíndrico, un émbolo (pistón) que se desplaza en el interior y un vástago que transmite ese movimiento al exterior para realizar un trabajo específico, cómo empujar, levantar, presionar o sujetar piezas en un sistema automatizado. El funcionamiento de un cilindro depende de la entrada y la salida de aire a través de las válvulas, las cuales controlan la presión y dirección del flujo de aire. Dichas válvulas se conectan a las vías del cilindro (entradas de aire comprimido), permitiendo así el movimiento del émbolo en una o ambas direcciones, dependiendo del tipo de cilindro. El símbolo que representa a los cilindros en los esquemas neumáticos indica cuántas vías tiene el actuador y de qué forma se retrae el vástago, ya sea mediante un resorte o por acción del aire comprimido en sentido contrario. Un ejemplo ilustrativo es el cilindro de simple efecto mostrado en la figura 3.2.5. En este caso, el aire comprimido solo actúa en una dirección, empujando el

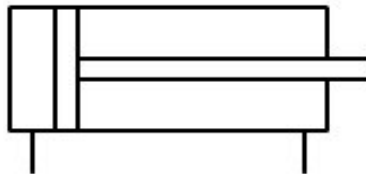
vástago hacia afuera (carrera de avance), y su retorno es por resorte u otro medio no neumático. Otro ejemplo es el cilindro de doble efecto, figura 3.2.6, en el que el aire actúa en ambas direcciones, permitiendo que el vástago se mueva hacia adelante y hacia atrás (carrera de ida y vuelta) mediante aire comprimido.



**Figura 3.2.4 Partes de un cilindro [16]**



**Figura 3.2.5 Cilindro de simple efecto, retorno por esfuerzos externos [13].**



**Figura 3.2.6 Cilindro de doble efecto [13].**

# Capítulo 4

## Síntesis de automatismos electroneumáticos

En esta tesis se considera que la síntesis de un automatismo [17] es el proceso metodológico mediante el cual se obtiene la descripción de sus componentes y sus interconexiones a partir de la secuencia de activación de sus elementos de trabajo que se quiere realizar. Se estudian los automatismos electroneumáticos, es decir, los que usan electroválvulas para la activación de los cilindros.

Se utilizan tres métodos de síntesis: heurístico, de cascada y máquinas de estados finitos, y se han validado mediante simulaciones en FluidSim, cosimulaciones en FluidSim y CoDeSys e implementaciones en el laboratorio. Cada método se describe a continuación.

### **4.1 Componentes principales para un automatismo, grupos, estados y reglas de construcción del diagrama esquemático**

El primer paso, común a los tres métodos de síntesis, es la definición del número y tipos de elementos principales necesarios para la implementación del automatismo. El número de cilindros se determina directamente de la secuencia y es igual al número de letras que ésta ocupa. Cada cilindro hace uso de una válvula de control de 5/2 vías. Cada posición del vástago de un cilindro se detecta con un sensor de final de carrera. De manera general, los elementos principales que conforman un automatismo con una secuencia de  $n$  letras, se puede estimar con la siguiente relación:

- n Cilindros de doble efecto. Cada letra de la secuencia corresponde a un cilindro.
- n Válvulas de control de 5/2 vías, una por cilindro.
- n Pares de sensores de final de carrera, un par por cada cilindro.
- n Pares de relevadores, un relevador por cada final de carrera como memoria de la posición del cilindro.

Adicionalmente, en la implementación del método heurístico se emplea un relevador por cada grupo repetido en la secuencia, ya que no es posible determinar en este caso el grupo precedente.

Se eligen cilindros de doble efecto para tener control tanto de su activación como su desactivación. Se utilizan válvulas 5/2 vías porque cada una de sus posiciones corresponde a la activación y desactivación del cilindro, y sus 5 vías porque una se emplea para la alimentación de aire comprimido, dos para el control del cilindro y dos para el desfogue. Se necesitan los sensores de final de carrera para el control de los solenoides de las válvulas de control.

## **Grupos y estados**

El método de cascada [18] usa para su implementación el concepto de grupo. Un grupo es una parte de la secuencia en donde ninguna letra, que representa a un actuador, se repite, y la unión de todos los grupos forma la secuencia original. Se busca que el número de grupos sea el menor posible, y cada grupo se designa por un número romano de manera consecutiva. Por otro lado, se denomina fase [19] a cada cambio de estado de cualquier elemento de una secuencia.

Por otro lado, el método de Máquinas de Estados Finitos usa el concepto de estado, que es equivalente al concepto de grupo que usa el método de cascada.

## **4.2 Reglas de construcción del diagrama esquemático**

El diagrama esquemático de un automatismo se puede dividir en una parte electroneumática y en una parte puramente eléctrica. En la parte electroneumática se encuentran los cilindros, los sensores de final de carrera y las válvulas de control. Por otro lado, en la parte eléctrica se encuentran los relevadores y los solenoides de las válvulas de control cuando se trata de los automatismos diseñados por el método heurístico y de cascada, o se encuentran los Diagramas de Escalera del control por PLC. Las reglas de construcción de cada parte serán abordadas en esta sección.

### 4.3 Parte electroneumática del diagrama esquemático

Las reglas de construcción del diagrama esquemático para la parte electroneumática [20] se refieren a las interconexiones de los elementos del automatismo siguiendo el siguiente orden de posicionamiento vertical de componentes, desde la parte superior del diagrama hacia abajo

- Elementos de trabajo.
- Elementos de regulación.
- Elementos de mando.
- Módulo de tratamiento.
- Módulo de entrada.
- Unidad de mantenimiento.
- Alimentación de energía.

Por su simplicidad, uno puede colocar los elementos de trabajo, estos es los cilindros y las válvulas del automatismo, en un diagrama esquemático aún antes de realizar cualquier otro pasó de diseño. Simplemente, a cada elemento de trabajo (cilindro del automatismo) se le conecta una válvula 5/2 vías para controlar su activación y un sensor de final de carrera para detectar la posición de su vástago. Los sensores emiten las señales numeradas con 0, por ejemplo A0, B0, etc., para las posiciones de reposo, y las señales numeradas con 1, por ejemplo A1, B1, etc., para las posiciones de trabajo de cada cilindro.

Nota:

En esta tesis en todos los casos se considerará que la posición inicial de cada elemento de trabajo corresponde al vástago retraído, y el estado correspondiente de esta condición, E1, se omitirá por practicidad en la descripción de la secuencia y se iniciará en su lugar con la primera transición. Cada vez que se defina una secuencia se resaltarán con color rojo únicamente los cilindros que cambiaron su condición de reposo. Se usará también el subrayado para indicar los grupos o estados de la secuencia que se repiten.

En esta tesis se estudian los automatismos electroneumáticos es decir los que usan electroválvulas para la activación de los cilindros. En estos casos, el diagrama esquemático correspondiente se realiza con los cilindros conectados a las válvulas de control y los sensores de final de carrera detectando las posiciones de los vástagos de los cilindros, como se apreciará en las subsecciones siguientes.

### 4.4 Parte eléctrica del diagrama esquemático

Las válvulas que forman parte del sistema de mando del automatismo son accionadas por solenoides conectados a un sistema eléctrico basado ya sea en relevadores para las síntesis de los métodos de heurístico y cascada, o en PLC para la síntesis del método Máquinas de Estados Finitos.

El control de los solenoides de las válvulas depende de cada método de síntesis y para su diseño se toman en cuenta las señales provenientes de los sensores de final de carrera y el orden de la secuencia del automatismo.

## 4.5 Métodos de síntesis de automatismos

Cada uno de los tres métodos de síntesis, heurístico, cascada y máquinas de estados finitos, será ilustrado con la aplicación a una secuencia de tres cilindros, considerada como de mediana complejidad, y que incluye arbitrariamente un estado repetido tres veces. Cada desarrollo del procedimiento de síntesis se numera secuencialmente a fin de poder realizar un análisis posterior de su complejidad.

### 4.5.1 Método empírico o heurístico

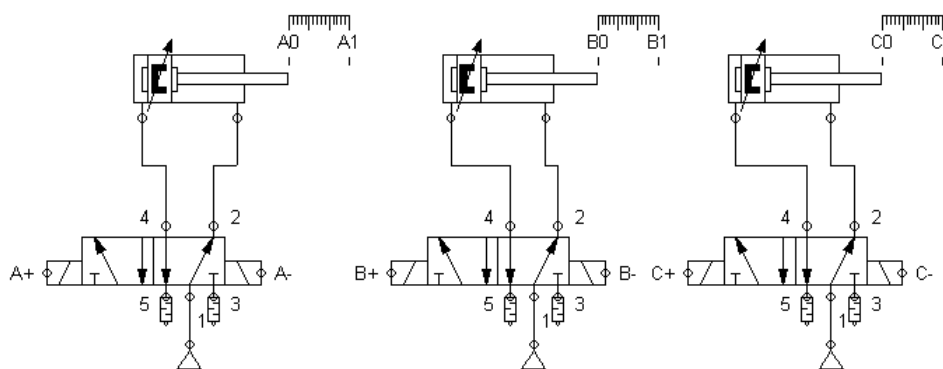
El método empírico o heurístico, [17] a diferencia de otros métodos, no se basa en reglas ya establecidas sino en la intuición y el pensamiento lógico.

Como ejemplo de su aplicación, se considera la síntesis que corresponde a la siguiente secuencia:

**A- B- C- | **A+** B- C- | A- B- C- | A- **B+** C- | A- B- C- | A- B- **C+** |**

El procedimiento de síntesis queda definido en los siguientes pasos.

- Definición de los elementos de trabajo y de control.** Aplicando la regla de definición de componentes citada en la sección previa, se tiene:
  - 3 Cilindros de doble efecto A, B y C.
  - 3 Válvulas de control de 5/2.
  - 3 Pares de sensores de final de carrera, un par por cada cilindro.
  - 2 Relevadores.
- Diagrama esquemático de la parte neumática.** Para su dibujo se sigue la regla indicada en la sección previa, y el diagrama se muestra en la figura 4.1.1.



**Figura 4.1.1 Elementos de trabajo y válvulas de mando del automatismo.**

**A- B- C- | **A+** B- C- | A- B- C- | A- **B+** C- | A- B- C- | A- B- **C+** |**

3. **Diseño del control por relevadores.** Se observa que la secuencia tiene un grupo o estado repetido tres veces. Esto ocasiona una indefinición en la evolución de la secuencia si se usa únicamente las señales de final de carrera como criterio de activación. De aquí resulta evidente la necesidad de identificar el grupo en turno para lograr la activación del grupo siguiente, lo cual se consigue con relevadores usados como unidades de memoria. Se utilizan n relevadores de acuerdo a la fórmula  $r \leq 2^n$ , con r el número de repeticiones. En este caso,  $r = 3$ , por lo que  $n = 2$ . Así, se requieren dos relevadores K0 y K1, un relevador por cada repetición de acuerdo a la tabla 2 donde se muestra el estado que se activará en función de los estados de los relevadores en donde si los dos relevadores están activados se indetermina el estado que se activará.

**Tabla 2: Combinación de los relevadores para la activación de los estados del automatismo.**

K0	K1	Estado activo
0	0	E2
0	1	E4
1	0	E6
1	1	X

El Diagrama de Escalera correspondiente se ilustra en la figura 4.1.2. En los casos donde no existen grupos repetidos, únicamente se emplean los sensores de final de carrera como condiciones de activación para los cilindros, siendo conectados directamente a los solenoides de las válvulas de control. Este caso se aborda en el capítulo 6.



Los restantes 6 pasos del procedimiento de la síntesis del automatismo se describen a continuación.

- Definición de elementos de la secuencia.** Se crea la tabla 3 de elementos de la secuencia, la cual especifica los grupos, las fases, los relevadores de grupo y los sensores de final de carrera que conforman la secuencia, y la nomenclatura empleada. Los sensores de final de carrera detectan el estado de cada actuador, y un relevador de grupo se usa como elemento de memoria para indicar qué grupo está activo en un instante específico.

**Tabla 3: Elementos de la secuencia según el método de cascada.**

Secuencia	<b>A+ B- C-   A- B- C-   A- B+ C-   A- B- C-   A- B- C+   A- B- C-</b>					
Grupos	I	II	III	IV	V	VI
Fases	A+	A-	B+	B-	C+	C-
Sensores	A1	A0	B1	B0	C1	C0
Relevadores del grupo	K1	K2	K3	K4	K5	K6

- Activación y desactivación de los grupos.** Se crea la tabla 4 para indicar qué elementos llevan a la activación y desactivación de los diferentes grupos.

**Tabla 4: Activación y desactivación de grupos.**

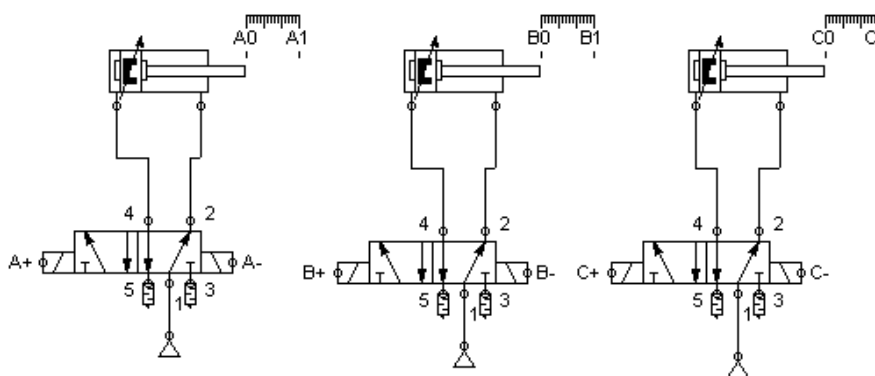
Grupo	Activado por	Desactivado por
I	C0 y VI	II
II	A1 y I	III
III	A0 y II	IV
IV	B1 y III	V
V	B0 y IV	VI
VI	C1 y V	I

- Activación de los solenoides.** La última tabla, 5, es realizada para indicar la activación de los solenoides de las válvulas mediante grupos.

**Tabla 5: Activación de solenoides.**

Solenoides	Activado por
A+	I
A-	II
B+	III
B-	IV
C+	V
C-	VI

5. **Construcción del diagrama esquemático de los elementos de trabajo.** Siguiendo las reglas de construcción abordadas en la sección 4.1, se obtiene el diagrama esquemático mostrado en la figura 4.1.3.



**Figura 4.1.3 Cilindros, válvulas de control y finales de carrera del automatismo.**

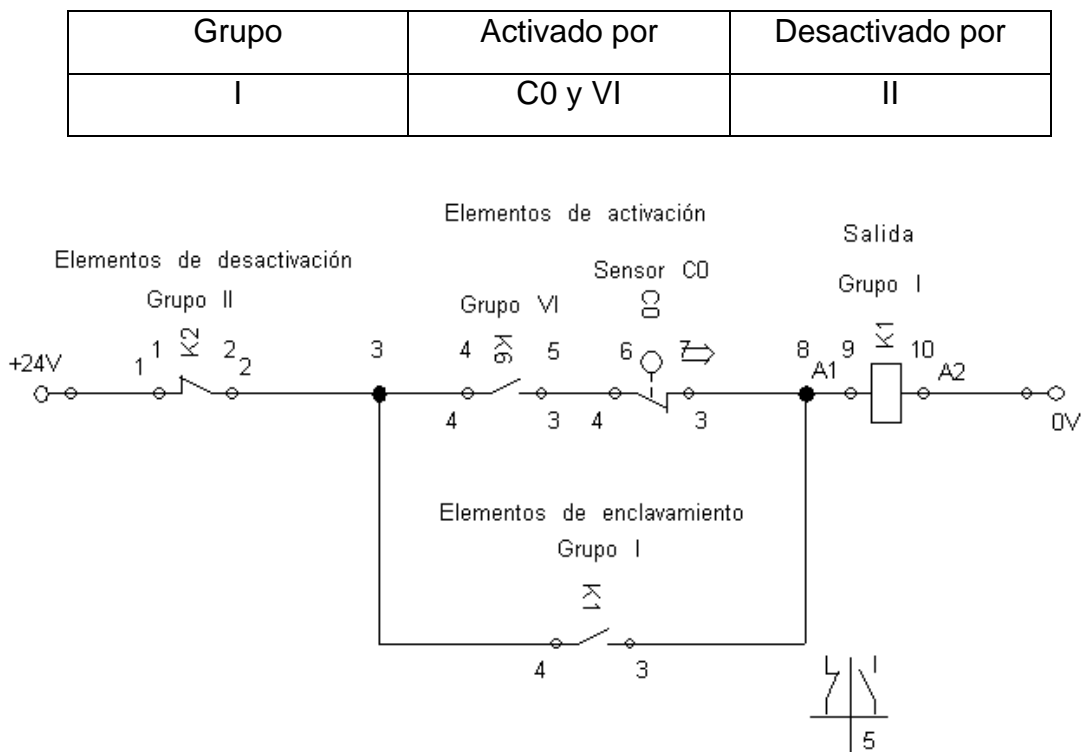
El resto del diagrama esquemático, el cual se refiere a la parte de control, se obtiene mediante los pasos siguientes:

6. **Activación y desactivación de los grupos.** Mediante la tabla 4 se construye el Diagrama de Escalera de la activación con enclavamiento y desactivación de los grupos. En esta secuencia de ejemplo, cada grupo consiste de un solo cilindro, aunque pudiera ser más de uno para otra secuencia diferente. Para construir el Diagrama de Escalera se implementa un enclavamiento por cada renglón de la tabla tomando como salida a las bobinas de los relevadores de cada grupo especificadas en la primera columna de la tabla. La condición de activación del enclavamiento está dada por los grupos y sensores de final de carrera que se toman de la segunda columna de la tabla, conectando estos elementos en serie para implementar las entradas de una función AND y generar como salida el enclavamiento de su respectivo grupo. Posteriormente, se usa el grupo de

desactivación especificado en la tercera columna de la tabla para desactivar el enclavamiento. Con esto se logra la implementación del control secuencial de los cilindros, lo que resta por sintetizar es la activación de los solenoides de las válvulas. Los pasos del procedimiento se resumen en la siguiente lista:

- Salida: Grupo que se quiere activar, representado por la bobina de un relevador
- Elementos de activación: Elementos de la segunda columna conectados en serie, representados por contactos normalmente abiertos
- Elemento de enclavamiento: Contacto normalmente abierto del relevador del grupo que se quiere activar conectado en paralelo con los elementos de activación
- Elementos de desactivación: Elementos de la tercera columna, representados por un contacto normalmente abierto

Lo anteriormente mencionado se puede observar con mayor detalle en la figura 4.1.4 donde se muestra cómo se crea una parte del Diagrama de Escalera que corresponde al grupo I especificado en la tabla 4 que será tomado como ejemplo ilustrativo.

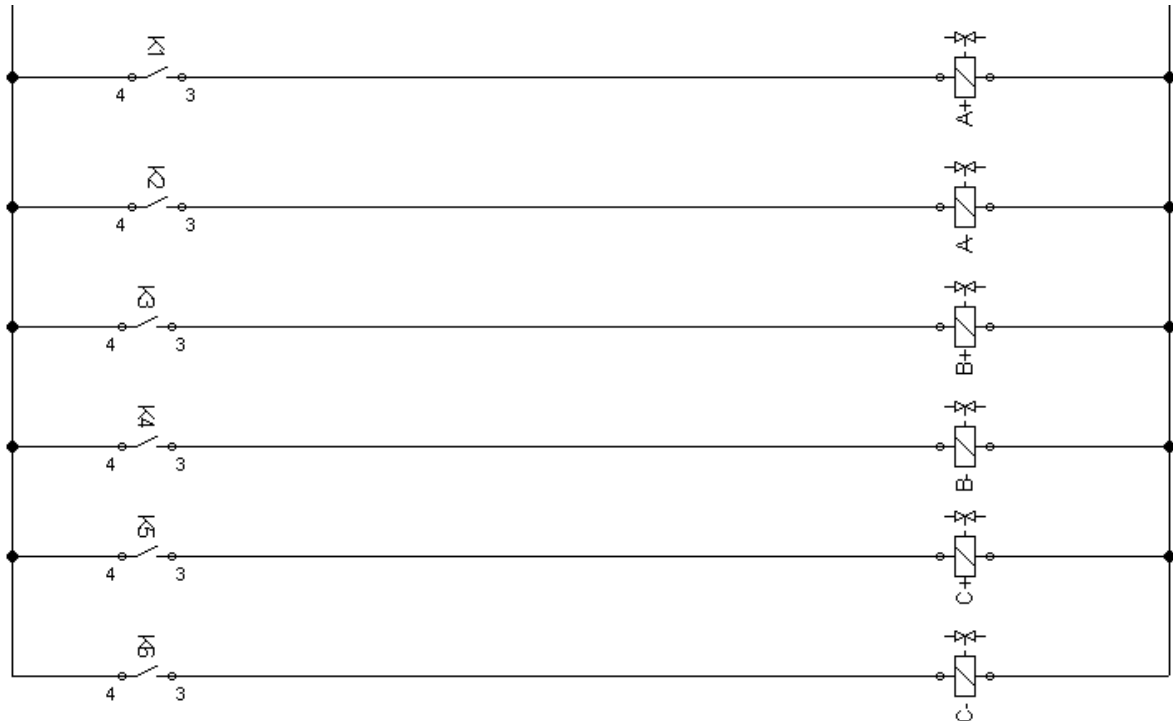


**Figura 4.1.4. Diagrama de Escalera de la activación y desactivación del grupo I.**



## 7. Conexión de los relevadores a los solenoides de las válvulas de control.

Finalmente, se genera la última parte del control conectando los relevadores de cada grupo directamente a los solenoides de las válvulas correspondientes, como marca la tabla 5 y se ilustra en la figura 4.1.6.



**Figura 4.1.6. Conexión de los relevadores a los solenoides de las válvulas de control.**

## 4.5.3 Máquinas de Estados Finitos

El método de Máquinas de Estados Finitos [21] se usa normalmente en el diseño de circuitos digitales, aunque puede ser extendido a otras áreas por su versatilidad. En nuestro caso, será usado para la síntesis de automatismos electroneumáticos basados en PLC debido a que éstos pueden ser estudiados mediante tablas de transición de estados.

Como entradas al PLC tenemos los sensores de final de carrera de cada cilindro, y como salidas los solenoides de las válvulas de control. Una vez aplicado el método de Máquinas de Estados Finitos resultarán los diagramas de escalera para la programación del PLC que controlará la secuencia del automatismo.

En la aplicación del método se usa la siguiente nomenclatura [22]:

- $E_1, E_2 \dots E_K$ : Conjunto finito de  $k$  estados. Opcionalmente, uno de estos,  $E_1$ , es asignado como el estado inicial.
- $I_1, I_2 \dots I_m$ :  $m$  entradas binarias
- $S_1, S_2 \dots S_n$ :  $n$  Salidas binarias

- $CT_1, CT_2, \dots, CT_{K-1}$ : Condiciones de transición de estado
- $F_1, F_2, \dots, F_K$ : Reglas de salida

La implementación de automatismos sintetizados por este método considera básicamente dos tecnologías diferentes, una basada en relevadores, y la otra basada en PLC. En esta tesis se abordará la segunda opción, usando un PLC virtual en un esquema de cosimulación entre Fluidsim y CODESYS, cuyos detalles se revisan en el capítulo 5.

Para propósitos de comparación, se implementó el método de Máquinas de Estados Finitos en la misma secuencia que se usó en los otros métodos.

Para facilitar la lectura se reescribe la secuencia:

**A- B- C- | **A+ B- C-** | A- B- C- | **A- B+ C-** | A- B- C- | **A- B- C+** |**

El método de Máquinas de Estados Finitos puede dividirse en 11 pasos secuenciales, que serán ilustrados a continuación.

1. **Definición de los elementos de trabajo y de control.** Al emplear un PLC ya no es estricta la necesidad de usar relevadores, reduciendo al mínimo el número de componentes de acuerdo a la lista siguiente:
  - 3 Cilindros de doble efecto A, B y C
  - 3 Válvulas 5/2
  - 6 Sensores de finales de carrera
  - 1 PLC
  - 1 Botón pulsador normalmente abierto
  - 1 Botón pulsador normalmente cerrado
2. **Identificación de entradas y salidas.** El siguiente paso en el procedimiento es la identificación de las entradas (sensores de final de carrera) y las salidas (cilindros) del automatismo.

#### **Entradas:**

START - Botón pulsador de arranque

STOP – Botón pulsador de paro

S1 – Sensor de final de carrera del actuador A extendido

S2 – Sensor de final de carrera del actuador A retraído

S3 – Sensor de final de carrera del actuador B extendido

S4 – Sensor de final de carrera del actuador B retraído

S5 – Sensor de final de carrera del actuador C extendido

S6 – Sensor de final de carrera del actuador C retraído

**Salidas:**

A+, A- : Solenoides de la válvula de control del cilindro A

B+, B- : Solenoides de la válvula de control del cilindro B

C+, C- : Solenoides de la válvula de control del cilindro C

donde el signo menos (-) o el signo (+) a la derecha del cilindro (A, B y C) representan que el correspondiente actuador está retraído o extendido, respectivamente.

3. **Definición de los estados.** Posteriormente, se definen los estados (en el método de cascada se usa en su lugar el concepto de grupo):

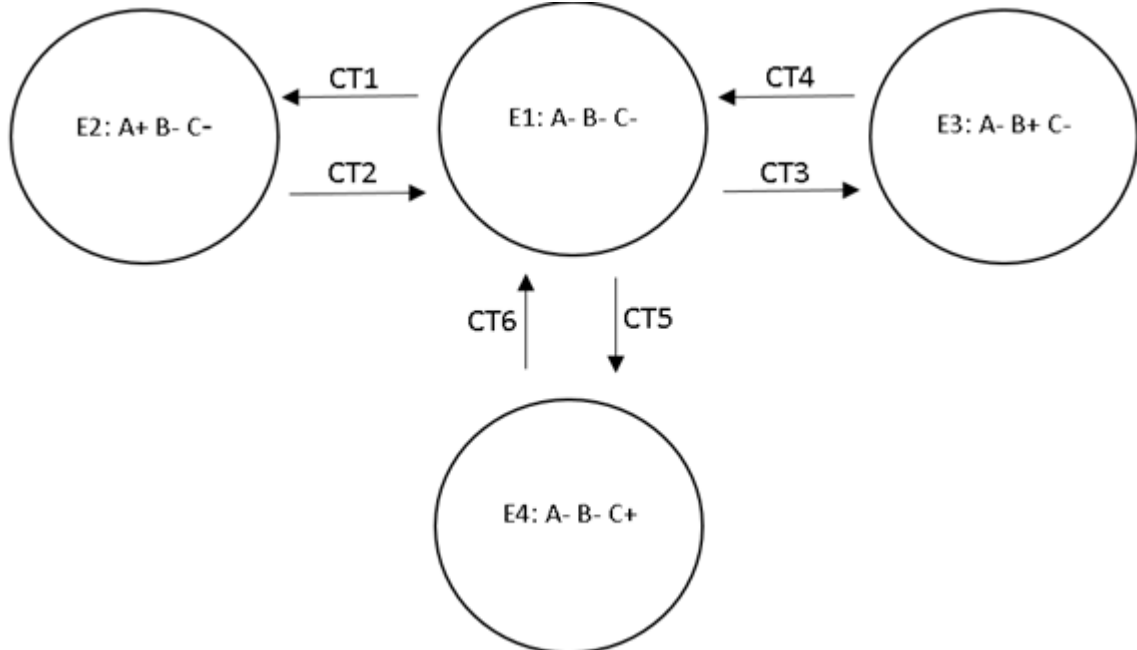
E1: A-B-C-

E2: A+B-C-

E3: A-B+C-

E4: A-B-C+

4. **Creación del diagrama de estados.** Luego, se crea el diagrama de estados, figura 4.1.7, donde los círculos encierran los estados, las flechas indican la transición y CT<sub>i</sub>, i=1,...6, las condiciones de transición de estados.



**Figura 4.1.7 Diagrama de estados.**

5. **Elaboración de la tabla de transición de estados.** A partir del diagrama de estados se elabora la tabla 6, la cual especifica la transición entre estados del automatismo en función de las entradas (START, STOP, y las señales de los sensores de final de carrera) y de los estados previos.

