

CONTROL MEDIANTE LÓGICA FUZZY DE UN PÉNDULO INVERTIDO

EDGAR AUGUSTO MARIN

OSCAR JAVIER ORTIZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2005

**CONTROL MEDIANTE LÓGICA FUZZY DE UN
PÉNDULO INVERTIDO**

EDGAR AUGUSTO MARIN

OSCAR JAVIER ORTIZ

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico.**

Director

JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2005

Ante todo agradezco a Dios por ser fuente de inspiración en las cosas que hago día a día, por su protección y bendición. A mis padres Ismael y Luz Marina por su amor dado, sus enseñanzas y su confianza total entregada. A mis hermanos Juan Carlos, David y Jessica por lo importante que son en mi vida. A Edgar por compartir esta experiencia y por su amistad brindada. A todas la personas que colaboraron en este proyecto, amigos y compañeros por ayudarme a cumplir este sueño. Gracias a todos y que Dios los bendiga.

Oscar J.

A Dios, por haber vencido mi incredulidad con su presencia. A mis padres, por haberme hecho quien soy, y por brindarme su apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida. A mis hermanas, por todo lo que han compartido en mi camino. A Oscar, por haber sido mi apoyo en este proyecto en los momentos en que otras cosas me alejaban del mismo, y por su invaluable amistad. A mi otra familia, llamada Dreamland, ellos saben por qué. A Cesar Dangond, por convertirse en el hermano que nunca tuve. A todos aquellos que me levantaron en aquellos tres meses en que todo parecía desaparecer. A mi guitarra Sofía, por ser mi alma en los momentos de tedio y de cansancio. A mis sobrinos, por la luz que trajeron a mi entorno. Y a todos aquellos que han estado allí, aunque olvide su nombre en este instante. A Adriana, por todo.

Edgar M.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Nuestras familias por su entrega y apoyo incondicional, sin lo cual hubiese sido imposible la realización de este proyecto.

Ingeniero Jorge Enrique Meneses, Director de Proyecto por sus valiosos aportes en el desarrollo del mismo.

Los amigos y miembros del Grupo de Investigación en Mecatrónica por su colaboración, compañía y amistad.

A Diego Navas, por su colaboración en el diseño electrónico del banco.

A los señores Gonzalo Calderón Caballero y Henry Alberto Cruz, encargados del Taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por la valiosa colaboración prestada en el diseño y construcción del equipo.

Oscar Higuera, Efraín Ruiz, Sergio Caballero, Luis Sepúlveda, Orlando Toledo, Oscar Angulo, Holguer Rangel, Mauricio Ortiz, Diana Ramirez, Jose Verdeza, Eduardo Culman.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	5
JUSTIFICACIÓN	7
OBJETIVOS	9
1 EL BANCO COMO SISTEMA AUTOMATIZADO.	12
1.1 PARTE OPERATIVA (PO)	13
1.1.1 La máquina	13
1.1.2 Sensores	14
1.1.2.1 Posición angular del péndulo.	15
1.1.2.2 Posición lineal del carro	16
1.1.3 Actuador	17
1.2 PARTE DE CONTROL (PC)	17
1.2.1 Preactuador	18
1.2.2 Controlador	19
2 LAS PARTES DEL BANCO	20
2.1 ESTRUCTURA CENTRAL DEL PÉNDULO.	22
2.2 PAQUETE MOTRIZ	22
2.3 ESTRUCTURA INTERNA	23
2.4 ESTRUCTURA DE APOYO	23
2.5 CAJA DE CONTROL	24
3 ESTRUCTURA CENTRAL DEL PÉNDULO	26
3.1 EL CARRO DEL PÉNDULO	27

	pág.	
3.1.1	El péndulo invertido	28
3.1.1.1	Posicionamiento angular del péndulo	31
3.1.2	Estructura de montaje del encóder	31
3.1.3	Transmisión péndulo - encóder	32
3.1.4	Estructura del móvil	34
3.2	ESTRUCTURA DE MONTAJE DE LOS FINALES DE CARRERA	37
3.3	LAS GUÍAS Y LOS SOPORTES DE MONTAJE	38
4	EL PAQUETE MOTRIZ	42
4.1	EL MOTOR ELÉCTRICO	43
4.2	TRANSMISIÓN DE POTENCIA	44
4.2.1	Tornillo de potencia	44
4.2.2	Correas sincrónicas (Timing Belts)	46
4.2.3	Transmisión mediante cable de acero	49
4.2.3.1	Selección del cable de acero para la transmisión	50
4.3	EL FRENO ELECTROMAGNÉTICO	52
4.4	ADICIONALES DE MONTAJE	54
5	ESTRUCTURA INTERNA	56
5.1	MÓDULO DE MONTAJE DEL CONJUNTO MOTRIZ	56
5.2	MÓDULO DE MONTAJE DE LA ESTRUCTURA CENTRAL	57
5.3	CAJA DE CONTROL	57
6	FUNCIONAMIENTO DEL BANCO	59
6.1	ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO	59
6.1.1	Etaa inicial (arranque en frío)	59
6.1.2	Etaa de posicionamiento automático	59

	pág.	
6.1.3	Etapa de posicionamiento manual	60
6.1.4	Etapa fuzzy	61
6.1.5	Etapa final fuzzy	61
6.1.5.1	Fuzzy fallido	61
6.1.5.2	Fuzzy fallido por activación de finales de carrera o pulsador inicio	61
6.1.5.3	Fuzzy exitoso	62
6.1.6	Etapa final	62
6.1.7	Etapa de emergencia	62
6.2	VISUALIZACIÓN DE ESTADOS	63
6.2.1	Indicador de estado ON	63
6.2.2	Indicador de estado READY	63
6.2.3	Indicador de estado RUNNING	64
6.2.4	Indicador de estado MOTOR	64
6.2.5	Indicador de proceso ROJO	64
6.2.6	Indicador de proceso AMARILLO	64
6.2.7	Indicador de proceso VERDE	65
6.3	INTERRUPTORES	65
7	CONTROL DEL SISTEMA AUTOMATIZADO	67
7.1	CONTROLADOR	67
7.1.1	Tipo de controlador	68
7.1.2	Algoritmo	70
7.2	PREACTUADOR	70
7.3	DIÁLOGO SISTEMA - OPERADOR	71
7.3.1	Panel de control	71
7.3.2	Display del variador de velocidad	71
7.3.3	Indicador de ángulo del péndulo	73

	pág.
7.3.4	Interface SCADA 73
7.3.5	Monitoreo del bloque fuzzy 73
8	INTERFACE SCADA 74
8.1	GENERALIDADES 74
8.1.1	Prestaciones 74
8.1.2	Módulos de un SCADA 75
8.2	SIMATIC WINCC V 5.1 76
8.2.1	Conexión del autómeta con el WinCC. 77
8.2.2	Definición de variables del proceso. 78
8.2.3	Diseño grafico del sistema SCADA. 78
9	EL ENTORNO FUZZY 82
9.1	SOFTWARE UTILIZADO 82
9.2	PROGRAMACIÓN FUZZY 82
9.2.1	Operaciones básicas 83
9.2.2	Edición de entradas 85
9.2.3	Edición de salidas 86
9.2.4	Edición de reglas 87
9.3	LA COMUNICACIÓN CON EL AUTÓMATA 88
9.3.1	Selección del sistema de destino. 88
9.3.2	Conexión 89
9.3.3	Envío de la información al bloque de datos fuzzy 91
9.4	VISUALIZACIÓN Y MONITOREO 91
10	DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO 93
10.1	DISEÑO ELÉCTRICO 93

	pág.	
10.2	DISEÑO ELECTRÓNICO	95
10.2.1	Control electrónico del variador de velocidad	95
10.2.2	Control del freno electromagnético del motor	99
10.2.3	Alimentación y toma de señales del encóder	100
10.2.4	Interruptores y finales de carrera	102
10.2.5	Control de potencia eléctrica	102
10.2.6	Pilotos digitales en el panel de control	103
10.2.7	El circuito electrónico completo	103
10.2.8	El circuito impreso PCB	105
10.2.9	Conexiones	106
11	EL PROGRAMA	111
11.1	GRAFCET Y GEMMA	111
11.1.1	GRAFCET	111
11.1.2	GEMMA	116
11.2	EL PROGRAMA	116
11.2.1	Estructura del programa del banco	119
11.2.1.1	OB1	120
11.2.1.2	OB100	120
11.2.1.3	FC1	120
11.2.1.4	FC2	120
11.2.1.5	FC3	120
11.2.1.6	FB30	121
11.2.1.7	FC4	121
11.2.1.8	FC5	121
11.2.1.9	FC6	121
11.2.1.10	FC7	121

	pág.
11.2.1.11 FC8	122
11.2.2 Relación de Operandos.	122
11.2.3 Sistema de entradas / salidas digitales	122
11.2.4 Salidas analógicas	123
11.2.5 El sensor rotativo (encóder)	126
12 ENSAYOS PRELIMINARES	128
13 CONCLUSIONES	133
14 RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFIA	136

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Cálculo de la transmisión sincrónica.	48
Tabla 2. Cálculos de la transmisión con cable de acero.	51
Tabla 3. Datos técnicos cable de acero galvanizado.	52
Tabla 4. Principales características del freno Warner Electric ERS-26.	52
Tabla 5. Relación de interruptores utilizados.	66
Tabla 6. Características de las salidas analógicas integradas al API.	96
Tabla 7. Características técnicas del encóder.	100
Tabla 8. Relación de variables utilizadas en el GRAFCET.	112
Tabla 9. Relación de entradas digitales utilizadas.	123
Tabla 10. Relación de salidas digitales utilizadas.	124

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Componentes del sistema automatizado.	12
Figura 2. Diseño esquemático del banco.	13
Figura 3. El banco de pruebas.	14
Figura 4. Encóder tipo absoluto marca Omron.	16
Figura 5. Motor eléctrico del banco.	18
Figura 6. Aspecto general del banco terminado.	20
Figura 7. Partes del banco.	21
Figura 8. Estructura central del péndulo.	22
Figura 9. Paquete motriz.	23
Figura 10. Estructura interna.	24
Figura 11. Estructura de apoyo.	24
Figura 12. Diseño final de la estructura del péndulo.	26
Figura 13. Estructura central del péndulo.	27
Figura 14. Diseño del carro del péndulo.	28
Figura 15. Diseño del péndulo.	30
Figura 16. Simulación de esfuerzos en el eje del péndulo.	30
Figura 17. Posicionamiento angular del péndulo.	32
Figura 18. Estructura de montaje del encóder.	32
Figura 19. Transmisión péndulo – encóder.	34
Figura 20. Despiece de la estructura del móvil.	35
Figura 21. Montaje final del carro del péndulo.	36
Figura 22. Simulación de esfuerzos en el carro del péndulo.	37
Figura 23. Diseño de la estructura de montaje de los finales de carrera.	38
Figura 24. Montaje de los finales de carrera en el banco.	39
Figura 25. Estructura básica de las guías y los soportes de montaje.	39

	pág.
Figura 26. Análisis de esfuerzos en las guías.	40
Figura 27. Análisis de deflexión en las guías.	41
Figura 28. El paquete motriz.	42
Figura 29. Las partes del paquete motriz.	43
Figura 30. Motor eléctrico del banco.	44
Figura 31. Transmisiones sincrónicas.	47
Figura 32. Freno electromagnético Warner Electric ERS 26.	53
Figura 33. Acople entre el freno electromagnético y el eje del motor.	54
Figura 34. Montaje del conjunto motriz en la estructura interna.	55
Figura 35. Estructura interna de soporte.	56
Figura 36. Módulo de montaje del paquete motriz.	57
Figura 37. Módulo de montaje de la estructura central.	58
Figura 38. Caja de control.	58
Figura 39. Parte de control del sistema automatizado.	67
Figura 40. Panel de control.	72
Figura 41. Display del variador de velocidad.	72
Figura 42. Configuración de la conexión.	77
Figura 43. Administrador de Variables.	79
Figura 44. Administrador de imágenes.	80
Figura 45. Pantallazo inicial del SCADA.	80
Figura 46. Ventana “Panel de control” activada.	81
Figura 47. Registro de las variables del proceso.	81
Figura 48. Pantallazo inicial.	83
Figura 49. Estructura del documento de programación.	84
Figura 50. Edición de entradas.	85
Figura 51. Edición de salidas.	87
Figura 52. Edición de reglas de evolución.	88
Figura 53. Conexión al sistema de destino.	89

	pág.
Figura 54. Mensaje de error de conexión.	90
Figura 55. Parámetros de conexión.	90
Figura 56. Escritura del bloque de datos fuzzy.	91
Figura 57. Esquemático del circuito eléctrico del banco.	94
Figura 58. Cableado salida analógica API – variador.	96
Figura 59. Montaje de relés en circuito impreso.	97
Figura 60. Control de tres cables sobre el variador.	98
Figura 61. Diagrama de conexión del dispositivo CBC-100.	99
Figura 62. Esquema de conexión de salidas tipo colector abierto.	101
Figura 63. Diseño esquemático del circuito electrónico.	104
Figura 64. Diseño final PCB del circuito.	105
Figura 65. Conexión del freno electromagnético.	106
Figura 66. Conexión de finales de carrera.	107
Figura 67. Conexión de interruptores.	108
Figura 68. Conexión de los pilotos.	109
Figura 69. Conexión del variador.	110
Figura 70. GRAFCET rutina principal.	113
Figura 71. Macroetapa posicionamiento automático.	114
Figura 72. Macroetapa posicionamiento manual.	115
Figura 73. GEMMA del automatismo.	117
Figura 74. Estructura del programa.	119
Figura 75. Módulo de salidas analógicas del autómeta.	125
Figura 76. Relación entre PAW 128 y voltaje de la salida analógica.	126
Figura 77. Conversión de código gray a binario.	127
Figura 78. Función de pertenencia de la variable “Ángulo”.	128
Figura 79. Función de pertenencia de la variable “Angular”.	129
Figura 80. Función de pertenencia de la variable “Motor”.	129
Figura 81. Matriz de reglas.	130

	pág.
Figura 82. Región tridimensional fuzzy de salida.	130
Figura 83. Resultados de los ensayos preliminares.	131
Figura 84. Monitoreo de reglas.	132

LISTA DE ANEXOS

		pág.
Anexo A.	Diferentes tipos de péndulo invertido.	138
Anexo B.	Catálogo del encóder.	143
Anexo C.	Catálogo de los finales de carrera.	150
Anexo D.	Catálogo del motor eléctrico.	153
Anexo E.	Catálogo del variador de velocidad.	158
Anexo F.	Catálogo de los rodamientos axiales.	196
Anexo G.	Simulaciones de esfuerzos en Visual Nastran Desktop.	200
Anexo H.	Programa en AWL.	207
Anexo I.	Bases teóricas de la lógica fuzzy.	241
Anexo J.	Manual de usuario del software FuzzyControl++.	256
Anexo K.	Modelo matemático del péndulo invertido.	257
Anexo L.	Catálogo del freno electromagnético.	263

TITULO:

CONTROL MEDIANTE LÓGICA FUZZY DE UN PÉNDULO INVERTIDO.*

AUTORES:

EDGAR AUGUSTO MARIN.

OSCAR JAVIER ORTIZ.

PALABRAS CLAVES:

Lógica fuzzy, Lógica difusa, Péndulo invertido, Control automático.

CONTENIDO:

Este proyecto surge ante la necesidad de la Escuela de Ingeniería Mecánica de responder al gran auge que tiene en la actualidad el estudio de técnicas de Inteligencia Artificial y su aplicación en la industria, incluyendo el estudio de ellas en su programa estudiantil; manteniendo de esta forma la competitividad de los ingenieros emergentes de la Universidad Industrial de Santander con los altos estándares de exigencia en la industria actual.

Entre los diversos algoritmos de control que simulan el carácter cualitativo del pensamiento humano, los más extendidos son la lógica fuzzy y las redes neuronales; así como la combinación de las mismas, conocida como neurofuzzy. Al pretender incluir el estudio de estas técnicas en los planes de pregrado y postgrado de la Escuela de Ingeniería Mecánica, se hizo necesario el desarrollo de la infraestructura que permitiera la experimentación práctica de la teoría aprendida, por medio de un banco de laboratorio que facilitara la vinculación de los algoritmos mencionados.

Los análisis preliminares mostraron que la mejor opción en cuanto a una experiencia práctica se refiere es el péndulo invertido, ampliamente conocido como una prueba estándar en el estudio de la inteligencia artificial. De esta forma, se diseñó y construyó un péndulo invertido controlado por lógica fuzzy, dejando abierta la posibilidad de desarrollos posteriores que vinculen otros algoritmos de control.

El proyecto alcanzó los objetivos planteados resultando en un banco de laboratorio ampliamente versátil y de gran utilidad en el estudio de la inteligencia artificial, convirtiendo a la institución en una fuente de innovación en cuanto a infraestructuras de laboratorios se refiere, manteniéndola en contacto con las nuevas tecnologías desarrolladas en la industria actual.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. JORGE MENESES

TITLE:

FUZZY CONTROL OF AN INVERTED PENDULUM*

AUTHORS:

EDGAR AUGUSTO MARIN.

OSCAR JAVIER ORTIZ.

KEY WORDS:

Fuzzy logic, diffuse logic, inverted pendulum, automatic control.

CONTENT:

The Project purposes respond the trend of Mechanics Engineering School, to gives a feasible choice to artificial intelligence study and industry applications. Thus, the school has included them in the faculty program, to improve student professional skills and standards quality of Santander Industrial University.

Logic Fuzzy and Neuronal Networks are the most extended control algorithm, that simulates the human mind procedures. Moreover, the combination between them, named Neurofuzzy.

In order to make efficient the implementation of their techniques as a part of Mechanical Engineering School program, was necessary the development of laboratory test bank that links both algorithms mentioned. Preliminary tests, shows as the best option regards practice experience refers to inverted pendulum , widely knows as a standard test in artificial intelligence study. Consequently, an inverted pendulum controlled by Fuzzy Logic was designed and make it, leaves open the door to other control algorithms alternatives.

Finally, the project reaches the objectives. Test Lab Bank versatility and utility to the artificial intelligence study will motivates the investigation of scholarship community and can be an innovative tool for Institution Labs in the near future, gives to the University the choice to be in contact with the newest technologies of the industry.

* Degree Project.

** Faculty of Physical – Mechanical Engineering, Mechanical Engineering School, Engineer. JORGE MENESES.

INTRODUCCIÓN

El gran auge que tiene en la actualidad el estudio de técnicas de Inteligencia Artificial y su aplicación en la industria ha hecho que la llamada lógica difusa se convierta en una de las alternativas más extendidas en cuanto el control automático se refiere, debido a la capacidad que tiene de simular el pensamiento humano mediante modelos de razonamiento que reflejen el carácter cualitativo del mismo. Esto hace que el estudio de este tipo de algoritmo de control sea indispensable para todas las personas que se relacionen con los sistemas de control automático.

Con la intención de acercar a la comunidad estudiantil de pregrado y postgrado a este campo de la ingeniería, se pretende incluir de alguna forma su estudio en las asignaturas vinculadas con el Control Automático en el pènsum de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Se tuvo entonces la idea de desarrollar la infraestructura necesaria para brindar al estudiantado la posibilidad de estudiar el control fuzzy en un entorno práctico y de aplicación a la cotidianidad de la industria.

Esto llevó a pensar de manera inmediata en el diseño y construcción de un banco de laboratorio que involucrase la aplicación de métodos de control automático basados en lógica difusa, así como otras áreas de interés como son los autómatas programables y los dispositivos utilizados en los sistemas de control; en el entorno de un proyecto de grado desarrollado por estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Un análisis preliminar de las diversas alternativas en cuanto a la configuración misma del banco se refiere, demostró que la mejor opción en

cuanto a posibilidades de estudio de algoritmos de control, factibilidad de desarrollo y manejabilidad en un laboratorio se refiere; era el péndulo invertido lineal de rotación limitada. Se denomina péndulo invertido a un péndulo normal que se mantiene en posición vertical superior, en equilibrio inestable. La solución del problema de control es mantener esta posición vertical generando cargas inerciales en el péndulo, mediante la aplicación de fuerzas al punto de apoyo móvil del mismo.

La selección de un péndulo invertido como el proceso a controlar está ligada a las características intrínsecas del mismo. El péndulo es inestable y puede caer en cualquier momento y en cualquier dirección, a menos que se le aplique una fuerza de control adecuada. La razón por la cual este problema es interesante desde el punto de vista de control es por que ilustra muchas de las dificultades asociadas con problemas de control del mundo real; y su estudio es importante para el análisis de sistemas que tienen que mantenerse próximos a un punto de equilibrio inestable. Ejemplo de ello son los sistemas robóticos móviles con patas, sistemas de navegación o antenas espaciales.

El problema de control sobre un péndulo invertido ha sido además solucionado utilizando distintos algoritmos de control, lo que permite realizar una comparación entre ellos. Hay que mencionar que el péndulo invertido es uno de los sistemas de control más difundidos para el estudio de las aplicaciones prácticas de la lógica difusa.

Enfrentar este problema constituyó la oportunidad para demostrar una vez más el permanente interés de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, por formar profesionales que correspondan a los retos tecnológicos que presenta el permanente desarrollo en diversos campos del conocimiento, vinculándolos con las tecnologías de

avanzada a nivel mundial. De igual forma, convierte a la institución en una fuente de innovación en cuanto a infraestructuras de laboratorios se refiere, haciéndola totalmente competente con la alta exigencia presente en la industria actual sobre los ingenieros emergentes.

La forma como se dio resolución a este problema, se consigna en este informe de siguiente manera:

CAPITULO 1. Describe el banco de pruebas como un sistema automatizado.

CAPITULO 2. Muestra las partes principales que componen el banco.

CAPITULO 3. Describe el desarrollo de la estructura central del péndulo.

CAPITULO 4. Resume el diseño y selección de los componentes del paquete motriz del banco.

CAPITULO 5. Muestra en detalle la estructura interna de apoyo de los componentes del banco.

CAPITULO 6. Especifica las diversas etapas de funcionamiento del equipo.

CAPITULO 7. Describe la parte de control del sistema automatizado.

CAPITULO 8. Resume el desarrollo y las utilidades de la interface SCADA del banco.

CAPITULO 9. Explica en detalle el funcionamiento del software utilizado para el control fuzzy, así como sus aplicaciones de visualización y monitoreo de reglas y variables.

CAPITULO 10. Recoge el desarrollo eléctrico y electrónico de la caja de control del banco, así como diagramas de conexión de los componentes de control al circuito central de la máquina.

CAPITULO 11. Resume el diseño definitivo del programa de control, utilizando las herramientas gráficas GRAFCET y GEMMA para este propósito.

CAPITULO 12. Compila los resultados de los primeros ensayos llevados a cabo en el banco.

ANTECEDENTES

Las bases teóricas de la lógica borrosa (Fuzzy) fueron enunciadas a principios de los años 60 por Lotfi A. Zadeh, profesor de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de California en Berkeley, en su primera publicación en 1965. Sin embargo, no es sino hasta 1973 que se presenta la teoría básica de los controladores borrosos y de los conjuntos difusos. A partir de este trabajo inicial, muchos otros investigadores comenzaron a aplicar la lógica borrosa a diversos procesos de control. Estas primeras aplicaciones cuentan con el control de procesos de un sistema de regulación de vapor, el control de hornos rotativos en una cementera, y muchos más.

La lógica difusa tiene amplios campos de aplicación en la actualidad, en diversas ramas técnicas, que incluyen desarrollos importantes en herramientas educacionales que tienden a simular los sistemas de aplicación reales.

Las aplicaciones técnicas abarcan en general la automatización industrial, la medicina, ahorro de energía en motores de inducción, aplicaciones en recintos de temperatura controlada, Ingeniería Automotriz (frenos ABS, control de la velocidad máxima de los camiones en las autopistas), patrones inteligentes de vuelo de aeronaves, fusión nuclear, control de tráfico, sistemas de sonar, control de plataformas de despegue de móviles espaciales, y muchas otras aplicaciones importantes. La lógica difusa tiene un campo de aplicación tan extenso que incluso se utiliza en los electrodomésticos de uso cotidiano, como lavadoras y aires acondicionados.

En cuanto al campo educacional vinculado a las prácticas de lógica difusa, existen diversos experimentos de laboratorio que pueden llevarnos al aprendizaje de este algoritmo de control, algunos de ellos más aplicados que otros. Estos experimentos pueden llevarse a cabo tanto en bancos de laboratorio reales como en software de simulación de sistemas de control. En cuanto a los bancos físicos, los más extendidos son el control de la temperatura de una corriente de aire que fluye por una turbina calentada mediante resistencias eléctricas, control de temperatura de un cuarto, control del ángulo de inclinación de las paletas del rotor de un aerogenerador a escala en función del ángulo y velocidad del viento, control de la posición lineal de un móvil, vehículos autoguiados y control de la posición vertical de un péndulo invertido.

A nivel mundial, existen innumerables instituciones que desarrollan cotidianamente alguna de estas prácticas para el estudio de la lógica difusa. Sin embargo, es muy predominante el uso del control de la posición de un péndulo invertido como la práctica estándar para el aprendizaje de la lógica fuzzy. En Colombia los desarrollos en el campo educacional de este tipo de lógica son en general reducidos en cuanto a los laboratorios con infraestructura física en modo de bancos para prácticas, aunque la simulación mediante algún tipo de software de sistemas fuzzy es bastante extendida.

Mediante los contactos realizados con las diversas instituciones universitarias de nuestro país, se encontró que la única universidad que cuenta en la actualidad con un modelo físico de péndulo invertido es la Universidad EAFIT (Medellín – Laboratorio de Control Digital). Sin embargo, no se obtuvo respuesta alguna de otras instituciones importantes a nivel nacional, por lo que existe la posibilidad de la presencia de mayor cantidad de bancos de este tipo en Colombia.

JUSTIFICACIÓN

El amplio desarrollo de nuevas tecnologías de inteligencia artificial en el campo del control automático y los automatismos lógicos a nivel internacional, y en menor medida a escala nacional, ha creado la necesidad de poner en contacto a los estudiantes y profesionales de las distintas áreas relacionadas con la ingeniería de control; con estos avances tecnológicos de última generación.

Esta necesidad se hace evidente al comprender las grandes falencias existentes en la industria colombiana, donde muchas empresas no sostienen el grado suficiente de automatización requerido para obtener productos de alta calidad, competitivos en el mercado nacional e internacional. De igual forma, existen en nuestro país pocas instituciones preocupadas por el desarrollo de estas nuevas tecnologías.

La Universidad Industrial de Santander, manteniendo su papel como motora del desarrollo tecnológico regional y nacional, se interesó hace algunos años en generar este espacio de contacto entre sus estudiantes de pregrado y postgrado y las teorías de inteligencia artificial en el control automático. Para lograr este objetivo básico, se hacía necesario desde un principio incluir el aprendizaje de estas tecnologías en el programa de estudios de las carreras profesionales que estuvieran en contacto con el control automático, en particular, en el pènsun de Ingeniería Mecánica. De esta forma, surgió la necesidad de desarrollar la infraestructura de soporte al aprendizaje de estos nuevos conceptos, utilizando de forma lógica el escenario de los laboratorios.

El problema del péndulo invertido es bastante interesante desde el punto de vista del control, ya que ilustra muchas de las dificultades asociadas con problemas de control del mundo real; y su estudio es importante para el análisis de sistemas que tienen que mantenerse próximos a un punto de equilibrio inestable. Ejemplo de ello son los sistemas robóticos móviles con patas, sistemas de navegación o antenas espaciales. El problema de control sobre un péndulo invertido ha sido además solucionado utilizando distintos algoritmos de control, lo que permite realizar una comparación entre ellos. Hay que mencionar que el péndulo invertido es uno de los sistemas de control más difundidos para el estudio de las aplicaciones prácticas de la lógica difusa.

Este proyecto pretende crear un espacio de estudio práctico de la lógica difusa para los estudiantes de la institución, permitiendo optimizar los sistemas de control existentes mediante la utilización de métodos probados con mucho éxito alrededor del mundo. De igual forma, el banco desarrollado se convierte en el punto inicial para el desarrollo de otras teorías de la Ingeniería de Control ampliamente difundidas en la actualidad, como lo son las redes neuronales y las redes neuro-fuzzy, abriendo la posibilidad de desarrollar otros trabajos de grado de igual interés para el estudiantado.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

- Contribuir al mejoramiento de la infraestructura educativa de la Universidad Industrial de Santander, en particular de la escuela de Ingeniería Mecánica, brindando a los alumnos más herramientas de aprendizaje, así como la facilidad de aplicar tecnologías que pueden estar fuera de su conocimiento.
- Integrar la formación universitaria con la actualidad en la industria, siendo acordes con el continuo crecimiento de la tecnología mecatrónica y su influencia en los procesos fabriles.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar y construir un banco de control automático sobre un péndulo invertido lineal, con las siguientes especificaciones:
 - Recorrido del carro del péndulo: aproximadamente un metro de longitud (1 m) en trayectoria lineal horizontal.
 - Ángulo de rotación total del péndulo: 70° , tomando la vertical superior como la bisectriz del ángulo.
 - Longitud del péndulo: variable, estando en el rango comprendido entre 50 y 100 centímetros.
 - Masa del péndulo: variable, concentrada en el extremo libre del mismo, en un rango comprendido entre 100 y 500 gramos.