**Tabla 6: Transición de estados.**

No.	Cilindros (Edo. Ant.)	Entradas								Cilindros (Edo. Sig.)	Transición de Estado
		START	STOP	S1	S2	S3	S4	S5	S6		
1	E1	↑	0	0	1	0	1	0	1	E2	A-B-C-→A+B-C-
		X	0	0	1	0	1	0	↑		
2	E2	X	0	1	0	0	1	0	1	E1	A+B-C-→A-B-C-
		X	1	X	X	X	X	X	X		
3	E1	X	0	0	↑	0	1	0	1	E3	A-B-C-→A-B+C-
4	E3	X	0	0	1	1	0	0	1	E1	A-B+C-→A-B-C-
		X	1	X	X	X	X	X	X		
5	E1	X	0	0	1	0	↑	0	1	E4	A-B-C-→A-B-C+
6	E4	X	0	0	1	0	1	1	0	E1	A-B-C+→A-B-C-
		X	1	X	X	X	X	X	X		

X - Condición no importa ↑ - Flanco de subida (cambio de "0" a "1").

6. **Identificación y definición de las condiciones de transición.** A partir del diagrama de estados, figura 4.1.5, se identifican las condiciones de transición:

CT1 – Condición de transición para cambiar de E1 a E2

CT2 – Condición de transición para cambiar de E2 a E1

CT3 – Condición de transición para cambiar de E1 a E3

CT4 – Condición de transición para cambiar de E3 a E1

CT5 – Condición de transición para cambiar de E1 a E4

CT6 – Condición de transición para cambiar de E4 a E1

De la tabla 6 son definidas las ecuaciones lógicas de las condiciones de transición directamente de la conjunción de las entradas de un mismo renglón (cada entrada se enlaza con la siguiente mediante una función AND), ignorando las condiciones "no importa":

$$CT1 = (STOP \cdot S6 \uparrow + START \uparrow \cdot S6) \cdot (S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \cdot S5) \quad (\text{Ec. 4.1.1})$$

$$CT2 = (STOP \cdot S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \cdot S5 \cdot S6) + STOP \quad (\text{Ec. 4.1.2})$$

$$CT3 = STOP \cdot S1 \cdot S2 \uparrow \cdot S3 \cdot S4 \cdot S5 \cdot S6 \quad (\text{Ec. 4.1.3})$$

$$CT4 = (STOP \cdot S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \cdot S5 \cdot S6) + STOP \quad (\text{Ec. 4.1.4})$$

$$CT5 = STOP \cdot S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \uparrow \cdot S5 \cdot S6 \quad (\text{Ec. 4.1.5})$$

$$CT6 = (STOP \cdot S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot S4 \cdot S5 \cdot S6) + STOP \quad (\text{Ec. 4.1.6})$$

Donde el asterisco denota la función AND.

Finalmente, realizaremos el Diagrama de Escalera en CODESYS, marca registrada de origen alemán, que denota las direcciones de entradas con E (del alemán eingang, que significa entrada), y las direcciones de salidas con A (del alemán ausgang, que significa salida), seguida de una B y un número entero de 0 a 7 para denotar el byte asignado, un punto y otro número entero de 0 a 7 para denotar el bit correspondiente. Por ejemplo, las notaciones EB0.0 y AB0.0 denotan, respectivamente, la dirección de memoria 0 del byte 0 para la entrada, y un significado similar para la salida, etc.

La realización del diagrama de escalera consiste de 4 pasos adicionales, que junto con los 6 anteriores completan el método de síntesis de máquinas de estados finitos.

7. **Elaboración de tablas de variables del PLC.** Siguiendo esta notación, se direccionan las etiquetas START, STOP y S1 a S6 con los 8 bits del byte 0 de entrada; esto es, EB0.0 a EB0.7, respectivamente, mientras que A+, A-, B+, B-, C+ y C- con los 6 primeros bits del byte 0 de salida AB0.0 a AB0.5. Esto se indica en la tabla de variables 7 de abajo.

**Tabla 7: Tabla de variables del PLC.**

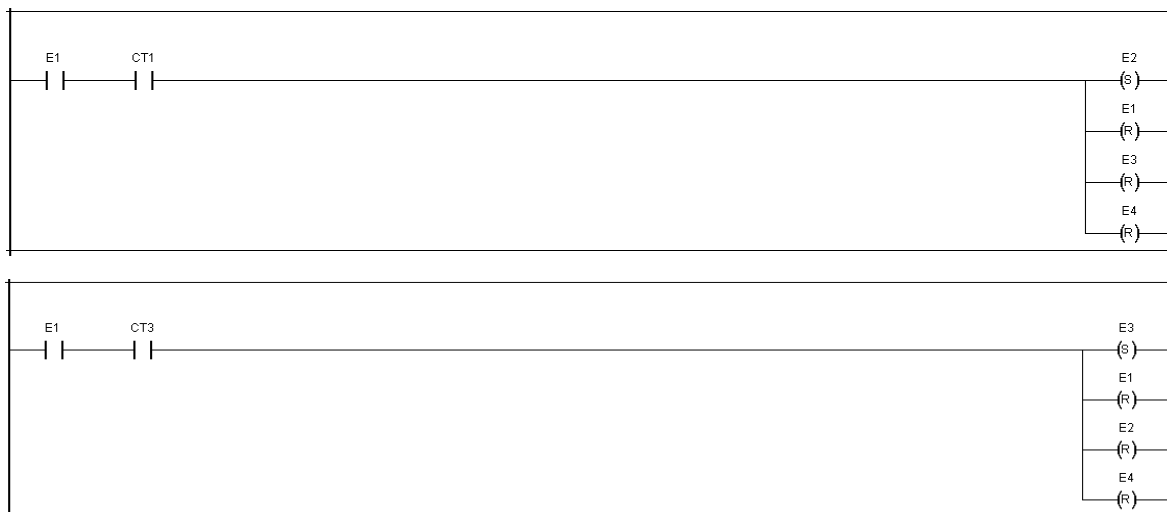
Dirección	Etiqueta*	Descripción
EB0.0	START	Botón de arranque
EB0.1	STOP	Botón de paro
EB0.2	A1	Final de carrera de A extendido
EB0.3	A0	Final de carrera de A retraído
EB0.4	B1	Final de carrera de B extendido
EB0.5	B0	Final de carrera de B retraído
EB0.6	C1	Final de carrera de C extendido
EB0.7	C0	Final de carrera de C retraído
AB0.0	Amas	Extiende el vástago del cilindro A
AB0.1	Amenos	Retrae el vástago del cilindro A
AB0.2	Bmas	Extiende el vástago del cilindro B
AB0.3	Bmenos	Retrae el vástago del cilindro B
AB0.4	Cmas	Extiende el vástago del cilindro C
AB0.5	Cmenos	Retrae el vástago del cilindro C

\* Se ha usado Amas en lugar de A+, etc., por una regla de sintaxis de CODESYS que no permite escribir etiquetas con símbolos.

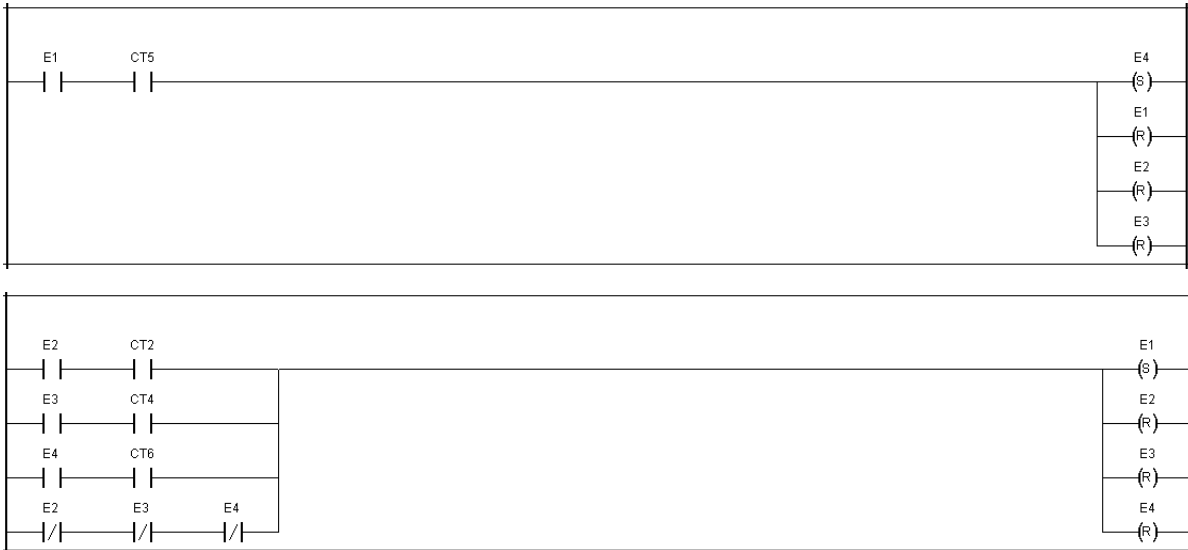
8. **Programación de la activación de los estados.** La activación de un estado depende de dos condiciones:

- que el estado previo este activo y
- que se verifique la condición de transición correspondiente.

Cuando un estado se activa deben desactivarse todos los demás. Se han usado las salidas *set* (S) y *reset* (R) propias de CODESYS para este propósito. El diagrama completo de todos los estados se muestra en las figuras 4.1.8 y 4.1.9.



**Figura 4.1.8 Control de los estados del automatismo parte 1.**



**Figura 4.1.9 Control de los estados del automatismo parte 2.**

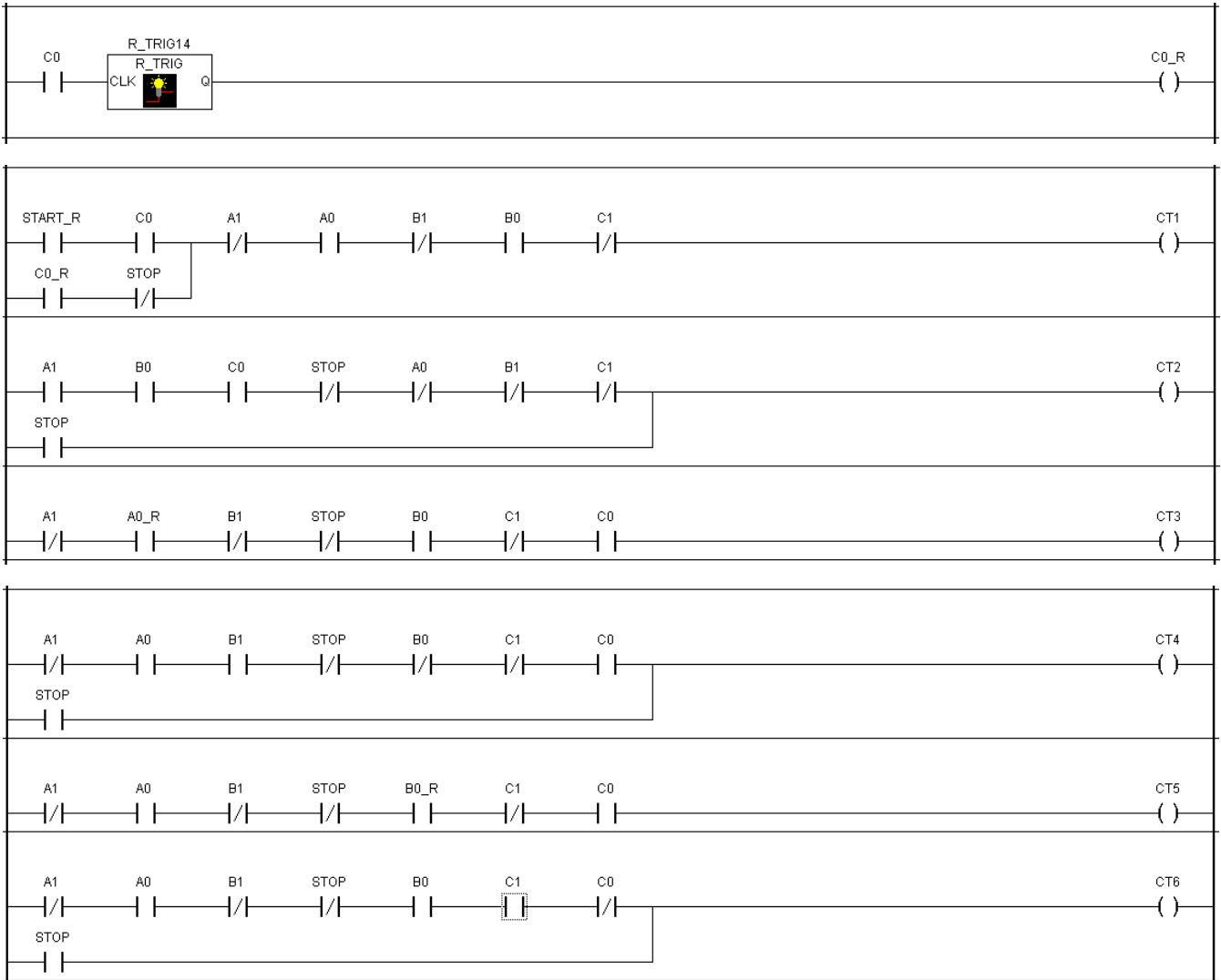
9. **Programación de las condiciones de transición.** Del diagrama de estados, figuras 4.1.7, se observa que hay estados repetidos. Sin embargo, las condiciones de transición de éstos estados difieren entre sí por tomar en cuenta la posición relativa de los cilindros; esto es, por considerar el flanco de la transición o la posición estable de un cilindro<sup>+</sup>. Para la detección de los flancos positivos se ha usado la función especial R\_TRIG propia de CODESYS, la cual detecta el flanco positivo de la función que precede al bloque de la función, y da como salida un “1” lógico. Por simplicidad, se han separado las detecciones de los flancos positivos de las condiciones de transición. Ambas partes se muestran en las figuras 4.1.10 y 4.1.11.

<sup>+</sup>También se usó la función R\_TRIG para detectar el flanco positivo de la señal START.



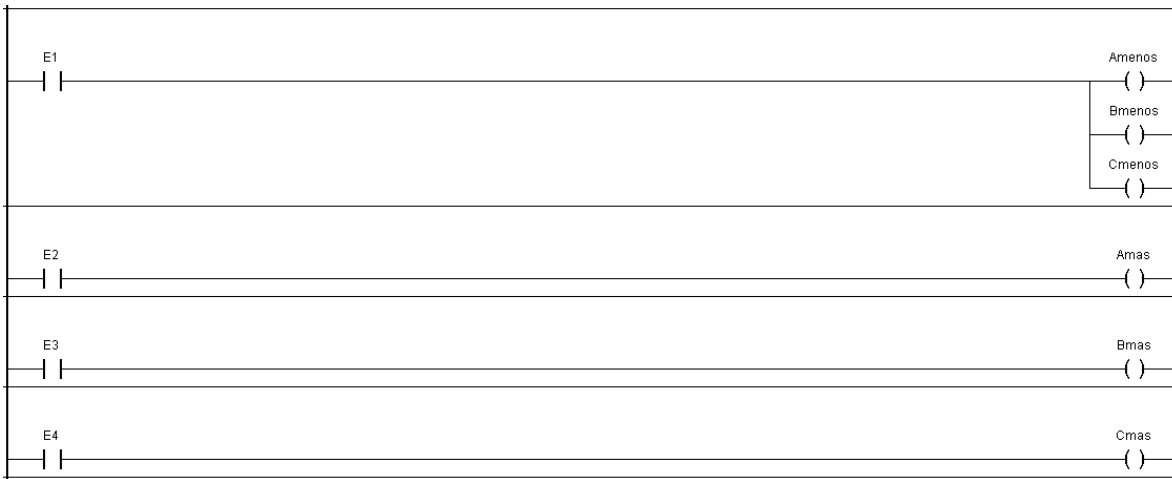
**Figura 4.1.10 Diagrama de Escalera de las condiciones de transición parte 1.**

En la figura 4.1.11 se agregan las condiciones de transición junto a las etiquetas de los flancos de subidas que se activan con el botón pulsador y los diferentes cilindros cuando pasan de un estado extendido a retraído (figura 4.1.10).



**Figura 4.1.11 Diagrama de Escalera de las condiciones de transición.**

10. **Programación de las salidas de control.** En la figura 4.1.12 se especifican los solenoides de las válvulas de control que son activados por los diferentes estados.



**Figura 4.1.12 Diagrama de Escalera de los solenoides de las válvulas de control activados por los estados del automatismo.**

11. **Construcción del diagrama esquemático de los elementos de trabajo.** Para concluir con la síntesis del automatismo, se realizan las conexiones entre el PLC, los sensores de final de carrera, los botones pulsadores y las válvulas de control de 5/2 vías. La parte de trabajo del automatismo es igual a la sintetizada por los otros métodos, es decir, consiste de dos cilindros de doble efecto conectados cada uno a una electroválvula 5/2 vías, con sensores de final de carrera A y B, respectivamente. El diagrama esquemático completo, figura 4.1.13, incluye un puerto de entradas al PLC, al que se conectan los finales de carrera y el botón de START y STOP, y un puerto de salida que se conecta directamente a los solenoides de las electroválvulas.

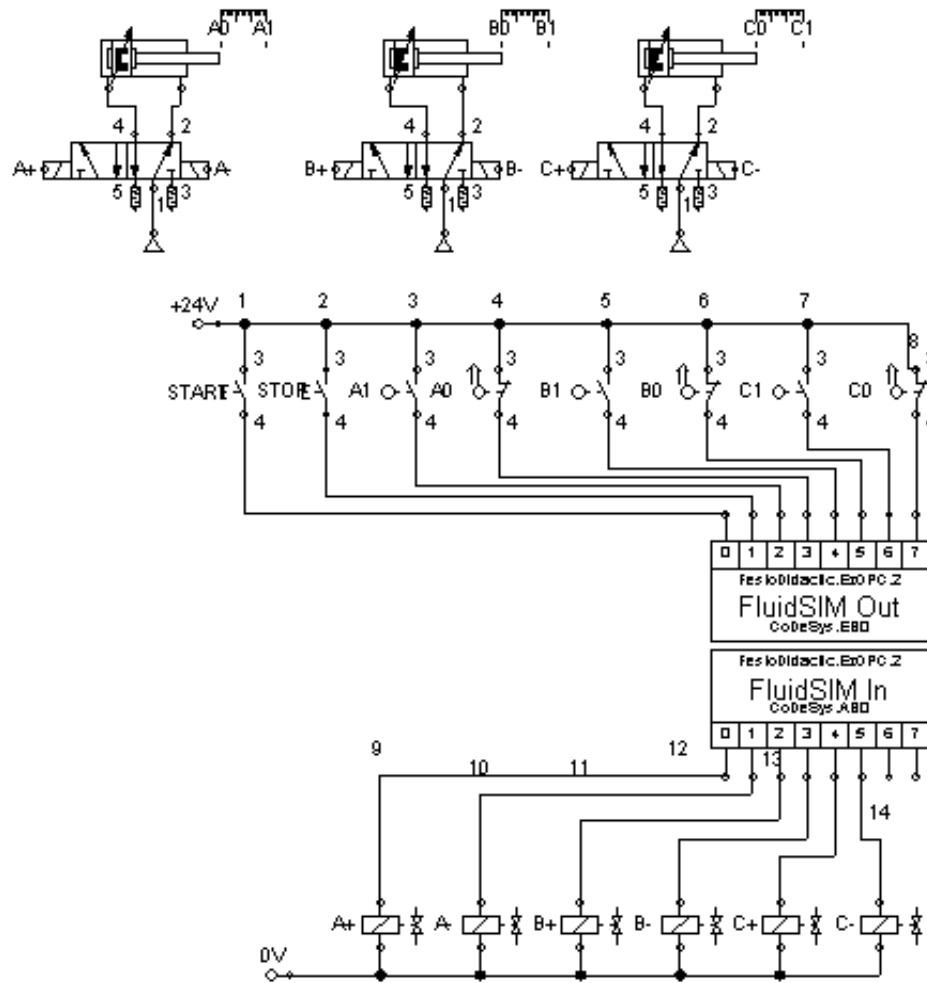


Figura 4.1.13 Automatismo electroneumático controlado por PLC.

## 4.6 Discusión sobre los tres métodos de síntesis de automatismos

En la realización de la misma secuencia con los tres diferentes métodos de síntesis de automatismos, se observó que el diseñado por el método de Máquinas de Estados Finitos requirió una menor cantidad de componentes físicos para su implementación con respecto a los sintetizados usando los otros dos métodos, pues sólo necesitamos un PLC, aparte de los cilindros, las válvulas y los sensores de final de carrera que son componentes comunes a las tres síntesis. Específicamente, los otros dos automatismos sintetizados usaron, adicionalmente a los componentes comunes, dos relevadores, en el caso del método heurístico, y seis relevadores, en el caso del método de cascada. Cabe resaltar que esto es válido para una secuencia de al menos tres cilindros, porque como se verá en el capítulo 6 cuando se trata de secuencias de menos de tres cilindros el método que requiere menos componentes es el heurístico, seguido del de Máquina de Estados Finitos y finalmente el de cascada.

Otra ventaja del método de Máquinas de Estados Finitos es que el uso del PLC permite el manejo de secuencias más complejas con relativa facilidad; por ejemplo, aquellas que incluyen temporización y conteo de eventos, o la inclusión de estados repetidos. Esto se debe a que los temporizadores y contadores, así como las funciones lógicas secuenciales que pudieran requerirse en la realización de secuencias de un automatismo se pueden implementar vía software, lo que no se puede decir de los otros dos métodos de síntesis que sólo usan componentes de hardware.

Adicionalmente, el software para programar el PLC generalmente cuenta con funciones internas para la detección de errores de programación, que junto con el análisis visual de los códigos de programas facilita el diagnóstico de fallas del automatismo y la modificación de la secuencia del mismo.

Otro aspecto importante de comparación es el costo aproximado de los componentes de un automatismo, que para los métodos heurístico y de cascada se determina directamente de la cantidad de éstos, mientras que para el método de Máquinas de Estados Finitos dependerá de las características del PLC. Un análisis detallado de este tema se realiza en el capítulo 6.

# Capítulo 5

## Cosimulación FluidSim CODESYS

En la realización del proyecto de tesis se usó la estrategia de cosimulación entre FluidSim\* de FESTO y CODESYS\*\* con el objetivo de analizar y comparar el desempeño de los diferentes automatismos antes de realizar las implementaciones prácticas.

En FluidSim se integraron los automatismos y en CODESYS el control lógico de la secuencia mediante un PLC virtual de la misma marca. Esto permitió observar las diferentes características de cada automatismo y valorar la eficiencia de su respectiva síntesis, el número de componentes, su costo y complejidad, entre otros.

Para ilustrar el proceso de cosimulación se usará un automatismo de un único cilindro por cuestión de simplicidad, dejando el caso de tres cilindros para el capítulo 6.

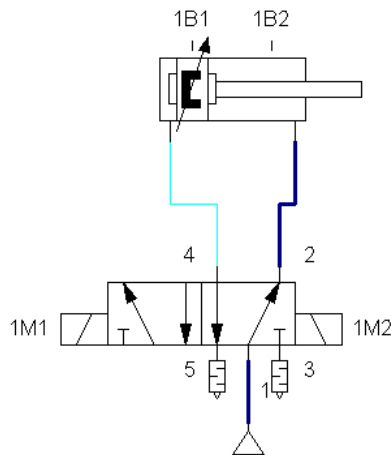
\*FluidSim: Software de simulación [23] para crear y simular esquemas de circuitos en neumática, hidráulica y electrotécnica.

\*\*CODESYS: Software [24] utilizado por ciento de fabricantes para programar y simular PLC bajo el estándar IEC-61131.

## Configuración de la cosimulación

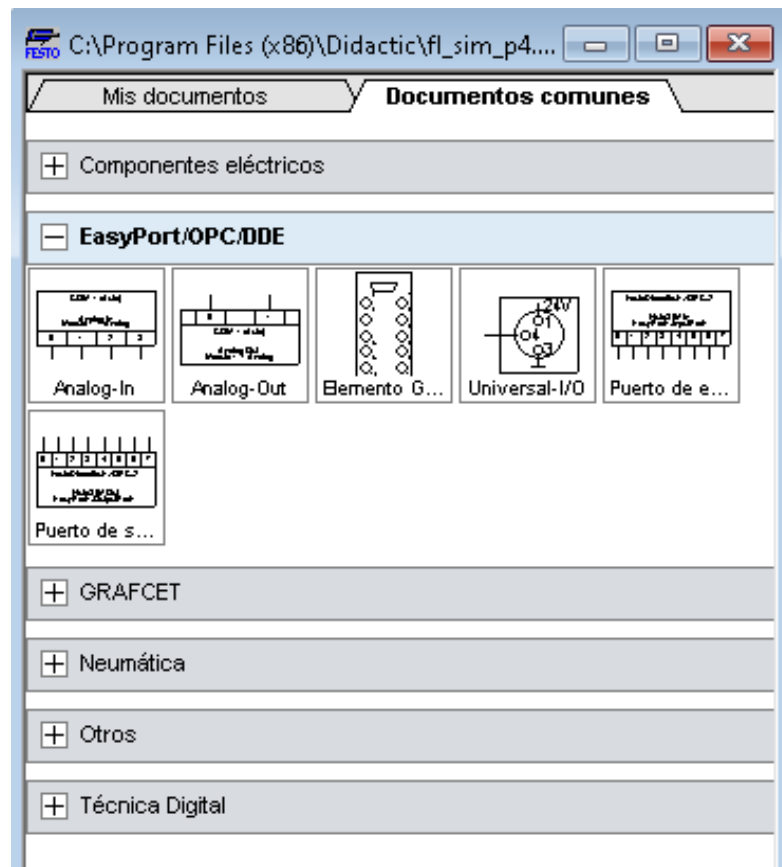
Para la realización de la cosimulación fue necesario seguir los siguientes pasos:

**5.1 Selección de puertos de entrada y salida.** Una vez elaborado el modelo del automatismo electroneumático en FluidSim se agrega el PLC virtual que se comunicará con el automatismo mediante dos puertos, uno de entrada al automatismo (salida del PLC) y otro de salida al automatismo (entrada del PLC), tomados de la biblioteca de Componentes eléctricos/EasyPort/OPC/DDE. Luego, al puerto de entrada se conectan la referencia eléctrica (comúnmente llamada tierra) y los solenoides que activarán las válvulas de control, mientras que al de salida se conectan la fuente de energía y los sensores de final de carrera.



**Figura 5.1.1 Automatismo simple antes de su conexión al PLC virtual.**

Los puertos de entrada y salida de Fluidsim (figura 5.1.2) únicamente cuentan con 7 entradas para la conexión tanto de los sensores de final de carrera como los solenoides de las válvulas de control.



**Figura 5.1.2 Puertos de entrada y salida.**

Los botones pulsadores se encuentran en la sección de interruptores (figura 5.1.3) en la subsección de accionamiento manual de los que ahí se encuentran únicamente se eligen la opción de pulsador (Obturador).