- Hardware de control: autómeta programable industrial (API) Siemens Simatic S7.
 - Algoritmo de control: lógica difusa o fuzzy.
 - Software de control: Fuzzy Control++ sobre Simatic Step 7.
- Diseñar las pruebas a realizar en el banco, con el fin de:
 - Sintonizar el controlador lógico fuzzy del péndulo invertido, ante diferentes situaciones de longitud, masa y posición angular inicial. Se entiende por sintonizar obtener las reglas de evolución fuzzy y las funciones de pertenencia, delimitar los dominios de los conjuntos fuzzy; y modificar estos parámetros según las diferentes situaciones mencionadas.
 - Obtener resultados gráficos de la relación existente entre la variable actuada (velocidad del actuador del carro) y las variables reguladas (posición y velocidad angular del péndulo).
 - Analizar el tiempo de respuesta del sistema de control en función de la posición inicial, la longitud y la masa del péndulo.
 - Desarrollar el material soporte para el desarrollo de las pruebas de laboratorio (material pedagógico) así como el material técnico del banco. El material pedagógico incluirá:
 - Metodología de las pruebas a realizar.
 - Documentación de prelaboratorio y laboratorio, tanto para estudiantes como auxiliares.
 - Tiempo estimado de pruebas.
 - Metodología de evaluación de pruebas.
 El material técnico incluirá:
 - Manuales de usuario de los componentes de hardware utilizados en el banco.
 - Planos mecánicos del banco.

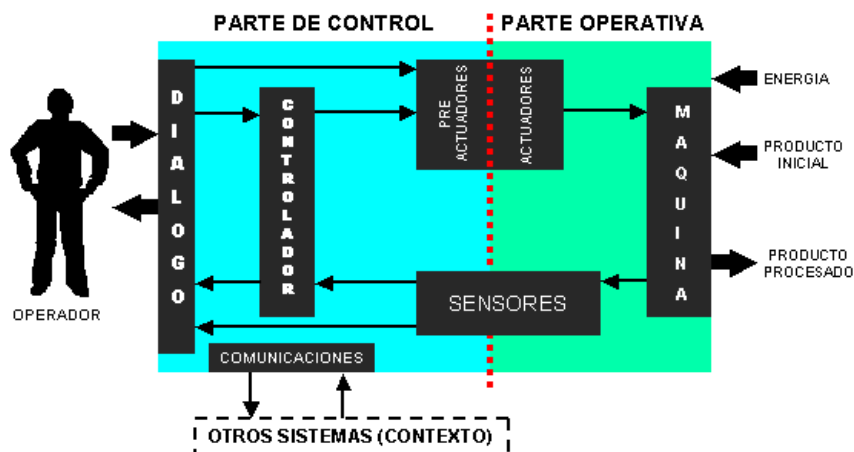
- Planos eléctricos y electrónicos del banco.
- Manual de operación del banco.

1 EL BANCO COMO SISTEMA AUTOMATIZADO.

Todo sistema automatizado se divide en dos partes: parte de control (PC) y parte operativa (PO). La parte de control comprende todo aquello que contribuye a la automatización del proceso, y la parte operativa incluye el resto del mismo.¹ El conjunto está relacionado con el exterior a través de un diálogo con el operador y comunicaciones con otros automatismos que operen en el mismo contexto. En la *figura 1* se observan los componentes del sistema automatizado.

El banco de pruebas del péndulo invertido se considera un sistema automatizado, ya que tiene todos los elementos necesarios para serlo. La selección de cada uno de los componentes se estudia brevemente a continuación. Para facilitar el análisis posterior de los procesos de diseño desarrollados, se dividirá el banco en los diversos conjuntos que lo conforman.

Figura 1. Componentes del sistema automatizado.

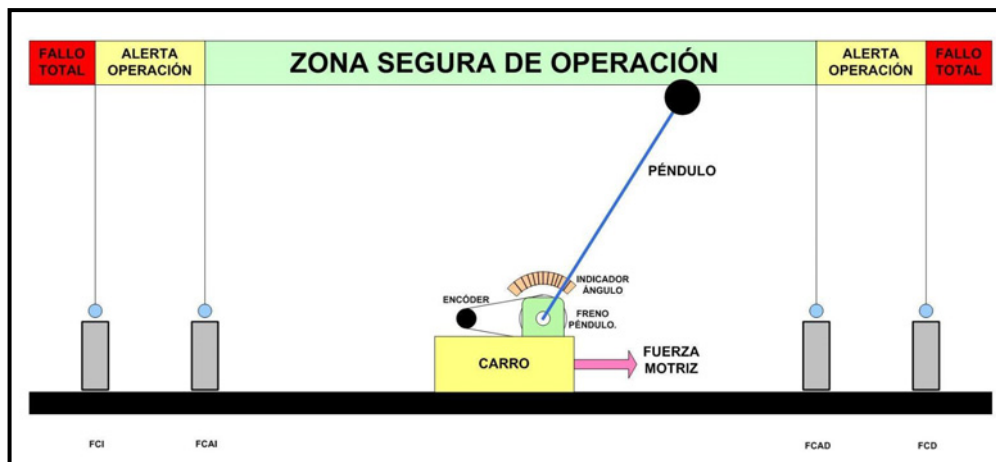


¹ BALCELLS, Josep; ROMERAL, Jose Luis. Autómatas Programables. México DF. Alfaomega – Marcombo editores. 1998, p 19.

1.1 PARTE OPERATIVA (PO)

La parte operativa está compuesta por la máquina, los actuadores y los sensores. Todos estos componentes se encuentran montados sobre una única estructura central. Según los objetivos planteados en un principio, se desarrolló un diseño esquemático de la parte operativa del banco, como se muestra en la [figura 2](#).

Figura 2. Diseño esquemático del banco.



Como se observa en este diseño, los sensores están compuestos principalmente por interruptores de posición tipo final de carrera y un sensor rotativo. La fuerza motriz del diagrama representa el actuador. La máquina está representada por el péndulo invertido. Las alternativas de selección de cada componente se estudian a continuación.

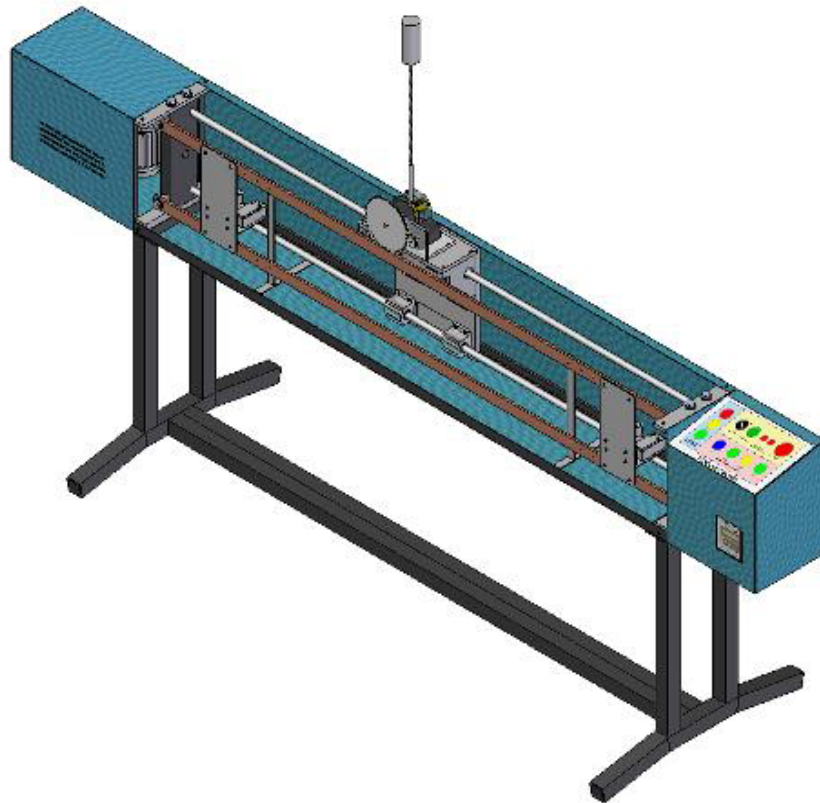
1.1.1 La máquina

La máquina en este caso está representada por el péndulo invertido. Existen diversos tipos de péndulos invertidos, cuyas características, ventajas y desventajas se resumen en el ANEXO A. La selección de un péndulo invertido como centro del proyecto deriva de las características intrínsecas del mismo, ya que es un sistema inestable y puede caer en cualquier

momento y en cualquier dirección, a menos que se le aplique una fuerza de control adecuada.

Este proyecto está basado en un péndulo invertido lineal de rotación limitada. Se decidió utilizar este tipo de péndulo, ya que la premisa inicial de diseño era usar unos elementos estructurales disponibles de desarrollos anteriores. Al estudiar las características de los diversos tipos de péndulo, se encuentra que las aplicaciones de control son similares para todos ellos.

Figura 3. El banco de pruebas.



1.1.2 Sensores

Se requiere utilizar dos tipos de sensores en el banco. El primero se encarga de medir la posición angular del péndulo en cualquier momento, lo cual es

totalmente necesario para cumplir el objetivo del sistema. El segundo limita la carrera del péndulo dentro de unas fronteras mecánicamente seguras, fuera de las cuales no se puede realizar ninguna acción de control sobre el sistema.

1.1.2.1 Posición angular del péndulo.

Este sensor debe cumplir con las siguientes características técnicas:

- Medición de posición angular del péndulo.
- Alta precisión.
- Construcción compacta.
- Posibilidad de interacción directa con el autómatas.

Los encóders son dispositivos de medición de posición angular que utilizan un disco con grupos alternados de bandas opacas y translúcidas, y una serie de captadores ópticos. La señal de salida de los mismos suele estar en forma de código digital, ya sea binario o gray. La gran ventaja que tiene este tipo de sensor es su alta resolución, lo que da lugar a una precisión en el control bastante elevada. En el banco se ha utilizado un encóder absoluto con código gray de salida. El tipo absoluto permite conocer la posición angular exacta del péndulo, así como su dirección de giro; además de permitir la inferencia de la velocidad angular instantánea del mismo. El código gray tiene la ventaja de realizar un solo cambio numérico en la señal de salida por cada cambio en la posición angular del eje, lo que minimiza la posibilidad de errores en la captación de la misma. Este tipo de encóder genera señales individuales digitales, idóneas para trabajar con controladores de gama alta como son los autómatas programables.

El sensor utilizado tiene las siguientes características técnicas:

- Marca: Omron.
- Resolución: 8 bits (256 ppr).
- Salida: Código gray. Salida tipo colector abierto.
- Alimentación: 12 – 24 VDC (-10% / +15%)
- Consumo de corriente: 70 mA máx.

En el ANEXO B se encuentra el catálogo del encóder.

Figura 4. Encóder tipo absoluto marca Omron.



1.1.2.2 Posición lineal del carro

Se utilizaron unos sensores del tipo interruptor de posición, para limitar la posición lineal del carro del péndulo a un rango de trabajo óptimo. Se decidió colocar dos sensores de este tipo en cada extremo del recorrido del móvil, haciendo posible manejar un estado de alarma y otro estado de fallo total.

Los finales de carrera del banco tienen las siguientes especificaciones técnicas:

- Marca: Telemecanique.
- Tipo: Cuerpo plástico con palanca de roldana termo plástica.

- Cabezas intercambiables y posicionables.
- Hasta 15 millones de maniobras.

En el ANEXO C se encuentra el catálogo de los finales de carrera.

1.1.3 Actuador

Se ha decidido utilizar un actuador tipo motor, que cumpla con las siguientes características:

- Acción rotativa bidireccional.
- Respuesta rápida a las órdenes de control.

Se decidió utilizar un motor trifásico de corriente alterna, debido principalmente a la facilidad de control del mismo mediante un variador de velocidad, elemento disponible en la escuela.

Las características de este motor son:

- Marca: Neri Motori.
- Potencia: 0.5 HP.
- Amperaje a plena carga: 2 A.
- Frecuencia nominal: 50 Hz.

En el ANEXO D puede encontrarse el data – sheet del motor.

1.2 PARTE DE CONTROL (PC)

La parte de control está compuesta principalmente por el preactuador, el controlador, los elementos de diálogo y las comunicaciones con otros sistemas en el mismo entorno. Este último ítem no aplica en este proyecto, ya que el banco es un sistema único que no se comunicará con otros sistemas.

Figura 5. Motor eléctrico del banco.



1.2.1 Preactuador

Teniendo en cuenta el actuador utilizado, el preactuador más idóneo es un variador de velocidad para motores trifásicos de corriente alterna, habilitado para recibir órdenes de comando mediante señales analógicas generadas por controladores de gama alta. Se utilizó un variador Allen Bradley con herramientas de control mediante señales analógicas bipolares, cuyo catálogo se encuentra relacionado en el ANEXO E. Las especificaciones del mismo son:

- Marca: Allen Bradley.
- Referencia 160AA02NNX1P1.
- Voltaje de control: 12 VDC.
- Amperaje de control: 10 mA.
- Capacidad de control de motores trifásicos de hasta 0.5 HP.
- Seguidor de señal analógica de tipo 4 / 20 mA o -10 / 10 VDC.

1.2.2 Controlador

El autómata programable industrial API es un equipo electrónico de control con cableado interno independiente del proceso a controlar, que se adapta a dicho proceso mediante un programa específico que contiene la secuencia de operación a realizar. Una de las ventajas del autómata programable es que incluye total o parcialmente las interfaces con las señales del proceso. Otra de sus grandes ventajas es la modularidad, entendiendo como tal el hecho de que el hardware está fragmentado en partes interconectables que permiten configurar un sistema a la medida de las necesidades. Además, es un controlador diseñado para la industria, lo que implica un tamaño pequeño y apropiado, y una gran resistencia a los factores externos propios de los procesos y ambientes industriales. Su montaje es sencillo y reducido.

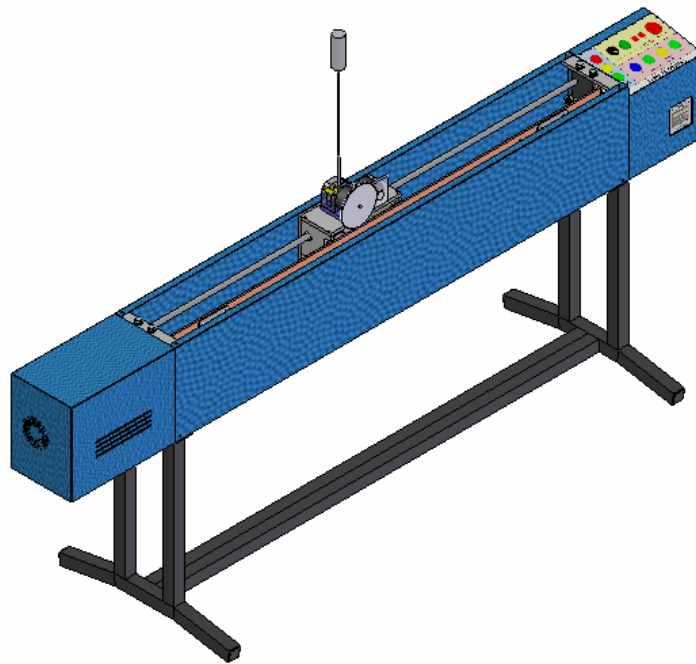
Estas ventajas hacen que el controlador utilizado en este banco sea un autómata programable industrial API.

Debido a la disponibilidad actual de los Autómatas Programables Industriales de la marca Siemens, de la serie Simatic 300 en la Escuela de Ingeniería Mecánica; y a la experiencia adquirida en la programación de los mismos en la asignatura electiva Controladores Lógicos Programables (PLC), se decidió la utilización de un autómata de este tipo en la realización del proyecto.

2 LAS PARTES DEL BANCO

El concepto general de diseño del banco resulta en una estructura única e independiente, de fácil manejo y transporte, siendo acorde con las exigencias del trabajo en laboratorio. El aspecto final del banco se muestra en la [figura 6](#).

Figura 6. Aspecto general del banco terminado.

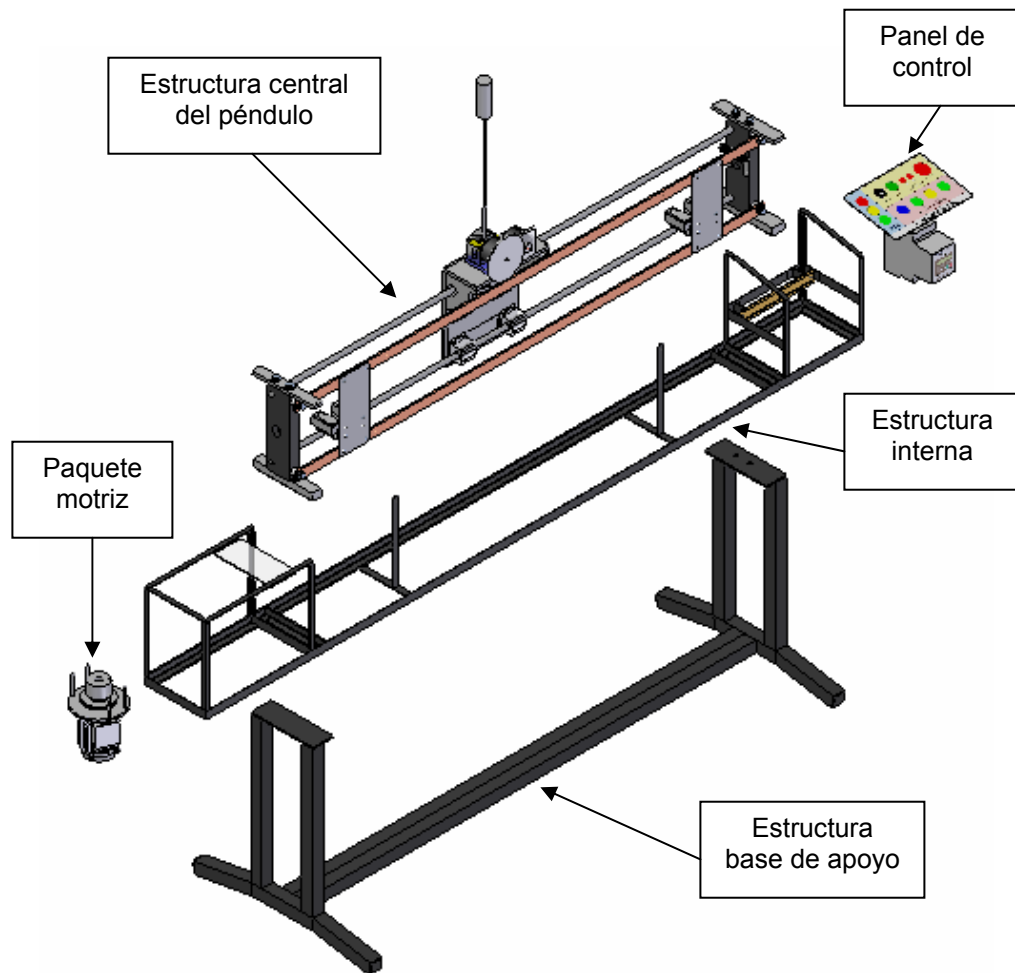


El banco está compuesto por los conjuntos que se muestran en la [figura 7](#). Estos pueden resumirse en:

- Estructura central del péndulo.
- Estructura interna.
- Paquete motriz.

- Estructura base de apoyo.
- Caja de equipo eléctrico y electrónico (panel de control).

Figura 7. Partes del banco.

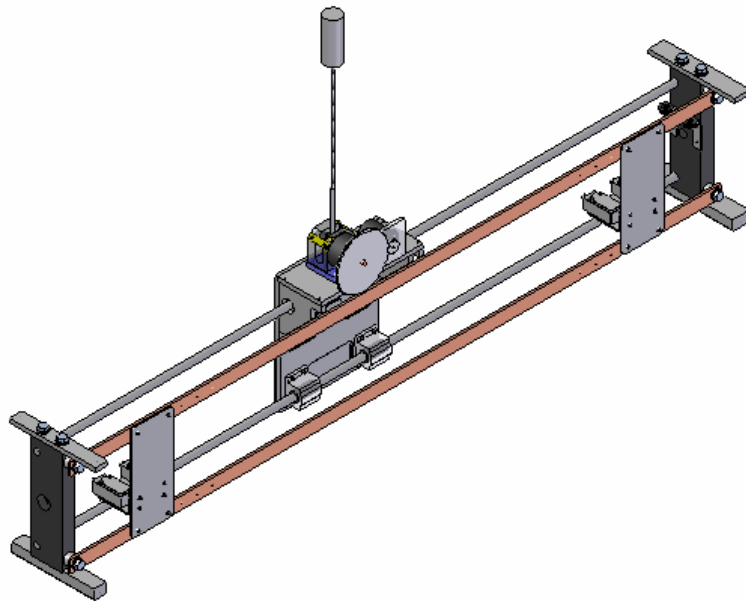


Cada uno de los conjuntos que constituyen el banco fue objeto de una labor detallada de diseño. Adicionalmente, el banco se encuentra protegido por unas tapas en lámina de acero HR calibre 18 recubiertas con pintura electrostática. Cada una de las partes del banco se describe a continuación.

2.1 ESTRUCTURA CENTRAL DEL PÉNDULO.

La estructura central del péndulo es la encargada de dar soporte al móvil del mismo, así como a los sensores de posición utilizados en la etapa de control del banco. Incluye el móvil que da soporte al péndulo como tal, y las guías que constituyen el recorrido del carro.

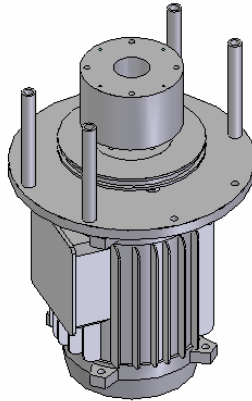
Figura 8. Estructura central del péndulo.



2.2 PAQUETE MOTRIZ

El paquete motriz está conformado por el motor y la polea motriz de la transmisión entre el actuador y el móvil de péndulo. Se considera la transmisión parte del conjunto motriz del banco, aunque las poleas auxiliares de apoyo se encuentran ensambladas sobre la estructura central del péndulo. En este paquete se incluye un freno electromagnético tipo Fail – Safe (activado a la ausencia de voltaje en sus terminales), que bloquea el movimiento del motor cuando el banco se encuentra inactivo, permitiendo su traslado sin inconvenientes.

Figura 9. Paquete motriz.



2.3 ESTRUCTURA INTERNA

La estructura interna del banco sirve de apoyo a los conjuntos mencionados anteriormente. Está construida principalmente en ángulo estructural de acero de 1/2", y en platina de acero de 1/2". Contiene los apoyos para la estructura central del péndulo, así como los soportes auxiliares de montaje de la estructura de los finales de carrera.

El diseño de esta estructura permite su división en tres módulos principales, que de izquierda a derecha habilitan el montaje del paquete motriz, la estructura central del péndulo y la caja de control.

2.4 ESTRUCTURA DE APOYO

Finalmente, el banco cuenta con una estructura construida en tubería cuadrada que sirve de apoyo del mismo, permitiendo el manejo y traslado como un equipo totalmente independiente. Esta estructura genera el equilibrio necesario para evitar funcionamientos erróneos del péndulo invertido, debido a las vibraciones.

Figura 10. Estructura interna.

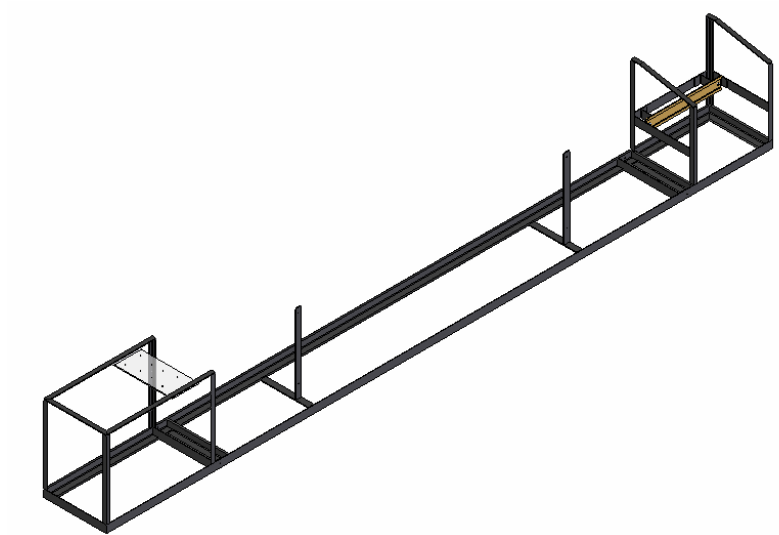
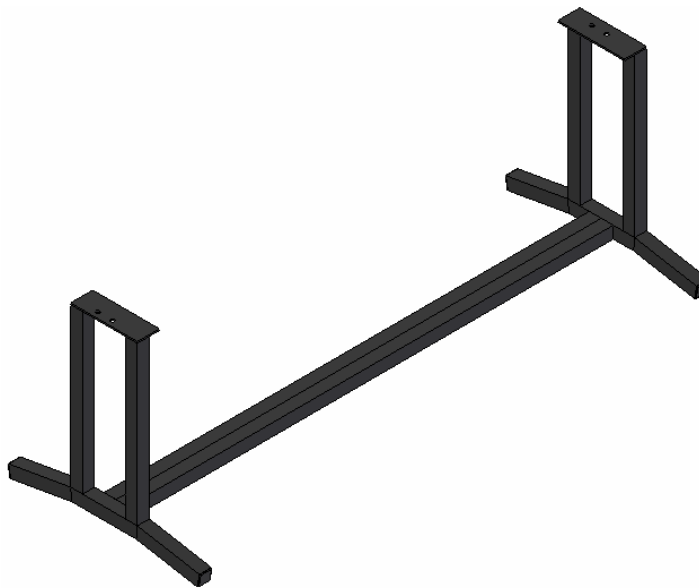


Figura 11. Estructura de apoyo.



2.5 CAJA DE CONTROL

La caja de control incluye todo el equipo eléctrico y electrónico utilizado en las etapas de control del banco, como son los circuitos impresos, los pulsadores y pilotos de visualización, el control de potencia, las conexiones

de dispositivos externos y la conexión de alimentación eléctrica. Para efectos prácticos, esta caja hace las labores de panel de control.

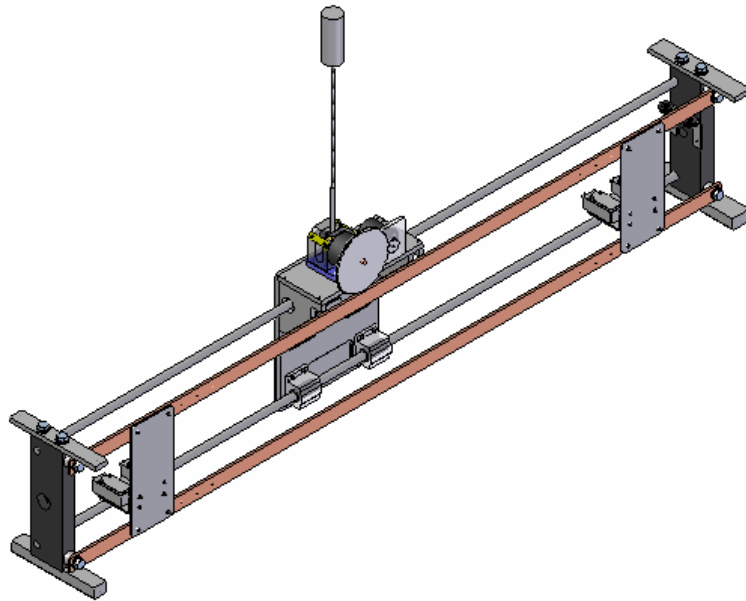
Todas las señales de los sensores, la activación de los actuadores y preactuadores, y las labores de encendido y manipulación del péndulo se realizan desde este panel.

El variador de velocidad que funciona como preactuador del motor se encuentra integrado en este conjunto. El montaje de este dispositivo, así como de los relés de control de potencia utilizados, se realizó sobre riel DIN estándar de 35 mm.