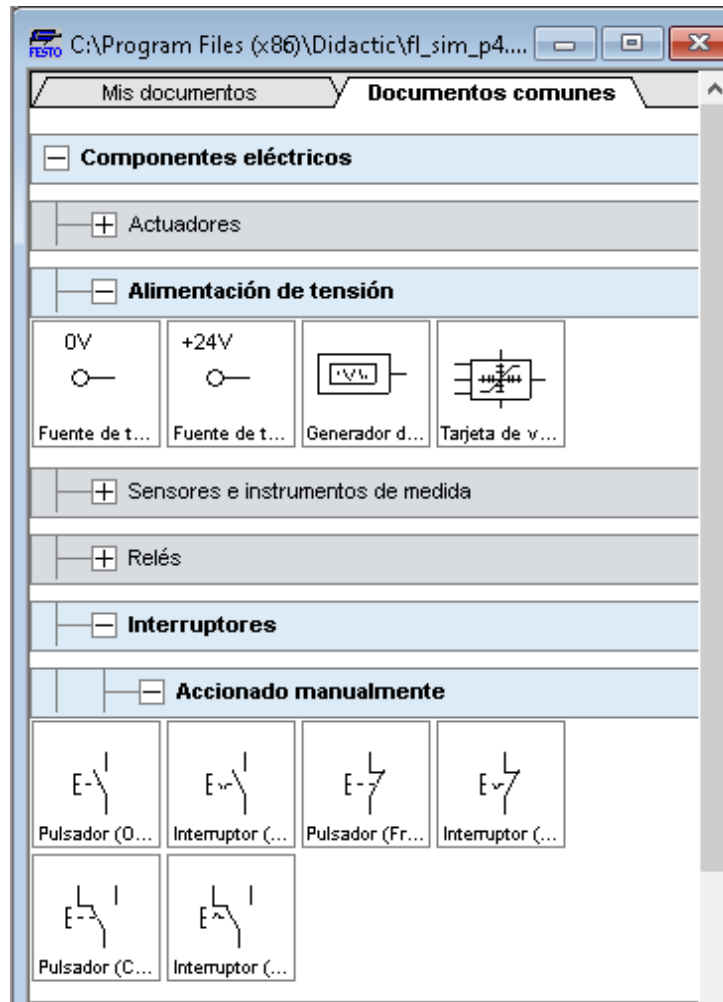
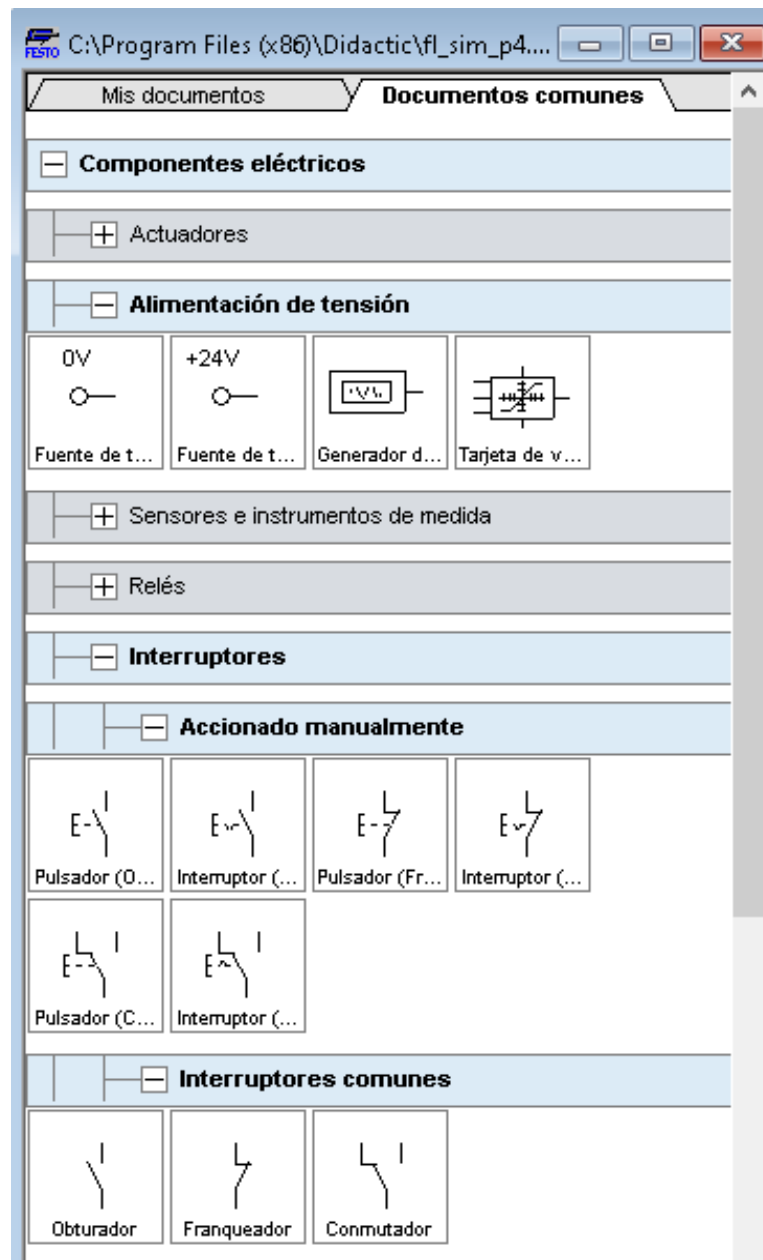


Figura 5.1.3 Fuente de energía y referencia eléctrica.

Para los sensores de final de carrera es necesario utilizar los interruptores normalmente abiertos que se encuentran en la sección de interruptores comunes (figura 5.1.4).



**Figura 5.1.4 Sensores de finales de carrera.**

En la sección de Relés (figura 5.1.5) únicamente se elige la opción de solenoides de válvulas y a diferencia de los sensores de final de carrera (figura 5.1.6) cuando no se ha iniciado la simulación estos se encuentran en el mismo estado en el que se encuentran los cilindros

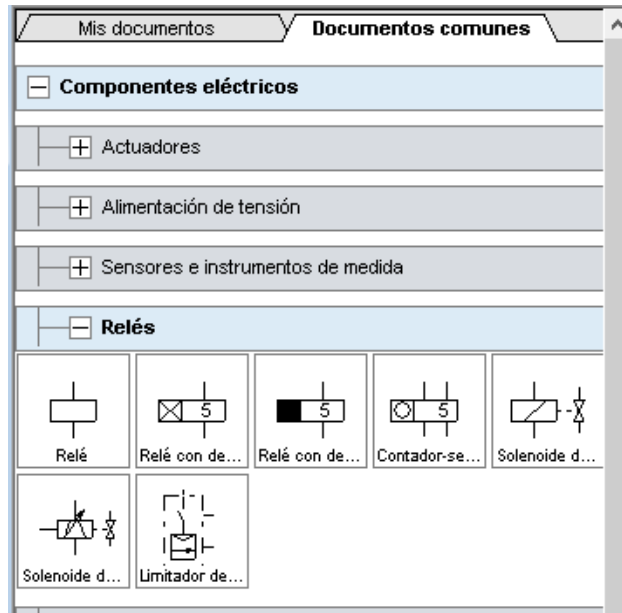


Figura 5.1.5 Solenoides de las válvulas de control.

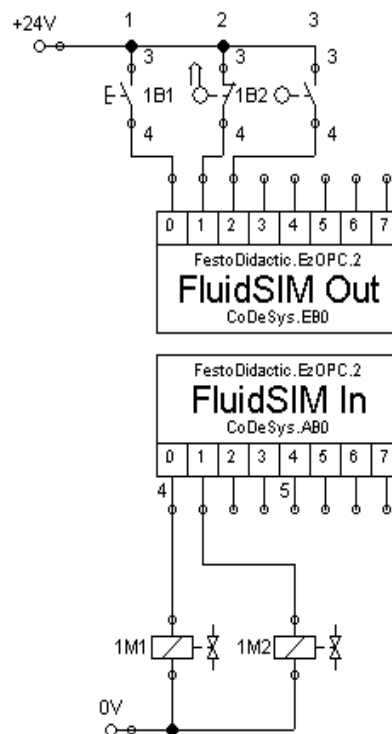
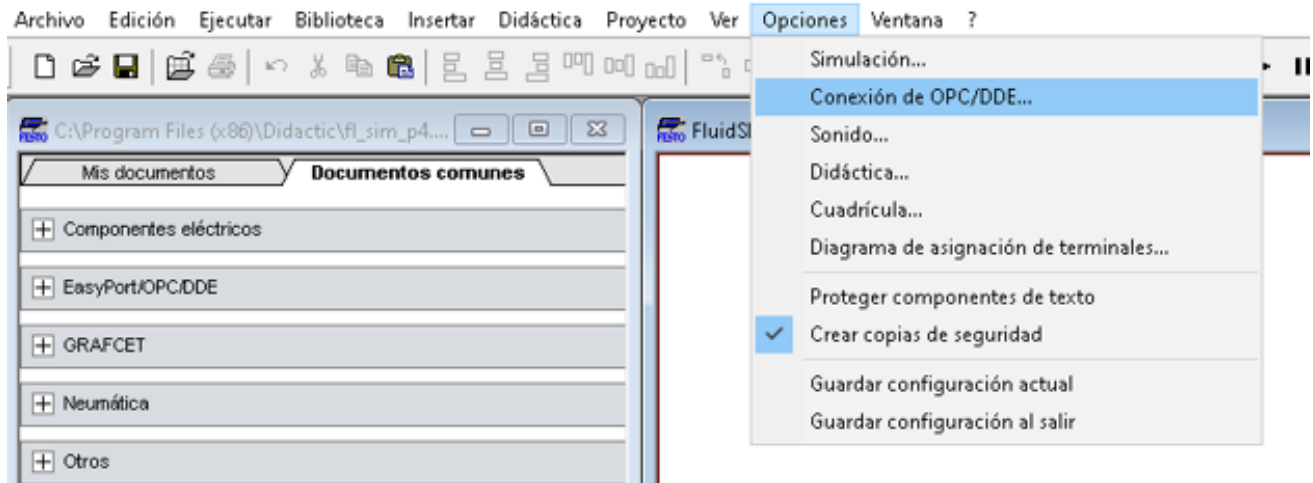
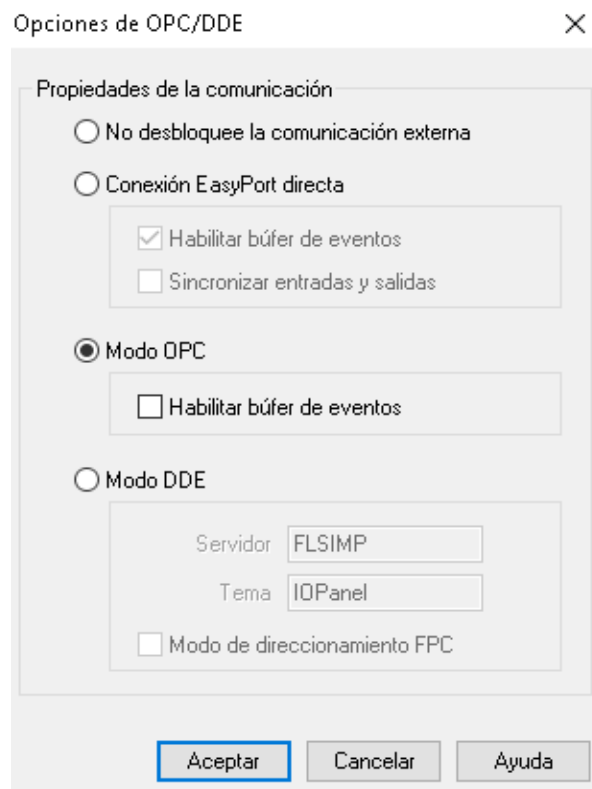


Figura 5.1.6 Puertos de entrada y salida.

**5.2 Conexión de OPC/DDE.** El protocolo de comunicación que hace posible la cosimulación es OPC/DDE el cual se configura desde **Opciones/Conexión de OPC/DDE...** Al hacerlo en la ventana emergente se selecciona **Modo OPC** y se deshabilita **Habilitar búfer de eventos** para evitar que se sature la memoria, como se ve en las figuras 5.1.7 y 5.1.8.

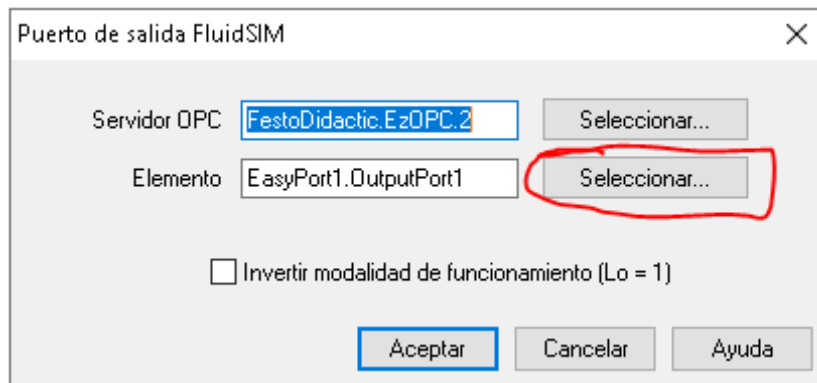


**Figura 5.1.7 Conexión de OPC/OCD.**

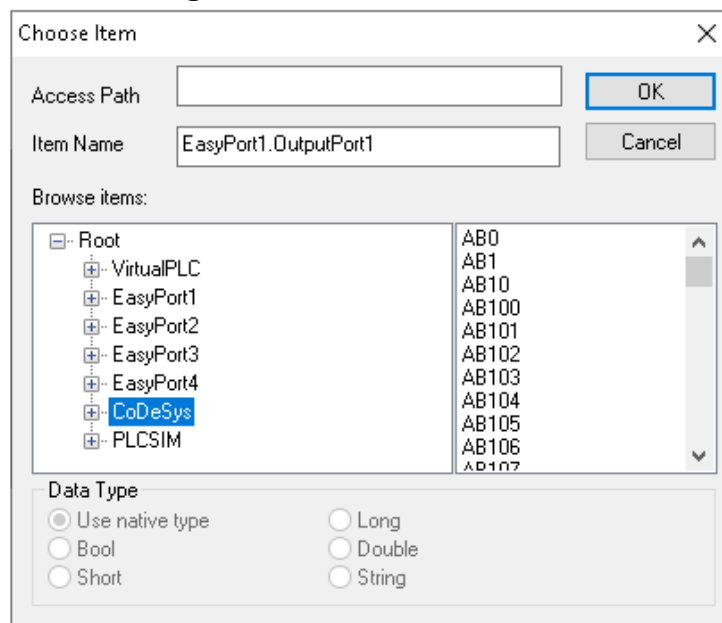


**Figura 5.1.8 Opciones de OPC/OCD.**

**5.3 Selección de servidor OPC y puerto de comunicación.** Desde la ventana de configuración de los puertos de entrada y salida (se accede dando doble click a cada puerto) se selecciona el servidor OPC **FestoDidactic.EzOPC.2**. Posteriormente, en el campo de **Elemento** se selecciona **EasyPort1.OutputPort1** (figura 5.1.9) y se accede a la lista de aplicaciones que soportan este protocolo y a la lista de direcciones de memoria de entrada y de salida dando click en el botón de al lado **Seleccionar**, y se selecciona la aplicación **CoDeSys** y las direcciones EB0 para FluidSIM Out y AB0 para FluidSIM In (figura 5.1.10).

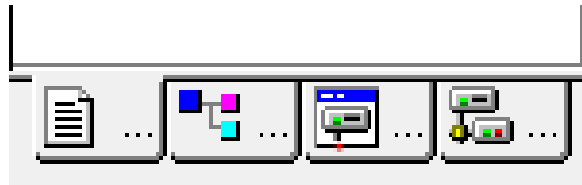


**Figura 5.1.9 Puerto de salida.**

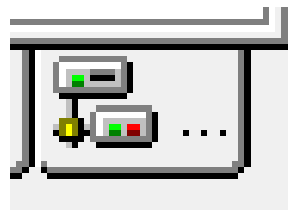


**Figura 5.1.10 Direcciones de memoria de entradas y salidas.**

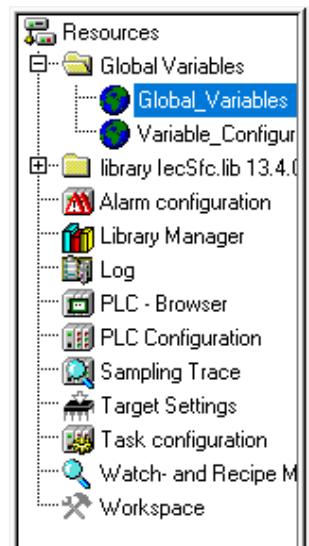
**5.4 Definición de variables globales en CODESYS.** Una vez que se concluyó con la parte de Fluidsim, se abrirá CODESYS (previamente instalado en la misma computadora donde se tiene FluidSim) y dentro de su entorno se seleccionará de la barra de herramientas (figura 5.1.11) de la parte inferior **Resources** (figura 5.1.12), y luego **Global\_Variables** accediendo desde **Global Variables** (figura 5.1.13). Una vez ahí, se definen las variables que se usarán para la cosimulación y que fueron definidas desde FluidSim; estas son AB0 y EB0 (figura 5.1.14).



**Figura 5.1.11** Barra de herramientas de la parte inferior en el IDE de CODESYS.



**Figura 5.1.12** Pestaña Resources.



**Figura 5.1.13** Recursos de variables globales.

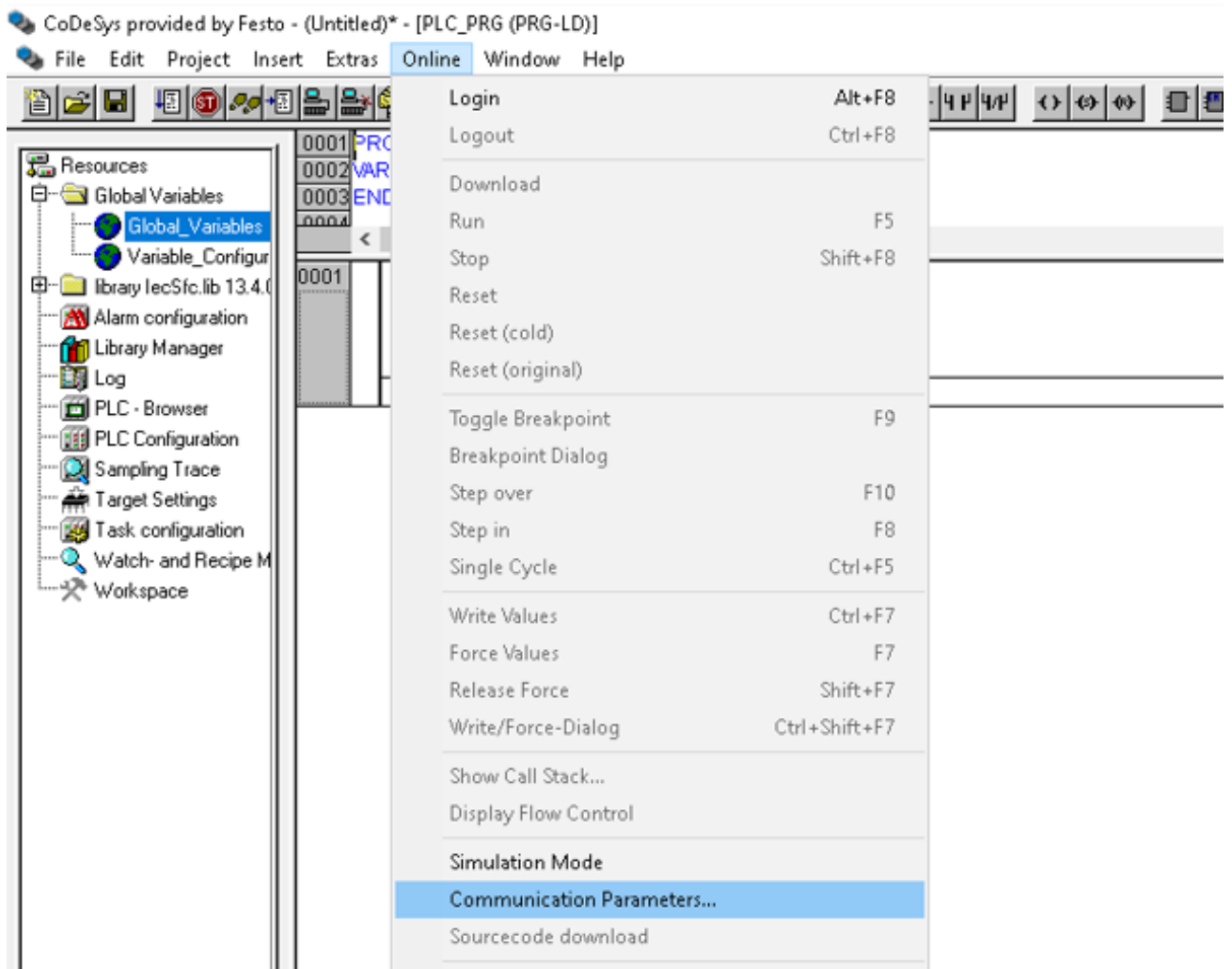
```

0001 VAR_GLOBAL
0002
0003     AB0:BYTE;
0004     EB0:BYTE;
0005
0006 END_VAR
0007
0008
0009

```

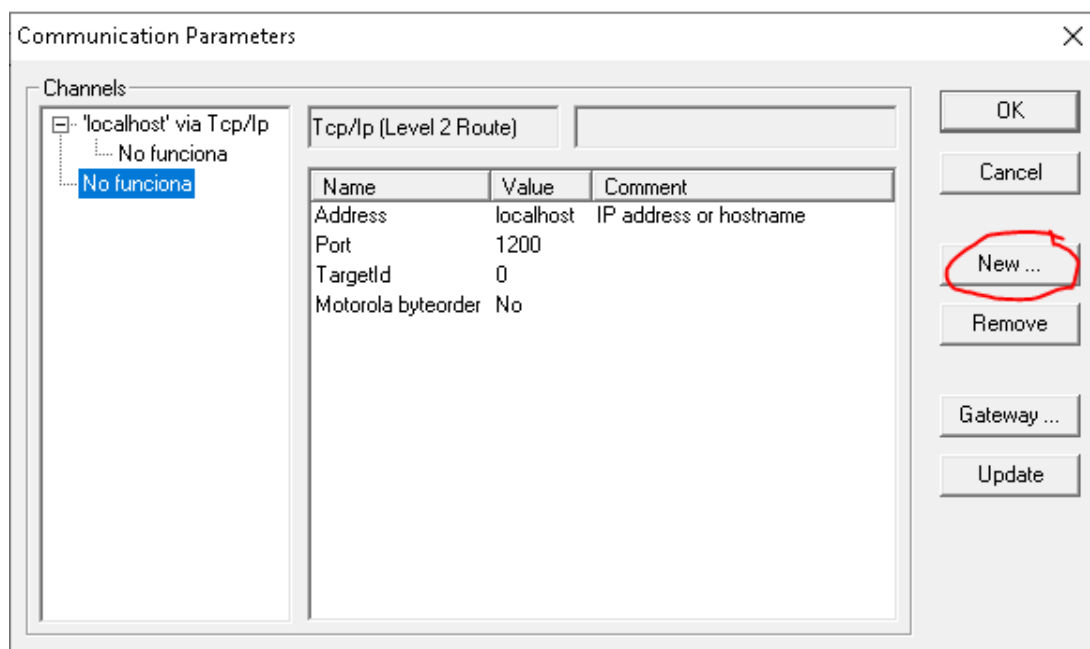
**Figura 5.1.14 Creación de las variables globales.**

**5.5 Se establece la configuración de la comunicación OPC para CoDeSys.** Para ello, primero se define el canal de comunicación que usará CoDesSys; en este caso, **Tcp/Ip (Level 2 Route)** (5.1.17) que se despliega con el botón **New** de la ventana emergente **Communication Parameters** (figura 5.1.16) que emerge desde la opción del mismo nombre en la pestaña **Online** (figura 5.1.15).

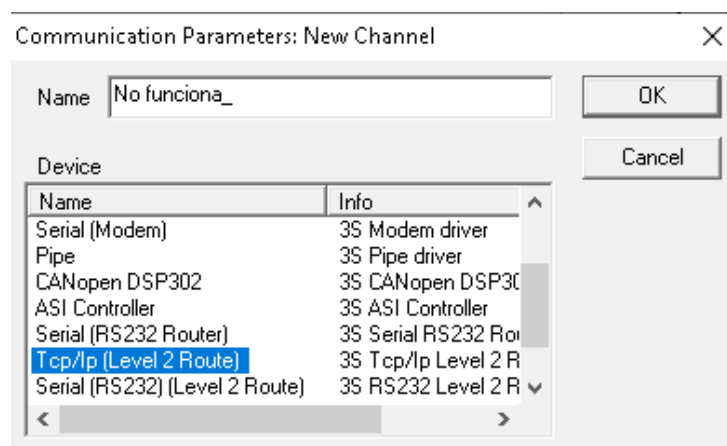


**Figura 5.1.15 Online.**

Una vez se le da new en communication parameters (figura 5.1.6) en la nueva pestaña (figura 5.1.7) en sección de Name se puede colocar cualquier tipo de nombre.

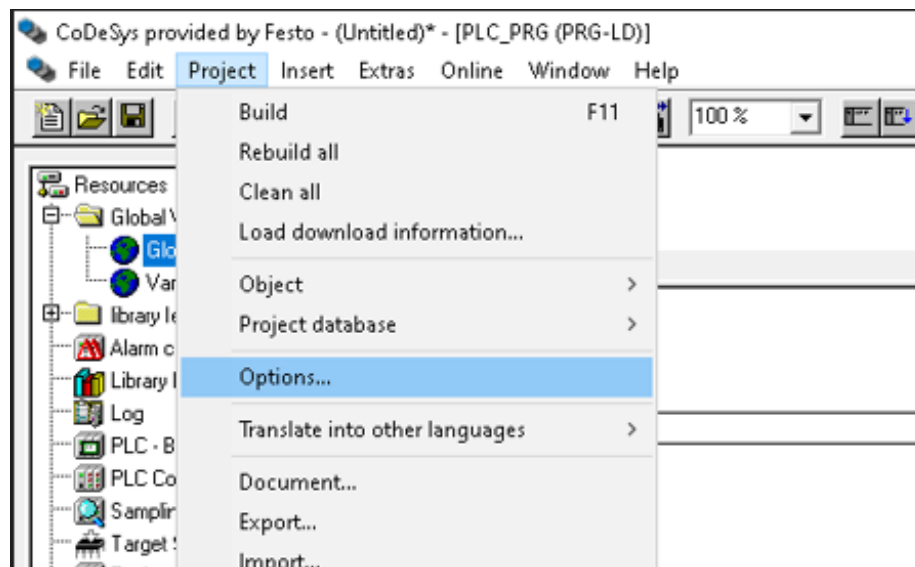


**Figura 5.1.16 Ventana de Communication Parameters.**



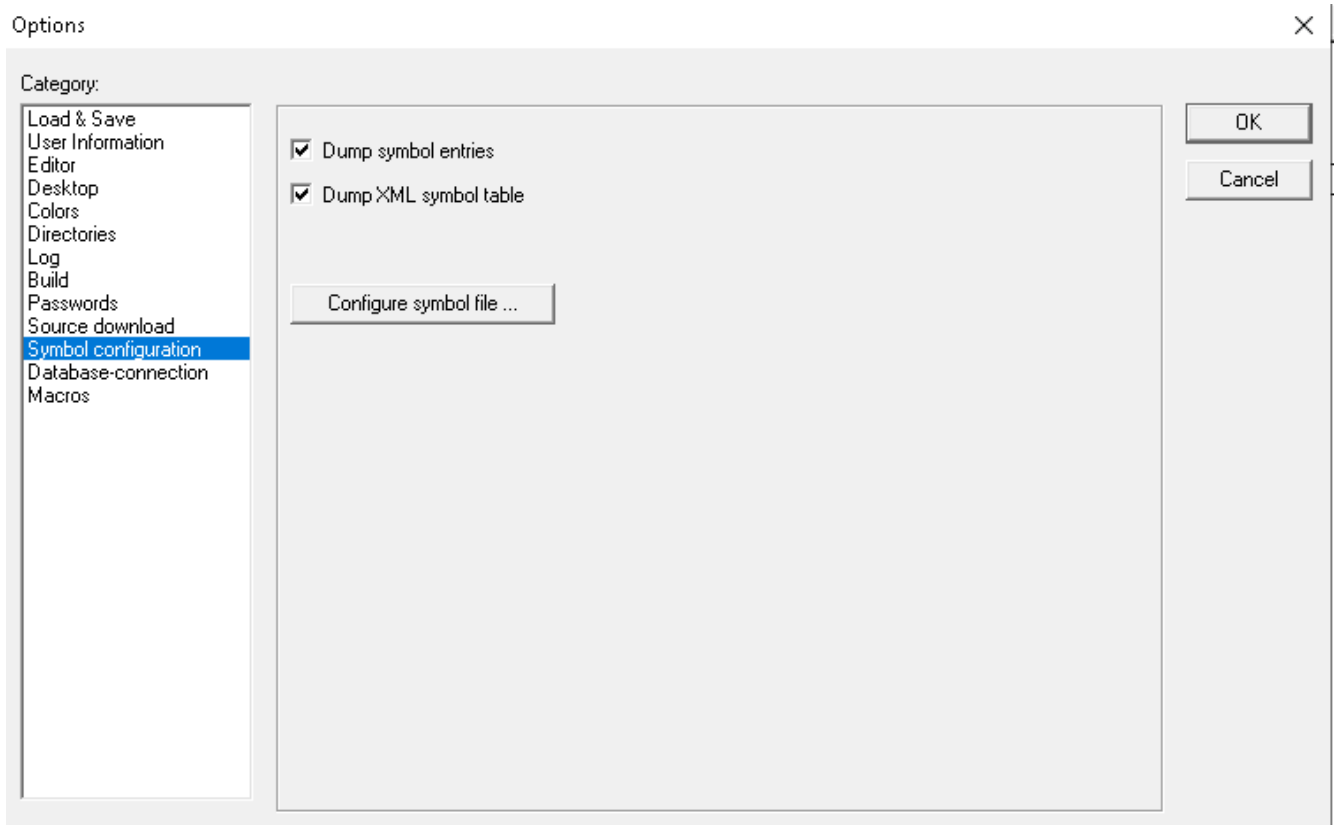
**Figura 5.1.17 Selección de un nuevo canal Tcp/Ip (Level 2 Route).**

**5.6 Configuración de las variables de acceso para el servidor OPC.** Se seleccionan **Dump symbol entries** y **Dump XML symbol table** desde **Symbol configuration** que se muestra dando click a **Options...** de la pestaña superior **Project** (figura 5.1.18). Desde la misma ventana emergente de **Symbol configuration** se selecciona la opción **Configure symbol file...** (figura 5.1.19) para dar acceso a otra ventana emergente (**Set object attributes**) desde la cual se selecciona primero el programa principal **PLC\_PRG (PRG)** (equivalente al *main* en lenguajes de alto nivel) y se da click a **Export variables of object** para permitir la exportación de las variables de comunicación. Luego, se hace lo mismo con **Global Variables** y nuevamente seleccionando **Export variables of object** (figura 5.1.20). Finalmente, se acepta esta configuración dando click a las pestañas de OK.