3 ESTRUCTURA CENTRAL DEL PÉNDULO

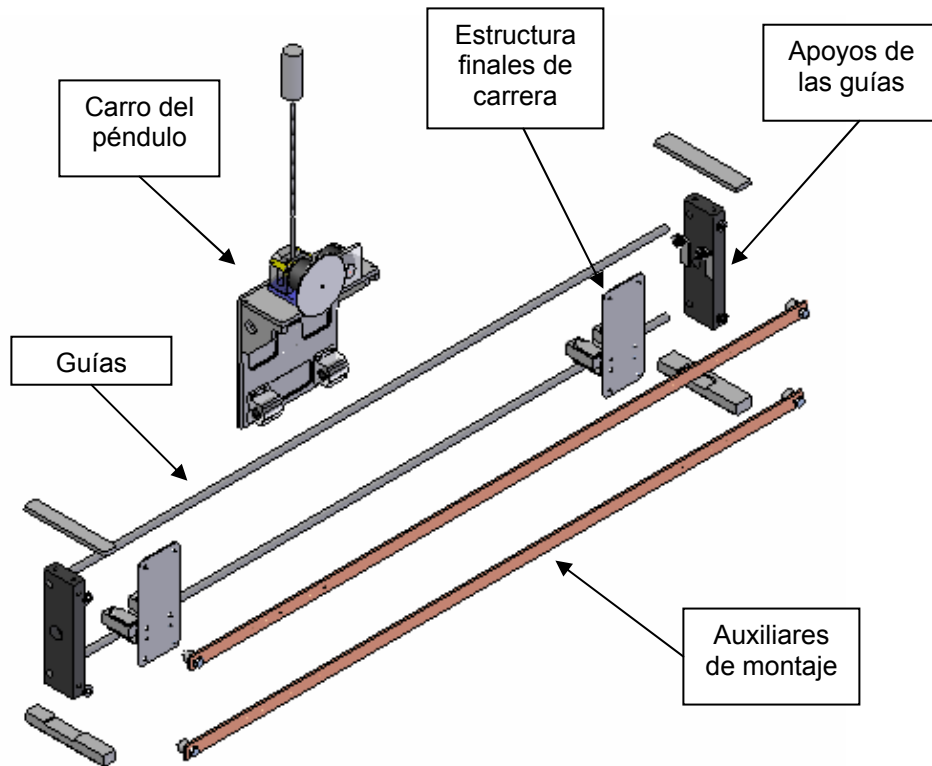
El diseño final de la estructura del péndulo puede observarse en la [figura 12](#).

Figura 12. Diseño final de la estructura del péndulo.



Esta estructura representa el centro del diseño del banco. La premisa básica fue utilizar los elementos disponibles de desarrollos anteriores en la escuela, entre los que se cuentan las guías cilíndricas de 160 cm de longitud y las bases de acero para el montaje de ellas, además de cuatro rodamientos de deslizamiento axial para montaje sobre las guías, marca Thomson referencia SPB 10. En el ANEXO F se encuentra el data sheet de estos rodamientos. Utilizando estos elementos, se desarrolló la estructura completa del péndulo y su móvil, la cual está constituida por las partes mostradas en la [figura 13](#).

Figura 13. Estructura central del péndulo.



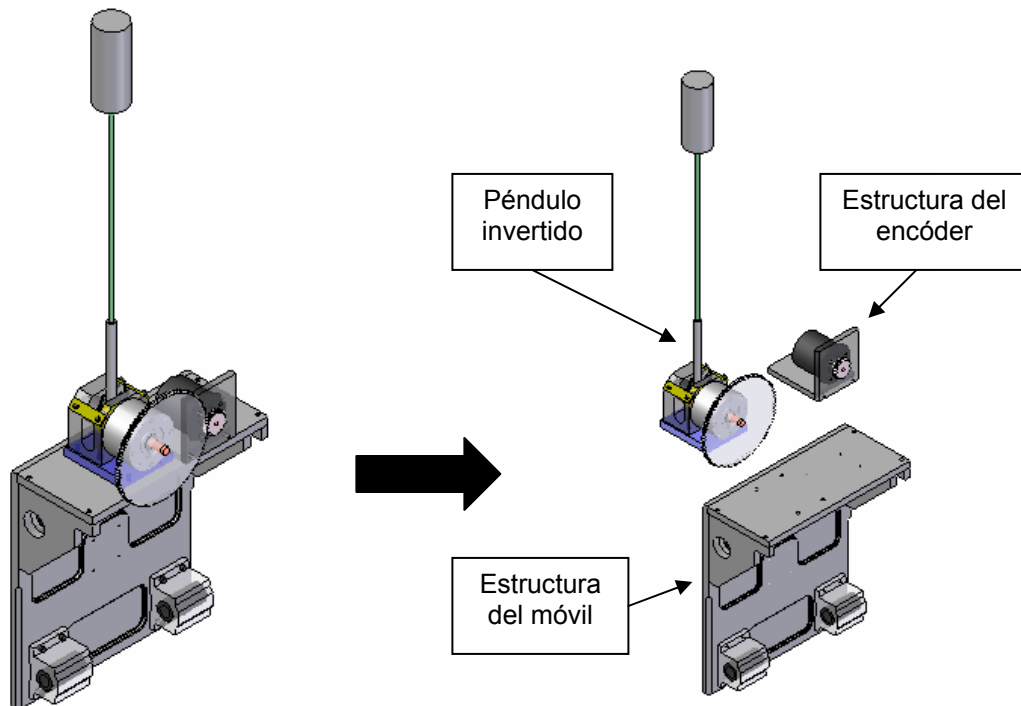
3.1 EL CARRO DEL PÉNDULO

El diseño del carro del péndulo se convirtió desde el principio en la parte central de la etapa de diseño mecánico del proyecto, debido a la gran importancia que tiene en el desempeño final del banco, y en la respuesta del mismo a los comandos de control. Este debe contener el acople entre el péndulo y la fuente motriz, incluyendo el montaje de los rodamientos axiales que deslizan sobre las guías, las cuales definen la trayectoria a recorrer por el móvil.

Es obvio que este carro debe permitir el montaje tanto del péndulo como del encóder, con sus estructuras y la transmisión de movimiento entre ellos. De esta forma, las premisas de diseño de este elemento fueron bajo peso, tamaño suficiente para el montaje de los elementos mencionados y

configuración desmontable y de fácil manejo. Este carro está constituido por tres estructuras principales, las cuales incluyen en péndulo invertido como tal, la estructura de montaje del encóder y la estructura del móvil.

Figura 14. Diseño del carro del péndulo.



3.1.1 El péndulo invertido

El péndulo invertido es el punto central del banco en cuestión. Básicamente se trata de una barra pivotada en su punto inferior, con una masa en la parte superior. Como se ha definido desde un principio el tipo de péndulo invertido a utilizar, esto es, péndulo invertido lineal con rotación limitada, el diseño del mismo debe estar acorde con esta delimitación.

La estructura del péndulo está construida en microfundición de aluminio, lo que hace que su peso sea bastante reducido en comparación con el acero. La consideración principal para buscar un peso reducido en los elementos móviles es la inercia que pueden generar al encontrarse en movimiento, lo

que dificulta el cambio de dirección del carro, así como el tiempo de respuesta del sistema a esta orden.

El péndulo se encuentra compuesto por un eje perpendicular al plano de movimiento del carro, el cual se convierte en el pivote de la barra. De esta forma, esta barra gira en el mismo plano vertical en el que se mueve linealmente el carro. Debido a que se pretende tener un movimiento rotacional limitado, se han colocado unos topes que restringen esta rotación. El péndulo se fija al eje mediante un bulbo con un agujero roscado, lo que permite trabajar con una barra del péndulo roscada en los extremos. Esta barra se acopla al bulbo en una de sus puntas, y sobre la otra se monta la carga, que tiene forma de cilindro con un agujero roscado. Haciendo un juego de distintas barras y cargas, se pueden variar las características del péndulo.

Este bulbo se encuentra montado en el eje del péndulo mediante un ajuste forzado, y fijado mediante un prisionero. La tolerancia dimensional del conjunto eje – bulbo (basada en un diámetro de eje de 18mm) es H6-r5, según la norma de ajustes. Esto nos da una interferencia mínima de 0.012mm, y una interferencia máxima de 0.031mm.

El diseño del péndulo está calculado para permitir una rotación de la barra de 70° en su valor máximo.

Como se puede observar en la figura, el eje del péndulo sobresale de la estructura. Esto se debe a consideraciones de montaje posterior, como son el posicionamiento angular del péndulo y la transmisión de movimiento entre el péndulo y el encóder.

La platina inferior está fabricada en microfundición de aluminio, y se utiliza para anclar el péndulo en el móvil.

Los cálculos estructurales de las piezas relacionadas al móvil del péndulo se hicieron mediante el programa de simulación de esfuerzos Visual Nastran Desktop 4D. Los resultados de las simulaciones se muestran en el ANEXO G.

Figura 15. Diseño del péndulo.

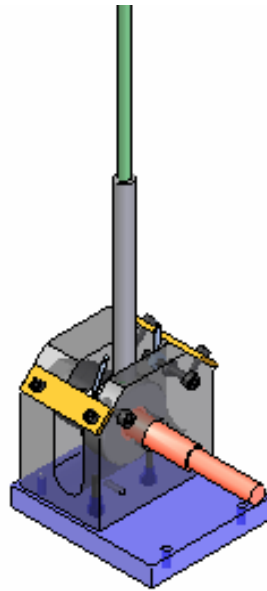
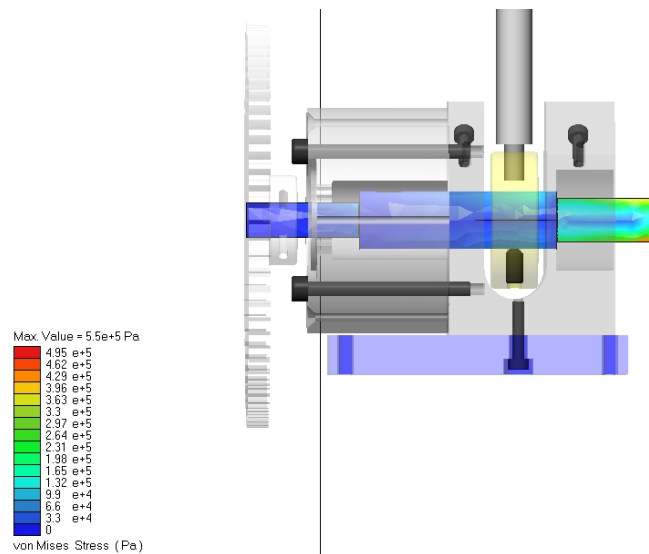


Figura 16. Simulación de esfuerzos en el eje del péndulo.



El eje del péndulo se fabricó en acero inoxidable 420. En el gráfico de simulación de esfuerzos, se observa que el valor máximo de esfuerzo sobre este eje alcanza los 550 kPa. El esfuerzo máximo admisible para un material

de este tipo es 655MPa^2 , lo que nos da un factor de seguridad para este elemento de 1190.

3.1.1.1 Posicionamiento angular del péndulo

Las características del funcionamiento del banco hacen que sea indispensable realizar un posicionamiento angular de arranque del péndulo, para poder evaluar la respuesta del control a los distintos estados iniciales. Este posicionamiento se hace de forma mecánica, utilizando unos apoyos móviles que encajan sobre unas muescas hechas en la barra del péndulo. El movimiento del carro al entrar en el bloque fuzzy hace que el péndulo salga del estado de reposo, lo que libera la barra del soporte, permitiendo el funcionamiento normal del sistema. El diseño del soporte hace que este caiga fuera del alcance de la barra del péndulo, evitando cualquier tipo de interferencia mecánica entre la barra y los soportes durante el movimiento del carro del péndulo.

3.1.2 Estructura de montaje del encóder

La estructura de montaje del encóder se fabricó en microfundición de aluminio, de tal forma que se acoplara al diseño de la transmisión anterior. El encóder se monta sobre la misma utilizando tornillos M4, según catálogo del fabricante (ver ANEXO B). Debido al reducido peso del encóder, y a la ausencia casi total de cargas en el eje del mismo, se obviaron los cálculos de esfuerzos de la estructura.

La [figura 18](#) muestra el resultado final de la estructura de montaje del encóder.

² NORTON, Robert L. Diseño de Máquinas. México DF. Prentice Hall – Pearson Editores, 1999, p 997.

Figura 17. Posicionamiento angular del péndulo.

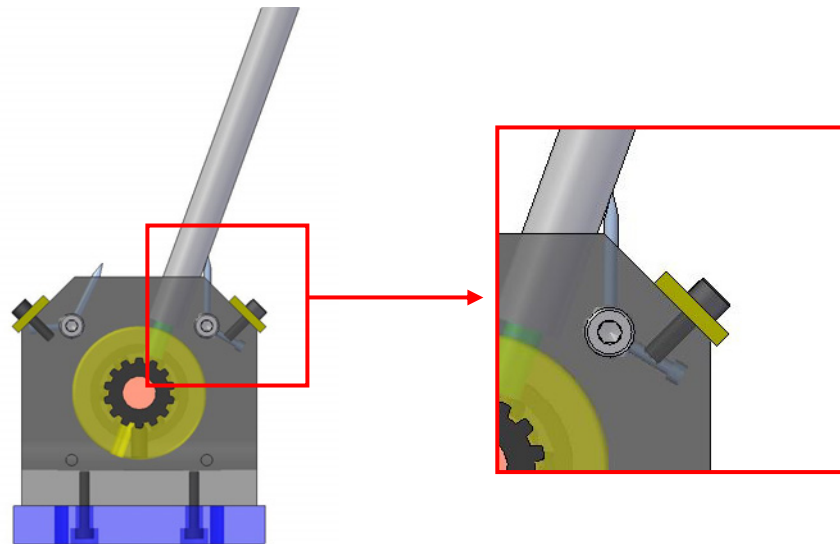
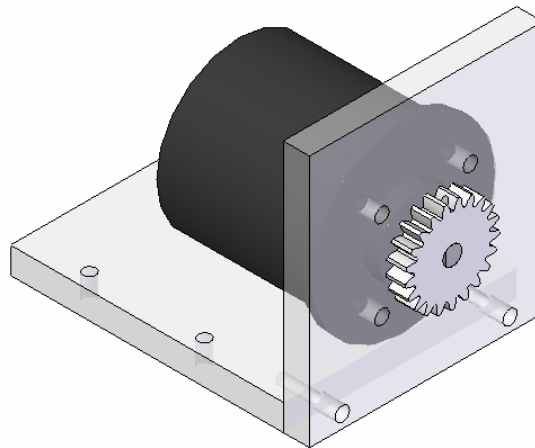


Figura 18. Estructura de montaje del encóder.



3.1.3 Transmisión péndulo - encóder

Debido al movimiento rotacional limitado del péndulo, se hace imposible el acople directo del encóder al eje del mismo, ya que esto significa una pérdida de resolución en el sensor. Esto se explica al definir la resolución del encóder (256 ppr) como la cantidad de pulsos que él genera en una vuelta o

revolución de su eje. La precisión angular del encóder, en este caso, es de 1.40° . Al tener en cuenta que el péndulo gira tan solo 60° , menos de un quinto del giro total del encóder, sería poco efectivo acoplarlos de manera directa, debido a que solo se utilizaría una quinta parte de la capacidad del encóder. La solución es desarrollar una transmisión de movimiento angular entre el péndulo y el encóder, que tenga una relación aproximada de 1:5. De esta forma se aprovecha la totalidad de giro del sensor, elevando la precisión del mismo a 0.27° , que representa un valor mucho más adecuado que el anterior.

Se estudiaron diversas opciones para el desarrollo de esta transmisión. Al final, las dos que más precisión presentaban eran la utilización de correas sincrónicas y la transmisión mediante engranajes de paso reducido.

El diseño inicial incluía una transmisión sincrónica sobre el móvil del péndulo. Los problemas encontrados con este diseño fueron básicamente de tamaño y peso. Debido a que las transmisiones con poleas requieren una distancia mínima disponible entre los centros de las mismas, el tamaño y el peso del carro se aumentan, lo que al final implica más flexión en las guías, así como un aumento en la inercia del móvil.

El diseño final demostró ser mucho más eficiente. Se utilizó un engranaje fabricado en fibra de nylon, de paso y tamaño reducido, para garantizar de esta manera un peso mínimo y una alta precisión en la transmisión. Debido a la pequeña distancia entre centros que se necesita en el engranaje, el tamaño del móvil se reduce drásticamente, así como el peso del mismo. Los engranes utilizados resultan al final bastante livianos, en comparación a las poleas que se pretendía usar.

La transmisión utilizada tiene las siguientes características técnicas:

- Material: fibra de nylon.
- Dientes engrane conductor: 100.
- Dientes engrane conducido: 20.

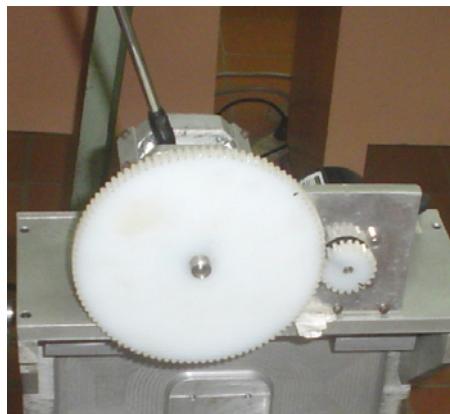
- Diámetro de paso engrane conductor: 125 mm.
- Diámetro de paso engrane conducido: 26.25 mm.
- Módulo: 125.
- Relación de velocidades: 5.

Los engranes se montaron en sus respectivos ejes utilizando tornillos prisioneros tradicionales, siendo dos tornillos a 90° por engrane.

Debido a la poca carga que va a soportar este engranaje, ya que se va a transmitir movimiento y no potencia, no se consideró necesario realizar los cálculos de esfuerzos en la transmisión.

En la [figura 19](#) se muestra el resultado final de la transmisión entre el eje del péndulo y el encóder.

Figura 19. Transmisión péndulo – encóder.



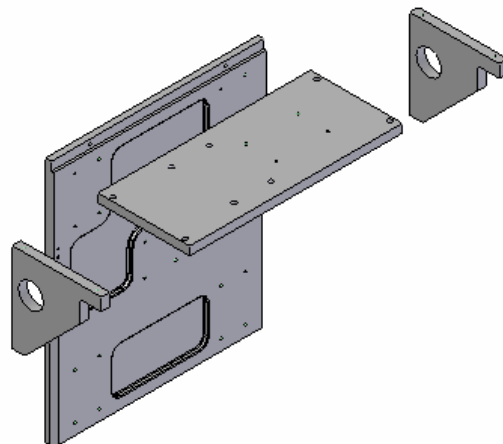
3.1.4 Estructura del móvil

Al estudiar las diferentes alternativas de diseño, se decidió en primer lugar montar los elementos de unión a la estructura principal (rodamientos axiales) sobre una sola pieza del conjunto, para evitar posibles desalineamientos al realizar el montaje en placas diferentes.

De esta forma, estos elementos quedan anclados a la placa posterior del conjunto carro, la cual es la de mayor tamaño, ya que debe abarcar la distancia entre las guías. Esta placa presenta un pequeño vaciado en sus dos extremos verticales, para permitir la activación de los finales de carrera según el catálogo de los mismos (se recomienda una superficie a 30° de inclinación con respecto a la horizontal – ver ANEXO C).

Habiendo definido la existencia de una única placa posterior de anclaje de los rodamientos, la estructura completa del móvil está compuesta por cuatro placas, una posterior, una superior y dos placas triangulares laterales, que funcionan como pie de amigos y dan rigidez al conjunto.

Figura 20. Despiece de la estructura del móvil.

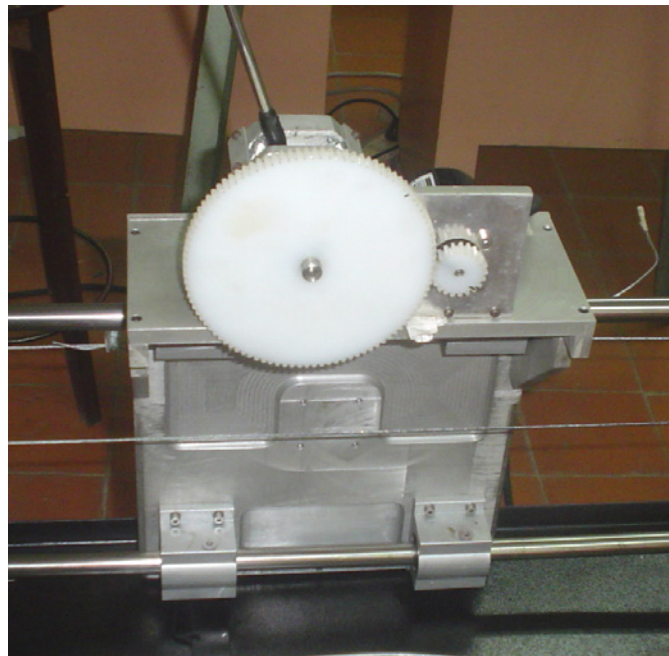


La placa superior del carro se diseñó para montar el péndulo y el encóder, con sus respectivas estructuras y engranes. Las placas triangulares tienen un agujero concéntrico con la guía superior para permitir el movimiento libre del carro a lo largo de la trayectoria. El pequeño recorte en forma de escuadra que se observa en estas dos piezas se hizo para evitar interferencia con la estructura de los finales de carrera.

Se realizó un vaciado de material en todas las piezas, para reducir el peso total de la estructura. Los cálculos estructurales de esfuerzos se hicieron utilizando el programa de simulación dinámica Visual Nastran Desktop 4D. En este programa se comprobó que los esfuerzos generados en las placas no se acercan de modo alguno al esfuerzo permisible de la microfundición de aluminio (248 MPa^3 - fundido en arena). El análisis mostró un esfuerzo máximo de 1.6 MPa . Se estima un peso total del carro junto con los rodamientos, el péndulo y el encóder de 6.79 kg .

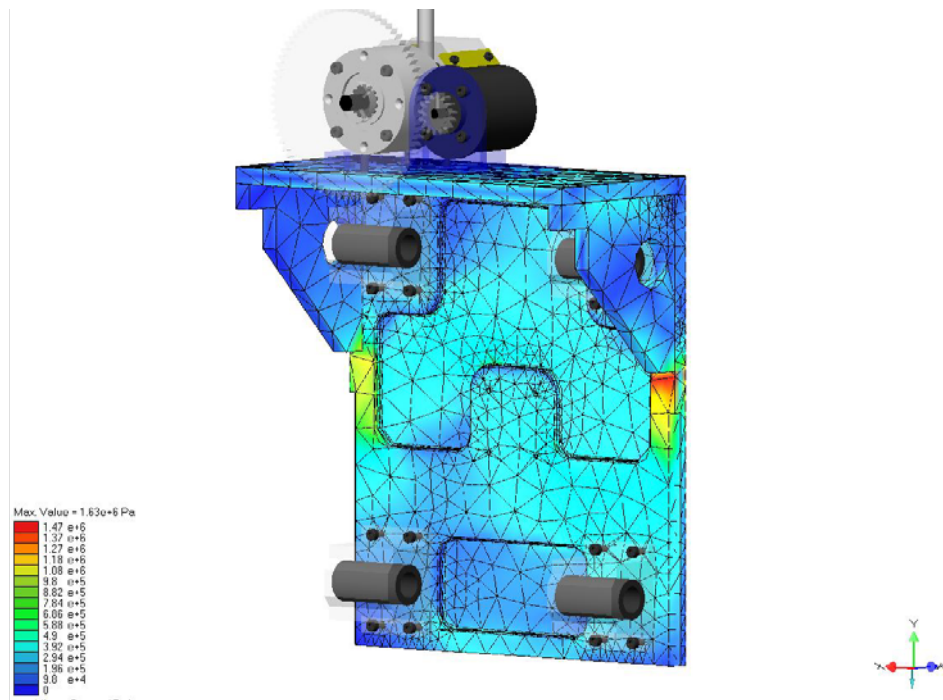
El maquinado de estas placas se realizó en centro de mecanizado del Laboratorio FMS de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Figura 21. Montaje final del carro del péndulo.



³ NORTON, Robert L. Diseño de Máquinas. México DF. Prentice Hall – Pearson Editores, 1999, p 995.

Figura 22. Simulación de esfuerzos en el carro del péndulo.



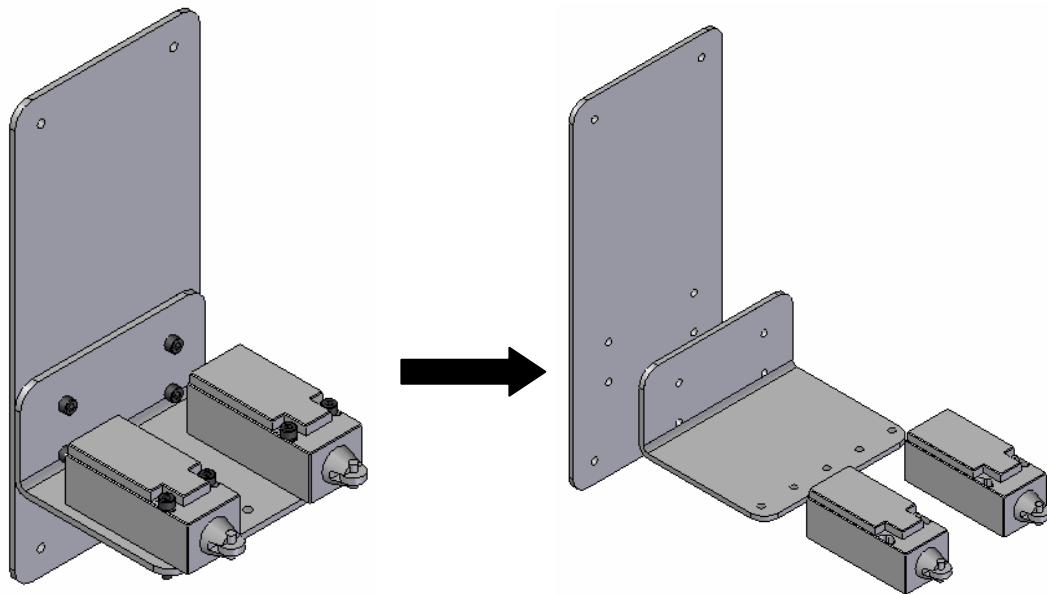
3.2 ESTRUCTURA DE MONTAJE DE LOS FINALES DE CARRERA

Para realizar el montaje de los sensores de posición que controlan el recorrido del móvil, se desarrollaron unas estructuras independientes, construidas en lámina de acero inoxidable calibre 18. Cada estructura (en total son dos) permite la colocación de dos finales de carrera (uno de alarma y el otro de fallo), y está conformada por dos placas acopladas entre sí mediante tornillería convencional. Para lograr el montaje adecuado de estos dispositivos, se hizo necesaria la colocación de unos auxiliares de montaje, lo que permite utilizar los bloques de apoyo de las guías como soporte de la estructura de los finales de carrera. Se utilizaron unos bujes separadores para dar la distancia adecuada de activación de los sensores.

Tanto los auxiliares de montaje de la estructura de los finales de carrera como la lámina de anclaje de los mismos cuentan con un juego de agujeros

igualmente espaciados, lo que permite modificar la distancia de recorrido útil del móvil, así como el espacio disponible entre el final de carrera de alarma y el final de carrera de fallo. Cada una de las estructuras se monta en un extremo del banco, dando así el control bilateral requerido en la carrera del móvil.

Figura 23. Diseño de la estructura de montaje de los finales de carrera.



3.3 LAS GUÍAS Y LOS SOPORTES DE MONTAJE

El recorrido del carro del péndulo está definido por unas guías cilíndricas fabricadas en acero inoxidable 420, las cuales se montan en unos soportes de acero 1045. La estructura básica formada por estas guías y estos soportes se convirtió en el punto de partida para el diseño de los demás elementos del banco.

Figura 24. Montaje de los finales de carrera en el banco.

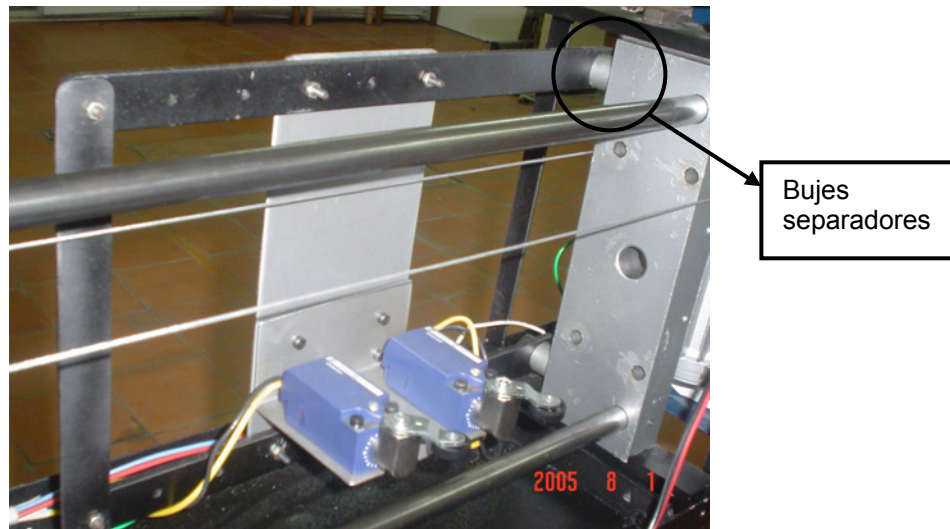
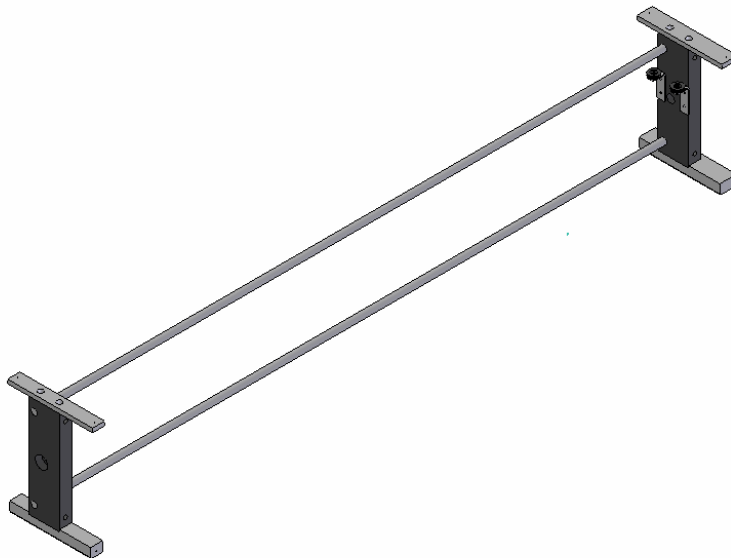


Figura 25. Estructura básica de las guías y los soportes de montaje.



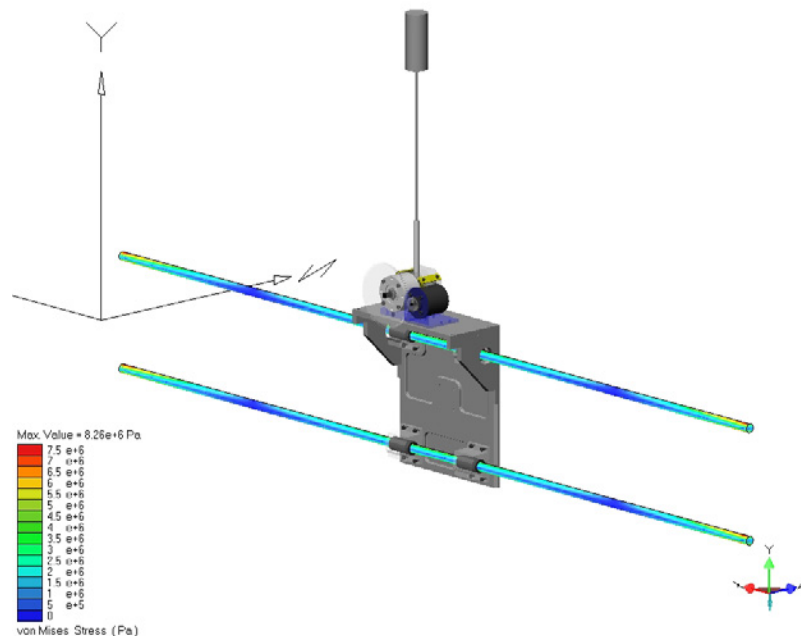
Como se mencionó previamente, los elementos de esta estructura base se encontraban disponibles de desarrollos anteriores. Se añadieron unos soportes adicionales a los existentes, en la base de los mismos. Estos

soportes horizontales aumentan la estabilidad de este conjunto, y evitan interferencia mecánicas en el movimiento del carro.

En la parte superior de los soportes de las guías se colocaron unos auxiliares para permitir el ensamble de las cubiertas del banco. Los soportes de las guías fueron también utilizados para montar la estructura de los finales de carrera, y para apoyar las poleas auxiliares de la transmisión entre el motor y el móvil.

Para calcular los esfuerzos y las deformaciones en las guías, se utilizó el programa de simulación de esfuerzos Visual Nastran Desktop 4D. El resultado del análisis se observa en las figuras.

Figura 26. Análisis de esfuerzos en las guías.



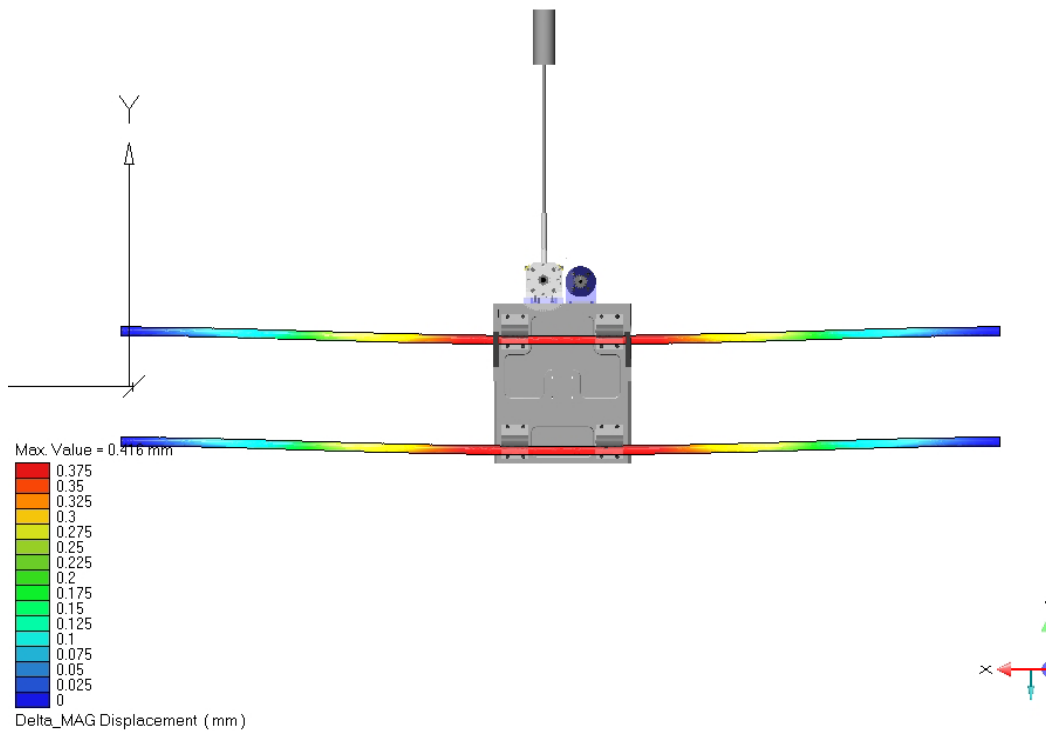
Los análisis dan como resultado un esfuerzo máximo de 8.26MPa en las guías, con una deflexión máxima de 0.476mm. El esfuerzo máximo

admisible para el material de este elemento es de 655MPa^4 , el cual está muy por encima del esfuerzo generado.

Figura 27. Análisis de deflexión en las guías.

Deformations scaled by 38.5

Load Factor = 1

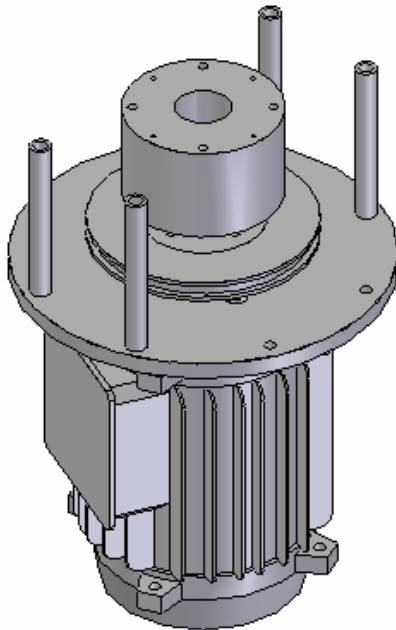


⁴ NORTON, Robert L. Diseño de Máquinas. México DF. Prentice Hall – Pearson Editores, 1999, p 997.

4 EL PAQUETE MOTRIZ

El paquete motriz del péndulo está conformado principalmente por el motor trifásico, y la transmisión entre el motor y el móvil.

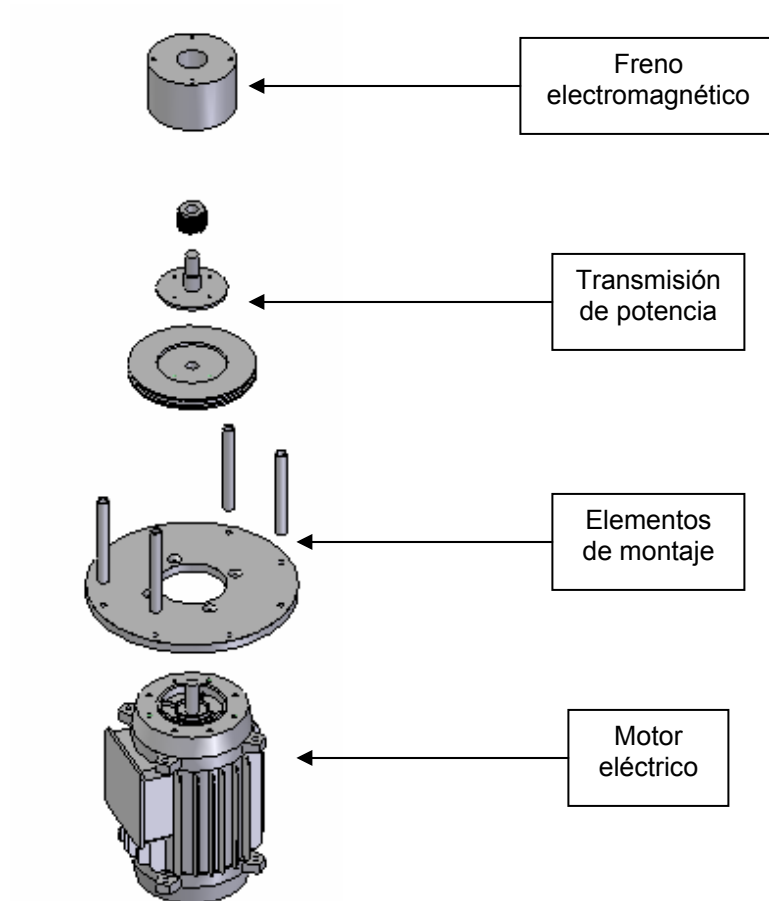
Figura 28. El paquete motriz.



Este paquete contiene los elementos mostrados en la [figura 29](#), entre los que se cuentan:

- Motor eléctrico
- Transmisión motor – móvil
- Freno electromagnético de bloqueo del motor
- Adicionales de montaje

Figura 29. Las partes del paquete motriz.



4.1 EL MOTOR ELÉCTRICO

Se diseñó el paquete motriz en base a un motor trifásico con las siguientes especificaciones:

- Marca: Neri Motori.
- Potencia: 0.5 HP.
- Amperaje a plena carga: 2 A.
- Frecuencia nominal: 50 Hz.

En el ANEXO D puede encontrarse el data – sheet del motor.

Figura 30. Motor eléctrico del banco.



4.2 TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Se estudiaron diversas transmisiones entre el motor y el móvil, siendo las alternativas básicas el tornillo de potencia, una transmisión utilizando correas sincrónicas y transmisión mediante cable de acero. Los cálculos realizados para cada tipo de transmisión se muestran a continuación. El parámetro básico de selección fue la velocidad alcanzada con el carro, y la potencia requerida para alcanzar esa velocidad.

4.2.1 Tornillo de potencia

En los elementos disponibles para el desarrollo del banco se encontraba un tornillo de potencia, diseñado inicialmente para trabajar en la estructura conformada por las guías y los soportes de las mismas. Los datos técnicos de este elemento son:

- Diseño basado en catálogo de tornillos de bola Warner Electric, correspondiente al modelo RM1605.

- Paso: 5 mm.
- Rosca sencilla.
- Rosca derecha.
- Avance: 5 mm/rev.
- Diámetro mayor: 15.70 mm.

Los cálculos realizados para estudiar la respuesta en velocidad de este dispositivo, basados en la formulación consignada en el catálogo mencionado, son:

$$V = rpm * L \tag{1}$$

$$V = 1800 * 5 = 9000mm / min = 9m / min = 0.15m / s$$

Como se observa en estos cálculos, la velocidad alcanzada por el móvil es bastante baja. Existe la posibilidad de aumentar esa velocidad utilizando el variador de velocidad. Según el catálogo del variador, la frecuencia máxima admisible en el mismo son 240 Hz. Según las especificaciones del motor, este alcanza una velocidad angular de 1800 rpm a 60 Hz. La velocidad de rotación es directamente proporcional a la frecuencia, por lo que el valor máximo de este parámetro en nuestro caso sería de 7200 rpm. La velocidad lineal máxima que alcanzaríamos en este caso, sería de 0.6m/s.

El peso estimado del carro con el péndulo para los cálculos en el proceso de diseño fue de 5 kgs. Al finalizar el diseño, el peso real del móvil fue de 6.79 kgs. Se utilizará este valor para confirmar la validez de los cálculos realizados. Los efectos de la fricción entre las guías y los rodamientos axiales son totalmente despreciables, como se puede ver en el catálogo de los rodamientos.

Según el catálogo del fabricante del tornillo, el torque requerido para mover la carga está dado por

$$T = \frac{P * L}{2\pi * e} \tag{2}$$

En donde P representa la carga a mover (el peso del móvil en este caso), L el avance del tornillo, y e la eficiencia del tornillo de bolas (0.9 según catálogo del fabricante). Haciendo los cálculos y las conversiones de unidades requeridas, se obtiene un torque requerido igual a

$$T = 0.522lb * in$$

Haciendo los cálculos de potencia utilizando las fórmulas tradicionales, se obtiene

$$HP = \frac{rpm * T(lb * in)}{63000} = \frac{7200 * 0.522}{63000} = 0.06HP \quad (3)$$

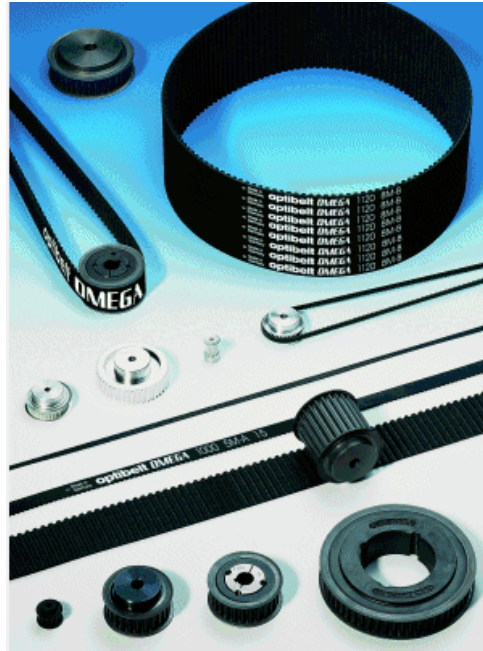
Los resultados de los cálculos evidencian que el motor seleccionado es suficiente para realizar la transmisión mediante el tornillo de potencia. Sin embargo, como se observará en los numerales siguientes, existe una amplia diferencia de velocidades lineales del carro entre la transmisión sincrónica y de cable de acero y el tornillo de potencia. Esta reducida velocidad del tornillo, utilizando incluso la máxima amplificación posible con el variador, hace que se descarte como alternativa de transmisión, ya que se considera que las aceleraciones generadas no serán suficientes para equilibrar el péndulo. Además, un reducido rango de velocidad en el móvil reduce drásticamente las posibilidades de control a realizar.

4.2.2 Correas sincrónicas (Timing Belts)

Este tipo de transmisiones se encuentran representadas en nuestro país principalmente por la marca Optibelt línea Omega. En la figura se observan este tipo de poleas con sus respectivas correas.

Las características principales de estas correas son su gran precisión en aplicaciones de posicionamiento, bajo nivel de ruido, alto desempeño y acople suave de la correa sobre la polea.

Figura 31. Transmisiones sincrónicas.



La consideración inicial para el montaje de una transmisión sincrónica es el espacio disponible. Siguiendo la línea de la estructura base del diseño, se estima que el diámetro máximo de la polea motriz es de aproximadamente 85 mm. De esta forma, se calcula la velocidad lineal del móvil con la rotación nominal del motor. No se consideran pérdidas de eficiencia en esta transmisión, por su característica sincrónica.

La velocidad lineal del carro está dada por

$$V_c = \frac{2\pi * n * r}{60} = 8.01m / s \quad (4)$$

Donde r representa el radio (en metros) de la polea, y n las revoluciones por minuto del motor.

Los cálculos de la transmisión sincrónica se hicieron utilizando una herramienta de software de la empresa Optibelt, llamada CAP Calculation Software. Las variables de entrada del programa fueron la geometría básica de la transmisión (según la estructura base del banco), el tipo de servicio y la potencia del motor. De esta forma, se obtuvieron los valores consignados en la [tabla 1](#).

Tabla 1. Cálculo de la transmisión sincrónica.

Variable	Valor	Unidades SI
Torque máximo de arranque	0.21	kg*m
Fuerza máxima de arrastre	10.45	kg
Tipo de correa a utilizar	No estándar	
Tipo de polea a utilizar	No estándar	
Diámetro externo de poleas	85	mm

Los resultados muestran que aunque la transmisión sincrónica es una opción totalmente válida para nuestro banco, no existen poleas estándar que cumplan los requerimientos de la transmisión. Esto se debe básicamente al reducido diámetro de la polea motriz, ya que se requieren diámetros mayores para cumplir con los requerimientos.

Estas inquietudes se comunicaron a los distribuidores de estas piezas en Colombia, específicamente al Almacén A.R. Los Restrepos S.A., ubicado en la ciudad de Medellín, quienes mostraron su disposición para hacer una transmisión personalizada a las necesidades del banco. Debido a la larga longitud entre centros de poleas (alrededor de 1700mm) se hacía necesaria la colocación de unas placas tensoras que mantuvieran las correas

horizontales, ya que estas presentaban flexión debido a su propio peso. Esto al final habría sido excesivamente costoso, trayendo implicaciones mecánicas y de montaje totalmente indeseables. La transmisión sincrónica se descartó al final por el elevado tiempo de entrega, ya que el mismo era de seis semanas para poleas estándar y 10 semanas para poleas y correas no estándar.

Se consultaron distribuidores locales de transmisiones sincrónicas, encontrando dificultades similares a las mencionadas.

4.2.3 Transmisión mediante cable de acero

Manteniendo las mismas consideraciones de espacio anteriores, se encuentra la velocidad lineal máxima del carro. La literatura sobre transmisiones con cable de acero es bastante reducida, por lo que se tomó la eficiencia de la transmisión de la literatura de ascensores, la cual estima una pérdida promedio del 20% entre el tambor o pulea y el cable. Por tanto, la eficiencia de la transmisión se toma como $n=0.8$.

De esta forma, el cálculo de la velocidad lineal del carro con el motor girando a 1800 rpm da como resultado (según la ecuación (5)), una velocidad lineal de

$$V_c = \frac{2\pi * n * r}{60} * 0.8 = 6.4 \text{ m/s} \quad (5)$$

Se realizó en primer lugar un cálculo dinámico de la aceleración del carro del péndulo, considerando la misma constante, aplicando las ecuaciones básicas dinámicas del MRUA.

De esta forma, se estima que el móvil está en reposo, y que se va a llevar a la velocidad final de 6.4m/s, en un tiempo estimado de 0.5s.

Aplicando las ecuaciones del MRUA, obtenemos

$$V = V_0 + at \rightarrow a = \frac{V - V_0}{t} = \frac{6.4}{0.5} = 12.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (6)$$

$$F = m * a = 6.8 * 12.8 = 87.04N = 19.56lbf \quad (7)$$

Haciendo el diagrama de cuerpo libre de la polea, y con un diámetro de polea $d=85\text{mm}=3.34\text{in}$, se tiene que

$$T = F * r = 19.56 * 1.67 = 32.74lbf * in \quad (8)$$

De esta forma, y aplicando la ecuación (3), la potencia requerida por el motor para lograr el movimiento del carro según las condiciones planteadas, es de 0.93 HP.

Como se observa en este caso, el motor seleccionado no es suficiente para las condiciones específicas del problema. Debido a que se tiene una versión del variador de velocidad cuya capacidad máxima de potencia es de 0.5HP, no es una opción el recambio del motor por otro más grande. La solución que existe es reducir la velocidad de rotación del motor hasta llegar a un límite de potencia aceptable. Otra opción es aumentar el tiempo de aceleración del carro, para reducir de esta forma la fuerza necesaria, y por consiguiente la potencia del motor.

Haciendo los cálculos sobre estos reajustes, se obtienen las combinaciones de velocidades, potencias y fuerzas resumidas en la [tabla 2](#).

Se observa que las velocidades lineales son mucho más altas a las alcanzadas utilizando el tornillo de potencia. Debido a la consecución fácil, al bajo costo y a que se acomoda a nuestras necesidades, se decidió utilizar en las pruebas preliminares del banco una transmisión con cable de acero.

4.2.3.1 Selección del cable de acero para la transmisión

Se estiman que las fuerzas de arranque y de frenado son las más altas que va a soportar el cable de acero. En el caso de un frenado brusco del motor (esto es, un cambio de la máxima velocidad de 6.4m/s a 0, en una décima de

segundo), el cable estará sometido a un alto esfuerzo debido a la inercia del carro.

Tabla 2. Cálculos de la transmisión con cable de acero.

	V lineal máx (m/s)	Tiempo acel (s)	Torque (lbf*in)	Potencia (HP)	rpm motor
1	6.4	1	16.34	0.46	1800
2	4.6	0.5	23.38	0.48	1300

Haciendo los cálculos dinámicos de la operación de frenado del carro, utilizando las ecuaciones (6) y (7) (asumiendo una aceleración de frenado constante en el móvil), se obtienen los siguientes resultados

$$a = -60.4 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 92.33lbf = 41.88kgf$$

En la [tabla 3](#) se observan las propiedades de cables de acero estándar, según datos técnicos suministrados por la empresa Emcocable S.A. Se observa que el esfuerzo de rotura de un cable de acero de $\varnothing 3mm$ es de 479 kgf. Utilizando un cable de este tipo, obtenemos un factor de seguridad de la forma

$$N = \frac{Frotura}{Freal} = \frac{479kgf}{41.88kgf} = 11.43 \quad (9)$$

Es claro que este cable cumple con los requerimientos de trabajo debido a su elevado factor de seguridad. Se utilizará, por tanto, un cable de 3mm o 1/8", según la disponibilidad del mismo, en la transmisión.

La polea mantendrá el diseño básico de polea acanalada, con un diámetro menor de 85mm, según los cálculos realizados.

Tabla 3. Datos técnicos cable de acero galvanizado.

7 x 19 + 0			6 x 19 + 1 Textil		
Diámetro nominal mm	Peso aproximado Kg/100 m	Carga de rotura efectiva	Diámetro nominal mm	Peso aproximado Kg/100 m	Carga de rotura efectiva
		Kgf			Kgf
3	3,4	479	3	3,1	438
4	6,0	846	4	5,5	785
5	9,3	1.326	5	8,6	1.224
6	13,4	1.918	6	12,4	1.775
7	18,2	2.601	7	16,9	2.407
8	23,8	3.406	8	22,0	3.142
10	37,2	5.305	10	34,4	4.916
12	53,6	7.660			

4.3 EL FRENO ELECTROMAGNÉTICO

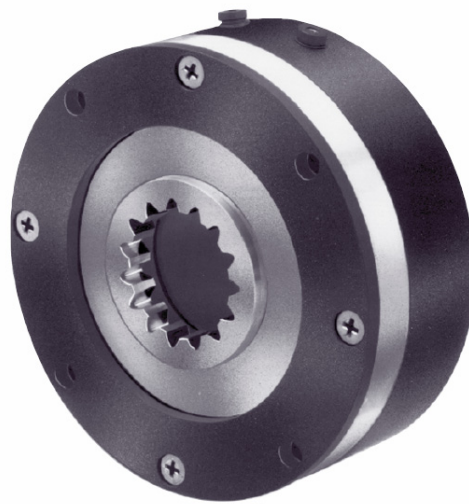
Para realizar el bloqueo del sistema al movimiento manual cuando este se encuentra apagado o en operaciones de emergencia, se ha dispuesto la colocación de un freno electromagnético sobre el eje del motor. En este caso, se decidió utilizar un freno marca Warner Electric, tipo ERS-26, debido a la disponibilidad del mismo en la Escuela de Ingeniería Mecánica. Al realizar un estudio de las principales características de este dispositivo, se encontró que es apto para realizar la labor de bloqueo del motor. Estas características se relacionan en la [tabla 4](#).

Tabla 4. Principales características del freno Warner Electric ERS-26.

Modelo	Voltaje (DC)	Torque estático (lb * ft)	Inercia (lb*ft ²)	Peso (lbS)
ERS - 26	90 VDC	1.5	0.03	1.20

Es importante especificar que el freno electromagnético utilizado es del tipo FAIL SAFE BREAK, lo que significa que se activa cuando se interrumpe la corriente hacia el mismo. De esta forma, en cualquier instante en que el banco se encuentre apagado, el freno estará bloqueando la rotación del motor.

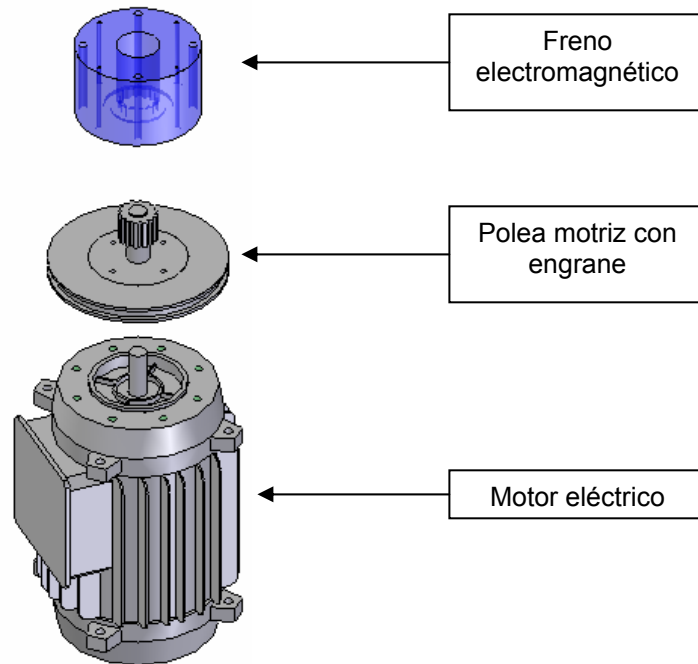
Figura 32. Freno electromagnético Warner Electric ERS 26.



Como se observa en la figura, el freno posee un engrane interior sobre el cual se acopla el eje objeto del bloqueo. Se utilizó una pieza solidaria a la polea motriz de la transmisión para realizar este acople. Esta pieza posee el engrane externo que ensambla con el freno, y ya que la polea está montada directamente sobre el eje del motor, se genera el bloqueo sobre el eje del mismo.

La carcasa del freno posee unos agujeros para anclarlo a una estructura estática, que en nuestro caso es la estructura interior del banco. En la [figura 33](#) se muestran los elementos utilizados para realizar el bloqueo del eje del motor mediante el freno.

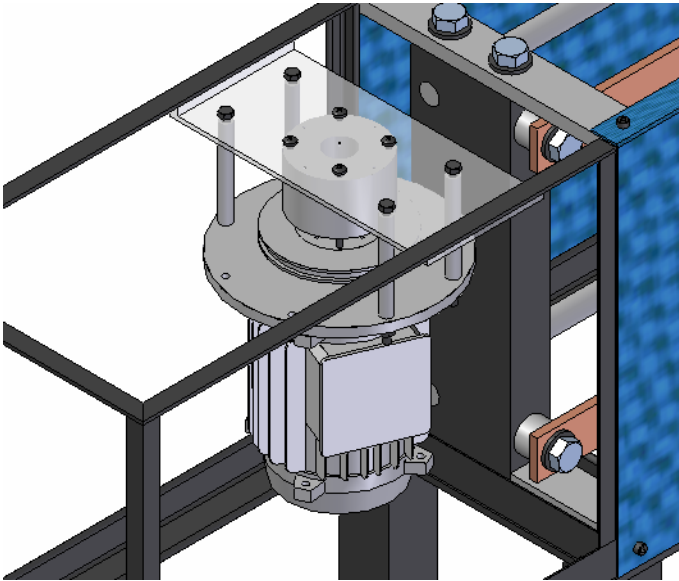
Figura 33. Acople entre el freno electromagnético y el eje del motor.