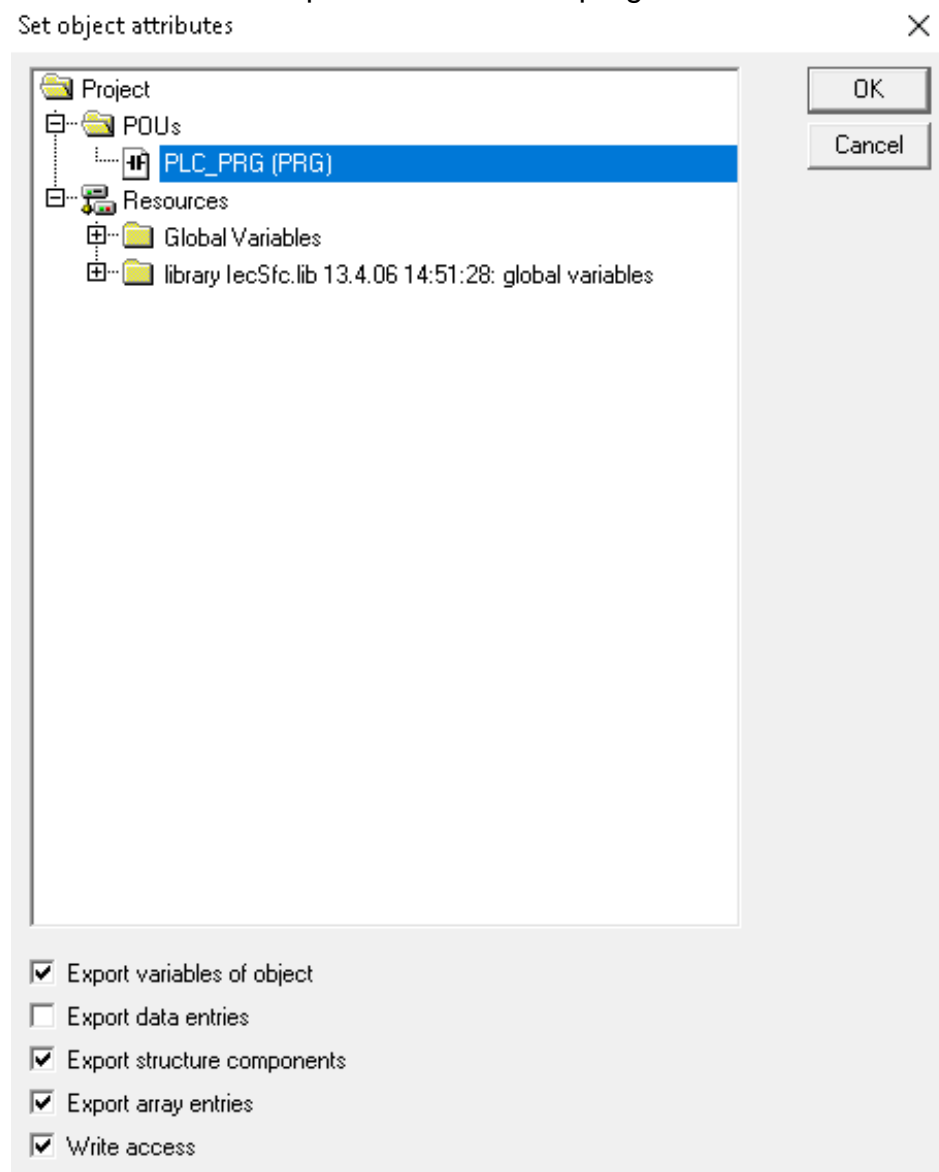
**Figura 5.1.18 Opciones de la pestaña Project.**

En caso en que la ventana options (figura 5.1.19) ya tenga selecciona las opciones Dump symbol entries y Dump XML symbol table no es necesario volver a seleccionarlos.



**Figura 5.1.19 Selección de Symbol configuration.**

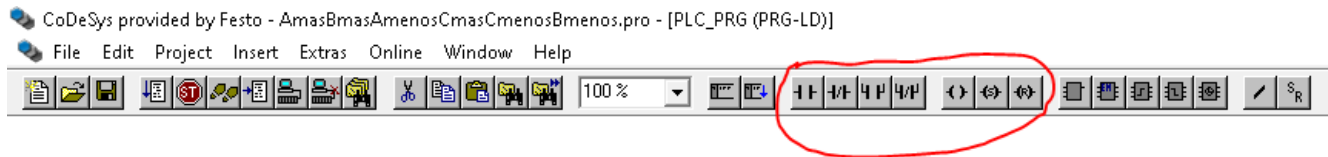
En caso de no haber seleccionado Global Variables y seleccionado Export variable of object y después seguir con los demás pasos no será posible iniciar la simulación sin mencionar que, en ocasiones, aunque se realice nuevamente este paso existe la posibilidad de seguir sin funcionar la simulación en caso de que esto ocurra se tendrá que crear un nuevo programa desde cero.



**Figura 5.1.20 Ventana Set object attributes.**

## 5.7 Creación del programa en lenguaje de Diagrama de Escalera en CODESYS.

Desde el IDE de CODESYS se crea el programa del automatismo (figura 5.1.22) utilizando la barra de herramientas (figura 5.1.21).

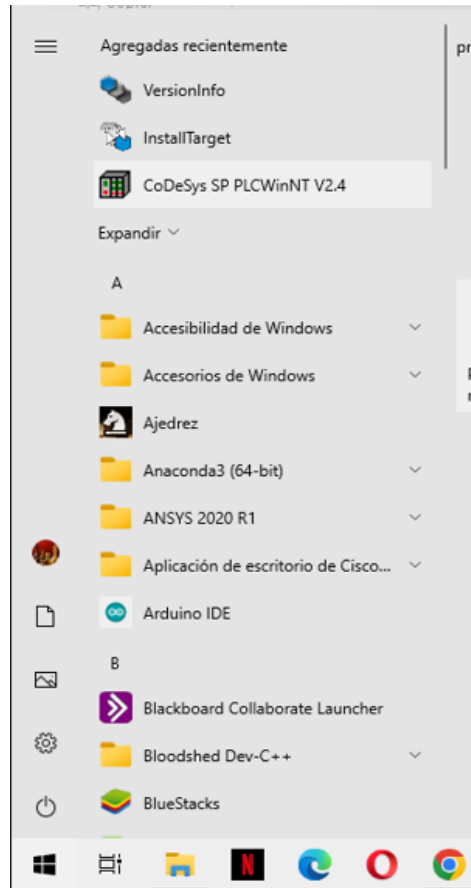


**Figura 5.1.21** Barra de herramientas del IDE de CODESYS para Diagramas de Escalera.

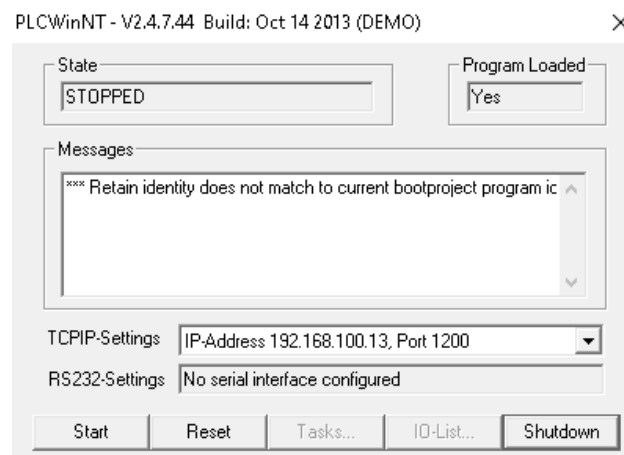


**Figura 5.1.22** Programa del PLC.

**5.8Habilitación del PLC virtual.** Una vez finalizado el diagrama de escalera se abre el programa **CoDeSys SP PLCWinNT V2.4** (figura 5.1.24) propio de CODESYS (se instala automáticamente al instalar CODESYS) desde el campo de inicio de Windows para habilitar el PLC virtual (figura 5.1.23) sin cambiar sus parámetros por defecto y dejarlo así durante la cosimulación.

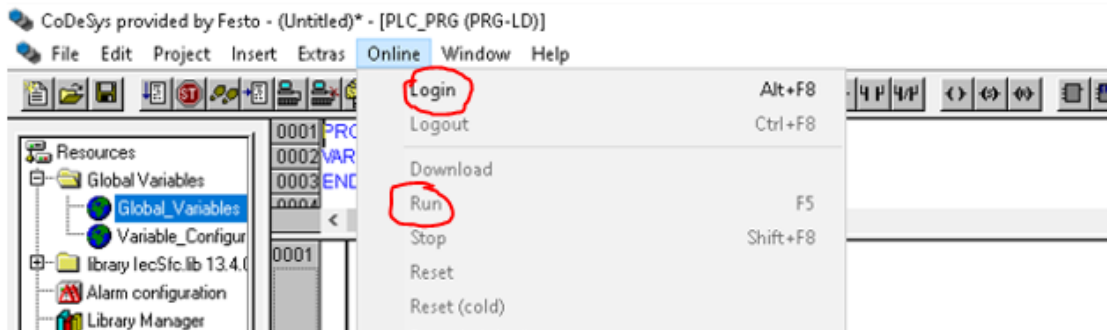


**Figura 5.1.23** Icono del PLC virtual de CoDeSys.

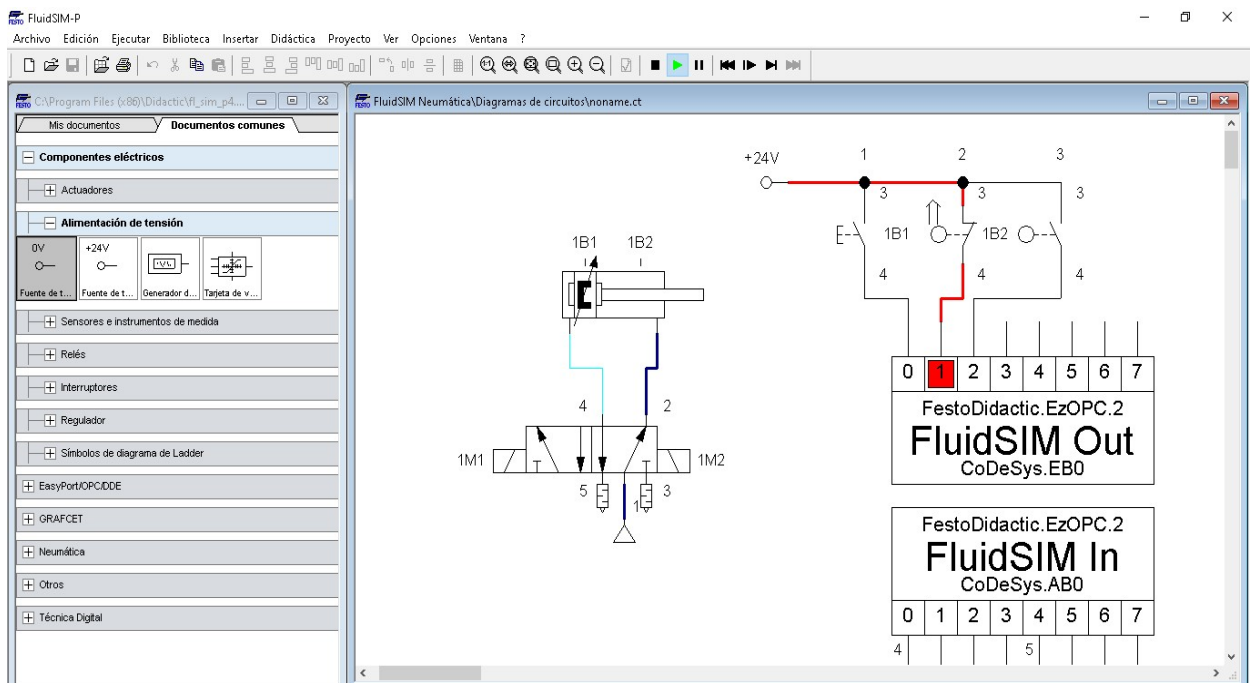


**Figura 5.1.24** Ventana de configuración del PLC virtual.

**5.9 Ejecución de la cosimulación.** Para finalizar, el primer paso es cargar el programa en Diagrama de Escalera al PLC virtual y ejecutarlo en CODESYS. Esto se hace desde las opciones **login** y **run**, respectivamente, ambas de la pestaña **Online** (figura 5.1.25). El último paso es la ejecución del programa en FluidSim (figura 5.1.26).



**Figura 5.1.25 Login y Run activados secuencialmente desde la pestaña Online.**



**Figura 5.1.26 Ejecución de la simulación del automatismo en FluidSim.**

Los resultados de la implementación de las cosimulaciones se presentan en el capítulo 6.

# Capítulo 6

## Resultados de simulación, de cosimulación y de experimentos de laboratorio

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos de las simulaciones implementadas en FluidSim, de las cosimulaciones en FluidSim y CODESYS, y de las pruebas prácticas en el laboratorio con el fin de realizar un análisis comparativo. Para el estudio de cada automatismo sintetizado se realizaron dos secuencias, una con dos cilindros y otra con tres cilindros en cosimulaciones, y una secuencia con dos cilindros en los experimentos de laboratorio.

Las secuencias implementadas en simulaciones y cosimulaciones son (con rojo se resaltan los cilindros de la secuencia que cambian de posición):

- Secuencia para dos cilindros: **A-B+**|**A+B-**
- Secuencia para tres cilindros: **A+** B- C- | **A+** **B+** C- | **A-** B+ C- | A- **B+** **C+** | A- **B+** **C-** | A- **B-** C-

La primera secuencia recién referida también se implementó en el laboratorio.

### Parámetros de desempeño

En el análisis de los automatismos diseñados por los tres métodos abordados en la tesis (heurístico, cascada y Máquinas de Estados Finitos), se usó como criterio de comparación la cantidad y costo aproximado de componentes, y la flexibilidad a modificaciones en las secuencias. Esto se abordará en una sección subsecuente.

## 6.1 Resultados de simulación y cosimulación

Para la realización de la tesis se empleó tanto la simulación como la cosimulación. La diferencia entre estos dos procedimientos es que en la simulación todo, automatismo y control, reside en una sola aplicación de software; en este caso, FluidSim, mientras que en la cosimulación se trabaja con dos aplicaciones de software diferentes, una que alberga el automatismo, para lo cual se usó FluidSim, y otra que contiene el PLC virtual, trabajada en CODESYS.

En la realización de los métodos heurístico y de cascada se usó la simulación, mientras que en el de Máquinas de Estados Finitos se empleó la cosimulación.

### 6.1.1 Automatismo sintetizado por el método heurístico

En la realización de las dos secuencias electroneumáticas diseñadas por el método heurístico, se siguieron los pasos mencionados en el capítulo 4, donde básicamente se expresa la dependencia de la experiencia del diseñador.

#### Secuencia A- B- | A- B+ | A+ B-

1. **Definición de los elementos de trabajo y de control.** Los elementos necesarios para el automatismo de acuerdo al capítulo 4 son 8:
  - 2 Cilindros de doble efecto A y B.
  - 2 Válvulas de control de 5/2 vías.
  - 2 Pares de sensores de final de carrera, un par por cada cilindro.
2. **Diagrama esquemático de la parte neumática.** Para su dibujo se sigue la regla indicada en el capítulo 4, obteniendo el diagrama que se muestra en la figura 6.1.1.

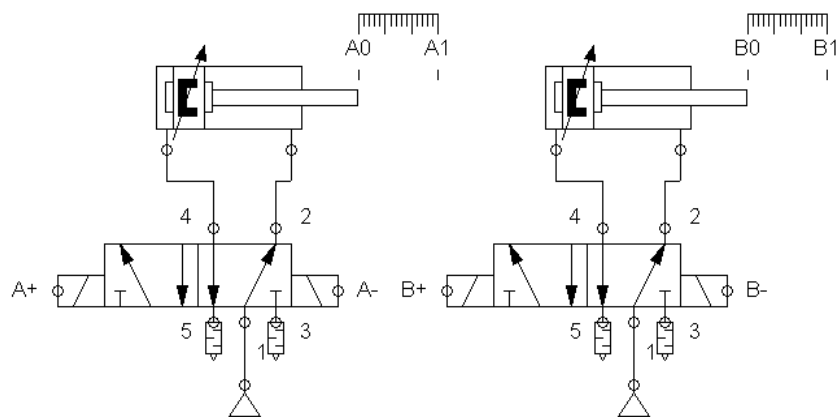


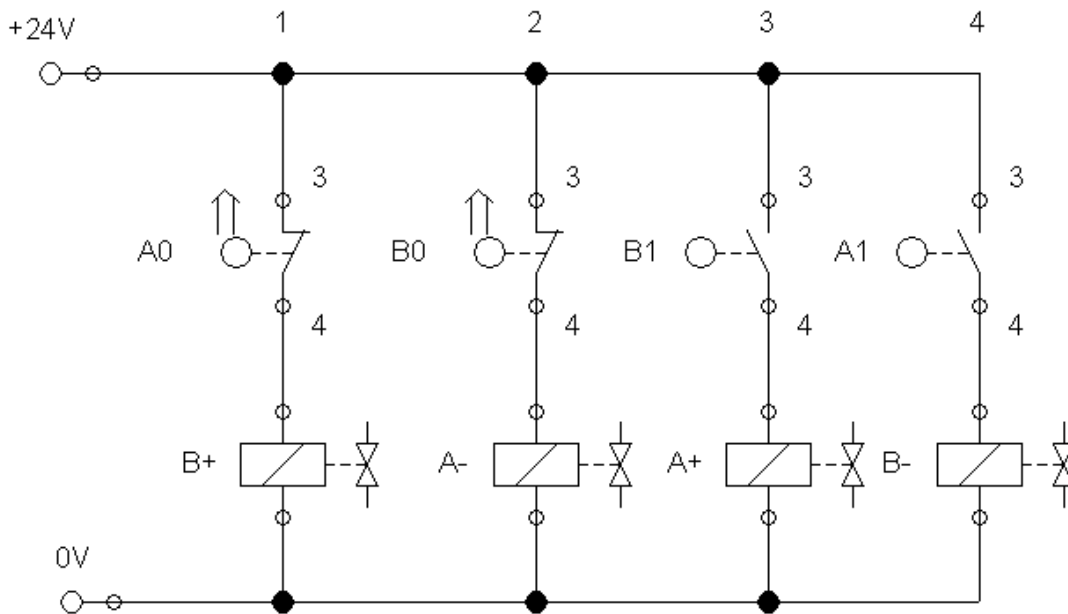
Figura 6.1.1. Cilindros y válvulas del automatismo con secuencia A- B- | A- B+ | A+ B- sintetizado por el método heurístico.

3. **Diseño del control por relevadores.** Por la simplicidad de la secuencia A- B- | A- B+ | A+ B-, se tomó la decisión de conectar directamente los finales de carrera a los solenoides de las válvulas en forma cruzada porque con eso se

logra el control de la activación de los cilindros; esto es, la señal A0 (vástago del cilindro A retraído) es la condición de activación del cilindro B, y la señal A1 (vástago del cilindro A extendido) es la condición de desactivación del cilindro B. Esto mismo aplica para las señales B0 y B1 en forma cruzada para la activación y desactivación del cilindro A. Se usa la siguiente nomenclatura:

- A0, A1: Señales de cilindro retraído y extendido, respectivamente, del sensor final de carrera del cilindro A.
- B0, B1: Señales de cilindro retraído y extendido, respectivamente, del sensor final de carrera del cilindro B.
- A+, A-: Solenoides de las válvulas de control de la activación y desactivación del cilindro A, respectivamente.
- B+, B-: Solenoides de las válvulas de control de la activación y desactivación del cilindro B, respectivamente.

El control del automatismo de la secuencia de dos cilindros se muestra en la figura 6.1.2.

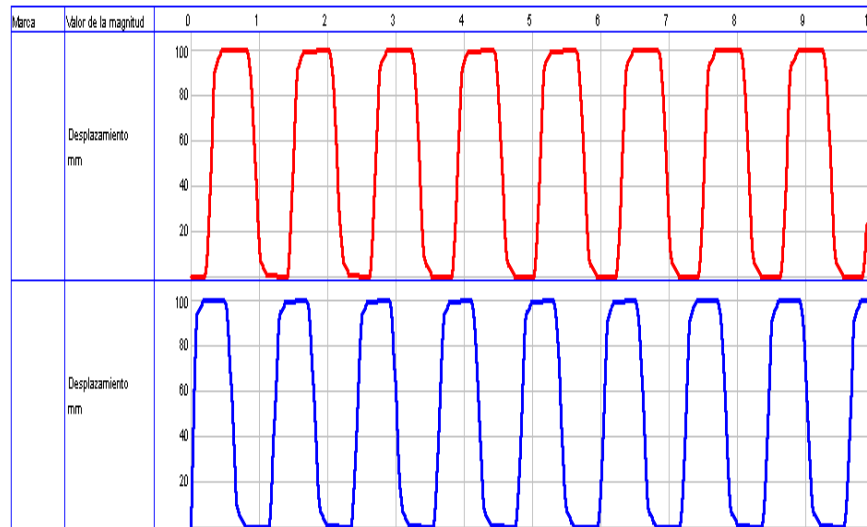


**Figura 6.1.2. Control eléctrico del automatismo con secuencia A- B- | A- B+ | A+ B- sintetizado por el método heurístico.**

El comportamiento del automatismo con secuencia A- B- | A- B+ | A+ B- se aprecia en el diagrama Espacio - Fase (figura 6.1.3). Un diagrama Espacio - Fase [11] consiste de una gráfica que muestra la secuencia de movimientos de los actuadores en función del tiempo, donde el eje "x" representa el tiempo transcurrido y el eje "y" los milímetros recorridos por los vástagos de los cilindros.

El diagrama Espacio - Fase nos indica en este caso que la secuencia comienza con el cilindro B (línea azul) en el segundo 0, y que al terminar de extenderse se extiende el cilindro A y de inmediato B regresa a su posición retraída, dando lugar a la

retracción de A y a que se complete así el primer ciclo de la secuencia. Los tiempos de extensión y retracción en todos los ciclos son de aproximadamente 300 ms, tiempo razonable para los cilindros estándar de doble efecto. Esto muestra que hay consistencia de los movimientos de los cilindros con el grupo que define la secuencia, y que está se reproduce sin errores.



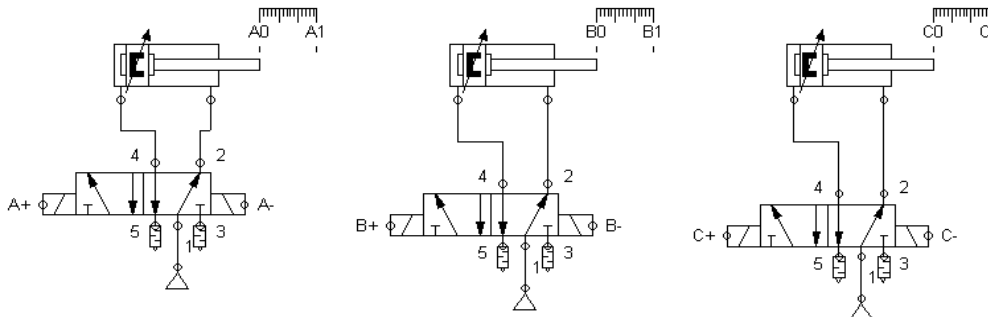
**Figura 6.1.3. Diagrama Espacio-Fase para la secuencia A- B- | A- B+ | A+ B- sintetizada por el método heurístico.**

La complejidad de la síntesis del automatismo fue de mediana a baja lo cual se discute en el capítulo 7.

A continuación se implementará una secuencia de tres cilindros por el método heurístico.

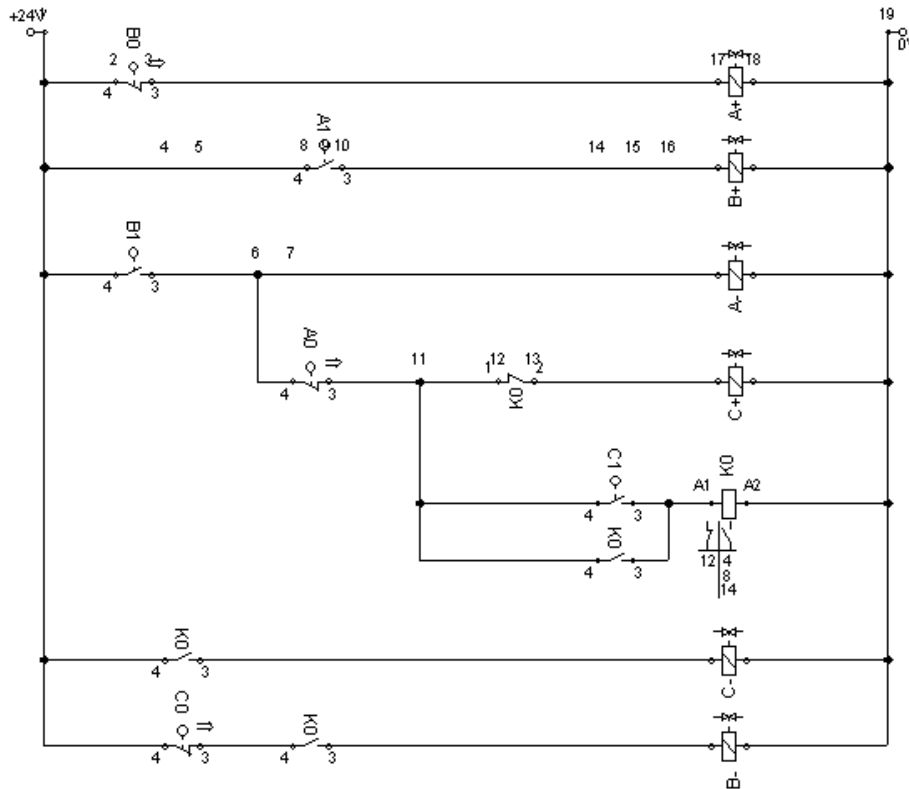
**Secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C-**

- Definición de los elementos de trabajo y de control.** El número de componentes empleados para la realización del automatismo son 13:
  - 3 Cilindros de doble efecto
  - 3 Válvulas de 5/2 vías
  - 6 Sensores de final de carrera
  - 1 Relevador
- Diagrama esquemático de la parte neumática.** Para su dibujo se sigue lo mostrado en el capítulo 4, obteniendo el diagrama que se muestra en la figura 6.1.4.