4.4 ADICIONALES DE MONTAJE

Para realizar el anclaje del paquete motriz a la estructura interna del banco, se utilizó la brida del motor y unos bujes separadores, que nos dan la distancia óptima entre el motor y el apoyo para el montaje de los demás elementos del conjunto motriz. El diseño final del montaje del paquete motriz se observa en la [figura 34](#).

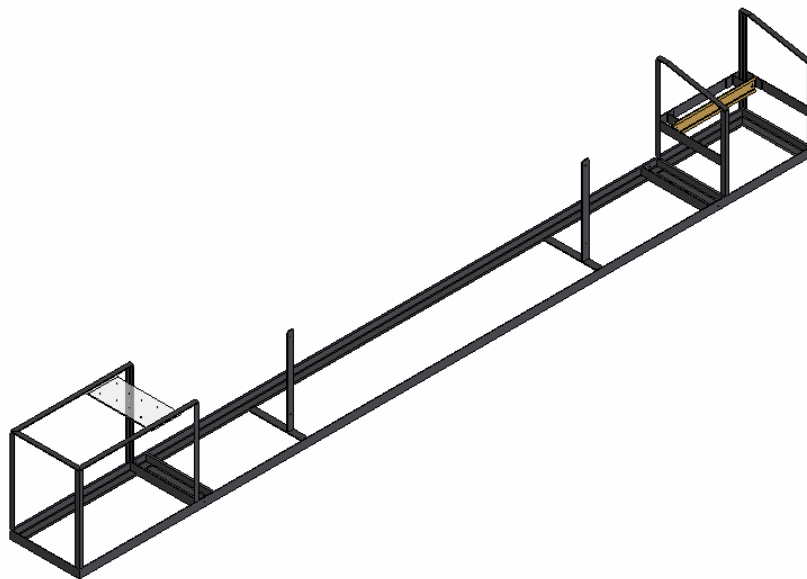
Figura 34. Montaje del conjunto motriz en la estructura interna.



5 ESTRUCTURA INTERNA

La estructura interna del banco sirve de base a todos los componentes del mismo. Está fabricada principalmente en ángulo de 1" x 1/8", siendo evidente su división en tres módulos diferentes: el módulo de montaje del paquete motriz, el módulo de montaje de la estructura central del péndulo y la caja de control.

Figura 35. Estructura interna de soporte.

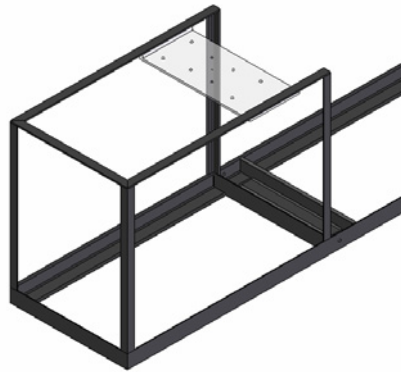


5.1 MÓDULO DE MONTAJE DEL CONJUNTO MOTRIZ

El módulo de montaje del conjunto motriz se encuentra al costado izquierdo de la estructura del banco, y es básicamente una caja formada por ángulo estructural y platina de 1/2" x 1/8". Posee su cubierta independiente, lo que permite realizar labores de mantenimiento sin retirar las cubiertas de los otros módulos. El montaje del paquete motriz se hace sobre una pieza de lámina

HR de ½" de espesor, como se observó en detalle en el numeral 4.4 de estas memorias.

Figura 36. Módulo de montaje del paquete motriz.



5.2 MÓDULO DE MONTAJE DE LA ESTRUCTURA CENTRAL

El módulo de montaje de la estructura central del péndulo es el de mayor tamaño. En sus extremos presenta dos alojamientos para los soportes horizontales inferiores de la estructura central. De igual forma, se han añadido unos travesaños con unos apoyos verticales que sirven de soporte a los largueros de montaje de la estructura de los finales de carrera.

En este módulo existen cuatro agujeros para el anclaje del conjunto a la estructura base. A diferencia de los otros módulos de esta estructura interior, el montaje de las cubiertas no se hace totalmente sobre los elementos constituyentes de la misma, ya que para tal fin se utilizan los soportes horizontales superiores de la estructura central del péndulo, los cuales reciben la parte superior de las cubiertas.

5.3 CAJA DE CONTROL

La caja de control permite el montaje de los elementos eléctricos y electrónicos de la etapa de control del banco, así como del panel de control

como tal. Desarrollada en ángulo y platina estructural, contiene un tramo de riel DIN estándar de 35mm para el montaje del variador de velocidad y los relés de control de la potencia eléctrica del sistema. La cara superior de la caja tiene un ángulo de inclinación de aproximadamente 20°, sobre la cual se coloca el panel de control. Esta inclinación permite la operación del banco por una persona en posición sentada o de pie.

Figura 37. Módulo de montaje de la estructura central.

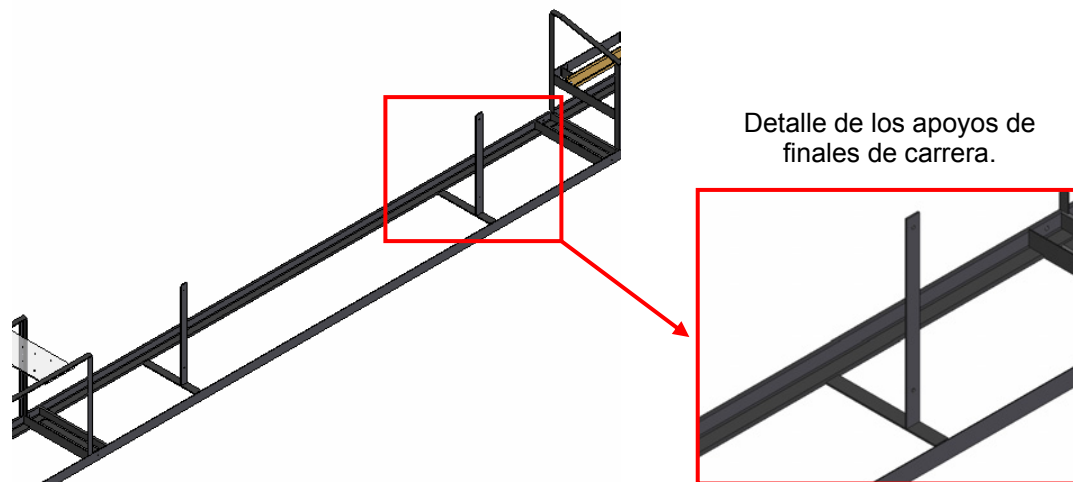
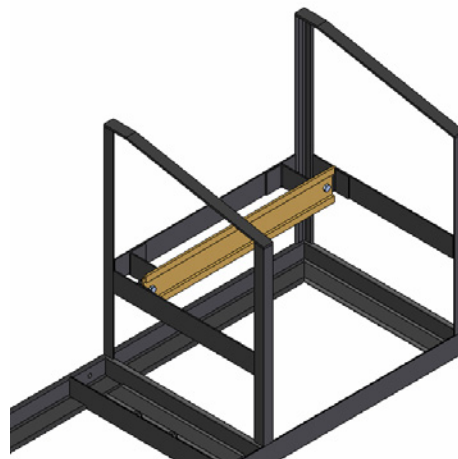


Figura 38. Caja de control.



6 FUNCIONAMIENTO DEL BANCO

6.1 ETAPAS DE FUNCIONAMIENTO

Para realizar el diseño del sistema de control, es necesario definir las etapas básicas de funcionamiento de la máquina. Estas etapas serán el punto de partida del diseño basado en GEMMA y GRAFCET.

6.1.1 Etapa inicial (arranque en frío)

Esta etapa se considera la inicialización del banco, después de haber sido encendido. Para iniciar esta etapa, es necesaria la activación del equipo, llevada a cabo mediante un interruptor tipo llave con contactos todo – nada, que me permite controlar la energía de alimentación al banco. Este interruptor se marcará como “ON”. En esta etapa se llevarán a cabo las operaciones de arranque tradicionales, como son la puesta a cero de todas las marcas, temporizadores y contadores utilizados. De igual forma, se harán operaciones de control para poner el variador en funcionamiento de señal analógica bipolar, según se describe en el manual del mismo. Se inicializará un generador de pulsos con frecuencias diversas, para ser utilizado en operaciones de visualización.

6.1.2 Etapa de posicionamiento automático

En esta etapa se pretende alejar el móvil de posiciones extremas de funcionamiento. Para lograrlo, se utilizan los sensores de posición lineal para el carro del péndulo. Se consideran posiciones extremas aquellas posiciones de alarma y de estado de fallo. En caso de presencia de alguna de las señales de los sensores lineales, se procede a generar un movimiento automático del banco a velocidad reducida, hasta alcanzar de manera aproximada el centro de la carrera del móvil. Este centro se calcula mediante

el uso de temporizadores calibrados previamente. Se hace necesaria la inclusión de un pulsador tipo todo – nada que me genere la señal para iniciar el proceso de posicionamiento automático. Se utilizará un pulsador estándar de $\varnothing 22\text{mm}$, referenciado en adelante como pulsador “Inicio”.

En caso de no existir señal alguna de los sensores de posición lineal, el carro del péndulo buscará el costado izquierdo, hasta generar la señal en el sensor correspondiente. A continuación, retornará a la posición de centro.

6.1.3 Etapa de posicionamiento manual

Después de haber posicionado el carro en el centro de la carrera, se desarrolla una etapa de posicionamiento manual opcional del mismo, para poder de esta forma estudiar el comportamiento del banco en diversas posiciones iniciales del móvil. Se considera un posicionamiento opcional ya que existe la posibilidad de iniciar el ciclo de operación de lógica fuzzy desde la posición central, mediante la utilización del pulsador “Inicio”.

Para poder realizar el posicionamiento manual del carro, se utilizarán dos pulsadores cuadrados de 15mm de lado. Estos pulsadores serán referenciados como “Izquierda” y “Derecha” respectivamente.

En caso de alcanzar un final de carrera, se imposibilita el movimiento hacia el costado del sensor activado.

Este ciclo finaliza con un estado intermedio entre esta etapa y la etapa siguiente, llamado estado “Ready”. Para entrar a este estado, se oprime el pulsador “Inicio”. Se ha habilitado la posibilidad de regresar al posicionamiento manual, en caso de querer modificar la posición actual del móvil. Para regresar al estado de posicionamiento manual, se utiliza la activación simultánea de los pulsadores “Izquierda” y “Derecha”. Si el banco se encuentra en estado “Ready”, y se oprime de nuevo el pulsador “Inicio”, se pasa de manera automática a la etapa siguiente.

6.1.4 Etapa fuzzy

La etapa de lógica difusa o etapa fuzzy es la etapa central del proceso. Debido a esto, se dedica un capítulo posterior para estudiar el desarrollo del control fuzzy, el software utilizado, la interface con el autómata, y las herramientas de visualización de este proceso.

6.1.5 Etapa final fuzzy

La etapa final fuzzy se define como aquella en que el automatismo abandona el control difuso, por diversos factores. Los factores que generan la finalización de esta etapa traen consigo unas sub-etapas asociadas, que se estudian a continuación.

6.1.5.1 *Fuzzy fallido*

Esta sub-etapa se genera cuando el controlador fuzzy es incapaz de equilibrar el péndulo. Esta incapacidad de equilibrio se define de acuerdo a un tiempo de funcionamiento máximo programado con anterioridad. En caso de cumplirse el tiempo sin alcanzar el equilibrio, el banco se detiene, generando una señal de estado fallido. Para identificar esta sub-etapa de las demás, se ha decidido adicionar unos pilotos al panel de control, para indicar los diversos estados de funcionamiento del banco. Estos pilotos serán tres, en colores verde, amarillo y rojo respectivamente. En este caso, y utilizando el generador de pulsos y frecuencias del programa, se hace titilar el led rojo en una frecuencia media. Después de esta etapa, y mediante el pulsador “Inicio” (utilizado como acuse de recibo), se ingresa a la etapa final del proceso.

6.1.5.2 *Fuzzy fallido por activación de finales de carrera o pulsador inicio*

Este caso es similar al anterior, diferenciándose en que la etapa de estado fallido se genera por la activación de uno de los finales de carrera o por la acción de pulsar “Inicio”. Se procede de igual forma, haciendo una

visualización distinta para la identificación del estado. En esta ocasión, titilan de forma simultánea los pilotos amarillo y rojo a una frecuencia media. Se hace necesaria la pulsación del acuse de recibo para pasar a la etapa final.

6.1.5.3 Fuzzy exitoso

En caso de lograr el equilibrio durante un tiempo predeterminado, se considera un ciclo exitoso. El equilibrio se define como la permanencia del péndulo en un ángulo reducido durante el periodo definido. Este ángulo se obtendrá en las calibraciones finales, según la respuesta del péndulo a las acciones de control. Se visualiza mediante el led verde, haciéndolo titilar a frecuencia media. Para salir de este estado se requiere la pulsación de “Inicio”.

6.1.6 Etapa final

En la etapa final, se realizan las operaciones de reseteo de marcas, contadores y temporizadores utilizados. Esta puesta a cero de variables se diferencia de la puesta a cero en el estado inicial, ya que esta última se logra mediante la activación de bloques programables de operaciones de inicialización, que se activan en el momento de realizar el arranque del programa.

Se deja listo el banco para realizar otro ciclo de trabajo. Esta etapa, en términos prácticos, es equivalente a la etapa inicial, ya que la primera solo se lleva a cabo en el arranque en frío del banco.

6.1.7 Etapa de emergencia

La etapa de emergencia es una etapa que inhabilita las demás. Es decir, al ingresar a ella, la etapa que se encuentre activa se finaliza instantáneamente, permitiendo de esta forma el diagnóstico de falla. Para visualizar este estado, se hace titilar el led rojo en la frecuencia alta del generador de pulsos. La emergencia se activa básicamente de dos formas:

mediante la activación de los finales de carrera extremos (estado de fallo total), y mediante la activación del pulsador de emergencia. Este pulsador es un pulsador de enclavamiento, lo que constituye un acuse de recibo inmediato. Sin embargo, debido a que la etapa de emergencia se activa no solo mediante este pulsador, se considera necesaria la programación de un acuse de recibo diferente. En nuestro caso se usará el acuse de recibo utilizado en las demás etapas, esto es, el pulsador “Inicio”. Para salir del estado de emergencia se debe eliminar la señal que produce el estado, y pulsar posteriormente “Inicio”. Al salir de la etapa de emergencia, el automatismo regresa a su estado inicial. Mientras dura la emergencia, el banco se encuentra bloqueado a cualquier orden.

6.2 VISUALIZACIÓN DE ESTADOS

En el ítem anterior se describieron algunas visualizaciones vinculadas a las etapas de funcionamiento del automatismo. Se considera necesario añadir a estas, unas indicaciones adicionales de funcionamiento básico. Esto es, indicar el estado de banco encendido, de motor funcionando, de banco listo para el control fuzzy y de lógica fuzzy en funcionamiento. Para lograr esto, se utilizaron unos pilotos estándar que completan la visualización de estados del banco. Estos pilotos se describen a continuación.

6.2.1 Indicador de estado ON

Este piloto se activa siempre que el banco esté encendido, permaneciendo en ese estado. Es activado por el interruptor con llave “On”. No titila en ningún estado.

6.2.2 Indicador de estado READY

Este led, de color verde, se enciende cuando el banco está listo para entrar al proceso fuzzy. Este estado se alcanza finalizando la etapa de posicionamiento manual, cuando se pulsa “Inicio” por primera vez.

Permanece encendido hasta que se da el arranque del estado fuzzy, con la pulsación de “Inicio” por segunda vez. En caso de eliminar el estado Ready mediante la pulsación simultánea de “Izquierda” y “Derecha”, este piloto se apaga. Cuando se da el arranque del estado fuzzy, el indicador “Ready” titila tres veces, utilizando la frecuencia media del generador de pulsos.

6.2.3 Indicador de estado RUNNING

Este led se enciende mientras el banco realiza el proceso de lógica fuzzy. Al dar el inicio de este proceso, el piloto titila de manera simultánea con el indicador Ready. Este piloto se apaga al finalizar el estado fuzzy, en cualquiera de las situaciones estudiadas anteriormente. Antes de apagarse, titila durante tres veces utilizando la frecuencia media del generador de pulsos.

6.2.4 Indicador de estado MOTOR

Este piloto se enciende siempre que el motor se encuentre funcionando, sin importar el estado ni la etapa del automatismo.

6.2.5 Indicador de proceso ROJO

El piloto rojo en los indicadores de proceso se utiliza para mostrar estados de fallo. Cuando se activa la etapa de emergencia, el led titila con la frecuencia más alta del generador de pulsos. Se apaga cuando se abandona la etapa de emergencia, de la forma descrita con anterioridad.

Se activa de igual manera cuando se presenta un estado de fuzzy fallido, ya sea por tiempo o por activación de finales de carrera. En este caso, titila con la frecuencia media del generador de pulsos, hasta recibir el acuse de recibo.

6.2.6 Indicador de proceso AMARILLO

Este led está configurado para indicar estados de alarma del banco. Se enciende en el proceso de posicionamiento automático, cuando se activa uno

de los finales de carrera y se mantiene el pulso de dirección (pulsador “Izquierda” o “Derecha”) correspondiente al sensor de posición activado. En este caso titila con la frecuencia media del generador de pulsos, hasta que se retira el pulso de dirección. En caso de activarse de nuevo este pulso, mientras el final de carrera sigue activado, el proceso de visualización se repite.

Se activa de igual manera cuando se genera un estado de fuzzy fallido por activación de los finales de carrera de alarma o pulsador inicio, titilando junto con el indicador de proceso rojo en la frecuencia media del generador de pulsos, hasta recibir el acuse de recibo.

6.2.7 Indicador de proceso VERDE

Finalmente se incluye un elemento de visualización para mostrar el desarrollo exitoso de los procesos automáticos del banco, es decir, el posicionamiento automático y la lógica difusa. Se considera exitoso el proceso de lógica difusa cuando se alcanza el equilibrio del péndulo, como se describió anteriormente. En ambos casos, el led titila utilizando la frecuencia media del generador de pulsos. En el posicionamiento automático exitoso, titila tres veces. En caso de estado fuzzy exitoso, titila hasta recibir el acuse de recibo.

6.3 INTERRUPTORES

En la descripción de las etapas de funcionamiento del automatismo, se hizo un resumen de la función de cada uno de los interruptores utilizados. En la [tabla 5](#) se consignan los pulsadores utilizados, así como su tipo, función y contactos asociados.

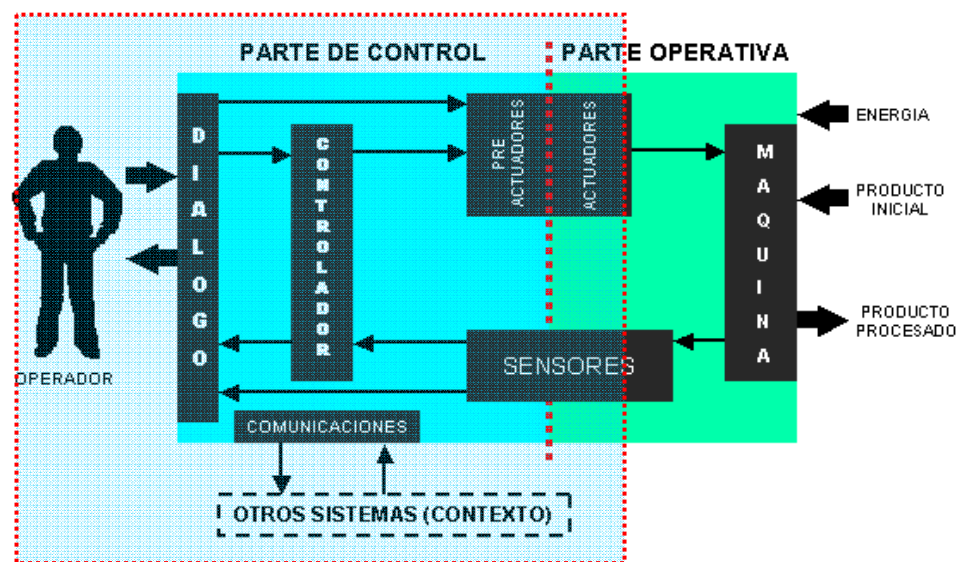
Tabla 5. Relación de interruptores utilizados.

Etiqueta	Tipo	Función	Contactos
ON	Interruptor llave 2 posiciones	Energizar el banco – arranque en frío	1 NA
INICIO - STOP	Pulsador	Inicia los estados de posicionamiento automático y estado fuzzy	1 NA
		Acuse de recibo	
		Finaliza el estado fuzzy	
IZQUIERDA	Pulsador	Mueve el carro hacia la izquierda, en la etapa de posicionamiento manual	1 NA
		Pulsado simultáneamente con “DERECHA” libera el estado Ready	
DERECHA	Pulsador	Mueve el carro hacia la derecha, en la etapa de posicionamiento manual	1 NA
		Pulsado simultáneamente con “IZQUIERDA” libera el estado Ready	
EMERGENCIA	Pulsador con enclavamiento	Pulsador de emergencia	1 NA – 1 NC

7 CONTROL DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

En el capítulo 1 de estas memorias se realizó una descripción general del banco de pruebas como un sistema automatizado. En este capítulo se estudiará en detalle la conformación de la parte de control del mismo. Según el diagrama, los componentes principales de esta etapa de control son los preactuadores, el controlador y los elementos de diálogo entre el operador y el automatismo.

Figura 39. Parte de control del sistema automatizado.



7.1 CONTROLADOR

En este ítem deben mencionarse dos subcomponentes principales. El primero es el tipo de controlador propiamente dicho, y el segundo es el algoritmo a utilizar en el controlador seleccionado.

7.1.1 Tipo de controlador

Los tipos de controladores que pudieron utilizarse en el lazo de control son los de lógica cableada, el autómata programable industrial (API) y el ordenador (PC); todos ellos utilizados de alguna forma en la industria.

Los sistemas de control del tipo cableado están constituidos principalmente por relés, circuitos integrados y cable. Según las necesidades, pueden incluirse accesorios como temporizadores y sensores. La gran desventaja de este tipo de controlador es que realizan una función de control fija, que depende de los componentes que lo forman y la manera en que se han interconectado; por lo tanto la única forma de alterar la función de control es modificando ya sea los componentes o la interconexión de los mismos, aunque en la mayoría de los casos se requiere la modificación de ambos. Esto hace que estos automatismos sean rígidos, sin versatilidad alguna y desde todo punto de vista obsoletos, restando flexibilidad al laboratorio, donde se requiere la realización de diversas pruebas adaptables a las necesidades.

Los otros dos controladores presentan la particularidad de permitir la realización de distintas funciones de control sin modificar la configuración física (hardware) del sistema en que se implementan, cambiando solamente la lógica del control (programa).

El control por ordenador tiene grandes capacidades de cálculo y conexiones a estaciones gráficas de interface con el usuario. Se utilizan generalmente en procesos complejos. La mayor desventaja de este tipo de control es que resulta económicamente costoso y poco estándar, sobre todo por el hecho de que el ordenador no suele disponer de interfaces adecuadas para recoger y enviar las señales de planta. El factor tamaño también juega un papel importante en este controlador, así como su sensibilidad a factores externos.

El autómata programable industrial API es un equipo electrónico de control con cableado interno independiente del proceso a controlar, que se adapta a dicho proceso mediante un programa específico que contiene la secuencia

de operación a realizar. Esta secuencia de operaciones toma señales del proceso (entrada) y genera señales de mando (salida al proceso), cableadas directamente en los bornes de conexión del autómeta. Las señales de entrada pueden proceder de elementos digitales o analógicos. Las señales de salida son digitales (todo – nada) o analógicas en tensión o corriente. El autómeta actúa sobre las señales de salida según el programa de control previamente almacenado en una memoria, a partir del estado de las señales de entrada. Una de las ventajas del autómeta programable es que incluye total o parcialmente las interfaces con las señales del proceso. Otra de sus grandes ventajas es la modularidad, entendiendo como tal el hecho de que el hardware está fragmentado en partes interconectables que permiten configurar un sistema a la medida de las necesidades. Además, es un controlador diseñado para la industria, lo que implica un tamaño pequeño y apropiado, y una gran resistencia a los factores externos propios de los procesos y ambientes industriales. Su montaje es sencillo y reducido.

Debido a las ventajas evidentes que presenta el autómeta programable industrial (API) en relación a los otros tipos de controladores, además de su amplia aplicación en la industria en la actualidad, y la posibilidad que tienen de programar el control fuzzy sobre software propio del mismo; se decidió utilizarlo como el controlador en este trabajo de grado.

Habiendo decidido el tipo de controlador a utilizar, el proceso se redujo a la selección del equipo mismo, esto es, marca y modelo. Debido a la disponibilidad actual del Autómetas Programables Industriales de la marca Siemens de la serie Simatic 300 en la Escuela de Ingeniería Mecánica; y a la experiencia adquirida en la programación de los mismos en la asignatura electiva Controladores Lógicos Programables (PLC), se decidió la utilización de un autómeta de este tipo en la realización del proyecto.

7.1.2 Algoritmo

Existe una diversa cantidad de posibilidades en cuanto al algoritmo de control a utilizar. En la actualidad, han tomado fuerza nuevas teorías de control como son el control por lógica Fuzzy y el control por redes neuronales. También existe el control PID, y los sistemas de control de retroalimentación sencillos (es decir, simplemente resta de voltajes de error y set-point).

Sin embargo, desde el principio mismo de este proyecto se definió la necesidad de poner en contacto a la comunidad universitaria con el entorno de la lógica fuzzy, lo cual eliminó el estudio de las demás posibilidades por estar fuera del contexto planteado. Hay que mencionar que el caso del péndulo invertido es utilizado mundialmente como una de las pruebas básicas en control con lógica fuzzy.

La arquitectura del controlador fuzzy se simuló mediante el software FuzzyControl++, compatible con el paquete de programación de los API Siemens de la serie Simatic, mediante bloques incluidos en el software de programación del controlador, denominado Simatic Step 7; y el paquete de comunicación Simatic Softnet.

7.2 PRACTUADOR

El preactuador es el elemento que actúa como interface entre el controlador y el actuador, permitiendo el accionamiento de este último con órdenes emitidas por el controlador. El preactuador más idóneo para el sistema es un variador de velocidad para motores trifásicos de corriente alterna, habilitado para recibir órdenes de comando mediante señales analógicas bipolares generadas por el controlador. De los variadores disponibles en el momento de desarrollar este proyecto, el más apropiado, debido a su diseño compacto y prestaciones, es el variador Allen Bradley, cuyas características técnicas se resumen a continuación:

- Referencia 160AA02NNX1P1.
- Voltaje de control: 12 VDC.
- Amperaje de control: 10 mA.
- Capacidad de control de motores trifásicos de hasta 0.5 HP.
- Seguidor de señal analógica de tipo 4 / 20 mA o -10 / 10 VDC.

En el ANEXO E se encuentra el catálogo completo del dispositivo.

7.3 DIÁLOGO SISTEMA - OPERADOR

Los elementos de diálogo entre máquina – operador con que cuenta el banco pueden dividirse en elementos de hardware y elementos de software. Los elementos de hardware incluyen el panel de control, el display de visualización del variador de velocidad y el indicador del ángulo del péndulo. Los elementos de software utilizados para la visualización son el paquete fuzzy y la interface SCADA.

7.3.1 Panel de control

Siguiendo los lineamientos de indicadores e interruptores definidos, se diseñó un panel de control utilizando pulsadores y pilotos estándar de 22mm. En el caso de los interruptores direccionales, se utilizaron pulsadores cuadrados de 15mm de lado. Los colores, la ubicación de los interruptores y la ubicación y color de los pilotos se decidieron bajo consideraciones de ergonomía, fácil acceso y fácil visualización de los elementos. De esta forma, el diseño final del panel de control se muestra en la [figura 40](#).

7.3.2 Display del variador de velocidad

El variador de velocidad cuenta con un display indicador desde el cual se pueden acceder a diversos parámetros de funcionamiento y programación del mismo. En el catálogo del variador se detalla el funcionamiento de este dispositivo.

Figura 40. Panel de control.