**Figura 6.1.4 Cilindros y válvulas del automatismo electroneumático con secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C- diseñado por el método heurístico.**

**3. Diseño del control por relevadores.** Se utiliza un relevador por cada repetición de un estado (las cuales se indican subrayadas en la secuencia), teniendo así un relevador K0 (figura 6.1.5) que funciona como una unidad de memoria de acuerdo al punto 3 de la sección 4.5.1 del capítulo 4.

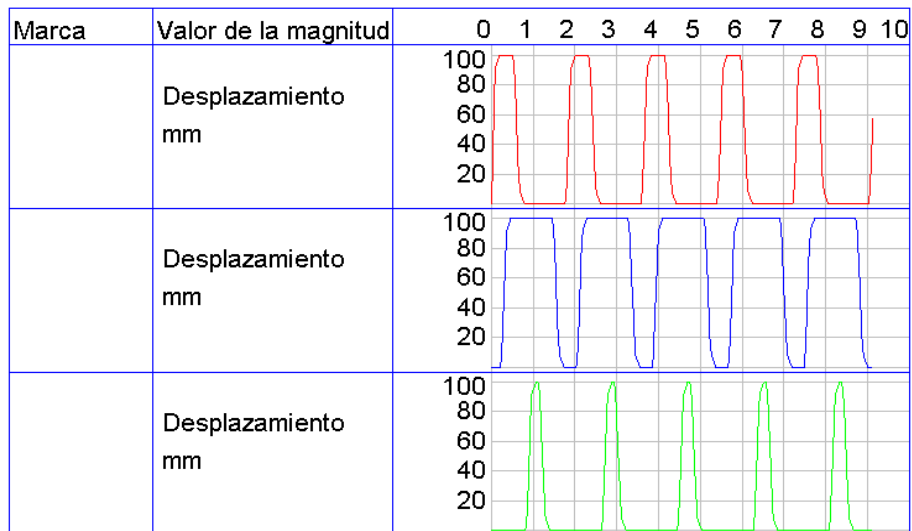


**Figura 6.1.5 Control del automatismo electroneumático con secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C- sintetizado por el método heurístico.**

El diagrama Espacio - Fase de la figura 6.1.6 exhibe el comportamiento de la secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C- de tres cilindros, cada uno indicado por una línea de color:

- Rojo, para el cilindro A,
- Azul, para el cilindro B, y
- Verde, para el cilindro C.

Inicialmente, los tres cilindros están retraídos. El primero en extenderse es A, seguido de B. Luego se retrae A sin retraerse B, y posteriormente C se extiende y se retrae de inmediato, mientras B sigue en su posición extendida. Finalmente, se retrae B llevando la secuencia a su posición inicial. Los tiempos de extensión y retracción de cada uno de los cilindros son idénticos y toman aproximadamente 300 ms, lo cual es consistente con la naturaleza doblemente actuada de los cilindros. También, consistente con la secuencia se observa que el cilindro que más tiempo tarda extendido es B con 1 s, seguido de A con 200 ms y luego de C con 10 ms. Todo esto corrobora el buen funcionamiento y consistencia de la secuencia del automatismo.



**Figura 6.1.6 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C- sintetizada por el método heurístico.**

La síntesis del automatismo se realizó en un proceso iterativo de tres pasos: idea preliminar – simulación – ajuste. En donde mediante un análisis de diseño se llegó a la conclusión que sólo es necesario un relevador común para representar al grupo que se repite. La complejidad de la síntesis del automatismo fue de mediana a baja, aunque el proceso de síntesis tomó varias horas.

## 6.1.2 Automatismo sintetizado por el método de cascada

El procedimiento de síntesis se ilustró en el capítulo 4 para una secuencia de tres grupos. En caso de usar menos de tres, se requiere una ligera modificación, como se verá a continuación.

En cuanto a componentes hablando de automatismos de dos o tres grupos, el método de cascada superó al heurístico, pero el tiempo de implementación fue significativamente menor en el de cascada debido a la existencia de reglas bien definidas en comparación con el heurístico.

### Secuencia A- B- | A- B+ | A+ B-

1. **Definición de los elementos de trabajo y de control.** A diferencia del método heurístico, aquí se requieren 3 relevadores, lo cual aumenta el número de componentes:
  - 2 Cilindros de doble efecto A y B
  - 2 Válvulas 5/2 vías
  - 2 Pares de sensores de final de carrera, un par por cada cilindro
  - 3 Relevadores
2. **Definición de elementos de la secuencia.** Este paso se ilustró en el capítulo 4 con una secuencia de tres cilindros formando más de tres grupos. Sin embargo, se tiene que hacer el siguiente ajuste en el caso de dos grupos. En la tabla 8 de elementos de la secuencia, es decir de los grupos, las fases y los relevadores de grupo, se agrega un grupo vacío debido a que en este método los grupos se activan con el grupo anterior y se desactivan con el grupo siguiente, además de los sensores de final de carrera en general, por lo que si se tiene uno o dos grupos solamente se cae en un ciclo indeterminado inmovilizando al automatismo. Esto se resuelve agregando un tercer grupo (vacío) que desactivará al grupo II.

**Tabla 8: Elementos de la secuencia según el método de Cascada.**

Grupo	I	II	III
Fase	A-B+	A+B-	
Sensor	A0	B1	
Relevador del grupo	K1	K2	K3

3. **Activación y desactivación de los grupos.** Se genera la tabla de activación y desactivación de los diferentes grupos (tabla 9).

**Tabla 9: Activación y desactivación de grupos.**

Grupo	Activado por (grupo y sensor de final de carrera)	Desactivado por (grupo)
I	III	II
II	A1 y I	III
III	A0 y II	I

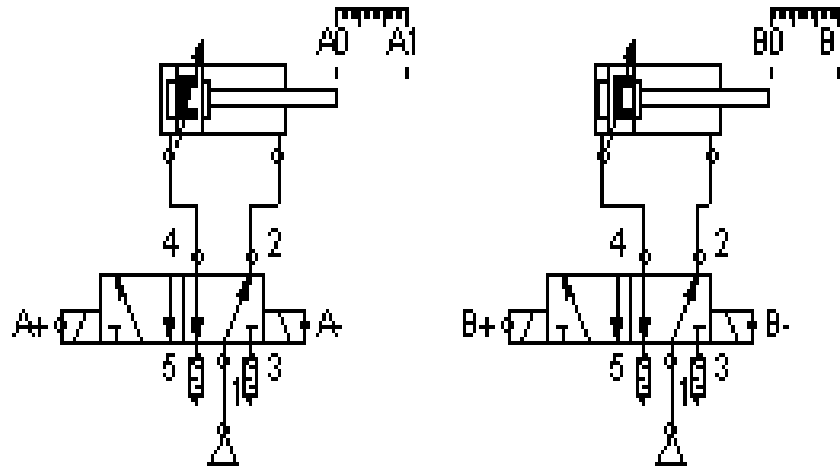
4. **Activación de los solenoides.** Se crea la tabla de activación de los solenoides de las válvulas (tabla 10).

**Tabla 10: Activación de solenoides.**

Solenoides	Activado por (grupo y sensores de final de carrera)
A+	I B1
A-	II B0
B+	I
B-	II

5. **Construcción del diagrama esquemático de los elementos de trabajo**

La conexión de los elementos de trabajo, las válvulas y los sensores de final de carrera se realiza siguiendo el procedimiento del capítulo 4. El diagrama esquemático correspondiente se muestra en la figura 6.1.7

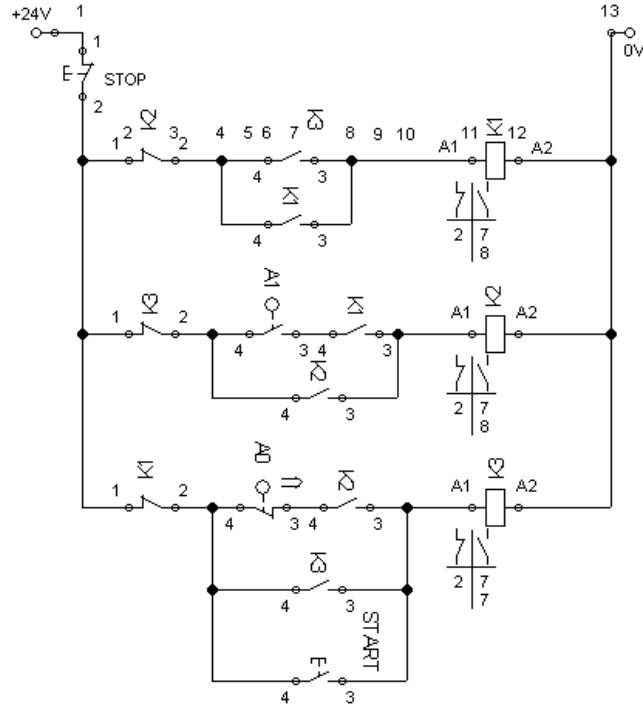


**Figura 6.1.7 Cilindros, válvulas y finales de carrera del automatismo de dos cilindros con secuencia A- B- | A- B+ | A+ B- diseñado por el método de cascada.**

6. **Activación y desactivación de los grupos.** La construcción del Diagrama de Escalera de la activación y desactivación de los grupos se realiza mediante el procedimiento descrito en el capítulo 4, el cual se resume en la siguiente lista ilustrando solamente el procedimiento para el grupo I por practicidad:

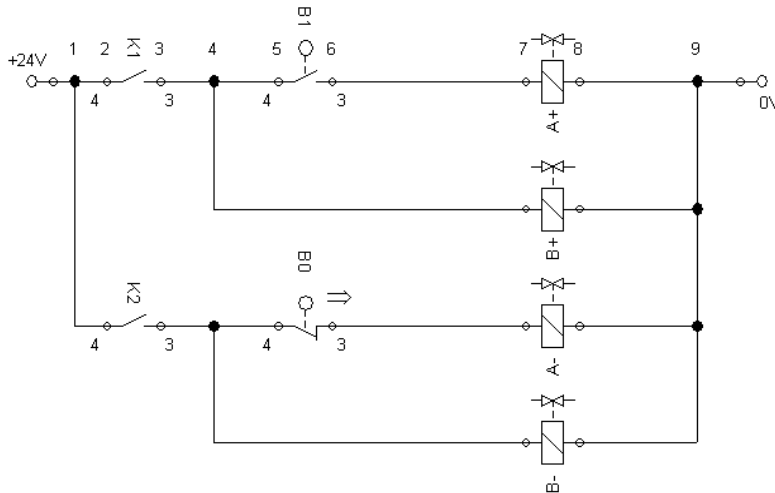
- Salida:  
Grupo que se quiere activar: Grupo I  
Representado por la bobina de un relevador: K1
- Elementos de activación: Elementos de la segunda columna conectados en serie, representados por contactos normalmente abiertos: K3
- Elemento de enclavamiento: Contacto normalmente abierto del relevador del grupo que se quiere activar conectado en paralelo con los elementos de activación: K1
- Elementos de desactivación: Elementos de la tercera columna, representados por un contacto normalmente abierto: K2

La activación del resto de los grupos se obtiene siguiendo el mismo procedimiento. El diagrama completo se ilustra en la figura 6.1.8.



**Figura 6.1.8 Diagrama de Escalera de la activación y desactivación de los grupos.**

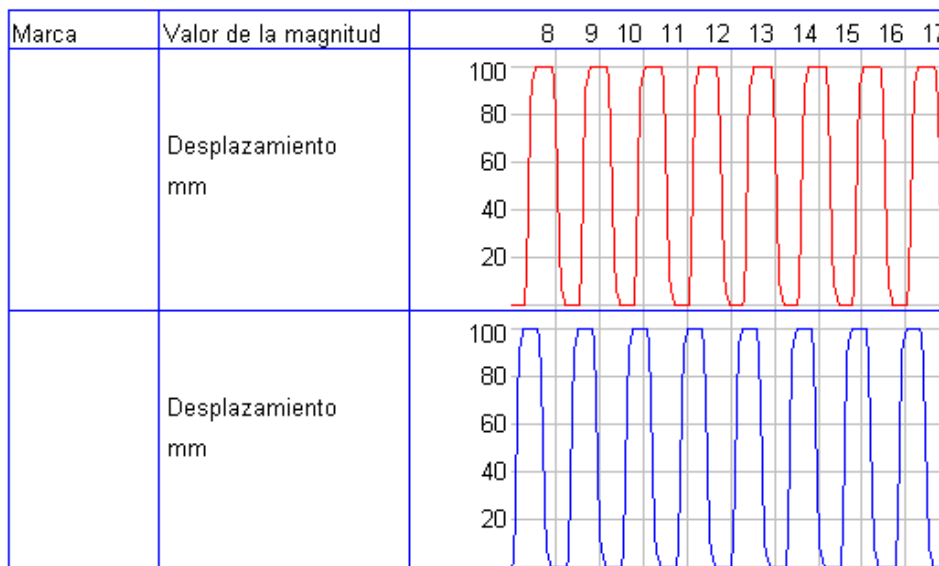
**7. Conexión de los relevadores a los solenoides de las válvulas de control.**  
 Para la activación de las válvulas, se conectan los interruptores de los relevadores de los grupos K1 y K2<sup>+</sup>, a cada solenoide de las válvulas de control (A+, A-, B+ y B-), según se indica en tabla 10. Esto se ilustra en la figura 6.1.9.



**Figura 6.1.9 Conexión de los relevadores a los solenoides de las válvulas de control.**

\*K3 no se ocupa en este caso, pues sólo sirve para evitar una inconsistencia en la secuencia del automatismo.

El diagrama Espacio - Fase de la figura 6.1.10 que corresponde a la secuencia de dos cilindros A- B- | A- B+ | A+ B- en discusión muestra que el inicio de la secuencia ocurre aproximadamente a los 8 s, una vez que se ha oprimido el botón pulsador de arranque. Se inicia con la extensión de B (línea azul) para luego extender también A (línea roja). Entonces, B es retraído y posteriormente A también es retraído, llevando la secuencia a su punto de partida. El ciclo se repite sin necesidad de oprimir de nuevo el botón de arranque. Nuevamente, los tiempos de extensión, retracción y permanencia de los cilindros en su posición extendida, son, respectivamente, de aproximadamente 300 ms cada uno, lo cual denota consistencia con la secuencia y funcionamiento correcto del automatismo.



**Figura 6.1.10 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B- | A- B+ | A+ B- sintetizada por el método de cascada.**

A continuación se aplicará el método de cascada para la síntesis del automatismo que corresponde a una secuencia de 3 cilindros. Esto con la finalidad de observar si hay cambios sustanciales en la aplicación del método cuando aumenta el número de cilindros.

**Secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C-**

La síntesis de este automatismo se sigue de forma idéntica a la de dos cilindros, pero al tener más de dos grupos ya no se requiere de uno adicional como fue el caso del ejemplo anterior.

1. **Definición de los elementos de trabajo y de control.** A diferencia del método heurístico, aquí se requieren 6 relevadores comunes en lugar de solo 1, lo cual aumenta el número de componentes:
  - 3 Cilindros de doble efecto A, B y C

- 3 Válvulas 5/2 vías
  - 3 Pares de sensores de final de carrera, un par por cada cilindro
  - 6 Relevadores
2. **Definición de elementos de la secuencia.** Se identifican 6 grupos, cada uno manejado por un relevador. Estos elementos con la definición de las fases y sensores de final de carrera se muestran en la tabla 11.

**Tabla 11: Elementos de la secuencia según el método de cascada.**

Grupo	I	II	III	IV	V	VI
Fase	A+	B+	A-	C+	C-	B-
Sensor	A1	B1	A0	C1	C0	B0
Relevador del grupo	K1	K2	K3	K4	K5	K6

3. **Activación y desactivación de los grupos.** Las reglas de activación y desactivación de los grupos ya se comentaron en el capítulo 4, y se aplican en la tabla 12.

**Tabla 12: Activación y desactivación de grupos.**

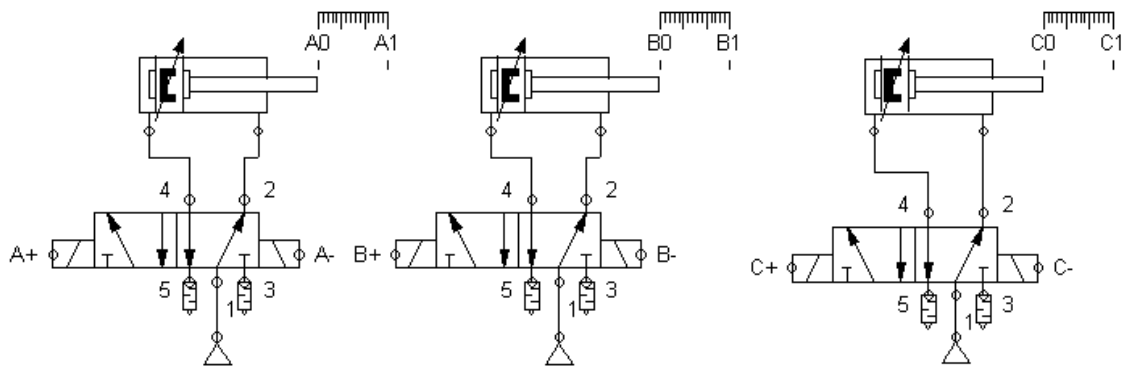
Grupo	Activado por (grupo y sensor de final de carrera)	Desactivado por (grupo)
I	B0 y VI	II
II	A1 y I	III
III	B1 y II	IV
IV	A0 y III	V
V	C1 y IV	VI
VI	C0 y V	I

4. **Activación de los solenoides.** La última tabla, 13, es realizada para indicar la activación de los solenoides de las válvulas mediante los grupos de acuerdo a la regla especificada en el capítulo 4.

**Tabla 13: Activación de solenoides.**

Solenoides	Activado por (grupo)
A+	I
A-	III
B+	II
B-	VI
C+	IV
C-	V

5. **Construcción del diagrama esquemático de los elementos de trabajo.** Se observa que se requieren tres cilindros de doble efecto y tres electroválvulas 5/2 vías para su control. El diagrama esquemático se ilustra en la figura 6.1.11.



**Figura 6.1.11 Cilindros del automatismo de la secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C-** por el método de cascada.

6. **Activación y desactivación de los grupos.** Mediante la tabla 12 se construye el Diagrama de Escalera siguiendo los pasos del capítulo 4 e ilustrando el procedimiento sólo para el grupo I:

- Salida:
  - Grupo que se quiere activar: Grupo I
  - Representado por la bobina de un relevador: K1
- Elementos de activación: Elementos de la segunda columna conectados en serie, representados por contactos normalmente abiertos: K6 y B0
- Elemento de enclavamiento: Contacto normalmente abierto del relevador del grupo que se quiere activar conectado en paralelo con los elementos de activación: K1
- Elementos de desactivación: Elementos de la tercera columna, representados por un contacto normalmente abierto: K2

La activación del resto de los grupos se realiza con el mismo procedimiento y el Diagrama de Escalera correspondiente se muestra a las figuras 6.1.12 y 6.1.13.

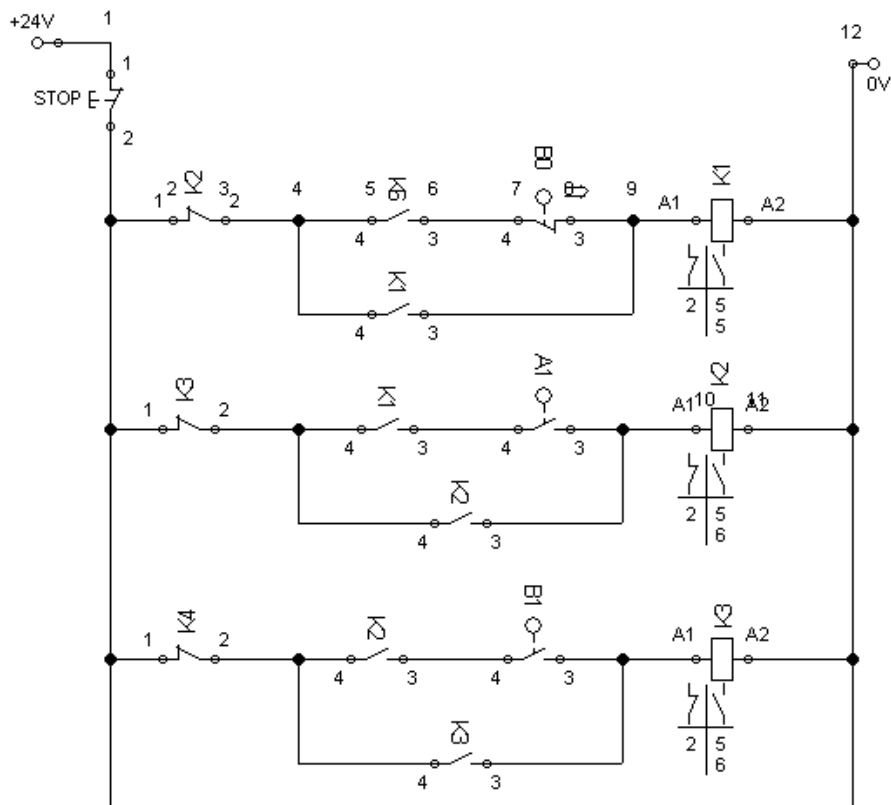


Figura 6.1.12 Circuito de activación y desactivación de los grupos parte 1.

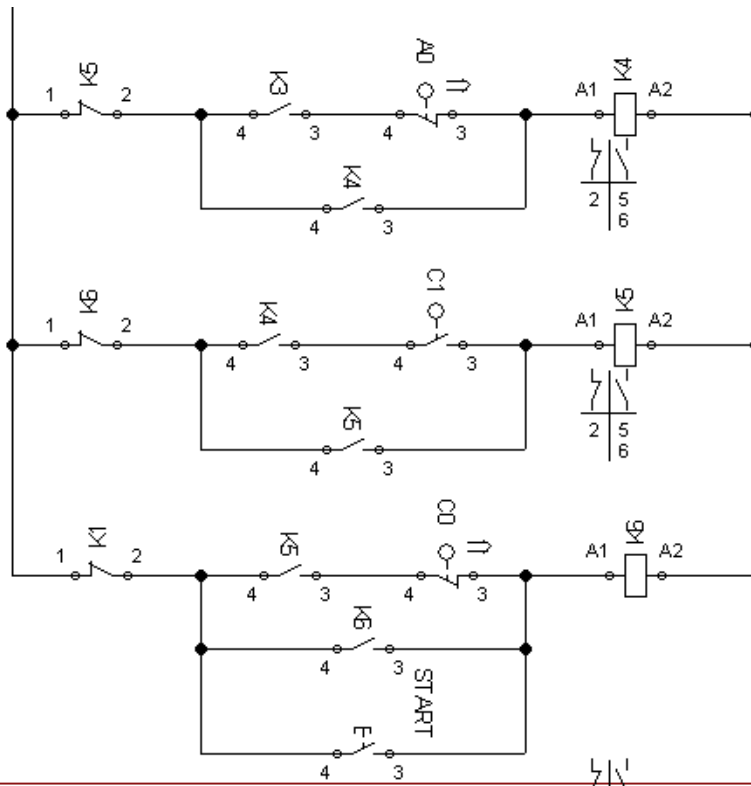


Figura 6.1.13 Circuito de activación y desactivación de los grupos parte 2.

7. **Conexión de los relevadores a los solenoides de las válvulas de control.**  
 Finalmente, se genera la última parte del control conectando los relevadores de cada grupo directamente a los solenoides de las válvulas correspondientes, como marca la tabla 13 y se ilustra en la figura 6.1.14.

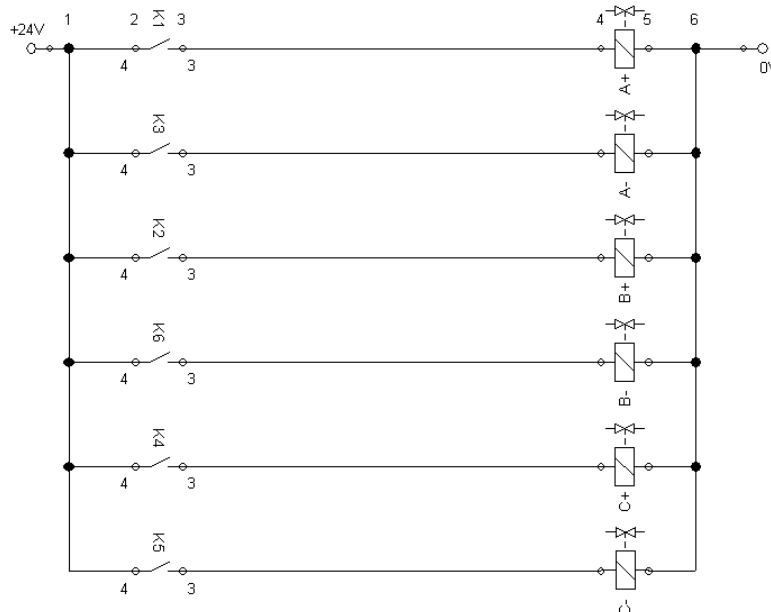
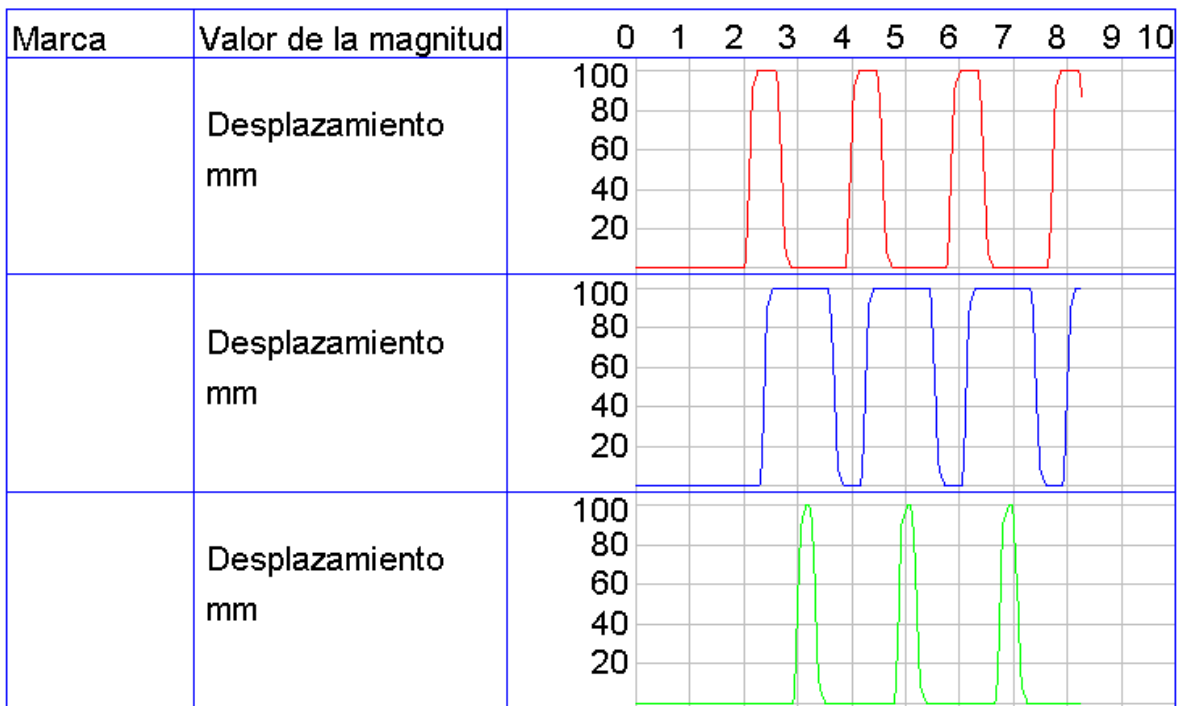


Figura 6.1.14 Conexión de los relevadores a los solenoides de las válvulas de control.