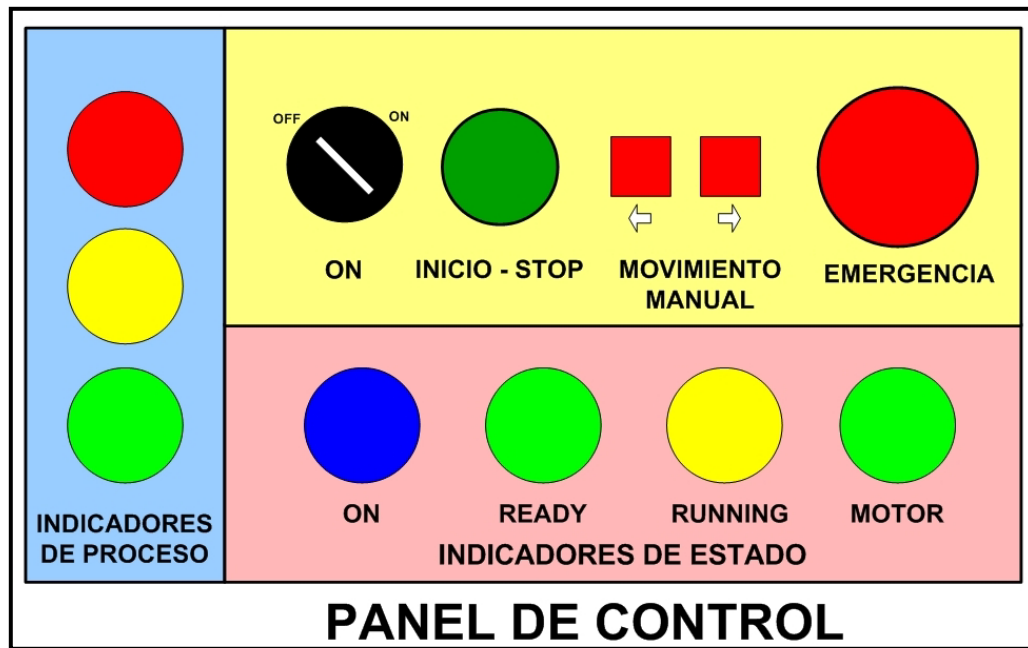


Figura 41. Display del variador de velocidad.



7.3.3 Indicador de ángulo del péndulo

Para facilitar la lectura del ángulo del péndulo, se ha puesto un pequeño indicador gráfico sobre el mismo. En este indicador se puede apreciar de forma aproximada el ángulo del péndulo con respecto a la vertical.

7.3.4 Interface SCADA

Se ha desarrollado una interface en sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) utilizando el programa WinCC desarrollado por la empresa Siemens, compatible con el paquete Simatic S7. En capítulos posteriores se describe el desarrollo y las utilidades de esta interface.

7.3.5 Monitoreo del bloque fuzzy

El software utilizado para el controlador fuzzy cuenta con una interfaz gráfica que permite la lectura de las variables de entrada, de las variables de salida y de las reglas fuzzy. En capítulos posteriores se describe el manejo de este paquete.

8 INTERFACE SCADA

8.1 GENERALIDADES

SCADA viene de las siglas de "Supervisory Control And Data Acquisition", es decir: adquisición de datos y supervisión de control. Se trata de una aplicación software especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores de control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, etc.) y controlando el proceso de forma automática desde la pantalla del ordenador. Además, provee la información que se genera en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como de otros supervisores dentro de las diferentes dependencias de una empresa: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc.

Los programas necesarios, y en su caso el hardware adicional que se necesite, se denomina en general sistema SCADA.

8.1.1 Prestaciones

Un paquete SCADA debe estar en disposición de ofrecer las siguientes prestaciones:

- Posibilidad de crear paneles de alarma, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias.
- Generación de un historial de datos de las señales de una planta, que pueden ser volcados para su proceso sobre una hoja de cálculo.
- Ejecución de programas de alto nivel de programación (VisualC++), que modifican la ley de control, o incluso el

programa total sobre el autómata, bajo ciertas condiciones en el proceso.

- Posibilidad de programación numérica, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador, y no sobre la del autómata.

Con ellas, se pueden desarrollar aplicaciones basadas en el PC, con captura de datos, análisis de señales, presentaciones en pantalla, envío de resultados a disco e impresora, etc.

Además, todas estas acciones se llevan a cabo mediante un paquete de funciones que incluye zonas de programación en un lenguaje de uso general (como C, Pascal, o Basic), lo cual confiere una potencia muy elevada y una gran versatilidad.

8.1.2 Módulos de un SCADA

Los módulos o bloques software que permiten las actividades de adquisición, supervisión y control son los siguientes:

- Configuración: permite al usuario definir el entorno de trabajo de su SCADA, adaptándolo a la aplicación particular que se desea desarrollar.
- Interfaz gráfico del operador: proporciona al operador las funciones de control y supervisión de la planta. El proceso se representa mediante sinópticos gráficos almacenados en el ordenador de proceso y generados desde el editor incorporado en el SCADA o importados desde otra aplicación durante la configuración del paquete.
- Módulo de proceso: ejecuta las acciones de mando preprogramadas a partir de los valores actuales de variables

leídas. La programación se realiza por medio de bloques de programa en lenguaje de alto nivel (como C, Basic, etc.).

- Gestión y archivo de datos: se encarga del almacenamiento y procesado ordenado de los datos, de forma que otra aplicación o dispositivo pueda tener acceso a ellos.
- Comunicaciones: se encarga de la transferencia de información entre la planta y la arquitectura hardware que soporta el SCADA, y entre ésta y el resto de elementos informáticos de gestión.

8.2 SIMATIC WINCC v 5.1

SIMATIC WinCC es un sistema de supervisión de procesos sobre PC ejecutable bajo Microsoft Windows 95 y Windows NT.

WinCC es un paquete desarrollado por Siemens y está concebido para la visualización y manejo de procesos, líneas de fabricación, máquinas e instalaciones. El volumen de funciones de este moderno sistema incluye la emisión de avisos de eventos en una forma adecuada para la aplicación industrial, el archivo de valores de medida y recetas y el listado de los mismos.

En este proyecto se utilizaron algunos componentes básicos de la herramienta WinCC para desarrollar un control y un monitoreo remoto sobre el banco automático.

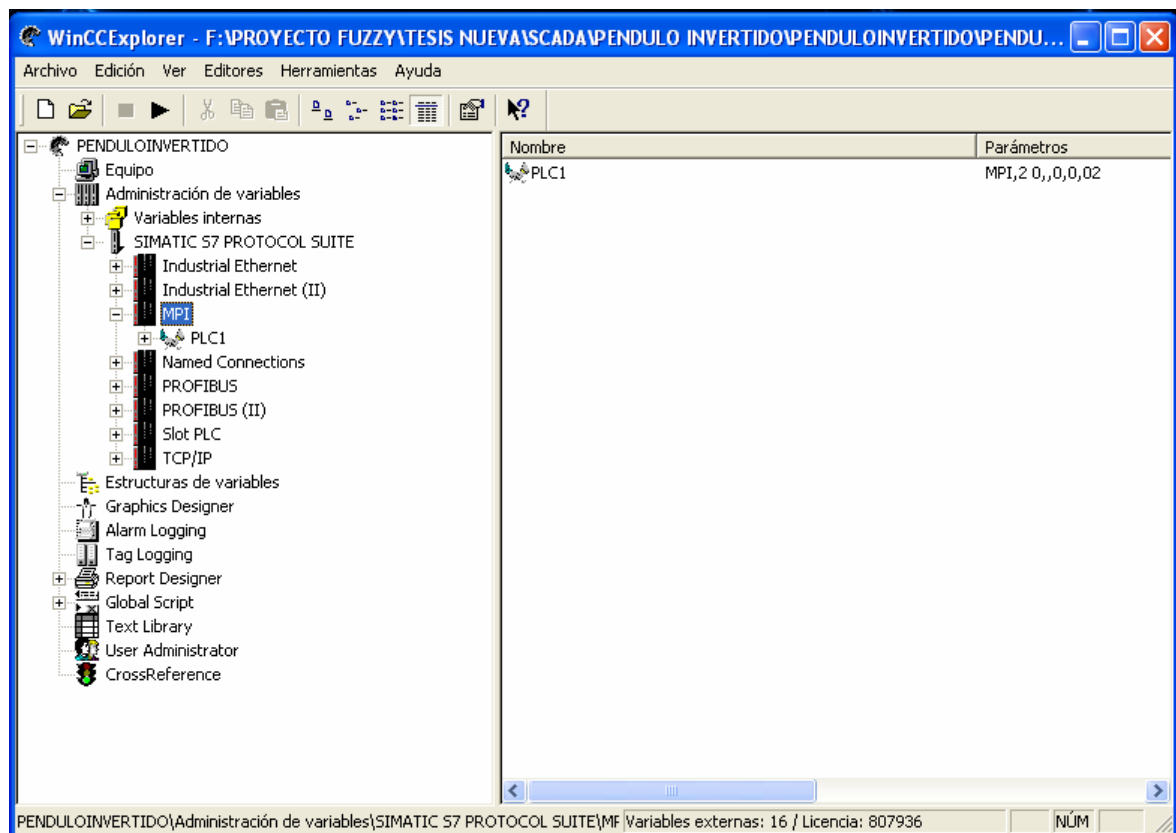
- Se configuró la conexión con el autómeta utilizado (SIMATIC S7 IFM314).
- Se definieron las variables de control y las variables de monitoreo del proceso.
- Se editaron las imágenes del proceso al mismo tiempo que se configuraron los tiempos de ejecución de las mismas.

- Se crearon las ventanas de tendencias y ventanas de tablas para la visualización de los valores de las variables del proceso.

8.2.1 Conexión del autómeta con el WinCC.

En este paso se configura el sistema SCADA de modo que pueda comunicarse con el API vía el driver de comunicaciones seleccionado. Este depende del controlador programable utilizado, en este caso se usa el driver "SIMATIC S7 Protocol Suite" de la familia SIMATIC PLC de Siemens. La [figura 42](#) muestra la conexión establecida. El nombre de la conexión es PLC1, el protocolo de comunicación utilizado es MPI.

Figura 42. Configuración de la conexión.



8.2.2 Definición de variables del proceso.

Las variables utilizadas en WinCC representan o bien valores reales, tales como la posición del péndulo, o bien valores internos calculados o simulados dentro del WinCC.

Las variables de proceso (variables externas) son asignaciones de memoria dentro del PLC, que han sido guardadas en el transcurso del proceso, como el valor registrado por un sensor o la activación de un interruptor. Esta información almacenada en la memoria del PLC es enviada al WinCC a través de la conexión descrita anteriormente.

Las variables internas son asignaciones de memoria dentro del WinCC que tienen la misma funcionalidad que dentro de un PLC, con la ventaja que pueden hacerse modificaciones y cálculos sin utilizar los recursos propios del PLC, sino los recursos del ordenador o PC.

La [figura 43](#) muestra las variables definidas en el sistema SCADA.

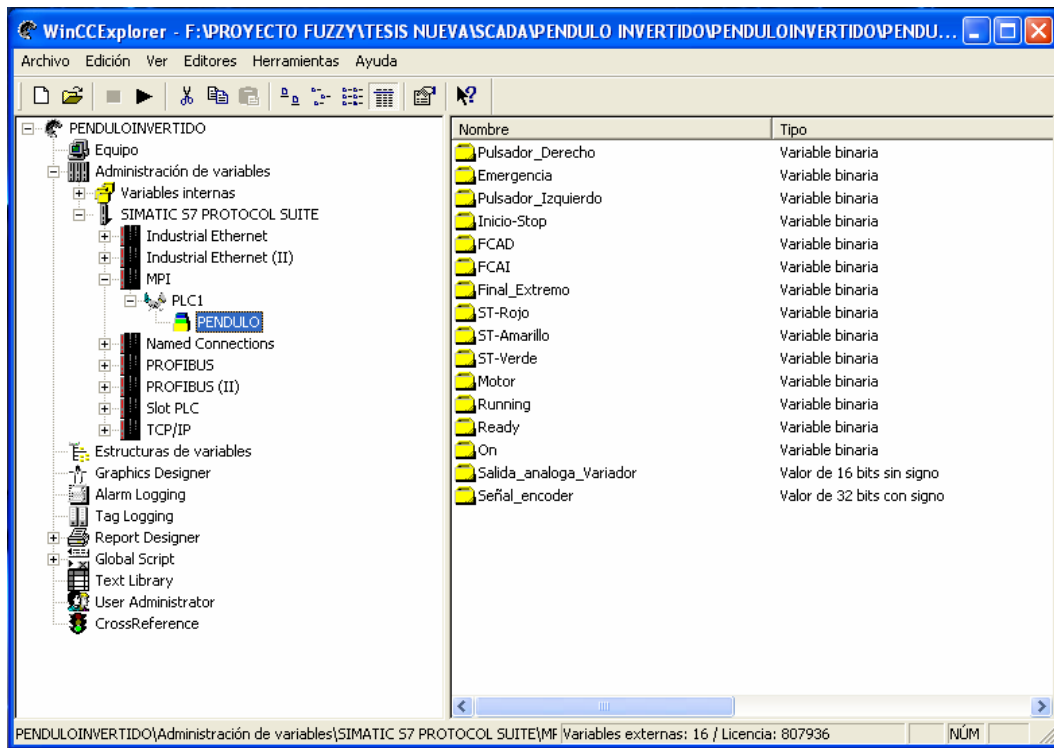
8.2.3 Diseño grafico del sistema SCADA.

El diseño grafico del sistema SCADA se realiza con la herramienta de edición de gráficos integrada en el WinCC, con la que se configuran las pantallas de operación del sistema con sus respectivos componentes, así como la visualización grafica de las variables por medio de indicadores numéricos o analógicos. Dentro del diseñador gráfico se insertan las imágenes que serán utilizadas durante el funcionamiento del SCADA.

En la [figura 45](#) se observa la imagen “INICIO.pdl”, la cual representa el pantallazo inicial de ejecución del sistema SCADA, y que contiene un esquema básico del proceso con una visualización de las variables de control (posición del péndulo y velocidad del motor) de forma digital y analógica.

En esta pantalla tenemos además dos botones que abren las ventanas del panel de control y la visualización de variables, y un botón para finalizar el sistema SCADA.

Figura 43. Administrador de Variables.



En la ventana “Panel de control” aparece una vista del panel de operación del banco. Desde esta ventana se tiene control completo de las operaciones vinculadas al panel de control. La imagen del panel de control es una replica del panel de operación físico del banco.

La [figura 47](#) muestra las variables del proceso (posición del péndulo y velocidad del motor) de forma grafica a través de ventanas de tendencias en forma de tablas a través de las ventanas de tablas.

Muestra la evolución del proceso en tiempo real y va haciendo un almacenamiento temporal de los datos.

Figura 44. Administrador de imágenes.

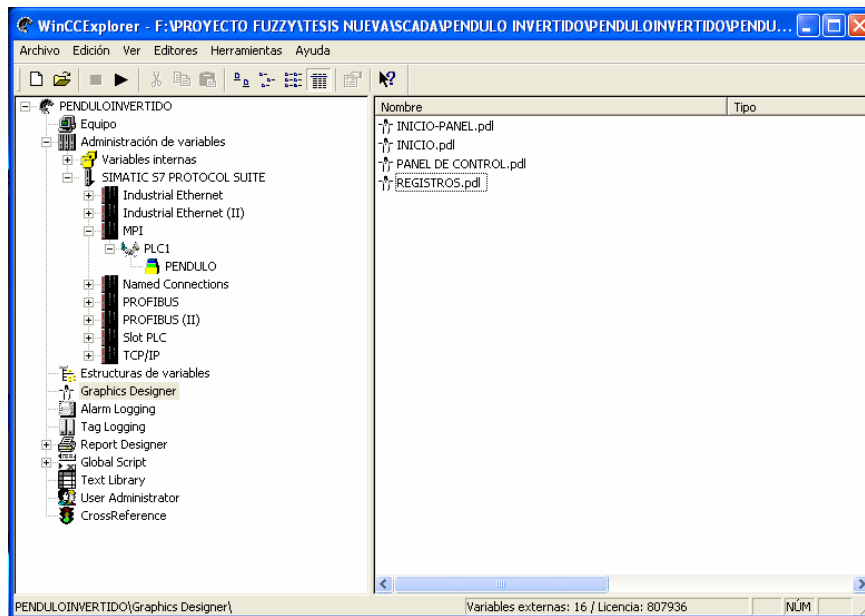


Figura 45. Pantallazo inicial del SCADA.

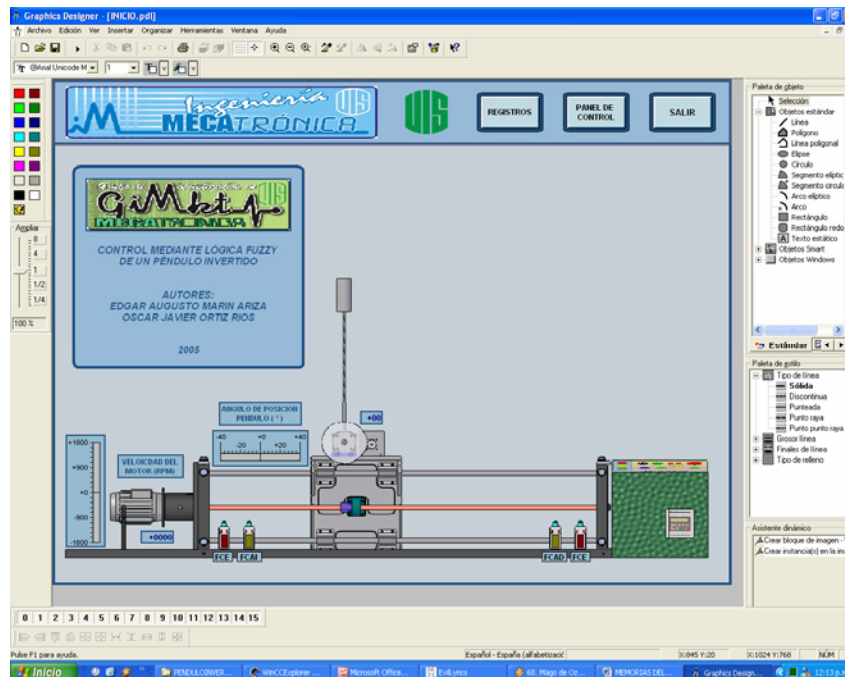


Figura 46. Ventana “Panel de control” activada.

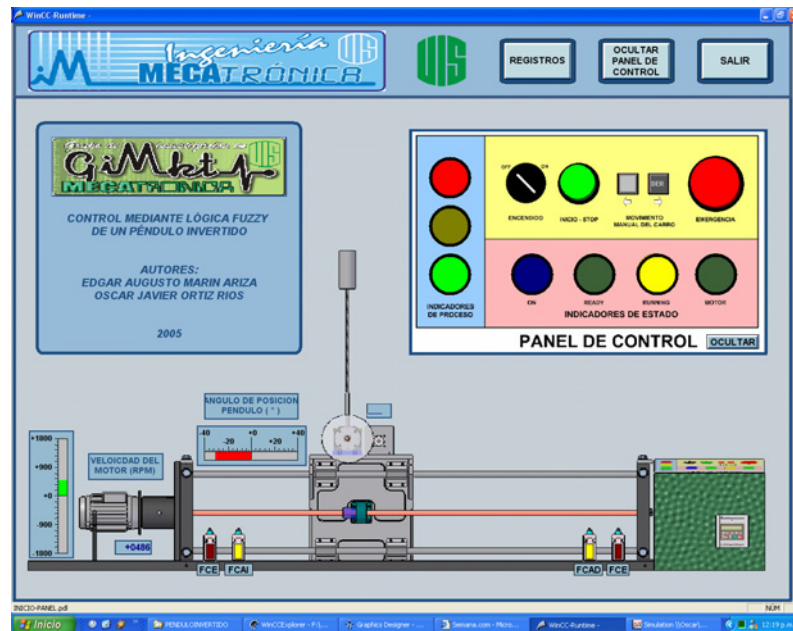
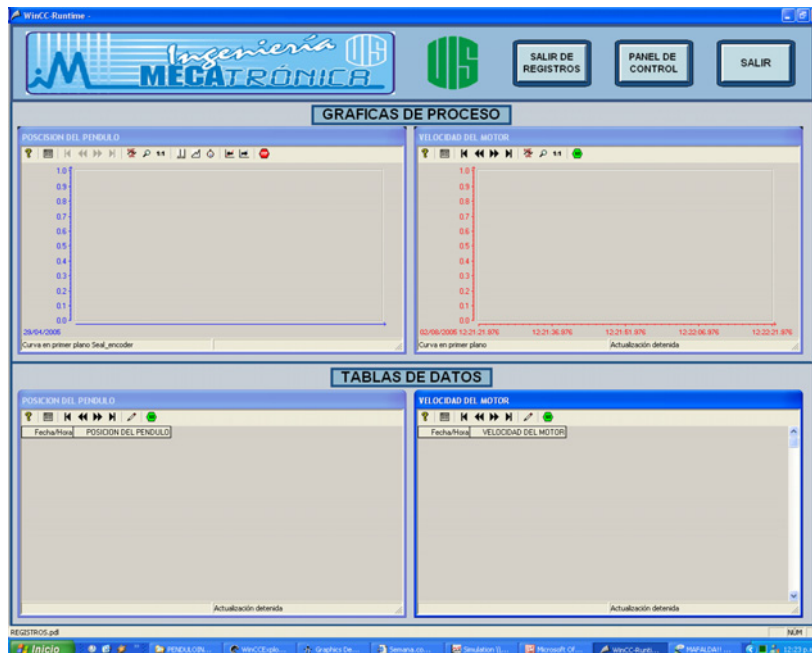


Figura 47. Registro de las variables del proceso.



9 EL ENTORNO FUZZY

9.1 SOFTWARE UTILIZADO

Para realizar el control mediante lógica difusa del péndulo invertido, es necesario utilizar un paquete fuzzy compatible con el autómata programable en cuestión. En este caso, el software desarrollado por la empresa fabricante Siemens para el control de los autómatas (Siemens Simatic Step 7) tiene la posibilidad de trabajar en conjunto con el paquete Siemens FuzzyControl++, desarrollado específicamente para aplicaciones de control mediante lógica difusa. Se hizo necesaria la implementación de un programa de comunicación entre los dos paquetes mencionados, denominado Siemens Simatic Net. Para lograr la compatibilidad entre las versiones disponibles de los paquetes de control del autómata y de lógica difusa disponibles en el laboratorio de automatización, se requirió de la utilización de una versión específica del software de comunicación. Las versiones de cada programa son:

- Siemens Simatic Step 7 V5.2.
- Siemens FuzzyControl++ V4.0.
- Siemens Simatic Net (Softnet) V6.2.

9.2 PROGRAMACIÓN FUZZY

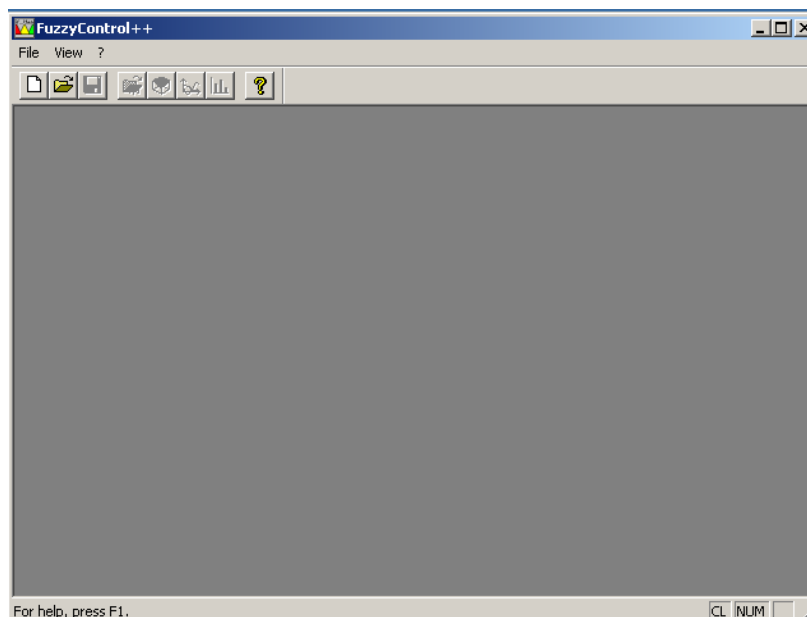
Para lograr una programación fuzzy exitosa, es necesario conocer las operaciones de comunicación, edición de reglas y monitoreo de resultados integradas en el FuzzyControl++. Es importante tener en cuenta que para lograr la comunicación entre este paquete y el autómata programable, se debe haber cargado el programa básico de control en el lenguaje Simatic Step 7 al autómata. Dicho programa debe incluir el llamado al bloque fuzzy y

a los bloques de datos relacionados.⁵ De no ser así, se generará un error de comunicación que impedirá la ejecución de las aplicaciones del programa. En el capítulo 11 de estas memorias se resume el desarrollo del programa de control. A continuación se estudian de manera breve los diversos pasos que deben seguirse para acceder a las herramientas de configuración fuzzy. Los instaladores del paquete mencionado incluyen un manual del usuario en formato digital, que servirá de referencia en caso de querer profundizar en el manejo del software.

9.2.1 Operaciones básicas

El paquete funciona en entorno Windows tradicional, presentando las funciones básicas integradas en cualquier programa de este tipo. El pantallazo inicial al ejecutarse el programa se muestra en la [figura 48](#).

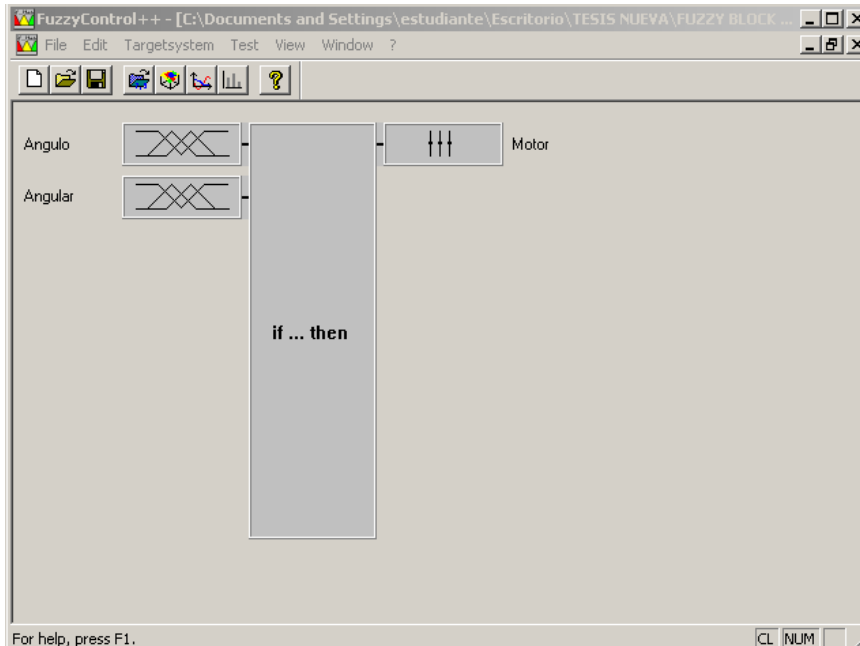
Figura 48. Pantallazo inicial.



⁵ Para mayor información sobre el llamado del bloque fuzzy, consultar el ANEXO H.

Los botones de crear un documento nuevo o de abrir uno existente son los estándares de Windows. Un documento de programación fuzzy tiene la estructura básica de la [figura 49](#).

Figura 49. Estructura del documento de programación.