El diagrama Espacio - Fase de la secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C- se muestra en la figura 6.1.15. El automatismo correspondiente también se arranca con un botón de marcha, la cual ocurre aproximadamente en el segundo 2.077. La secuencia inicia con la extensión de A (línea roja) que toma aproximadamente 272 ms, seguida de la extensión de B (línea azul) que toma el mismo tiempo que A. Una vez extendido B, A regresa a su posición original. Llegado A a su posición retraída, C (línea verde) se extiende y retrae de inmediato. Mientras esto ocurre, B se mantiene extendido. Ya que C alcanza su posición retraída, B se retrae concluyendo así con el primer ciclo de la secuencia. El ciclo se repite automáticamente tomando exactamente los mismos tiempos de extensión, retracción y permanencia en las posiciones retraídas y extendidas, lo que comprueba que la secuencia simulada es consistente con la planeada y que se lleva a cabo sin errores.



**Figura 6.1.15 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C- por el método de cascada.**

Como se comentó al inicio, el método de cascada considera al menos tres grupos para su implementación; de lo contrario, se crean ciclos indeterminados que provocan una secuencia errática. Esto se debe a la conexión secuencial entre grupos propia del método de cascada, donde el grupo previo activa al siguiente, y el siguiente desactiva al anterior. Así, con uno o dos grupos se produce una activación-desactivación simultánea de sus grupos lo que lleva a la indeterminación del ciclo y a la imposibilidad del funcionamiento de la secuencia. Este problema claramente está ausente en secuencias con tres o más grupos.

Cuando se presentó el método en el capítulo 4 se eligió una secuencia de más de tres grupos que no evidenció el problema descrito arriba. Sin embargo, el ejemplo considerado en este capítulo, el cual se forma con una secuencia de sólo dos grupos, tuvo la finalidad de ilustrar la aplicación del método de cascada a un caso problemático.

Se concluye, entonces, que fuera del ajuste de agregar un grupo vacío para evitar ciclos indeterminados, no hay otra diferencia en el resto de las reglas del método de síntesis independientemente del número de grupos que conformen a la secuencia, y que el desempeño del automatismo se corresponde plenamente con su secuencia, lo cual se verifica con los resultados de las simulaciones.

### **6.1.3 Automatismo sintetizado por el método de Máquinas de Estados Finitos**

Al igual que en los casos previos, los automatismos se sintetizaron siguiendo el correspondiente procedimiento del capítulo 4, y los detalles de la configuración de la cosimulación entre CODESYS y FluidSim necesaria para implementar el método se abordan en el capítulo anterior.

El método de síntesis de Máquinas de Estados Finitos será ilustrado con dos secuencias, una de dos cilindros y otra de tres cilindros.

#### **Secuencia A- B- | A- B+ | A+ B-**

- 1. Definición de los elementos de trabajo y de control.** El número de componentes utilizados para diseño del automatismo es 11:
  - 2 Cilindros de doble efecto, A y B
  - 2 Válvulas 5/2 vías
  - 4 Sensores de finales de carrera
  - 1 PLC
  - 1 Botón pulsador normalmente abierto
  - 1 Botón pulsador normalmente cerrado
- 2. Identificación de entradas y salidas.** En la aplicación del método de máquinas de estados finitos, el siguiente paso es necesario etiquetar las diferentes entradas y salidas del PLC como se muestra a continuación:

#### **Entradas:**

START– botón pulsador de arranque

STOP – botón pulsador de paro

S1 – Sensor de final de carrera del actuador A extendido

S2 – Sensor de final de carrera del actuador A retraído

S3 – Sensor de final de carrera del actuador B extendido

S4 – Sensor de final de carrera del actuador B retraído

**Salidas:**

A+, A- – Solenoides de la válvula de control del cilindro A

B+, B- – Solenoides de la válvula de control del cilindro B

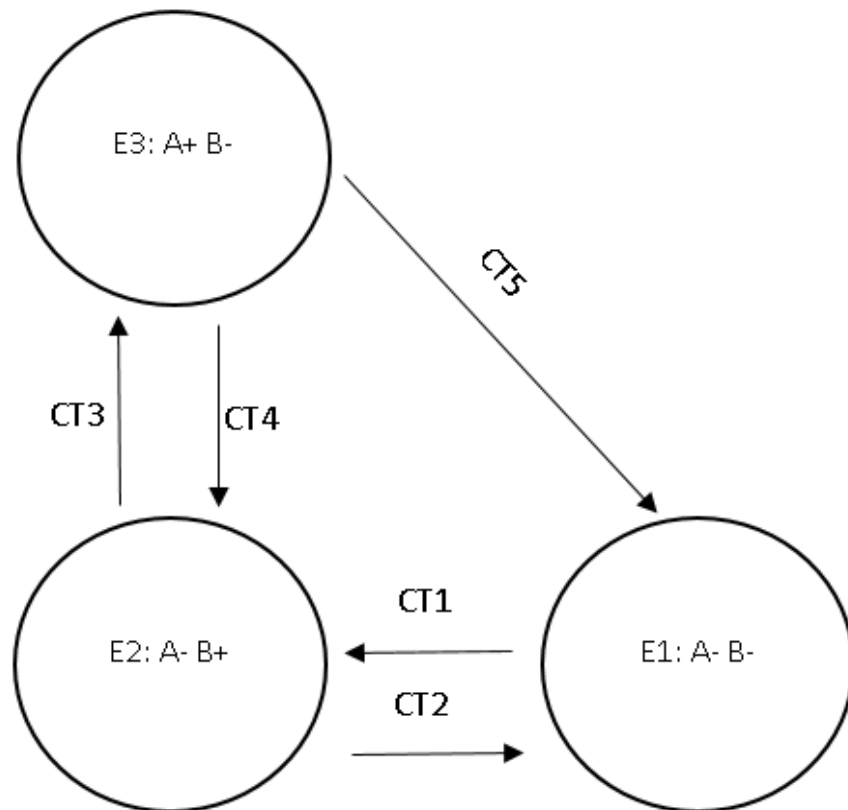
3. **Definición de estados.** Posteriormente, se definen los estados, donde el signo menos (-) o el signo (+) a la derecha del cilindro (A y B) representan que el correspondiente actuador está retraído o extendido, respectivamente.

E1: A-B-

E2: A-B+

E3: A+B-

4. **Creación del diagrama de estados.** Luego, se crea el diagrama de estados, figura 6.1.16, donde los círculos representan los estados, las flechas indican la transición y CTi la condición de transición de estado i-ésima.



**Figura 6.1.16 Diagrama de estados**

5. **Elaboración de la tabla de transición de estados.** La transición de estados, la cual se observa en el diagrama de estados, se especifica en la tabla 14.

**Tabla 14: Transición de estados.**

Renglón	Cilindros (Edo. Ant.)	Entradas						Cilindros (Edo. Sig.)	Transición de Estado
		START	STOP	S1	S2	S3	S4		
1	E1	↑	X	X	X	X	X	E2	A-B- → A-B+
2	E2	X	0	0	1	1	0	E3	A-B+ → A+B-
3	E2	X	1	X	X	X	X	E1	A-B+ → A-B-
4	E3	X	0	1	0	1	0	E2	A+B- → A-B+
5	E3	X	1	X	X	X	X	E1	A+B- → A-B-

X - No importa, ↑ - Flanco de subida (cambio de "0" a "1").

6. **Identificación y definición de las condiciones de transición.** A partir de la tabla 14 se definen las ecuaciones lógicas de las condiciones de transición directamente de la conjunción de las entradas (cada entrada se enlaza con la siguiente mediante una función AND) de un mismo renglón, quedando:

$$CT1 = START \uparrow \quad (\text{Ec. 6.1.1})$$

$$CT2 = STOP \quad (\text{Ec. 6.1.2})$$

$$CT3 = STOP * S1 * S2 * S3 * S4 \quad (\text{Ec. 6.1.3})$$

$$CT4 = STOP * S1 * S2 * S3 * S4 \quad (\text{Ec. 6.1.4})$$

$$CT5 = STOP \quad (\text{Ec. 6.1.5})$$

Donde el asterisco denota la función AND.

Para completar el método de síntesis de Máquinas de Estados Finitos se realiza el diagrama de escalera de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo 4 y el diagrama esquemático del automatismo.

7. **Elaboración de tablas de variables del PLC.** De acuerdo a la notación mostrada en la tabla de transición de estados 14, se direccionan las etiquetas START, STOP y S1 a S4 como se muestra en la tabla 15 de variables del PLC.

**Tabla 15: Variables del PLC.**

Dirección	Etiqueta	Descripción
EB0.0	START	Botón de arranque
EB0.1	STOP	Botón de paro
EB0.3	A1	Final de carrera de A+
EB0.2	A0	Final de carrera de A-

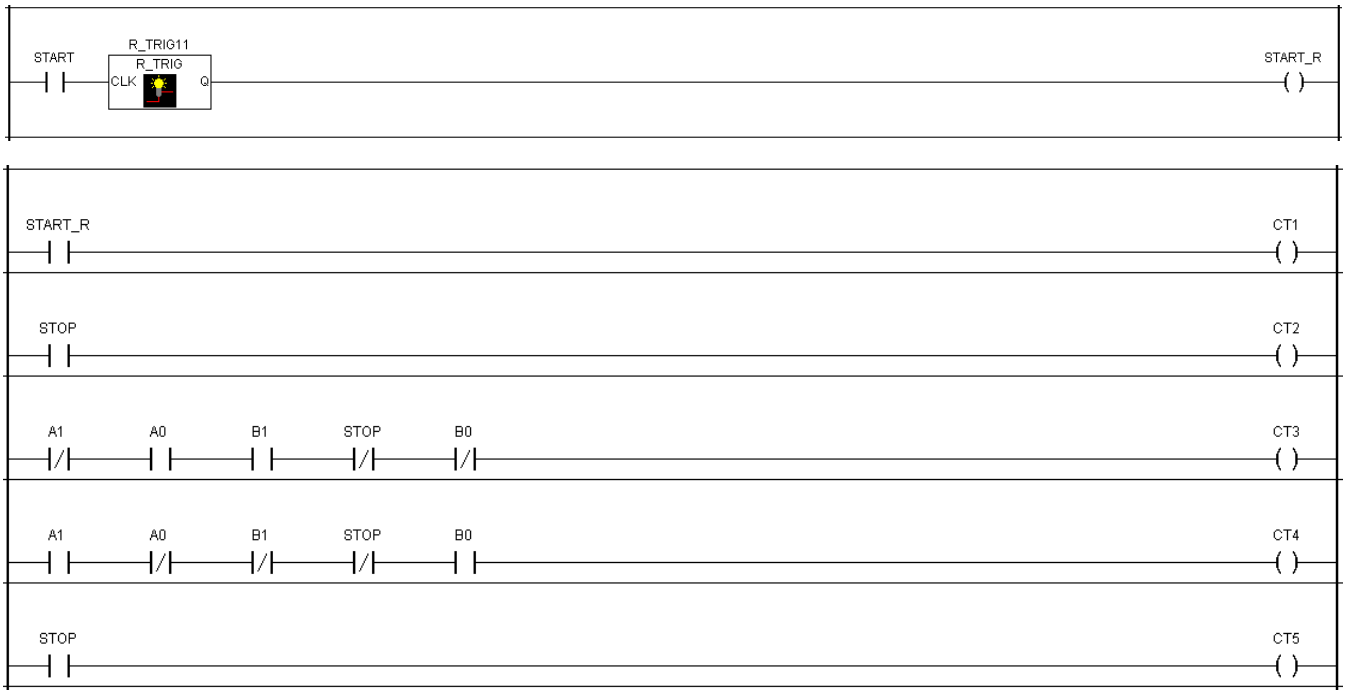
EB0.5	B1	Final de carrera de B+
EB0.4	B0	Final de carrera de B-
AB0.0	Amas	Cilindro A extendido
AB0.1	Amenos	Cilindro A retraído
AB0.2	Bmas	Cilindro B extendido
AB0.3	Bmenos	Cilindro B retraído

8. **Programación de activación de los estados.** La activación de un estado depende de que el estado previo se encuentre activo al igual que las condiciones de transiciones correspondientes como se muestra en la figura 6.1.17.



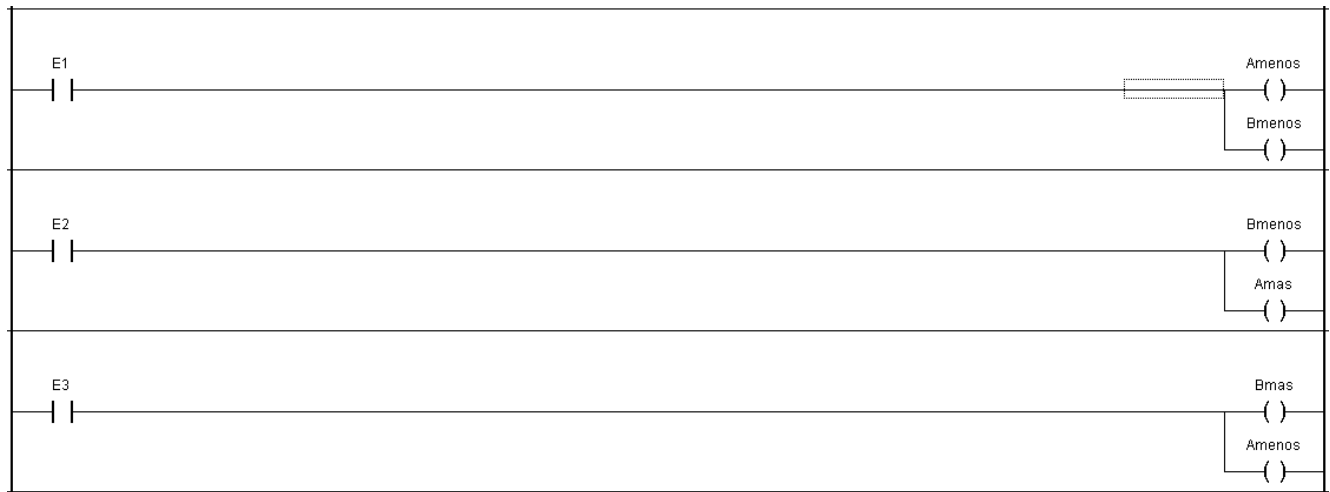
**Figura 6.1.17 Control de los estados del automatismo.**

9. **Programación de las condiciones de transición.** En la figura 6.1.18 se muestra el diagrama de escalera construido a partir de las ecuaciones 6.1.1 a 6.1.5.



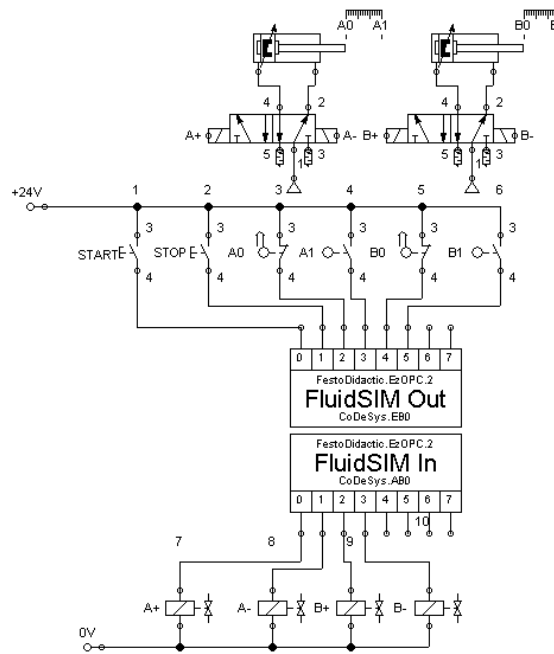
**Figura 6.1.18 Diagrama de Escalera de las condiciones de transición.**

10. **Programación de las salidas de control.** En la figura 6.1.19, se muestran las condiciones de activación obtenidas del diagrama de estados de la figura 6.1.16.



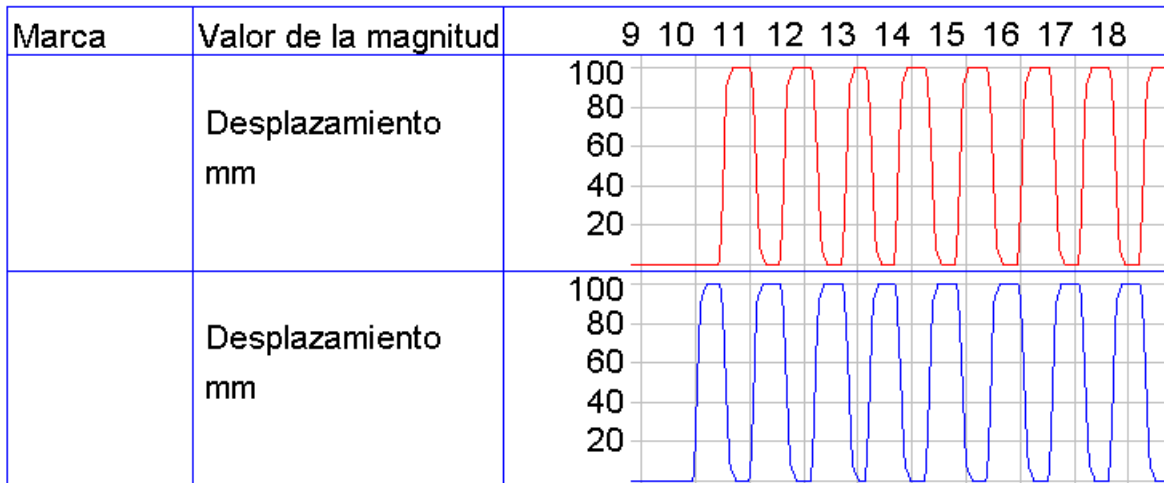
**Figura 6.1.19 Diagrama de Escalera de los solenoides de las válvulas de control activados por los estados del automatismo.**

11. **Construcción del diagrama esquemático de los elementos de trabajo.** La parte de trabajo del automatismo, figura 6.1.20, es igual a la sintetizada por los otros métodos, es decir, consiste de dos cilindros doble efecto conectados cada uno a una electroválvula 5/2 vías con sensores de final de carrera A y B, respectivamente. El diagrama esquemático incluye un puerto de entradas al PLC, al que se conectan los finales de carrera y el botón de marcha y paro, y un puerto de salida que se conecta directamente a los solenoides de las electroválvulas.



**Figura 6.1.20 Automatismo electropneumático de dos cilindros controlados por PLC.**

El diagrama Espacio - Fase de la figura 6.1.21 que corresponde a la secuencia de dos cilindros A- B- | A- B+ | A+ B- muestra que el inicio de la secuencia ocurre aproximadamente a los 9.9 s, tiempo en el que se completa la activación de los dos software de la cosimulación. Se inicia con la extensión de B (línea azul) para luego extender también A (línea roja). Entonces, B es retraído y posteriormente A también es retraído, llevando la secuencia a su punto de partida. El ciclo se repite de manera automática, y los tiempos de extensión, retracción y permanencia de los cilindros en su posiciones extendida y retraída son cada uno de 300 ms. Esto demuestra la consistencia de la simulación con la descripción de la secuencia, y denota el funcionamiento correcto del automatismo.



**Figura 6.1.21 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B- | A- B+ | A+ B-**  
por el método de máquinas de estados finitos.

Con la finalidad de observar la flexibilidad del método de Máquinas de Estados Finitos para automatismos con un número mayor de cilindros, se aplicará para un automatismo de tres cilindros con estados repetidos.

**Secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C-**

La síntesis de este automatismo se realiza siguiendo el mismo procedimiento que para el automatismo de dos cilindros, con ligeras diferencias por la incorporación de un tercer cilindro que serán explicadas a continuación. Se ha usado la misma convención de poner en rojo las letras que representan a los cilindros que han cambiado su posición con respecto al estado previo.

- Definición de los elementos de trabajo y de control.** El número de componentes utilizados para diseño del automatismo son 15:
  - 3 Cilindros de doble efecto A, B y C
  - 3 Válvulas 5/2
  - 6 Sensores de finales de carrera
  - 1 PLC
  - 1 Botón pulsador normalmente abierto
  - 1 Botón pulsador normalmente cerrado
- Identificación de entradas y salidas.** Primero se definen las entradas y salidas del PLC.

**Entradas:**

START - botón pulsador de arranque

STOP – botón pulsador de paro

S1 – Sensor de final de carrera del actuador A extendido

- S2 – Sensor de final de carrera del actuador A retraído
- S3 – Sensor de final de carrera del actuador B extendido
- S4 – Sensor de final de carrera del actuador B retraído
- S5 – Sensor de final de carrera del actuador C extendido
- S6 – Sensor de final de carrera del actuador C retraído

**Salidas:**

Los símbolos (+) y (-) para los cilindros A, B y C, denotan su posición extendida y retraída, respectivamente:

A+, A-

B+, B-

C+, C-

3. **Definición de estados.** Posteriormente, se definen los estados del automatismo directamente de la secuencia, dando un total de 5 estados:

E1: A-B-C-

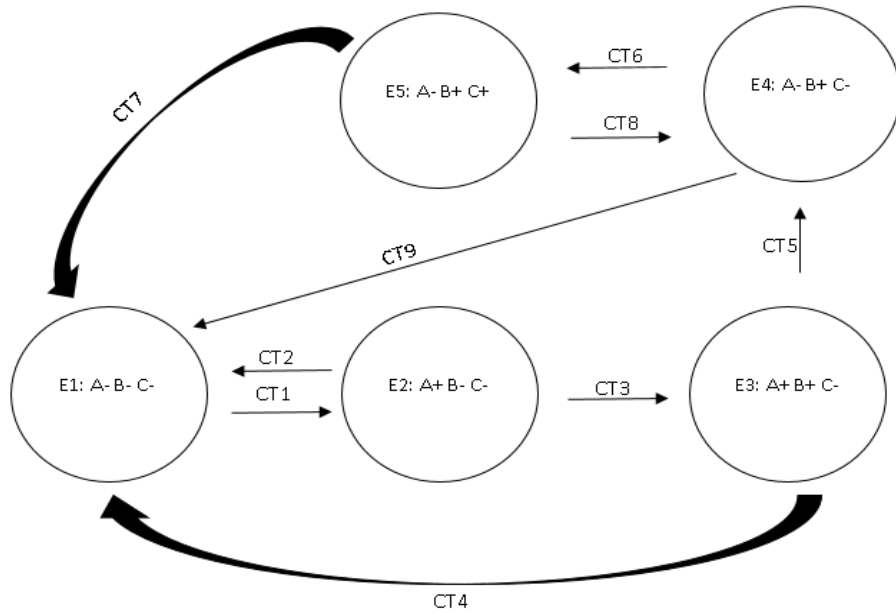
E2: A+B-C-

E3: A+B+C-

E4: A-B+C- (Se repite en la transición 5)

E5: A-B+C+

4. **Creación del diagrama de estados.** Para la representación gráfica de la secuencia del automatismo se crea un diagrama de estados (figura 6.1.22), donde al igual que el ejemplo anterior se utilizan los círculos para denotar los estados del automatismo, las flechas para indicar la transición entre estados y las CT indican las condiciones de transición.



**Figura 6.1.22 Diagrama de estados.**

5. **Elaboración de la tabla de transición de estados.** La tabla 16 especifica la transición entre estados del automatismo en función de sus entradas y los estados anteriores.

**Tabla 16: Transición de estados.**

Número	Edo. Ant.	Entradas								Edo. Sig.	Transición de Estado
		START	STOP	S1	S2	S3	S4	S5	S6		
1	E1	↑	X	X	X	X	X	X	X	E2	A-B-C-→A+B-C-
		X	0	0	1	0	↑	0	1		A-B-C-→A+B-C-
2	E2	X	0	1	0	0	1	0	1	E3	A+B-C-→A+B+C-
3	E2	X	1	X	X	X	X	X	X	E1	A+B-C-→A-B-C-
4	E3	X	0	1	0	1	0	0	1	E4	A+B+C-→A-B+C-
5	E3	X	1	X	X	X	X	X	X	E1	A+B+C-→A-B-C-
6	E4	X	0	0	↑	1	0	0	1	E5	A-B+C-→A-B+C+
7	E4	X	1	X	X	X	X	X	X	E1	A-B+C-→A-B-C-
		X	0	0	1	1	0	0	↑		
8	E5	X	0	0	1	1	0	1	0	E4	A-B+C+→A-B+C-
9	E5	X	1	X	X	X	X	X	X	E1	A-B+C+→A-B-C-

X - No importa, ↑ - Flanco de subida (cambio de "0" a "1").

6. **Identificación y definición de las condiciones de transición.** A partir de la tabla 16 se definen las ecuaciones lógicas de las condiciones de transición directamente de la conjunción de las entradas (cada entrada se enlaza con la siguiente mediante una función AND) de un mismo renglón, quedando:

$$CT1 = START\uparrow + (STOP * S1 * S2 * S3 * S4\uparrow * S5 * S6) \quad (\text{Ec. 6.1.6})$$

$$CT2 = STOP \quad (\text{Ec. 6.1.7})$$

$$CT3 = (STOP * S1 * S2 * S3 * S4 * S5 * S6) \quad (\text{Ec. 6.1.8})$$

$$CT4 = STOP \quad (\text{Ec. 6.1.9})$$

$$CT5 = STOP * S1 * S2 * S3 * S4 * S5 * S6 \quad (\text{Ec. 6.1.10})$$

$$CT6 = STOP * S1 * S2\uparrow * S3 * S4 * S5 * S6 \quad (\text{Ec. 6.1.11})$$

$$CT7 = STOP \quad (\text{Ec. 6.1.12})$$

$$CT8 = STOP * S1 * S2 * S3 * S4 * S5 * S6' \quad (\text{Ec. 6.1.13})$$

$$CT9 = STOP + (STOP * S1 * S2 * S3 * S4 * S5 * S6\uparrow) \quad (\text{Ec. 6.1.14})$$

Donde el asterisco denota la función AND y  $CT_i$  la condición de transición para cambiar del estado  $E_i$  a  $E_j$ , con  $i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ .

Para completar el método de síntesis de Máquinas de Estados Finitos se realiza el diagrama de escalera de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo 4 y el diagrama esquemático del automatismo.

7. **Elaboración de tablas de variables del PLC.** Siguiendo la notación indicada en el paso 3 de la síntesis del automatismo de dos cilindros, se direccionan las etiquetas (Tabla 17) START, STOP y S1 a S6 con los 8 bits del byte 0; esto es, EB0.0 a EB0.7, respectivamente, mientras que A+, A-, B+, B-, C+ y C- con AB0.0 a AB0.5.