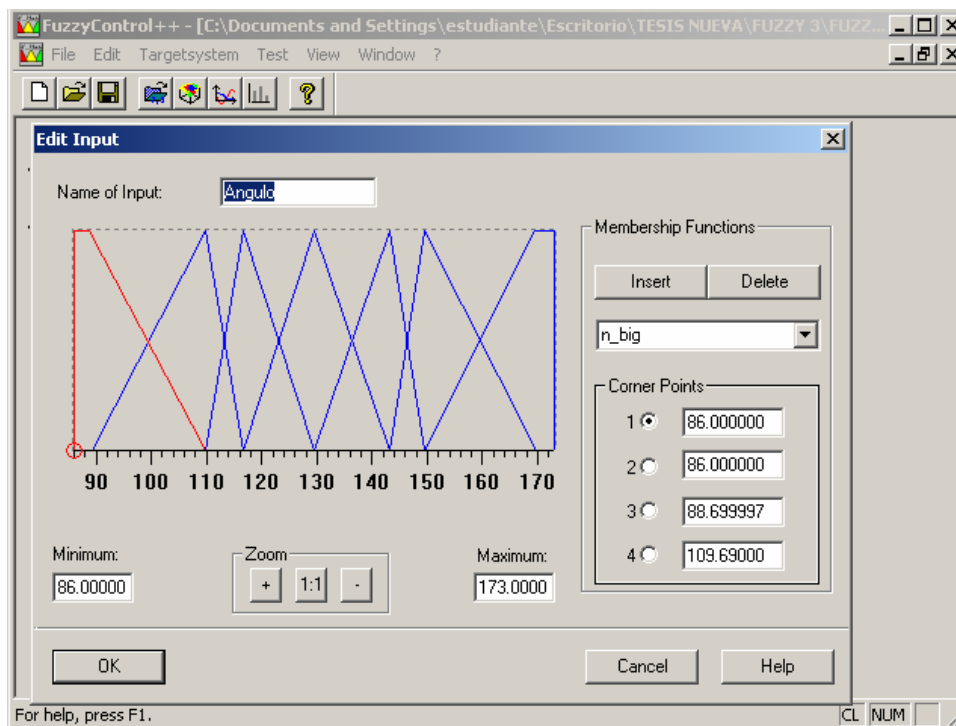
Como se observa en la imagen, el documento está compuesto por un conjunto de entradas (a la izquierda del rectángulo vertical) y un conjunto de salidas (a la derecha del rectángulo vertical), así como una base de reglas intermedias representadas por un rectángulo vertical central. Los menús desplegables en la barra de herramientas son los tradicionales File (Archivo), Edit (Edición), View (Ver) y Window (Ventana) que poseen los programas que trabajan en el entorno Windows. Además se encuentran el menú Targetsystem, utilizado para la conexión con el autómata; y el menú Test, utilizado para ejecutar las herramientas de visualización y control del bloque fuzzy. Al momento de crear un programa nuevo, aparece una estructura básica como la mostrada en la figura, la cual posee una entrada, una salida y

un cuadro de reglas. Para agregar entradas o salidas basta con hacer clic derecho en el rectángulo vertical principal, y seleccionar “Add Input” o “Add Output” respectivamente. Los mismos comandos pueden encontrarse en el menú desplegable “Edit”.

9.2.2 Edición de entradas

Para entrar al campo de edición de una entrada, se hace clic doble sobre el rectángulo horizontal que la representa. El cuadro de diálogo que aparece a continuación se muestra en la [figura 50](#).

Figura 50. Edición de entradas.



En esta ventana se pueden editar el nombre de la entrada (Name of Input), así como la cantidad y el nombre de las funciones de pertenencia (Membership Functions). El primer paso en la definición de una entrada es

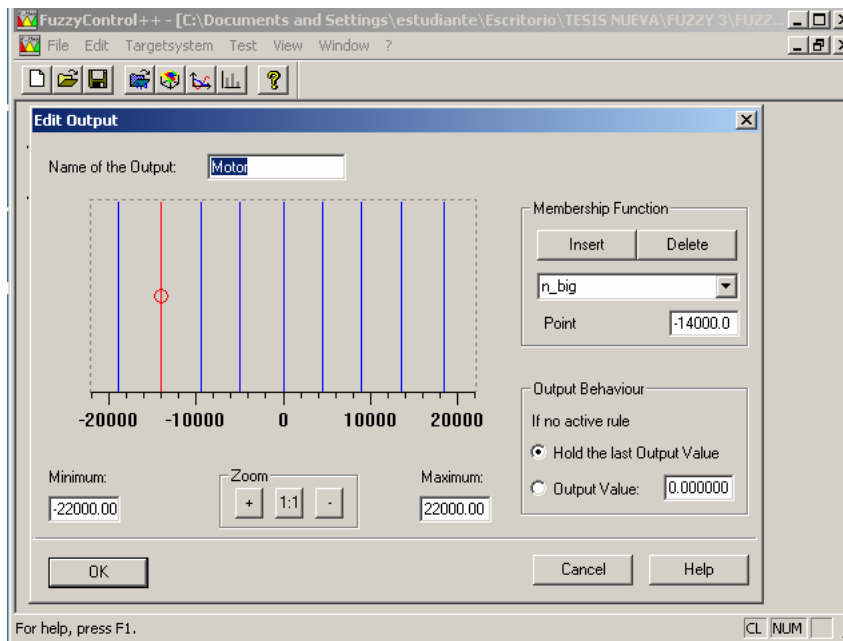
delimitar su dominio. Esto se logra fijando los límites inferior y superior en las casillas “Minimum” y “Maximum”. Después de realizar esta operación, se procede a insertar la cantidad necesaria de funciones de pertenencia, utilizando el botón “Insert”. Los nombres de las funciones de pertenencia son editables, y en totalidad pueden utilizarse hasta siete funciones por variable. Para definir la geometría de cada conjunto, puede utilizarse la herramienta “Corner Points”, en la cual se da un valor a cada uno de los cuatro puntos que lo delimitan. Estos puntos son, en orden descendente, inferior izquierdo, superior izquierdo, superior derecho e inferior derecho. Haciendo que los valores 2 y 3 sean iguales, se obtiene una función de forma triangular. Hay que tener en cuenta que la función debe estar seleccionada y resaltada en rojo para poder editarse. Esta selección se hace con un clic del mouse sobre ella.

9.2.3 Edición de salidas

La edición de salidas se activa de igual forma que la edición de entradas, iniciando un cuadro de diálogo para funciones tipo singleton (*figura 51*).

Las herramientas de edición son bastante similares, y el procedimiento sigue los mismos parámetros que el ítem anterior. La diferencia básica radica en que no es necesaria la definición de cuatro puntos por función, sino de un punto único, dada la característica singleton de estas salidas. De igual forma, se hace necesaria la definición del comportamiento de las salidas, cuando no se cumple ninguna regla de pertenencia según la lógica desarrollada. Este comportamiento puede ser el mantener el último valor registrado o cargar en la salida un valor constante predefinido. Según sea el caso, se activa la casilla de verificación correspondiente. Esta última herramienta es de alta importancia en la sintonización del sistema, ya que puede generar inestabilidades en caso de seleccionar el tipo de comportamiento de manera incorrecta.

Figura 51. Edición de salidas.

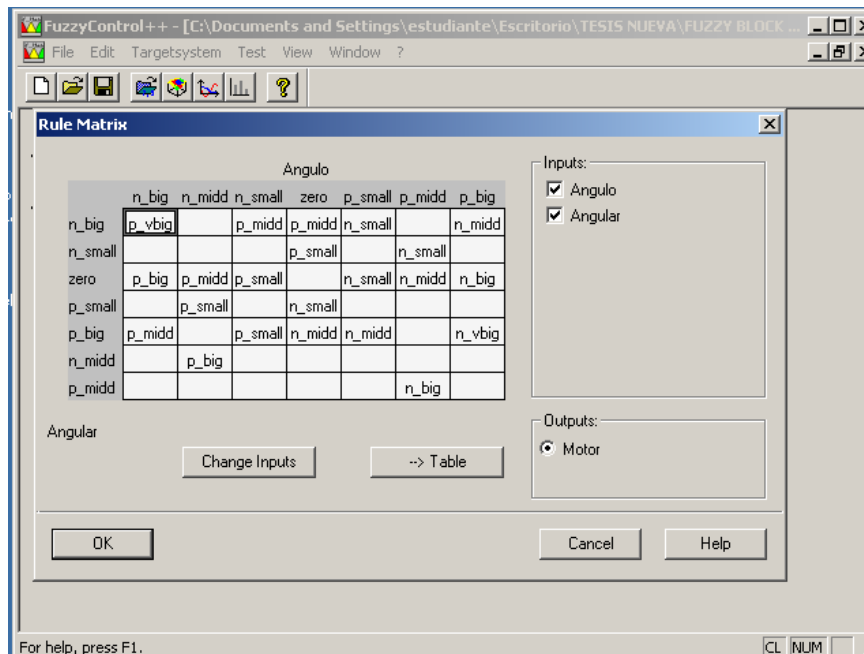


9.2.4 Edición de reglas

Para editar las reglas de evolución, se hace doble clic sobre el rectángulo vertical para abrir el diálogo de edición de la [figura 52](#). Si el pantallazo inicial de diálogo es diferente al mostrado en la figura, se activa el botón “Matrix” para acceder a la matriz de reglas. En esta matriz se define la función de salida correspondiente a la combinación de las funciones de entrada. Esta combinación está representada por el cruce de las casillas horizontales y verticales de la matriz. El porcentaje de pertenencia del resultante se define según las operaciones explicadas en el ANEXO I de estas memorias. No es necesario de ningún modo llenar todos los campos, ya que es posible que se prefiera considerar que algunas combinaciones de entrada no generan ninguna función de salida. En este caso, el parámetro “Output Behaviour” expresado en el ítem anterior rige el comportamiento de la salida del bloque fuzzy correspondiente a la combinación seleccionada. Este parámetro se

combina entonces con las demás pertenencias presentes en el momento para generar el valor de la salida.

Figura 52. Edición de reglas de evolución.



9.3 LA COMUNICACIÓN CON EL AUTÓMATA

Para establecer la comunicación entre el FuzzyControl++ y el autómata programable, se hace necesaria la instalación del software de interface Siemens Simatic Net (Softnet). Los pasos para lograr una comunicación exitosa entre los paquetes se resumen a continuación.

9.3.1 Selección del sistema de destino.

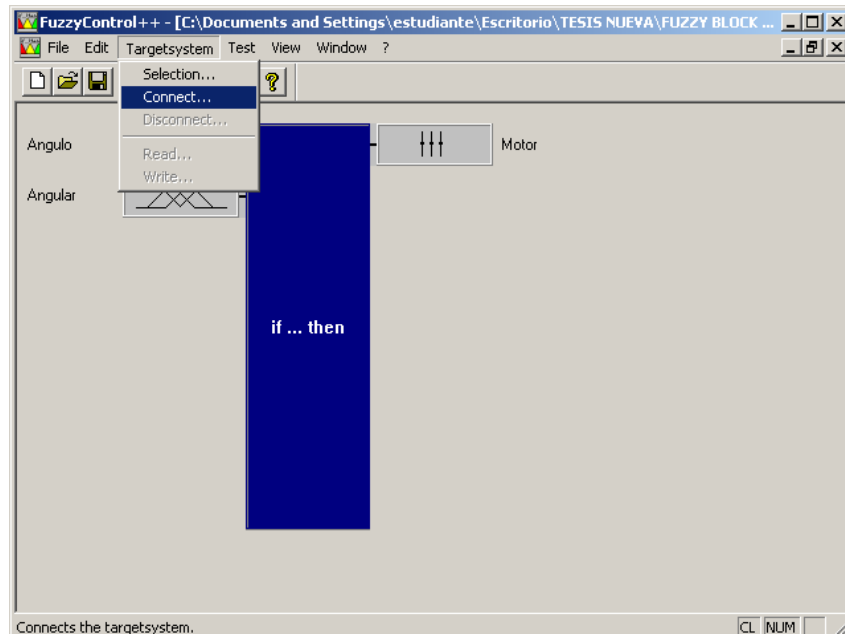
El sistema de destino se selecciona en el menú desplegable "Targetsystem", activando el comando "Selection". Al realizar esta operación, aparece un control desplegable que contiene los distintos sistemas con que puede

comunicarse el paquete fuzzy. Entre ellos, se elige el autómata “Simatic S7 300”.

9.3.2 Conexión

En el menú desplegable “Targetsystem”, se selecciona el comando “Connect”, como se muestra en la [figura 53](#).

Figura 53. Conexión al sistema de destino.



Es normal que se genere un mensaje de error al activar este comando, producto de la plataforma original para la cual se diseñó el software de control fuzzy, esto es, Windows 95. Este error se visualiza con la ventana mostrada en la [figura 54](#).

El problema se soluciona simplemente dando la ubicación correcta del archivo de comunicación entre los paquetes, utilizando el comando “Browse” de la ventana mostrada en la [figura 55](#), la cual se genera al dar “Aceptar” sobre el mensaje de error. El archivo se llama s732.dll, y se ubica en la

carpeta system32. La dirección completa es generalmente C:\Archivos de Programa\WinNT\system32, aunque depende de la versión instalada de Windows.

Figura 54. Mensaje de error de conexión.

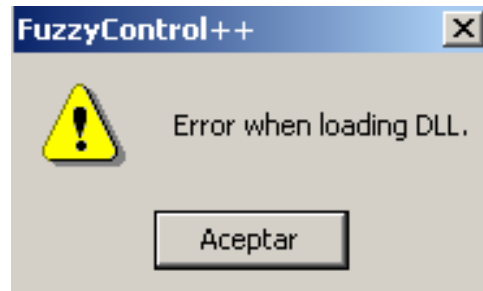
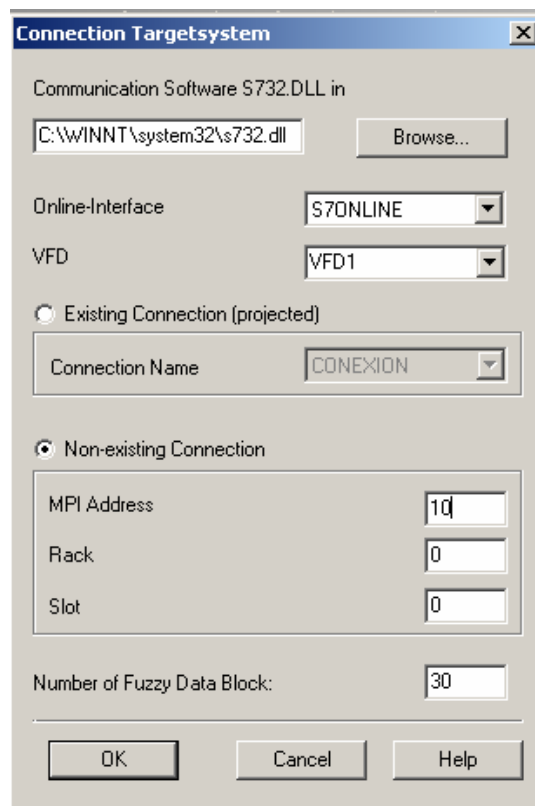


Figura 55. Parámetros de conexión.

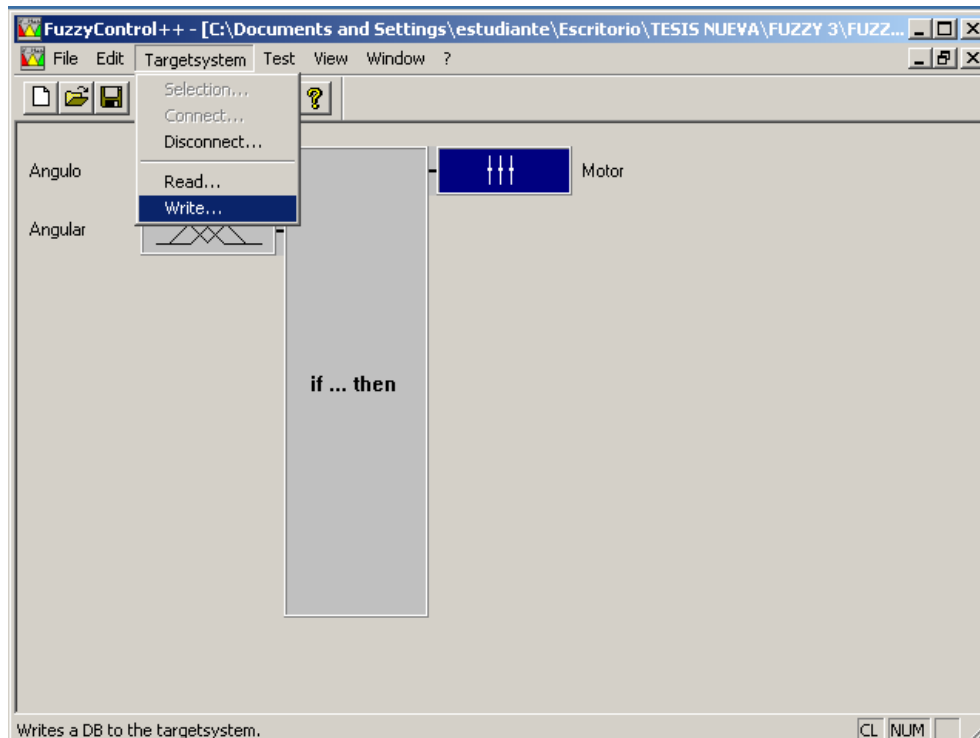


Para finalizar la conexión de manera exitosa, es necesario verificar la casilla “Non-existing Connection”, y seleccionar en el campo “MPI Address” la dirección MPI del autómatas, como se muestra en la figura.

9.3.3 Envío de la información al bloque de datos fuzzy

Para finalizar la programación es necesario enviar la información al bloque de datos del autómatas. Esto se logra utilizando el comando “Write” del menú desplegable “Targetsystem”.


Figura 56. Escritura del bloque de datos fuzzy.





9.4 VISUALIZACIÓN Y MONITOREO

El programa cuenta con funciones de visualización y monitoreo que permiten realizar el diagnóstico del funcionamiento del sistema. La primera

herramienta nos muestra la región tridimensional de la salida fuzzy en función de las entradas, de acuerdo a las funciones de evolución definidas.

Esta herramienta se activa con el icono  de la barra de herramientas.

Existen de igual forma la herramienta de visualización de variables y de

reglas, las cuales se activan con los íconos  y  de la barra de herramientas, respectivamente. En el capítulo 12, donde se resumen los resultados de los primeros ensayos desarrollados sobre el banco, se observa la apariencia de estas ventanas de visualización.

10 DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

10.1 DISEÑO ELÉCTRICO

El banco cuenta con un sistema eléctrico de potencia que permite controlar la alimentación de todos los elementos del mismo, como son el variador de velocidad, el motor, el ventilador del motor, y el freno del péndulo. La premisa básica al diseñar el mismo fue tomar la alimentación de todos los dispositivos usando un único conector externo a toma trifásica. Este conector tienen las tres fases de 110 VAC, el neutro y la tierra, por lo que permite realizar todas las alimentaciones necesarias para el funcionamiento del banco.

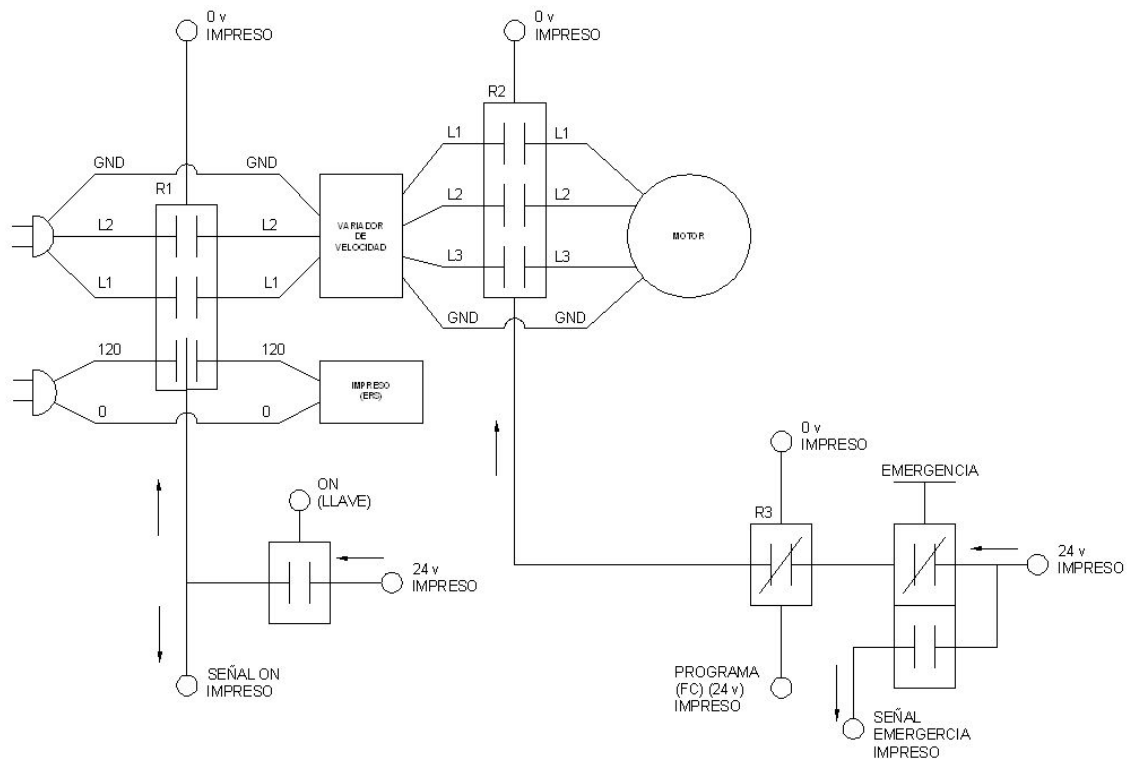
El panel de control y los sensores se alimentarán utilizando el voltaje generado por el autómeta. El sistema eléctrico se controla con señales de 24 VDC generadas ya sea desde el API o directamente desde los interruptores del panel de control.

En la [figura 57](#) se muestra un esquema del circuito de potencia del banco. Este cuenta con tres relés de potencia activados con una bobina a 24 VDC. Como se observa en el diagrama, este control de potencia permite eliminar cualquier voltaje de alimentación eléctrica (120 VAC) desactivando el interruptor con llave "ON", el cual controla el relé R1. Los contactos de este relé se utilizan para las fases de alimentación del variador y el control del freno electromagnético. Se debe evitar la activación y desactivación constante de este interruptor, debido a que puede ocasionar daños en el variador de velocidad.

La combinación de los relés R2 y R3 permite controlar de forma directa la aplicación o no de voltaje sobre las terminales del motor. En los contactos del relé R2 se encuentran cableadas las tres fases de alimentación del motor, tomadas a la salida del variador de velocidad. Esto habilita la desconexión

del motor sin apagar el variador. Este relé se controla directamente con el contacto normalmente cerrado del pulsador “Emergencia”, lo cual indica que al activar el pulsador y generar la señal de paro, el motor se desconecta. De igual manera, la señal creada por la activación de los finales de carrera extremos (generada desde el programa de control) desconecta el motor. Se ha decidido enviar esta señal desde el programa, ya que de generarla físicamente (haciendo puente de la alimentación de la bobina del relé por un contacto NC de los finales de carrera) se imposibilita el posicionamiento del carro en un estado de emergencia, obligando a un proceso manual de reposición.

Figura 57. Esquemático del circuito eléctrico del banco.



10.2 DISEÑO ELECTRÓNICO

El circuito electrónico a utilizar en el banco es una de las partes fundamentales del mismo, ya que permite realizar las operaciones de control sobre los diversos componentes eléctricos y electrónicos. Entre estas operaciones se cuenta el control sobre el variador de velocidad, el manejo del freno electromagnético acoplado sobre el eje del motor, la adquisición de las señales de entrada (detectores de posición, panel de control), alimentación y toma de señales desde el encóder y control de la parte de potencia eléctrica del banco. El circuito electrónico incluye también el manejo de señales del panel de control.

El objetivo inicial al desarrollar este diseño electrónico fue crear un circuito que controlara todas las operaciones mencionadas, en un control único central. A continuación se describe el desarrollo del circuito electrónico para cada uno de los dispositivos utilizados, y su montaje final en tarjeta impresa. El circuito constituye la interface entre el autómeta y los demás componentes del banco. Por lo tanto, el componente central es el conector estándar de 36 pines del autómeta.

10.2.1 Control electrónico del variador de velocidad

El variador de velocidad utilizado en el presente proyecto es marca Allen Bradley, modelo seguidor analógico, con capacidad máxima para motor de 0.5HP. Según el catálogo del fabricante, hay diversos modos de realizar el cableado de control según las necesidades específicas de la aplicación. En este caso, se requiere realizar control utilizando una señal analógica (cableada desde el API).

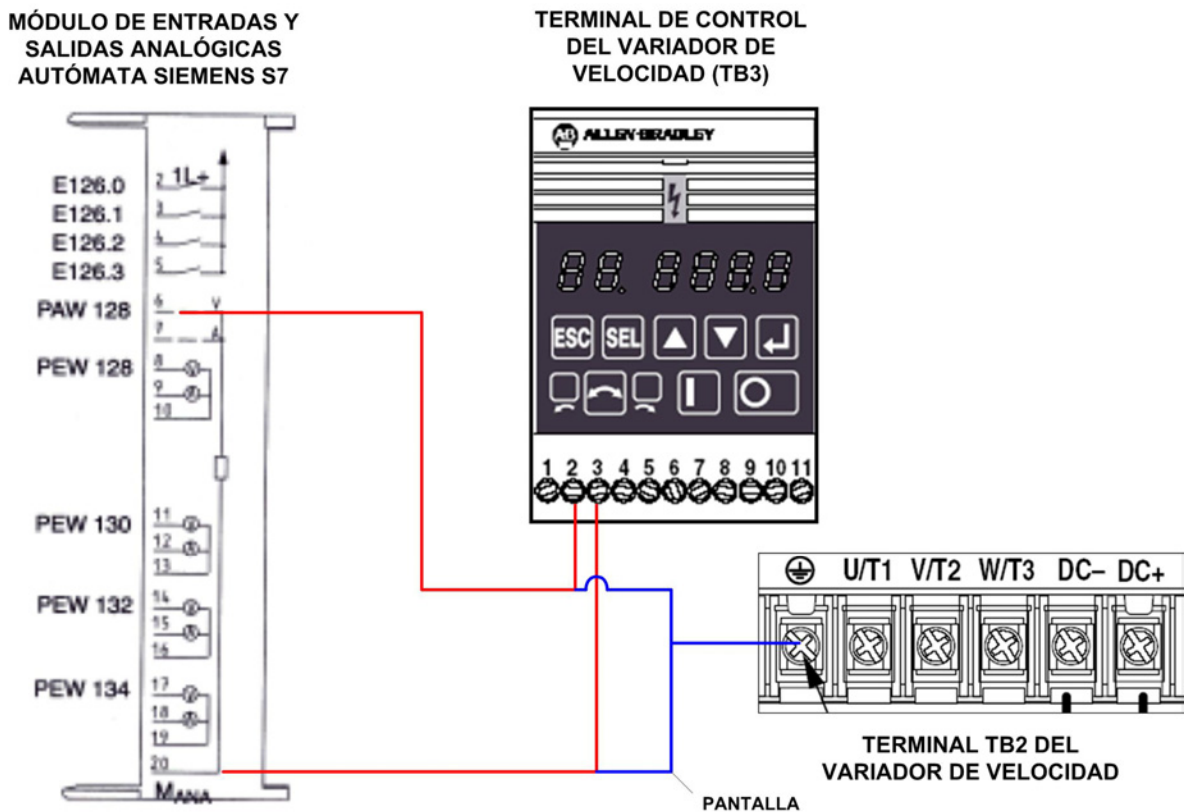
El autómeta programable utilizado (Siemens S7) cuenta con una salida analógica integrada, cuyas características se consigna en la [tabla 6](#).

Tabla 6. Características de las salidas analógicas integradas al API.

Cantidad salidas	Separación galvánica	Resolución	Margen de salida	Valor máximo de salida (límite de destrucción).
1	Si	11 bits + signo	-10.....10 V	±15 V durante máx. 1 seg.
			-20.....20 mA	30 mA

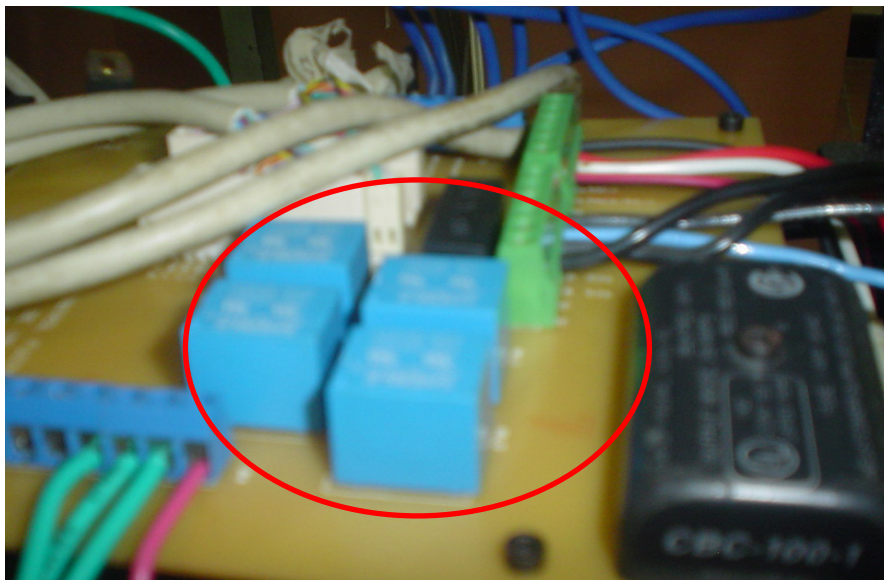
El cableado correcto entre la señal analógica y el variador se muestra en la [figura 58](#). Para realizar este cableado, se utiliza la bornera de control del variador (TB3) ubicada en la parte frontal del mismo, y la bornera correspondiente a la salida analógica del API (PAW 128). El cable utilizado en este proceso es cable apantallado calibre 16. La pantalla de este cable se aterriza en la tierra del variador de velocidad.