**Tabla 17: Variables del PLC.**

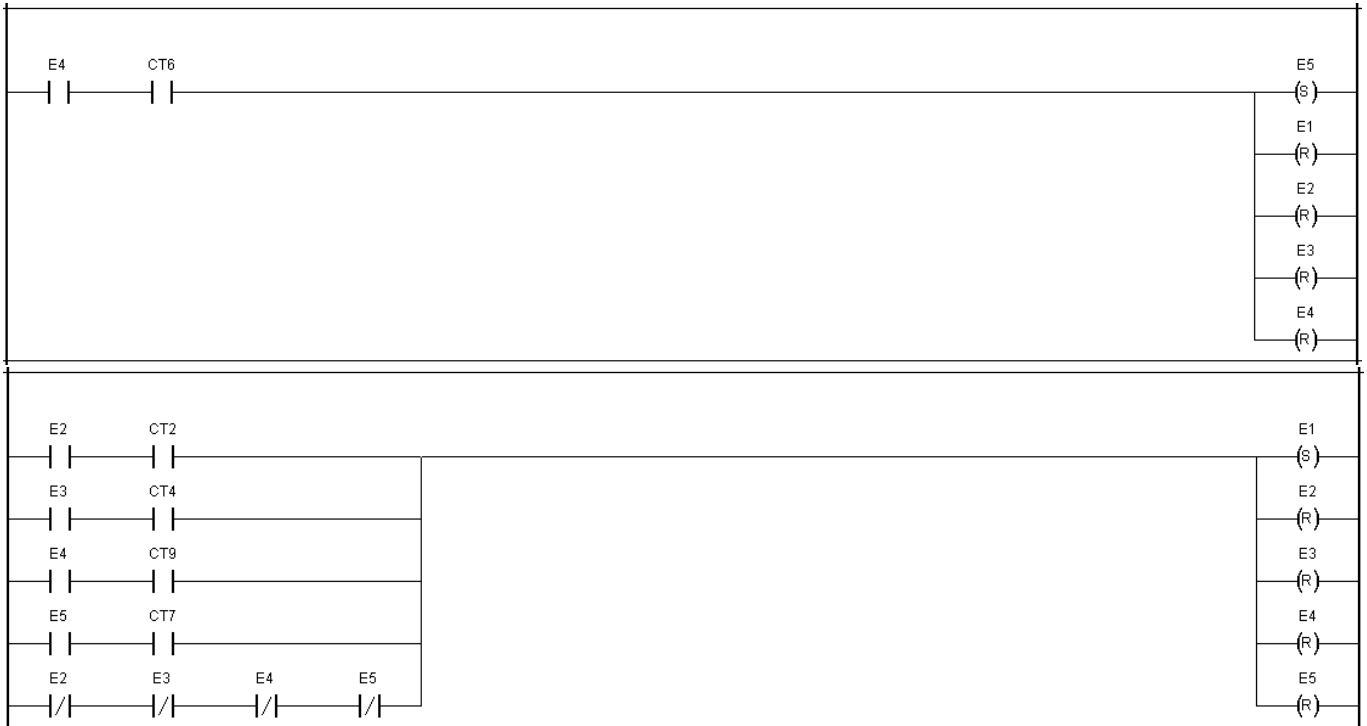
Dirección	Etiqueta	Descripción
EB0.0	START	Botón de arranque
EB0.1	STOP	Botón de paro
EB0.3	A1	Final de carrera de A+
EB0.2	A0	Final de carrera de A-
EB0.5	B1	Final de carrera de B+
EB0.4	B0	Final de carrera de B-
EB0.7	C1	Final de carrera de C+
EB0.6	C0	Final de carrera de C-
AB0.0	Amas	Cilindro A extendido
AB0.1	Amenos	Cilindro A retraído
AB0.2	Bmas	Cilindro B extendido

AB0.3	Bmenos	Cilindro B retraído
AB0.4	Cmas	Cilindro C extendido
AB0.5	Cmenos	Cilindro C retraído

8. **Programación de los estados.** Se programan las activaciones de los estados de igual forma que en los casos anteriores, mediante las condiciones de transición y los estados previos, como se ve en las figuras 6.1.23 y 6.1.24.

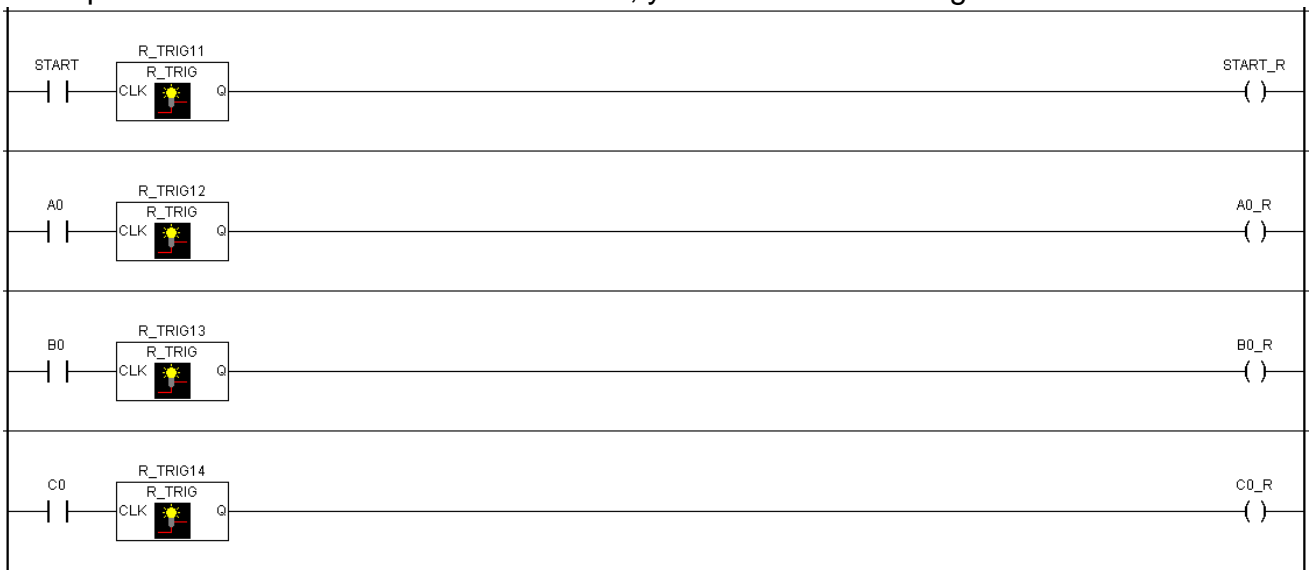


**Figura 6.1.23 Activación de los estados del automatismo parte 1.**



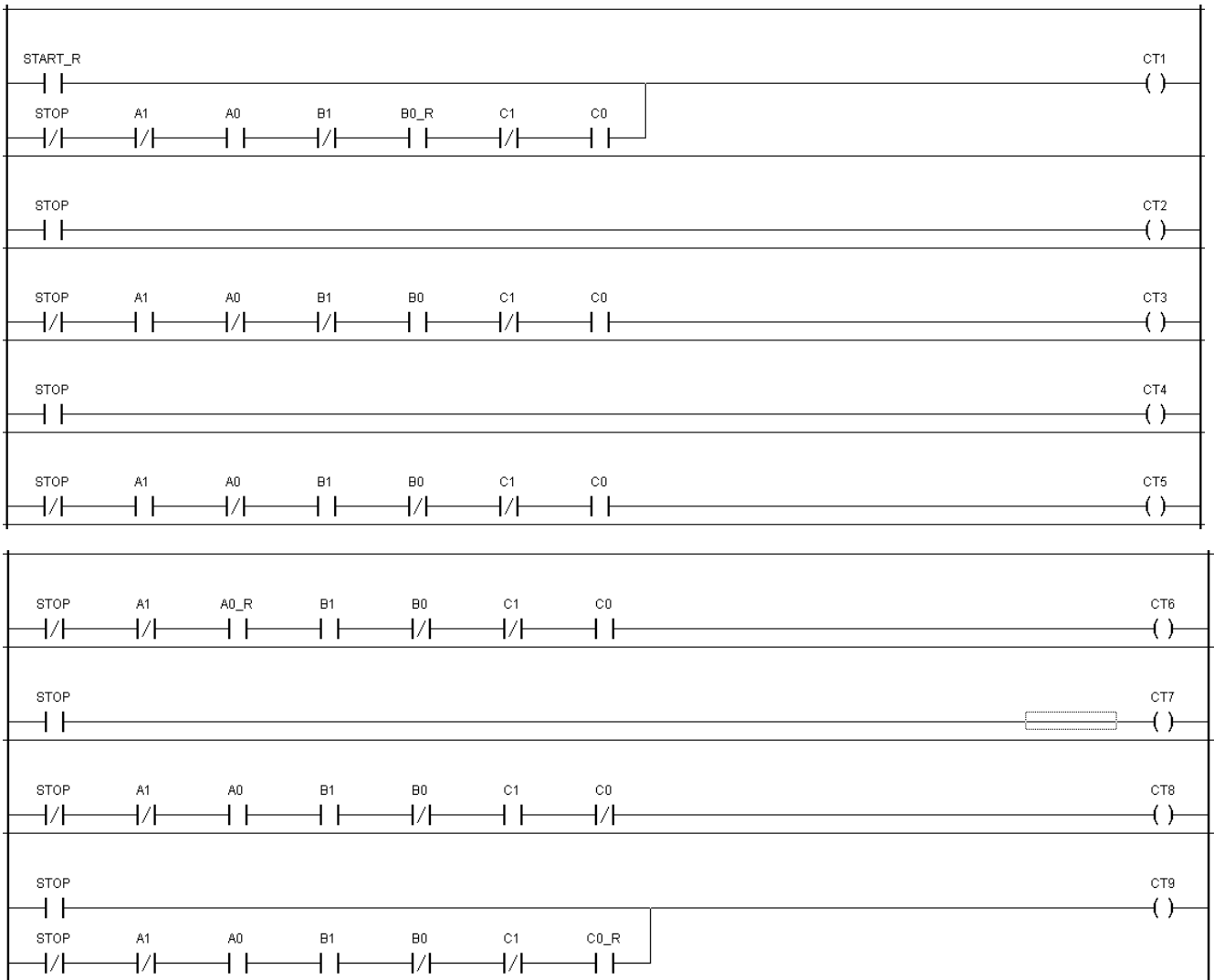
**Figura 6.1.24 Activación de los estados del automatismo parte 2.**

9. **Programación de las condiciones de transición.** Con referencia a la tabla 16 se usan 4 señales de flanco de subida las cuales en el Diagrama de Escalera son detectadas con funciones propias de CODESYS, como se ve en la figura 6.1.25, y posteriormente son utilizadas en las condiciones de transición que se obtienen a partir de las ecuaciones 6.1.6 a 6.1.14, y se observan en la figura 6.1.26.



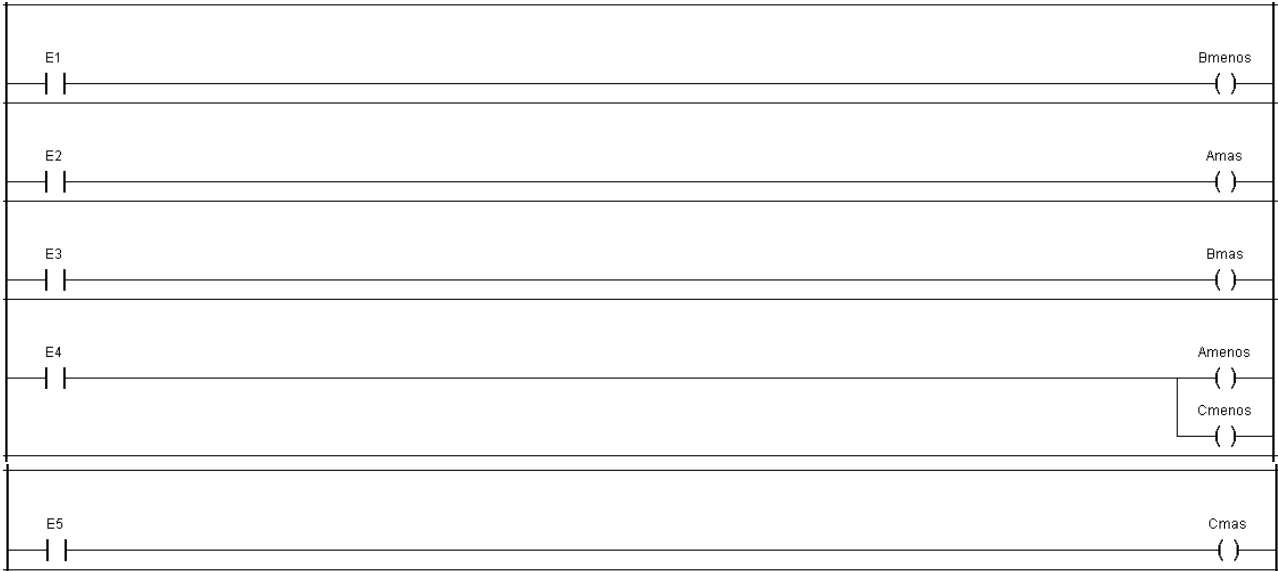
**Figura 6.1.25 Diagrama de Escalera con funciones de detección de flanco para el botón START y los sensores de final de carrera.**

Una vez ya crearon las etiquetas de los flancos de subida de los cilindros cuando pasan de una posición extendida a retraída (figura 6.1.25) únicamente se implementa las condiciones de transición (figura 6.1.26).



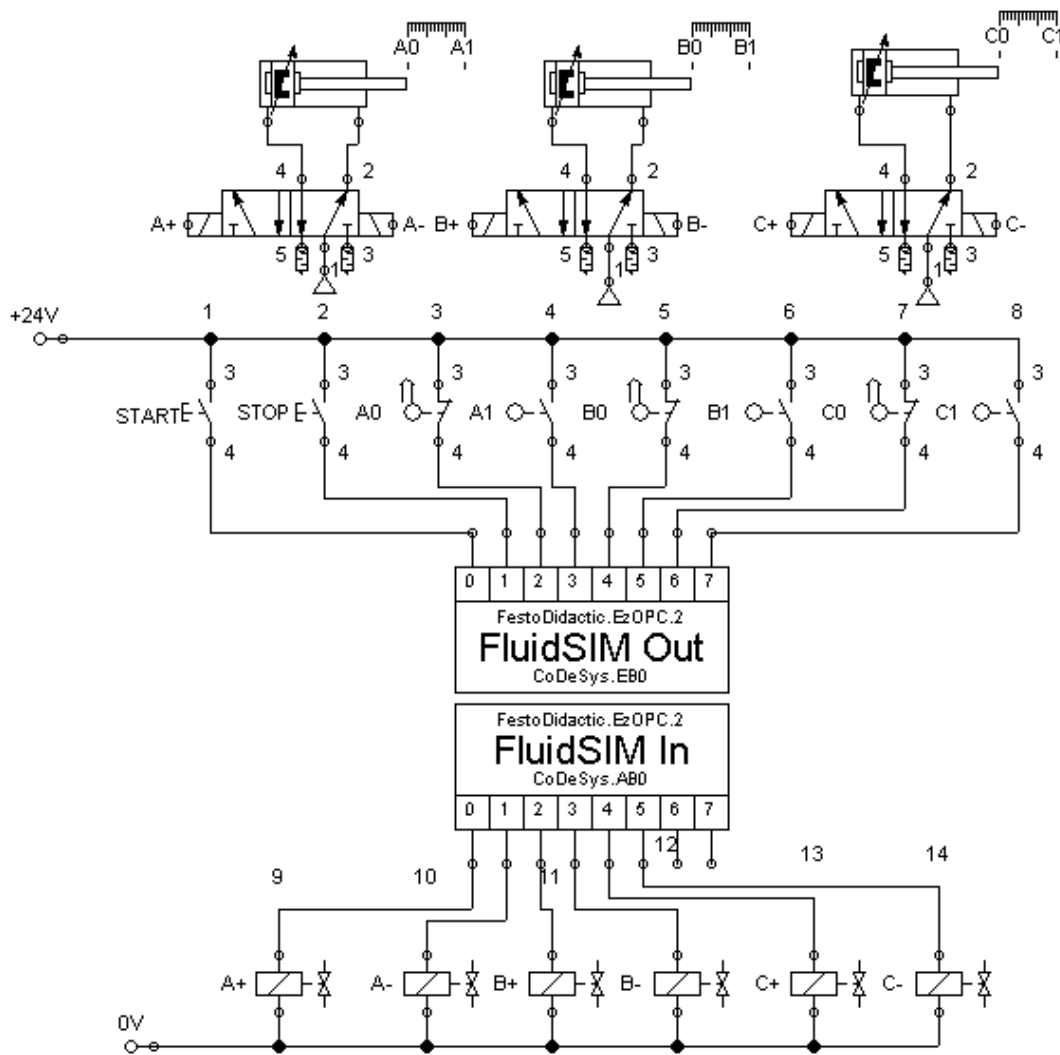
**Figura 6.1.26 Diagrama de Escalera de las condiciones de transición.**

10. **Programación de las salidas de control.** En el Diagrama de Escalera de la figura 6.1.27, se muestran como salidas de control los solenoides de los cilindros que son activados en cada estado de acuerdo al diagrama de estados de la figura 6.1.22.



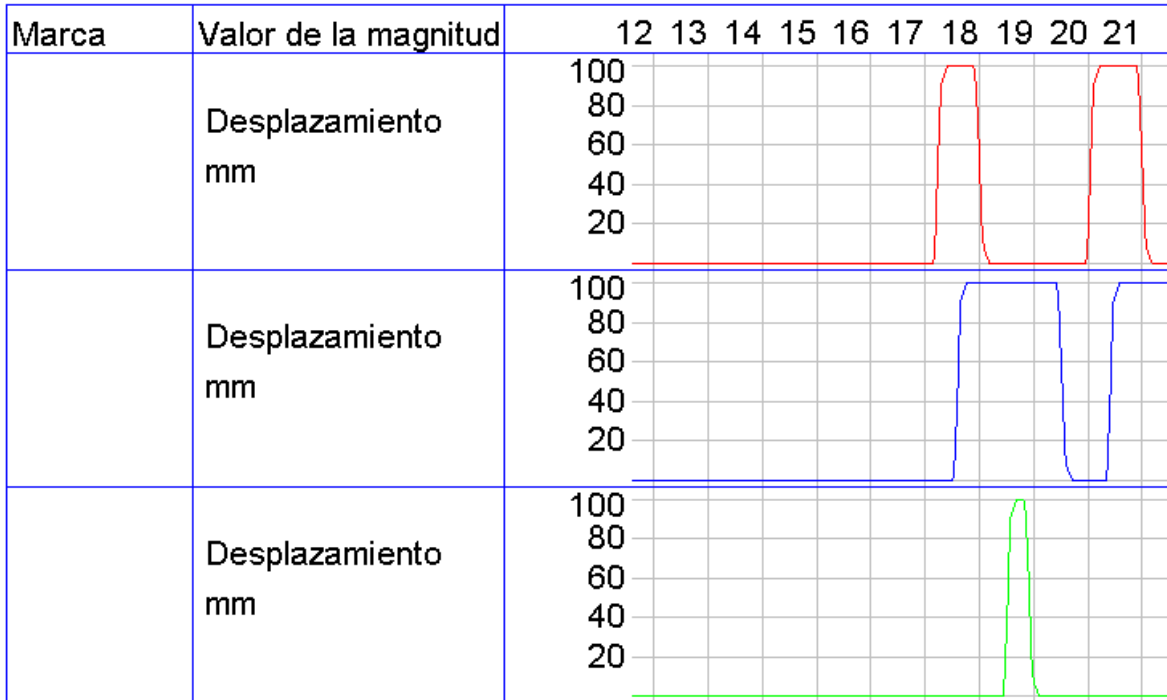
**Figura 6.1.27 Diagrama de Escalera de los solenoides de las válvulas de control activados por los estados del automatismo.**

11. **Construcción del diagrama esquemático de los elementos de trabajo.** El último paso del método es dibujar el diagrama esquemático del automatismo. La parte de trabajo del automatismo, figura 6.1.28, es idéntica a las sintetizadas por los otros métodos; es decir, consiste de tres cilindros de doble efecto conectados cada uno a una electroválvula 5/2 vías, con sensores de final de carrera A, B y C, respectivamente. El diagrama esquemático incluye un puerto de entradas al PLC, al que se conectan los finales de carrera y el botón de marcha (START) y paro (STOP), y un puerto de salida que se conecta directamente a los solenoides de las electroválvulas.



**Figura 6.1.28 Automatismo electroneumático de tres cilindros controlados por PLC.**

El último diagrama de Espacio - Fase que corresponde a la secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C- de tres cilindros se muestra en la figura 6.1.29. El automatismo arranca después de la activación de los dos software de cosimulación, lo que ocurre en el segundo 17.1. De entrada, se observa un aumento del tiempo requerido para iniciar la comunicación mediante el OPC, que es de esperarse por la mayor complejidad del automatismo. La secuencia inicia con la extensión de A (línea roja) que toma aproximadamente 272 ms, seguida de la extensión de B (línea azul) que toma el mismo tiempo que A. Una vez extendido B, A regresa a su posición original, y al hacerlo C (línea verde) se extiende y retrae de inmediato. Mientras esto ocurre, B se mantiene extendido, y se retrae una vez que C alcanza su posición retraída. Con esto se completa el primer ciclo de la secuencia guardando los mismos tiempos de extensión, retracción y permanencia en las posiciones retraídas y extendidas. Se concluye, pues, que la secuencia simulada es consistente con la planeada y que se lleva a cabo sin errores.



**Figura 6.1.29 Diagrama espacio-fase para la secuencia A- B- C- | A+ B- C- | A+ B+ C- | A- B+ C- | A- B+ C+ | A- B+ C- sintetizada por el método de Máquinas de Estados Finitos.**

### **Comentarios sobre los resultados observados en los diagramas de Espacio - Fase**

Con la información obtenida de los diagramas Espacio – Fase hasta este punto, se comprobó la consistencia de los resultados de las simulaciones con la secuencia de activación de los cilindros definida en cada grupo, lo que evidencia el correcto funcionamiento de todos los automatismos analizados. También se observó que no hay diferencias significativas en los tiempos de activación, desactivación, y permanencia en las posiciones extendidas y retraídas, lo que significa que el funcionamiento de los automatismos es independiente del método de síntesis, lo cual confirma nuestras expectativas. Esto nos lleva a considerar otros parámetros de desempeño de automatismos para poder realizar un análisis comparativo más objetivo, mismo que se presentará en apartados posteriores.

## **6.2 Resultados de experimentos de laboratorio**

Con la finalidad de demostrar que los resultados obtenidos mediante simulaciones son consistentes en la práctica se estimó conveniente implementar en el laboratorio algunos automatismos. Se utilizó para ello la misma secuencia y diferentes métodos de síntesis, heurístico y cascada. No se implementó el esquema del automatismo diseñado por el método de Máquinas de Estados Finitos debido a la necesidad de

utilizar un PLC de CODESYS con el que no se cuenta en el laboratorio. Fue necesario realizar ajustes en el diseño del automatismo sintetizado por el método de cascada para lograr su implementación, mismos que serán explicados más adelante.

Las implementaciones físicas fueron realizadas en el laboratorio de neumática del edificio FCE 2, y se utilizaron los siguientes materiales para las pruebas:

- 2 Cilindros de doble efecto (figura 6.2.1) de la marca AirTAC de una longitud del vástago de 100mm y 200mm de diámetro y un trabajo de presión de 1.0 MPa.



**Figura 6.2.1 Cilindro de doble efecto del laboratorio de neumática.**

- 1 Unidad de mantenimiento (figura 6.2.2) de la marca NORGREN R72G-3GK-RMN conformada por un regulador de presión con ajuste de salida de 0.3 a 10 bar y un filtro de agua.



**Figura 6.2.2 Unidad de mantenimiento del laboratorio de neumática.**

- 2 Electroválvulas 5/2 vías (figura 6.2.3) de la marca ASCO JOUCOMATIC.



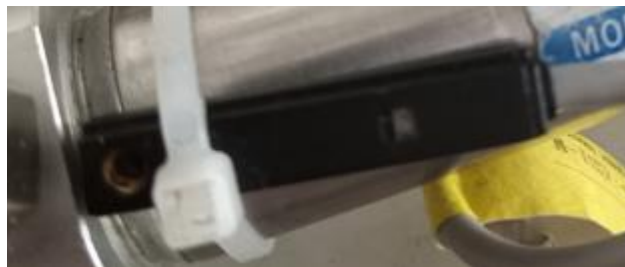
**Figura 6.2.3 Válvulas de control de 5/2 vías del laboratorio de neumática.**

- Un tablero de entrenamiento electroneumático (figura 6.2.4) de la marca BYTRONIC.



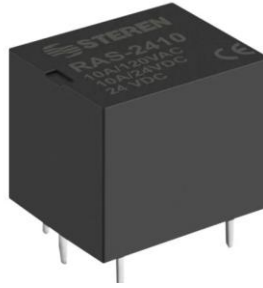
**Figura 6.2.4 Tablero de entrenamiento electroneumático del laboratorio de neumática.**

- 2 Sensores magnéticos de final de carrera (figura 6.2.5) de la marca AirTAC.



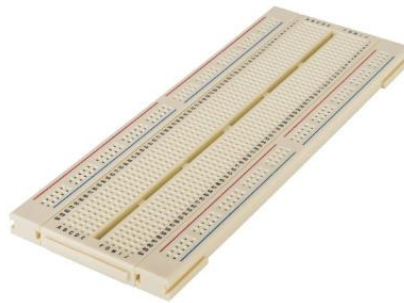
**Figura 6.2.5 Sensores de final carrera magnéticos.**

- 9 Relevadores de propósito general (figura 6.2.6) de la marca Steren.



**Figura 6.2.6 Relevadores.**

- 1 Protoboard (figura 6.2.7) de la marca Steren.



**Figura 6.2.7 Protoboard.**

- 6 Cables caimán de la marca Steren.
- 2 Botones pulsadores de propósito general (figura 6.2.8) de la marca Steren, uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado.



**Figura 6.2.8 Dos botones pulsadores, uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado.**

- Cable para protoboard de la marca Steren.

- Varias secciones de manguera genérica de aire (figura 6.2.9) de calibre de 6 mm.

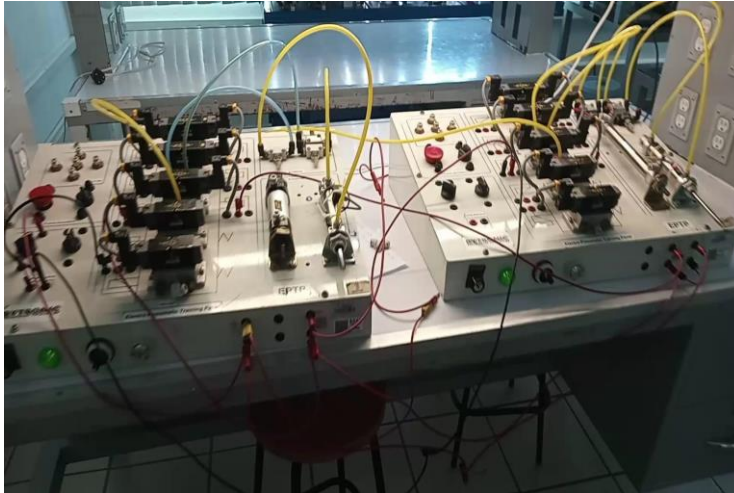


Figura 6.2.9 Manguera genérica de aire.

### **6.2.1 Implementación del automatismo electroneumático con secuencia A- B- | A- B+ | A+ B- diseñado por el método heurístico**

En la implementación física se siguió el orden indicado en el diagrama esquemático de la figura 6.1.2, comenzando con las conexiones neumáticas. Primero, se identificó mediante la aplicación directa de aire comprimido qué entradas son para retraer o extender los vástagos de los cilindros. Con las entradas identificadas se realizaron las conexiones de las electroválvulas.

Para la conexión eléctrica del automatismo, primero se probaron los solenoides de las electroválvulas, suministrándoles un voltaje de 24 V de cd. El automatismo completo se muestra en la figura 6.2.10.



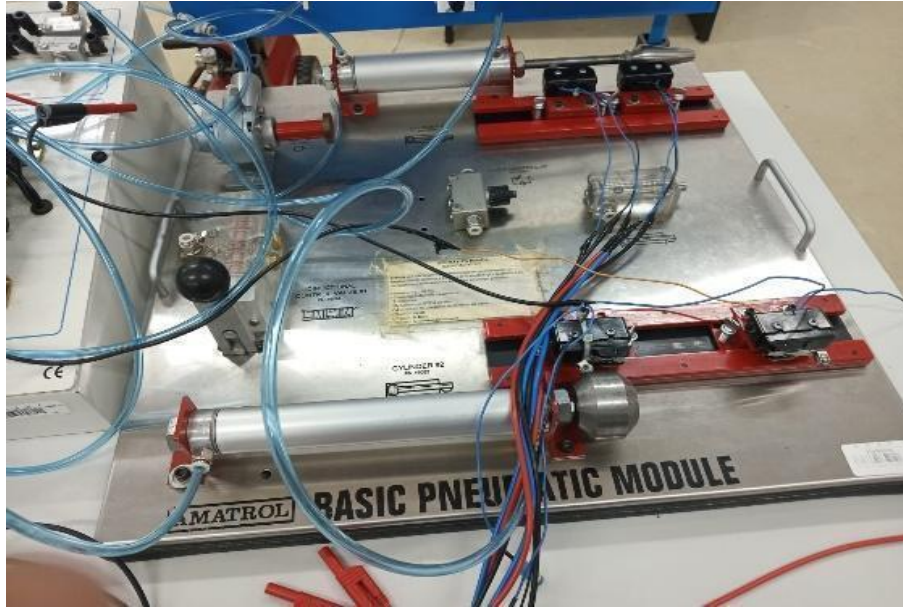
**Figura 6.2.10 Automatismo diseñado por el método heurístico.**

Debido a que el método heurístico hace uso de las señales de finales de carrera como condiciones de activación, en general no se requiere de relevadores que funcionen como memorias, aspecto que marca una diferencia significativa con respecto al método de cascada.

### **6.2.2 Automatismo electroneumático con secuencia A- B- | A- B+ | A+ B- diseñado por el método de cascada.**

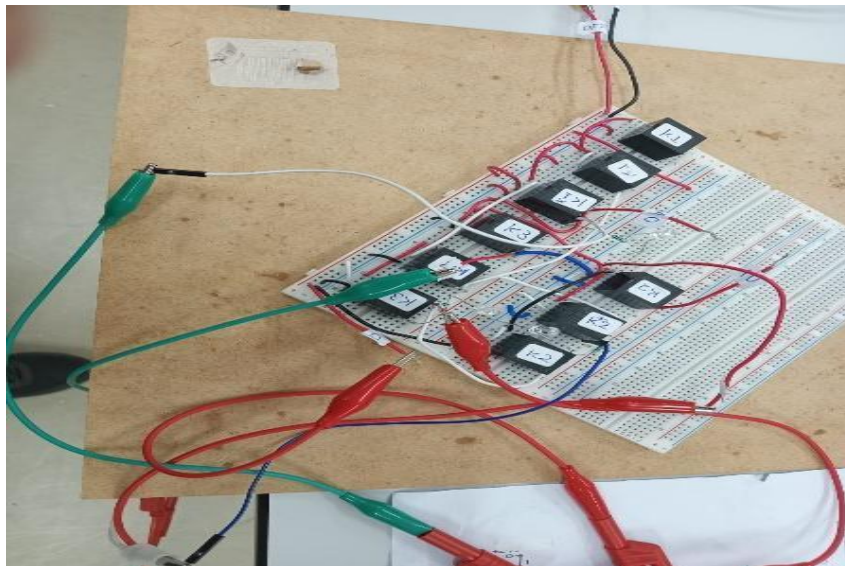
En el método de cascada la secuencia del automatismo se divide en grupos que junto con las señales de los finales de carrera funcionan como condiciones de activación. Se requiere, entonces, de señales que indiquen qué grupo está activado en un tiempo específico, y esto se logra con un relevador por grupo.

La parte neumática del automatismo, figura 6.2.11, se realiza primero, y luego la parte eléctrica siguiendo el diagrama esquemático.



**Figura 6.2.11 Parte neumática del automatismo.**

Normalmente, usando relevadores industriales se requieren sólo 3 de ellos para la implementación de la memoria de los grupos de trabajo del automatismo, 2 para los grupos I y II, cada uno con 3 contactos abiertos y 1 cerrado, y 1 para el grupo III, con 2 contactos abiertos y 1 cerrado. Esto porque un relevador industrial cuenta típicamente con 4 contactos, 2 normalmente abiertos y 2 normalmente cerrados. Puesto que usamos relevadores genéricos de propósito general, los cuales manejan sólo 1 contacto normalmente abierto y 1 normalmente cerrado, fue necesario hacer un arreglo de 3 bobinas en paralelo para cada grupo, dando un total de 9 relevadores, como se muestra en la figura 6.2.12.



**Figura 6.2.12 Unidad de memoria de los grupos del automatismo.**

## **6.3 Análisis comparativo**

### **6.3.1 Comparación de los automatismos cosimulados y simulados**

La realización de los diferentes automatismos sintetizados por los tres métodos heurístico, cascada y Máquinas de Estados Finitos, se caracteriza por dividirse en una parte neumática y una parte eléctrica. El número de cilindros, válvulas y sensores de final de carrera requerido depende de la complejidad de la secuencia del automatismo, compartiendo en todos los casos el mismo número de componentes neumáticos y diferenciándose en los elementos eléctricos que se emplean para la parte de control; esto es, excluyendo los sensores de final de carrera, la cantidad de relevadores o el uso del PLC.

En cuanto a la cantidad de componentes del automatismo para el caso de secuencias de dos cilindros, el más económico de los tres métodos es el heurístico, ya que su implementación se logra utilizando los sensores de final de carrera como condiciones de activación y desactivación, mientras que en el de cascada es necesario agregar por cada grupo un relevador, y en el de Máquinas de Estados Finitos aunque no se requieren relevadores, se necesita un PLC además de los sensores de final de carrera.

No se observó una gran diferencia en cuanto a la cantidad de componentes de la parte eléctrica en la síntesis de automatismos por los métodos de Máquinas de Estados Finitos y heurístico, aunque sí hay una marcada diferencia en el caso del método de cascada.

En general, realizar una simulación es más fácil que realizar una cosimulación porque en la simulación al trabajar con una sola aplicación de software todo reside en el mismo lugar, facilitando la detección de errores, el diagnóstico y las modificaciones de diseño. Este no es el caso de las cosimulaciones, donde estas tareas se dificultan por trabajar con dos aplicaciones de software simultáneamente. Sin embargo, al hacer uso de un PLC virtual las cosimulaciones tienen la ventaja potencial de implementar automatismos más complejos; por ejemplo, con temporización, conteo y estados repetidos en la misma secuencia.

En cuanto a la cantidad de pasos de cada uno de los tres diferentes métodos de síntesis de automatismos, se observa que el método heurístico contó con el menor número, seguido del método de cascada y finalmente el método de Máquinas de Estados Finitos. Por otro lado, el método heurístico presentó un mayor grado de complejidad al no contar con reglas específicas para su implementación a diferencia de los métodos de cascada y de Máquinas de Estados Finitos, aspecto que se indica en la tabla 18.

Sobre la facilidad para realizar modificaciones, el método de máquinas de estados finitos es el más flexible de los tres, pues cualquier cambio en la secuencia que mantenga el mismo número de cilindros se implementa en los Diagramas de Escalera del PLC (nivel software) y no en los elementos de trabajo (nivel hardware).

Con la valoración cualitativa realizada en los párrafos anteriores no es posible hacer un juicio concluyente, lo que deja inconcluso el esfuerzo de comparación. El problema, entonces, puede atacarse como uno de *toma de decisiones*<sup>+</sup>, y ser abordado con una herramienta específica.

En ésta tesis utilizamos el método de Pugh [25] para resolver el problema de valoración de los métodos de síntesis. Su aplicación requiere de una matriz, tabla 20, con los criterios de desempeño o categorías dispuestas en las filas y los métodos de síntesis colocados en las columnas. [26] Se escoge un método (una columna) como referencia, y se comparan los métodos restantes con éste. La comparación se realiza asignando pesos a cada categoría. Se tomaron como criterios de desempeño el número de pasos, la complejidad, la flexibilidad, el número de componentes y el costo aproximado.

En general, la asignación de pesos a los criterios de desempeño depende de las prioridades de cada empresa. Por ejemplo, para una empresa puede ser más importante el tiempo de implementación que el costo de componentes, pero para otra puede ser justo lo opuesto, etc. En esta tesis, se otorgó mayor importancia a la flexibilidad, seguida del número de componentes y el costo aproximado. El resultado de la aplicación del método de Pugh consiste de una asignación de valores subjetivos a cada método de síntesis.

En la tabla 18 se hace una asignación de pesos de tres niveles, bajo, medio y alto, de acuerdo a la experiencia personal del autor para cada uno de los pasos de los métodos de síntesis.

\*En un problema de toma de decisiones [27] se requiere elegir entre varias opciones para alcanzar un objetivo o resolver una situación.

**Tabla 18: Valoración subjetiva (criterio personal del autor) de los pasos de los métodos de síntesis de automatismos.**

Heurístico		Cascada		Máquinas de estados finitos	
Etapa	Nivel de complejidad	Etapa	Nivel de complejidad	Etapa	Nivel de complejidad
1.- Definición de los elementos de trabajo y control.	Medio	1.- Definición de elementos de los elementos de trabajo y control.	Bajo	1. -Definición de elementos de los elementos de trabajo y control.	Bajo
2.- Diagrama esquemático de la parte neumática	Bajo	2. Definición de elementos de la secuencia	Medio	2.- Identificación de entradas y salidas.	Bajo
3.- Diseño del control por relevadores	Alto	3.- Activación y desactivación de los grupos.	Medio	3.- Definición de estados.	Bajo
		4.- Se crea la tabla de la activación de los solenoides	Medio	4.- Creación del diagrama de estados.	Bajo
		5.- Activación de los solenoides.	Medio	5.- Elaboración de la tabla de transición de estados.	Medio
		6.- Construcción del diagrama esquemático de los elementos de trabajo	Medio	6.- Identificación y definición de las condiciones de transición.	Medio
		7.- Activación y desactivación de los grupos.	Medio	7.- Elaboración de tablas de variables del PLC.	Medio

				8.- Creación de las condiciones de transición en Diagrama de Escalera.	Medio
				9.- Creación del Diagrama de Escalera para activación de los solenoides.	Medio
				10.- Construcción del diagrama esquemático de los elementos de trabajo.	Bajo

Para continuar con la aplicación del método de Pugh se propone la siguiente ponderación de acuerdo al criterio del autor, tabla 19.

**Tabla 19: Tabla de ponderación de criterios.**

Criterio	Ponderación	Ponderación
No de pasos	1	El número de pasos no determina la complejidad del método.
Complejidad	2	El número de pasos no determina la complejidad del método.
Flexibilidad	5	Los cambios en el automatismo se realizan en menor tiempo de acuerdo a la flexibilidad que éste ofrezca, beneficiando potencialmente el ahorro de componentes.
No de componentes	3	El número de componentes impacta negativamente al costo y puede impactar potencialmente en la complejidad del automatismo.
Costo aproximado	3	Generalmente, el presupuesto de desarrollo de un automatismo es limitado.

El siguiente paso en el método de Pugh (tabla 20) es la comparación de los métodos de síntesis tomando como referencia el de cascada por ser el más ampliamente conocido. Todas las valoraciones de los criterios, por lo tanto, son 0 para el método de cascada, y son:

- 0, si el cumplimiento del criterio es igual al de referencia,
- 1, si el cumplimiento del criterio supera al de referencia, y
- -1, si el cumplimiento del criterio es inferior al de referencia.

Para obtener el *ranking* (el orden de mayor a menor valor de los métodos de síntesis) ya que se han asignado los valores de -1 a 1 para cada criterio, se suman los valores de cada columna de valoración. Sin embargo, esto puede generar un falso orden de importancia, al darle el mismo peso a todos los criterios. Para evitar ese error, usamos los valores ponderados; es decir, los obtenidos de la multiplicación de cada valoración por su correspondiente ponderación.

**Tabla 20: Tabla de Pugh con los pesos o ponderaciones.**

CRITERIOS	Pesos	Métodos de síntesis de automatismos					
		Heurístico		Cascada		Máquinas de estados finitos	
		Valoración	Valoración ponderada	Valoración	Valoración ponderada	Valoración	Valoración ponderada
No de pasos	1	1	1	0	0	-1	-1
Complejidad	2	-1	-2	0	0	1	2
Flexibilidad	5	0	0	0	0	1	5
No de componentes	3	1	3	0	0	1	3
Costo aproximado	3	1	3	0	0	-1	-3
Suma general		2	5	0	0	1	6
Ranking			2		3		1

Como resultado de la aplicación del método de Pugh (tabla 20), se obtuvo que el método de síntesis de Máquinas de Estados Finitos es la mejor opción, seguido por el método heurístico y al final el método de cascada.

### 6.3.2 Comparación de la implementación experimental de los automatismos

Como era de esperarse, en los experimentos de laboratorio se observó la misma característica que para las simulaciones: La parte neumática está conformada por la misma cantidad de componentes, y la parte de control difiere en su número de componentes dependiendo del método de síntesis utilizado.

Los costos aproximados de los componentes principales de los automatismos implementados sin considerar los consumibles como mangueras, cables, cinta de aislar, protoboard y caimanos, y asumiendo que se cuenta con una red neumática funcional y con las herramientas necesarias para trabajar, se estiman en las tablas 22 y 23, donde se observa que el automatismo diseñado por el método de cascada es un 8% más caro que el automatismo diseñado por el método heurístico, lo que resalta aún más el tercer lugar del método de cascada en el ranking de los métodos.

Se calcularon al momento de estar escribiendo esta tesis y se consultaron proveedores de internet Amazon, Mercado Libre y Steren, obteniendo la tabla de precios 21.

**Tabla 21. Precio unitario de los componentes principales de los automatismos.**

Componente	Precio unitario (MXN)
Cilindro de doble efecto de la marca AirTAC [28]	\$172.00
Electroválvula 5/2 vías de la marca ASCO JOUCOMATIC [29]	\$443.00
Sensor magnético de final de carrera de la marca AirTAC [30]	\$522.00
Relevador [31]	\$25.00
Botón pulsador [32]	\$29.00

**Tabla 22: Costo aproximado de los componentes principales del automatismo heurístico.**

Cantidad	Componente	Costo
2	Cilindros de doble efecto	\$344
2	Válvulas de 5/2 vías	\$886
4	Sensores de final de carrera	\$2,088

Costo total \$3,318

**Tabla 23: Costo aproximado de los componentes principales del automatismo de cascada.**

Cantidad	Componente	Costo
2	Cilindros de doble efecto	\$344
2	Válvulas de 5/2 vías	\$886
4	Sensores de final de carrera	\$2,088
2	Botones pulsadores	\$58
9	Relevadores comunes	\$225

Costo total \$3,601

No se cotizó el PLC que puede usarse en el método de Máquinas de Estados Finitos debido a que se trabajó en cosimulación. Sin embargo, su adquisición impactaría directamente al costo general, incluso desplazando al método del primer lugar del ranking estudiado. Su adquisición, entonces, dependerá del presupuesto del proyecto y de la ponderación de los criterios.

# Capítulo 7

## Conclusiones y trabajos futuros

Se expondrán las conclusiones obtenidas de las diferentes simulaciones realizadas por los métodos de síntesis de automatismos de cascada, heurístico y Máquinas de Estados Finitos, al igual que sus implementaciones físicas, y se hablará sobre los posibles trabajos futuros.

### 7.1 Conclusiones

Resultó más fácil diseñar los automatismos empleando los métodos de Máquinas de Estados Finitos y cascada, en comparación con el empleo del método heurístico, debido a que los primeros cuentan con reglas ya establecidas, mientras que el otro se basa en la experiencia del diseñador.

Una ventaja significativa del método de máquinas de estados finitos con respecto a los métodos de cascadas y heurístico es que el primero presenta una mayor flexibilidad a la hora de realizar cambios en las secuencias. Esto se debe a la relativa facilidad de cambiar valores en la tabla de estados por cada ajuste en la secuencia lo que lleva a modificaciones (rápidas) en el Diagrama de Escalera (software), en lugar de los componentes físicos (hardware).

En los experimentos de laboratorio se encontró que el método heurístico, en comparación con el de cascada, presentó un menor número de componentes al igual que un menor costo aproximado (tablas 22 y 23) al no emplear relevadores para su funcionamiento.

En cuanto al diagnóstico y corrección de errores, el automatismo diseñado por el método de Máquinas de Estados Finitos resulta ser el mejor en comparación con el de cascada y el heurístico, ya que justo ese es el orden de cantidad de componentes físicos de cada automatismo, sin contar con las herramientas propias del software para programar los Diagramas de Escalera.

De los tres métodos cuando se prioriza únicamente el costo aproximado el método heurístico resulta la mejor opción al necesitar pocos componentes siendo superado por el método de Máquinas de Estados Finitos, pero a diferencia de este último sus componentes representan un costo menor.

Conforme fue aumentando el número de actuadores y sensores de final de carrera se hizo presente la ventaja del método de Máquinas de Estados Finitos de trabajar con estados y repetidos y automatismos con una gran cantidad de entradas y salidas.

Por todas las ventajas arriba mencionadas, resulta evidente la superioridad del método de Máquinas de Estados Finitos que, como también se dijo, cuya elección dependerá del presupuesto con el que se cuente y de la valoración subjetiva de los criterios de desempeño.

## **7.2 Trabajo futuro**

Se propone como trabajo futuro la síntesis de automatismos cuando se tienen secuencias temporizadas, con contadores, y con múltiples repeticiones de estados, empleando tanto los mismos métodos reportados en esta tesis, como otros diferentes, y compararlos con el método de Máquinas de Estados Finitos. Resultará interesante estudiar también el grado de flexibilidad de cada automatismo sintetizado y el uso de un PLC real implementando el método de Máquinas de Estados Finitos en el laboratorio y otro proyecto que se realizará es llevar todo lo aprendido en una pequeña industria para recolectar información con respecto al impacto que tiene.

# Referencias

- [1] A. García Higuera. *El control automático en la industria*. España: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. 2005
- [2] R. Teran Cabañas, "Desarrollo de una metodología para proyectos de automatización eléctricos", Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2014.. citation.available: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/5221>. citation.accessed: May 27, 2025 [citation.online]
- [3] S.R. Majumdar. *SISTEMAS NEUMÁTICOS PRINCIPIOS Y MANTENIMIENTO*. México. Editorial McGRAW-HILL INTERAMERICANA. 1997
- [4]C. Reyes, J. Corrales, "Análisis comparativo de controles Neumáticos y Electroneumáticos en diferentes tipos de Secuencias". *Revista G-ner@ndo*, V°4 (N°2). 883 – 902, 2023.
- [5] V. I. Manzano Osornio, "Diseño de procesos electroneumáticos en ambientes virtuales usando un controlador lógico programable Siemens", tesis de ingeniería, Instituto Politécnico Nacional, México, DF 2011.
- [6]J. Zilberstein Toruncha, E. Escribano Hervis, A. Sánchez Macías, V. Azura Pugliese. "NUEVAS TENDENCIAS EN LA INVESTIGACIÓN UNIVERSITARIA CIENCIAS ADMINISTRATIVAS, EDUCATIVAS Y JURÍDICAS". México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 2022
- [7] C. Vázquez Hurtado. "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL UTILIZANDO REDES DE PETRI", Campus Toluca, ITESM, tesis de maestría, Toluca, México, 2002.
- [8] C. Sánchez. "AUTOMATIZACIÓN EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ: CONCEPTOS Y PROCESOS." *DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN EMPRESARIAL*, Edición 3, Volumen 2, pp. 11-14, Diciembre - 2014
- [9] C. VALDIVIA MIRANDA. *Comunicaciones industriales*. España: Ediciones Paraninfo, S.A. 2019
- [10] M. Gómez Galán, J. A. López Martínez, A. López Martínez, Á. J. Callejón Ferre. *Manual de presentaciones de Neumática y Oleohidráulica para el grado de ingeniero mecánico*. España: Editorial Universidad de Almería. 2020
- [11] J. Manuel Gea Puertas / V. Lladonosa Giro. *Circuitos Básicos de Ciclos Neumáticos y Electroneumáticos*. Barcelona, España: Alfaomega, 1998.
- [12] S. R. Majumdar. *SISTEMAS NEUMÁTICOS PRINCIPIOS Y MANTENIMIENTO*, McGRAW-HILL, 1997.

- [13] “Simbología Neumática e Hidráulica”. Accedido: 13 de noviembre del 2024. [Online]. Disponible en:  
[https://www.portaleso.com/web\\_simbologia\\_neuma/simbolos\\_neumatica\\_indice.html](https://www.portaleso.com/web_simbologia_neuma/simbolos_neumatica_indice.html)
- [14] V. Linares González. *Diagnos de averías y mantenimiento correctivo de sistemas de automatización industrial*. ELEM0311. España: IC Editorial. 2018
- [15] A. Guillén Salvador. *Introducción a la Neumática*. Colombia: Marcombo. 1988
- [16] Fuente: <https://www.cursosaula21.com/que-son-los-cilindros-neumaticos/>
- [17] J. C. Vásquez Cortés. *Automatización electroneumática*. Colombia: Ediciones de la U., 2016
- [18] A. Creus Solé. *Neumática e hidráulica*. España: Marcombo 2010.
- [10] V. Lladonosa Giró, J. M. Gea Puertas, J. M. Gea. *Circuitos Básicos de Ciclos Neumáticos y electroneumáticos*. España: Marcombo 1998.
- [20] A. SERRANO NICOLAS. *Neumática*. España: Ediciones Paraninfo, S.A. 1996
- [21] M. M. Mano. *Diseño digital*. México: Pearson Educación. 2003
- [22] A. Zehe, *MICROELECTRÓNICA Materiales y tecnologías Diseño de circuitos integrados*, 1st ed. Puebla: BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA, 1999
- [23] “FESTO”. Accedido: 18 de noviembre del 2024. [Online]. Disponible en:  
[https://www.festo.com/mx/es/e/educacion/aprendizaje-digital/simulacion-virtual-y-modelado/fluidsim-id\\_1663056/#:~:text=Desde%20hace%20m%C3%A1s%20de%2025,la%20eficiencia%20y%20la%20calidad.](https://www.festo.com/mx/es/e/educacion/aprendizaje-digital/simulacion-virtual-y-modelado/fluidsim-id_1663056/#:~:text=Desde%20hace%20m%C3%A1s%20de%2025,la%20eficiencia%20y%20la%20calidad.)
- [24] J. M. ESCAÑO GONZÁLEZ, A. NUEVO GARCIA, J. GARCÍA CABALLERO. *Integración de sistemas de automatización industrial*. España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2019.
- [25] J. Izar. *Manufactura de clase mundial*. Colombia: Alpha Editorial. 2016
- [26] A. M. Cruz. *Gestión tecnológica hospitalaria: un enfoque sistémico*. Colombia: Editorial Universidad del Rosario. 2010
- [27] “Espacios. Vol. 31 (2) 2010.” Accedido: 18 de noviembre del 2024. [Online]. Disponible en: <http://www.revistaespacios.com/a10v31n02/10310233.html>
- [28] “Cilindro neumático de aire CDJ2B10-30B 10 mm Diámetro 30 mm Carrera Doble acción 2 Acero inoxidable Cilindro hidráulico : Amazon.com.mx: Industria, Empresas y Ciencia.” Accedido: 18 de noviembre del 2024. [Online]. Disponible en:  
<https://www.amazon.com.mx/Cilindro-neum%C3%A1tico-CDJ2B10-30B-inoxidable->

hidr%C3%A1ulico/dp/B07HG8V8LS/ref=asc\_df\_B07HG8V8LS/?tag=gledskshopmx-20&linkCode=df0&hvadid=709859250123&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=974541043706461142&hvpon=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=9073959&hvtargetid=pla-1947010335598&pssc=1&mcid=1e7daf0fd9083022b775dc14e7f789c7&gad\_source=4

[29] “Baomain Válvula neumática solenoide de aire 4V230C-08 DC 24V 5 vías 3 posiciones PT1/4 pulgadas de acción pilotada internamente tipo doble control eléctrico cerrado en el medio: Amazon.com.mx: Herramientas y Mejoras del Hogar.” Accedido: 18 de noviembre del 2024. [Online]. Disponible en: [https://www.amazon.com.mx/solenoide-neum%C3%A1tica-Baomain-4V230C-08-posiciones/dp/B019PTHS7Y/ref=sr\\_1\\_5?dib=eyJ2ljojMSJ9.zb3s2KqB6QKIOv955VtvWqjiKW2vfpTim37v7PeNXRzzCpls1v8s0tslNRPEbo5WS\\_bKQM6452oT4MVPF3v7Xtgyx7Csym3o3JHIYBXW1Drwqxztlz6G1-JsvPEbv-ISNAFVozfJOZT0JsbMWmx\\_tEXf3SmZNdZCAJjjYtVWAR8JaL1Ce0BRXPMoIWjjQPdWixcqpuevmVdggFUCVh51O7HBrXtOO6eCgR4mSM6ufv-j460sQblORg2UrllDqReBLpLHiUlcnC3JgFs6OQ4UWTnrrar30hyo3XyzdUclmrbwwR4urtshkI6-uC2PtiH4YbWugVH59unmo99Yz1tUuEGcHDCbBjIYt3bJV-wvshGOxAF\\_jiNIHUYI7oL0qbWyymvDGquUIJZvi9SqR8IVhUXKZO7g3IWB0-3XaRaoVRXu9gq851RDH7cbPXLmnt-l.j1lZkQhvRkl95Zfa7RZVRFNeBN2xWIVtmOJ05pP7wll&dib\\_tag=se&keywords=electrovalvula+5%2F2&qid=1740155136&sr=8-5&ufe=app\\_do%3Aamzn1.fos.45030d3a-91a9-4303-890a-776dee9077c1](https://www.amazon.com.mx/solenoide-neum%C3%A1tica-Baomain-4V230C-08-posiciones/dp/B019PTHS7Y/ref=sr_1_5?dib=eyJ2ljojMSJ9.zb3s2KqB6QKIOv955VtvWqjiKW2vfpTim37v7PeNXRzzCpls1v8s0tslNRPEbo5WS_bKQM6452oT4MVPF3v7Xtgyx7Csym3o3JHIYBXW1Drwqxztlz6G1-JsvPEbv-ISNAFVozfJOZT0JsbMWmx_tEXf3SmZNdZCAJjjYtVWAR8JaL1Ce0BRXPMoIWjjQPdWixcqpuevmVdggFUCVh51O7HBrXtOO6eCgR4mSM6ufv-j460sQblORg2UrllDqReBLpLHiUlcnC3JgFs6OQ4UWTnrrar30hyo3XyzdUclmrbwwR4urtshkI6-uC2PtiH4YbWugVH59unmo99Yz1tUuEGcHDCbBjIYt3bJV-wvshGOxAF_jiNIHUYI7oL0qbWyymvDGquUIJZvi9SqR8IVhUXKZO7g3IWB0-3XaRaoVRXu9gq851RDH7cbPXLmnt-l.j1lZkQhvRkl95Zfa7RZVRFNeBN2xWIVtmOJ05pP7wll&dib_tag=se&keywords=electrovalvula+5%2F2&qid=1740155136&sr=8-5&ufe=app_do%3Aamzn1.fos.45030d3a-91a9-4303-890a-776dee9077c1)

[30] “Mercado Libre.” Accedido: 18 de noviembre del 2024. [Online]. Disponible en: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1346306847-cs1-g-reed-switch-sensor-magnetico-airtac-para-cilindro-\\_JM?matt\\_tool=28238160&utm\\_source=google\\_shopping&utm\\_medium=organic](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1346306847-cs1-g-reed-switch-sensor-magnetico-airtac-para-cilindro-_JM?matt_tool=28238160&utm_source=google_shopping&utm_medium=organic)

[31] “Buy Compact SPDT Relay 1 pole, 2 throw - 24 VDC Coil -,” Accedido: 18 de noviembre del 2024. [Online]. Disponible en: *Electrónica Steren México*. <https://www.steren.com.mx/relevador-compacto-de-1-polo-2-tiros-spdt-y-bobina-de-24-vcc.html>

[32] “Switch de push, de boton redondo, normalmente abierto,” Accedido: 18 de noviembre del 2024. [Online]. Disponible en: *Electrónica Steren México*, Nov. 12, 2020. <https://www.steren.com.mx/switch-de-push-de-boton-redondo-normalmente-abierto-color-rojo.html>