Figura 58. Cableado salida analógica API – variador.



El variador requiere, además del cableado analógico, el control de los comandos de Start, Stop y Reverse. Para realizar este control, es necesaria la utilización de contactos secos del tipo todo – nada, haciendo puente entre la señal de voltaje común de la bornera de control del variador (TB3 – 7) y los comandos mencionados (TB3 – 5, TB3 – 6 y TB3 – 8). Los contactos secos utilizados fueron relés comerciales con bobina a 24V DC, con capacidad en los contactos de hasta 240V y 5A. El voltaje del puerto común en la bornera de control del variador es de 10V DC. Estos relés se montaron sobre el circuito impreso PCB, como se muestra en la [figura 59](#).

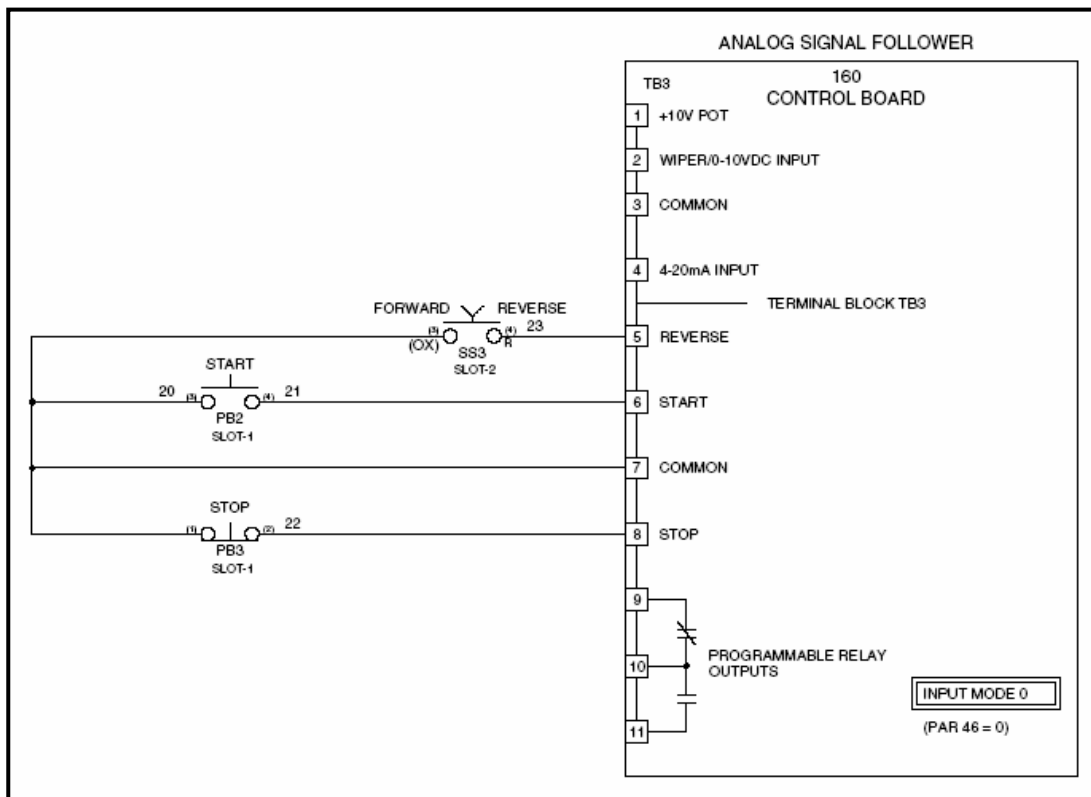
Figura 59. Montaje de relés en circuito impreso.



De acuerdo al montaje realizado, y siguiendo los parámetros especificados en los manuales del fabricante, el control a realizar se define como control a tres cables, ya que se manipula de forma independiente cada uno de los comandos en la bornera del variador. Esto quiere decir que el funcionamiento del variador esta supeditado a la presencia de la orden Start, la ausencia de la orden Stop, y siguiendo el sentido de giro indicado por la

orden Reverse (contacto cerrado – sentido de giro inverso). Sin embargo, la gran versatilidad del variador permite modificar este tipo de control mediante la programación interna del mismo, permitiendo por ejemplo la eliminación de la orden Reverse cuando se trabaja con una señal analógica bipolar (-10 a 10 V DC). Para mayor información, consultar el catálogo del fabricante. El diagrama del control a tres cables desarrollado se observa en la [figura 60](#). Es importante anotar que para poder realizar este tipo de control, el parámetro 46 de la programación del variador debe estar en cero (0).

Figura 60. Control de tres cables sobre el variador.

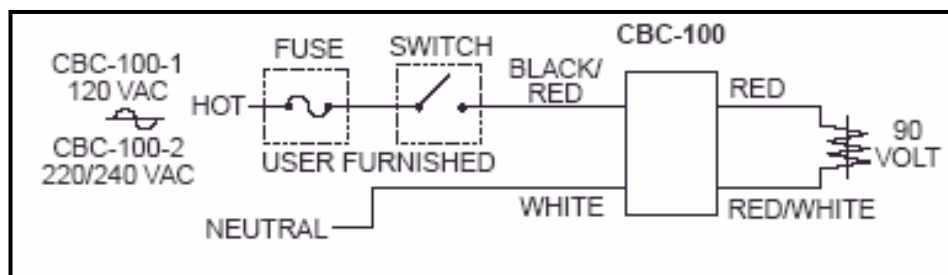


10.2.2 Control del freno electromagnético del motor

Para realizar el bloqueo del sistema al movimiento manual cuando este se encuentra apagado o en operaciones de emergencia, se ha dispuesto la colocación de un freno electromagnético) sobre el eje del motor. En nuestro caso, se decidió utilizar un freno marca Warner Electric, tipo ERS-26; debido a la disponibilidad del mismo en la Escuela de Ingeniería Mecánica. Al realizar un estudio de las principales características de este dispositivo, se encontró que es apto para realizar la labor de bloqueo del motor.

Este dispositivo trabaja con una tensión de 90 VDC. Debido a que el banco cuenta con una alimentación directa de tres líneas a 120 VAC, con una tierra y un neutro, no es posible utilizar estas líneas para dar potencia al freno electromagnético. Se hace necesario el uso de un dispositivo estándar de conversión de voltaje, distribuido por los fabricantes del freno y diseñado especialmente para este propósito. Este dispositivo se denomina Warner Electric CBC-100. Según el catálogo del fabricante, la forma de conexión del mismo requiere un interruptor de activación y un fusible de potencia. El diagrama de conexión se muestra en la [figura 61](#).

Figura 61. Diagrama de conexión del dispositivo CBC-100.



En este diagrama, la bobina que se observa al lado derecho representa el freno electromagnético. Es importante especificar que el freno electromagnético utilizado es del tipo FAIL SAFE BREAK, esto quiere decir, que se activa cuando se interrumpe la corriente hacia el mismo. De esta

forma, en cualquier instante en que el banco se encuentre apagado, el freno estará bloqueando la rotación del motor. El circuito mostrado en la figura se encuentra integrado a la tarjeta central de control.

10.2.3 Alimentación y toma de señales del encóder

El sensor rotativo utilizado en este proyecto es un encóder marca Omron del tipo absoluto, con 256 ppr de resolución. Las características más importantes de este dispositivo se relacionan en la [tabla 7](#).

Tabla 7. Características técnicas del encóder.

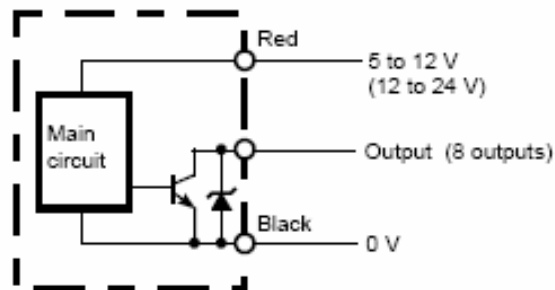
Modelo	E6CP-AG3C	E6CP-AG5C/E6CP-AG5C-C
Rango de tensión de operación	5 Vc.c. -5% a 12Vc.c. +10%, rizado (p-p): 5% máx.	12 Vc.c. -10% a 24Vc.c. +15%, rizado (p-p): 5% máx.
Consumo	70mA máx.	
Tipo de salida	Colector abierto	
Capacidad de salida	Tensión aplicada: 28Vc.c. máx. Corriente: 16mA máx. Tensión residual: 0,4V máx. (a 16mA de corriente)	
Frecuencia de respuesta máxima	5 kHz	
Código de salida	8 bits (código Gray)	
Lógica de salida	Lógica negativa: Alta= 0, Baja = 1	
Precisión	+/- 1° máx.	
Dirección de rotación	Sentido horario	
Tiempo de respuesta	1µseg. máx. (con salida de control de 16 V y resistencia de carga de 1kΩ, con cable de salida de 2m)	
Par de arranque	10g-cm máx.	
Momento de inercia	10g-cm ² máx.	
Carga del eje	Radial	3kg
	Axial	2kg
Velocidad de giro máxima	1000 rpm	
Temperatura ambiente	Operación: de -10° a 55°C	
Grado de protección	IEC: IP50	
Resistencia a vibraciones	de 10 a 55 Hz, 1,5mm de amplitud p-p durante 2 horas en cada dirección X, Y, Z	
Resistencia a golpes	100 G's 3 veces en cada dirección X, Y, Z	

El modelo seleccionado en particular es el **encóder Omron E6CP-AG5CC**, debido a que este se alimenta con un voltaje en el rango de 12 a 24 VDC, lo que lo hace compatible con el voltaje de trabajo de las señales del API, el cual está en el rango de los 24 VDC ±10%.

La combinación de las señales del encóder genera el indicador de posición absoluta del péndulo. Como se especifica en la tabla, el sensor es de salida tipo “colector abierto”. Esto significa que los terminales de salida requieren

una alimentación para poder generar señal, ya que ellos poseen un transistor interno que desvía el voltaje aplicado enviándolo a tierra o reenviándolo como señal, según el pulso generado por la posición angular del eje. El giro del encóder provoca la activación de estos transistores, generando de esta forma la combinación de señales en código gray que me indica la posición absoluta del péndulo. En la [figura 62](#) se muestra la configuración básica de las salidas tipo colector abierto.

Figura 62. Esquema de conexión de salidas tipo colector abierto.



El circuito para conexión de estas señales se integró a la tarjeta principal, como lo muestra el diseño definitivo. Se añadieron unas resistencias a la entrada de señal en el encóder, para regular el voltaje en los terminales. Estas resistencias tienen un valor nominal de 816 ohms. Con estas resistencias, se calcula un voltaje máximo en los terminales de 14.7 VDC, y una corriente máxima de 11.6 mA. De acuerdo a las especificaciones técnicas del encóder, estos valores están dentro de los límites seguros de trabajo del sensor.

Como elemento de seguridad adicional, se colocaron unos diodos comerciales que regulan el sentido de flujo de la corriente desde el sensor hacia el autómeta, evitando posibles retornos de voltaje hacia el sensor.

En el catálogo del encóder (referenciado en el ANEXO B) se encuentra el código de colores utilizado en el cableado tanto de alimentación como de señales. La alimentación del encóder se hizo con un voltaje regulado mediante un transistor comercial referencia LM7815C. Este voltaje está alrededor de los 17 VDC, valor acorde al rango de operación del dispositivo. En el circuito impreso se cablearon estas señales desde un conector estándar de 15 pines.

10.2.4 Interruptores y finales de carrera

Como se indicó anteriormente, se utilizarán cuatro finales de carrera, dos de ellos de alarma y los restantes para indicar fallo. Los interruptores utilizados se describen en el capítulo 6 de este documento. Estos finales de carrera e interruptores se alimentan con la fuente del autómeta, cerrando el circuito hacia la entrada correspondiente a cada uno de ellos. Debido a la ausencia de entradas disponibles, se decidió utilizar una sola señal de entrada para la indicación de finales de carrera de fallo. La configuración mecánica del banco garantiza que cuando se pisa uno de los finales de carrera de fallo, se pise de la misma forma y simultáneamente el final de carrera de alarma del lado correspondiente, lo que nos permite conocer cual de los finales de carrera de fallo se encuentra activado, y desarrollar así la lógica correspondiente. Para conectar todos los interruptores se utilizó un cable estándar de hilos AWG16. El circuito impreso incluye una bornera para calibre de este tipo, la cual contiene un puerto para alimentar el panel de control, y los respectivos conectores para las respectivas entradas en el autómeta.

10.2.5 Control de potencia eléctrica

Como se describió en el numeral 10.1 de este capítulo, para controlar la potencia eléctrica del banco se utilizan unos relés cuya bobina funciona a 24VDC, lo que permite el manejo de los mismos directamente desde el

autómata. La activación de estos relés se hace mediante el contacto normalmente abierto del pulsador ON y el normalmente cerrado del interruptor con enclavamiento de emergencia. Este cableado se hace directamente desde el panel de control a los relés, lo que no involucra el circuito electrónico. Sin embargo, existe una señal que activa el relé 3, y que proviene del programa, como se observa en el esquemático del circuito eléctrico mostrado en la [figura 57](#). Esta señal se genera directamente desde el circuito impreso, con una bornera que conecta directamente este comando de programa a la bobina del relé.

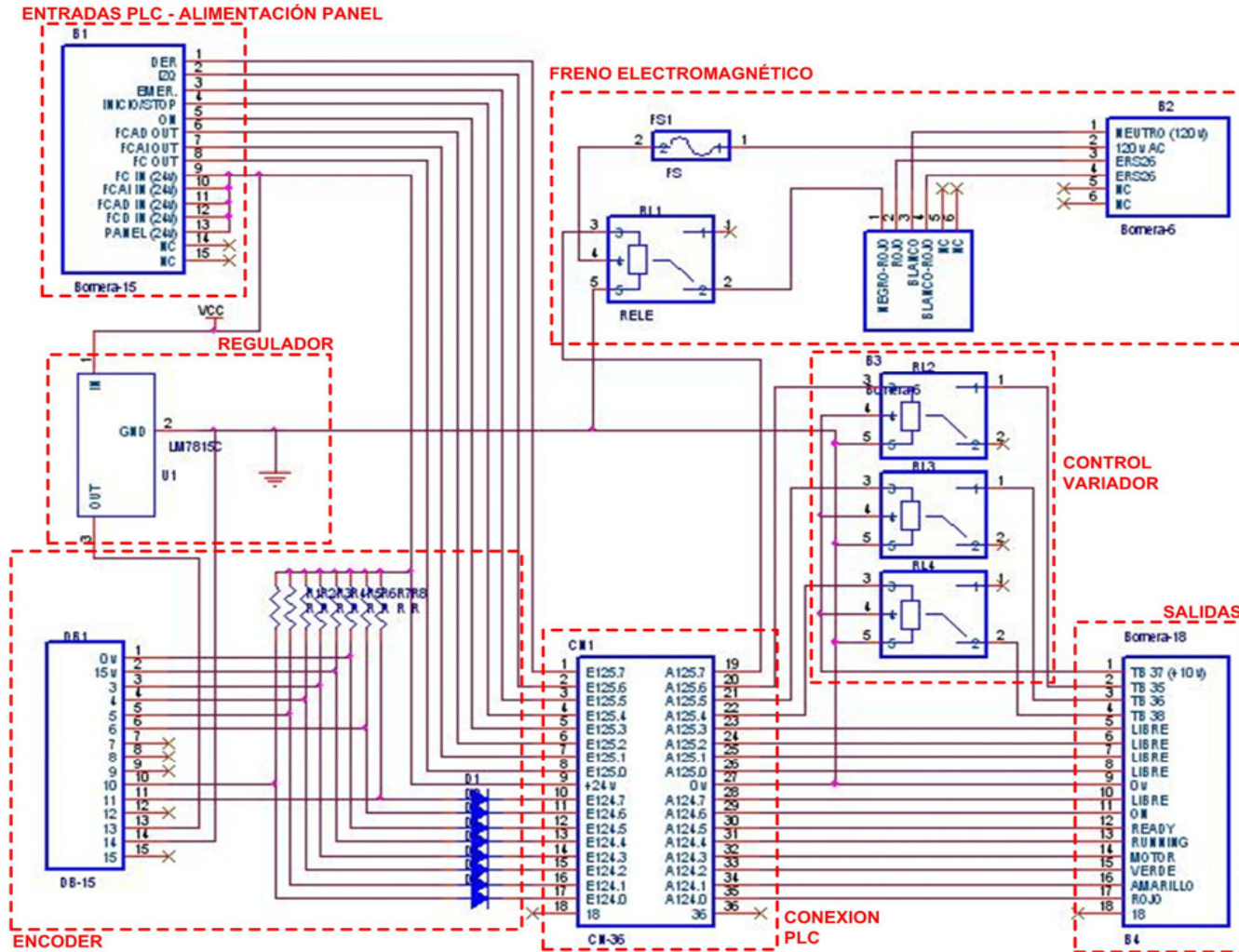
10.2.6 Pilotos digitales en el panel de control

Como se describió anteriormente, el panel cuenta con unos leds indicadores de estado del proceso. Esos leds son digitales, y funcionan a 24 VDC, lo que permite su activación mediante señales de salida del autómata. El funcionamiento de estos dispositivos es bastante sencillo, ya que tan solo necesitan la conexión del voltaje de alimentación en uno de sus puertos, mientras el otro puerto se conecta al neutro. El sentido de conexión de los puertos es totalmente indiferente en este caso, sin influir en el funcionamiento de los leds. De esta forma, el neutro de los leds se conecta a la bornera de neutro en el circuito impreso, y se hace puente entre estos neutros, como se muestra en la [figura 68](#). La alimentación de cada led proviene de la salida del autómata correspondiente. La conexión de estos leds se hace mediante una bornera en el impreso, utilizando cable estándar AWG16.

10.2.7 El circuito electrónico completo

Cada uno de los circuitos descritos anteriormente se integraron en un circuito único central. Este circuito se muestra en la [figura 63](#), detallando las diversas secciones del mismo, correspondientes a los ítems descritos anteriormente.

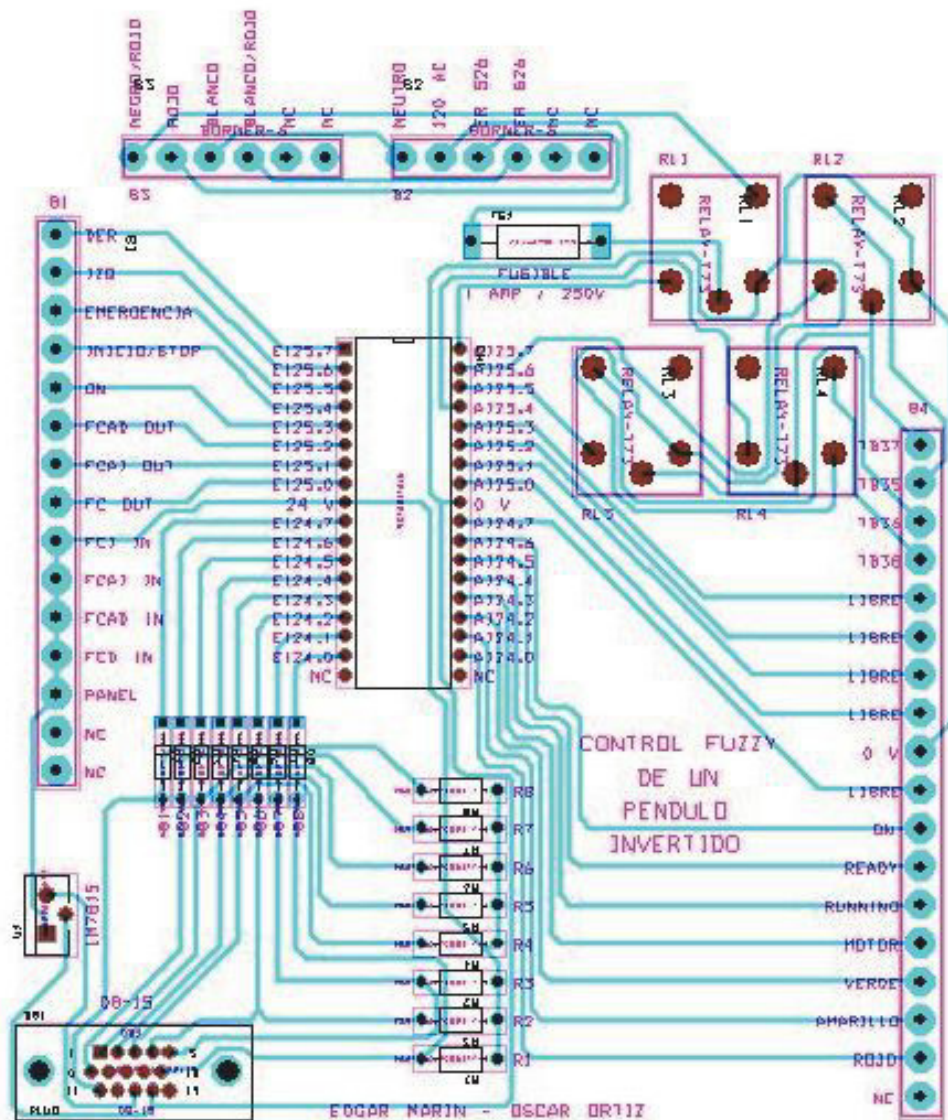
Figura 63. Diseño esquemático del circuito electrónico.



10.2.8 El circuito impreso PCB

El diseño del circuito se compiló en una tarjeta impresa PCB (Printed circuit board) diseñada mediante software especializado. El resultado final del diseño se muestra en la [figura 64](#).

Figura 64. Diseño final PCB del circuito.



10.2.9 Conexiones

Para facilitar la conexión entre el circuito electrónico y los diversos componentes del banco, se han desarrollado los diagramas que se muestran a continuación.

Figura 65. Conexión del freno electromagnético.

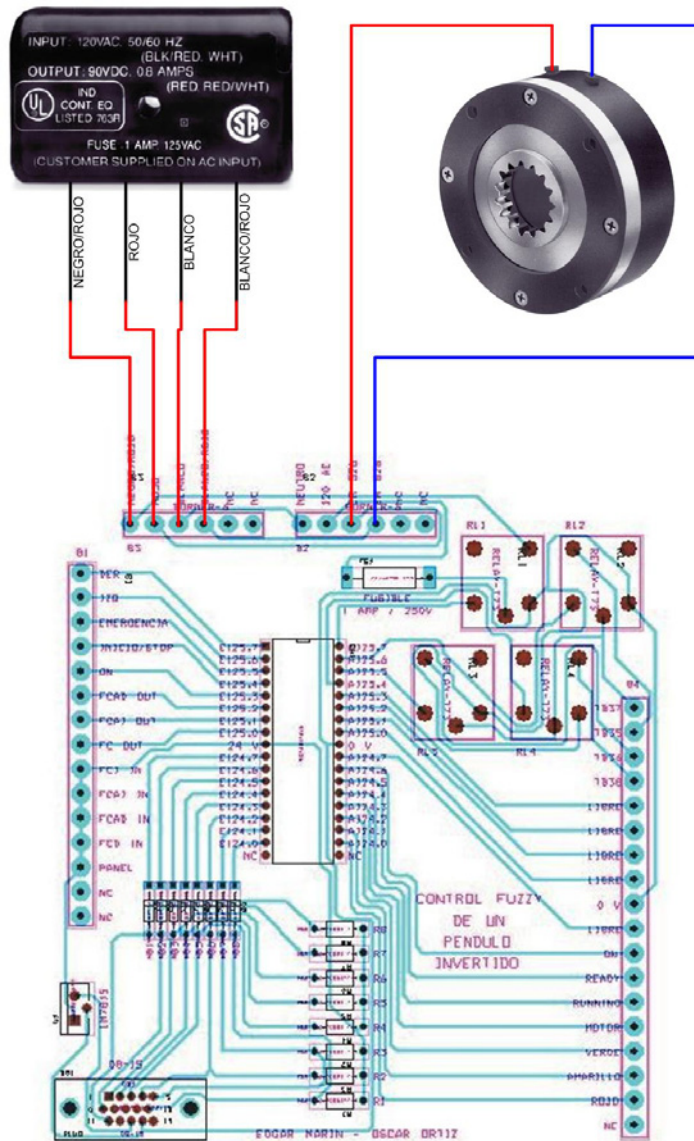


Figura 67. Conexión de interruptores.

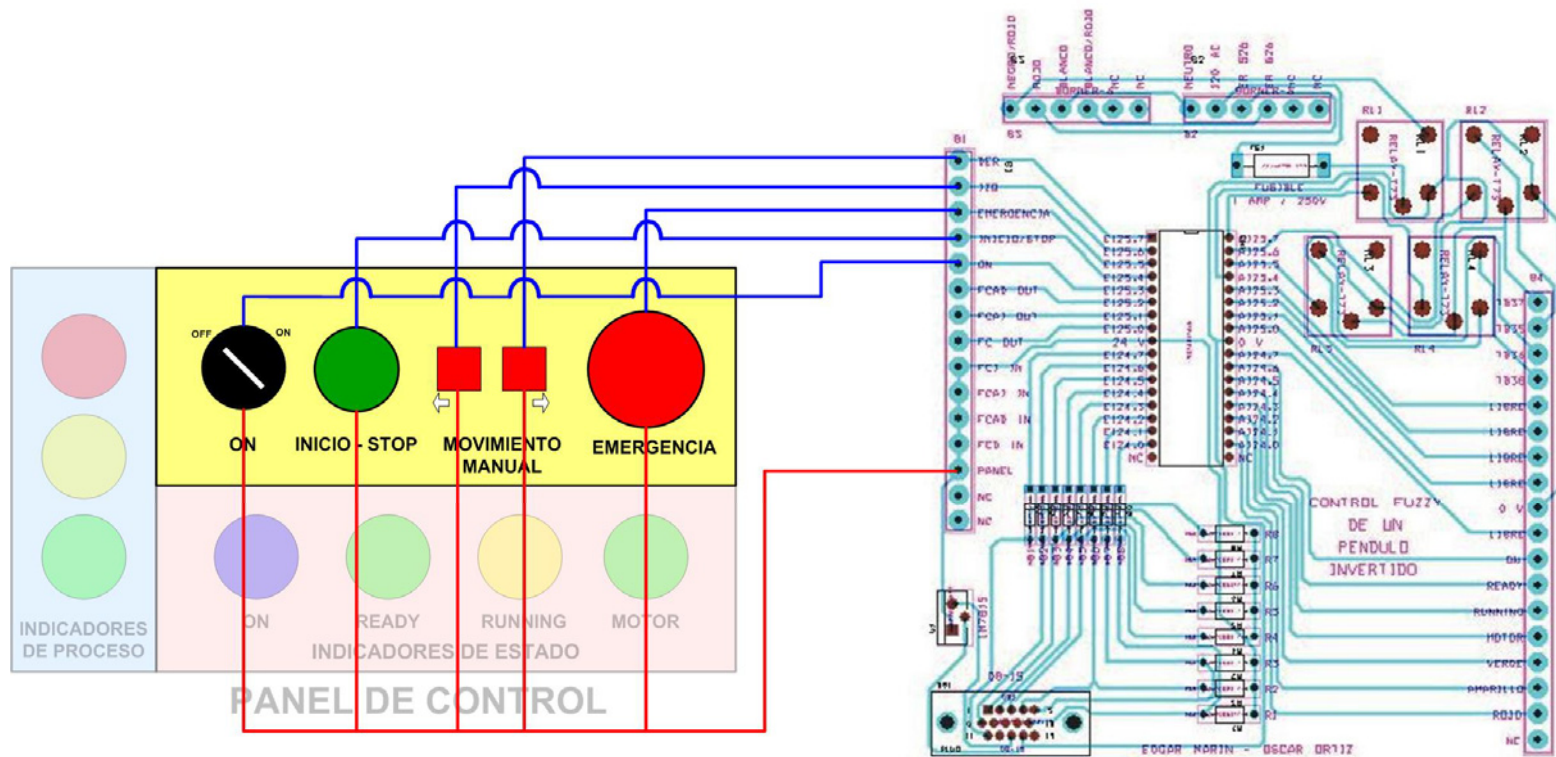


Figura 68. Conexión de los pilotos.

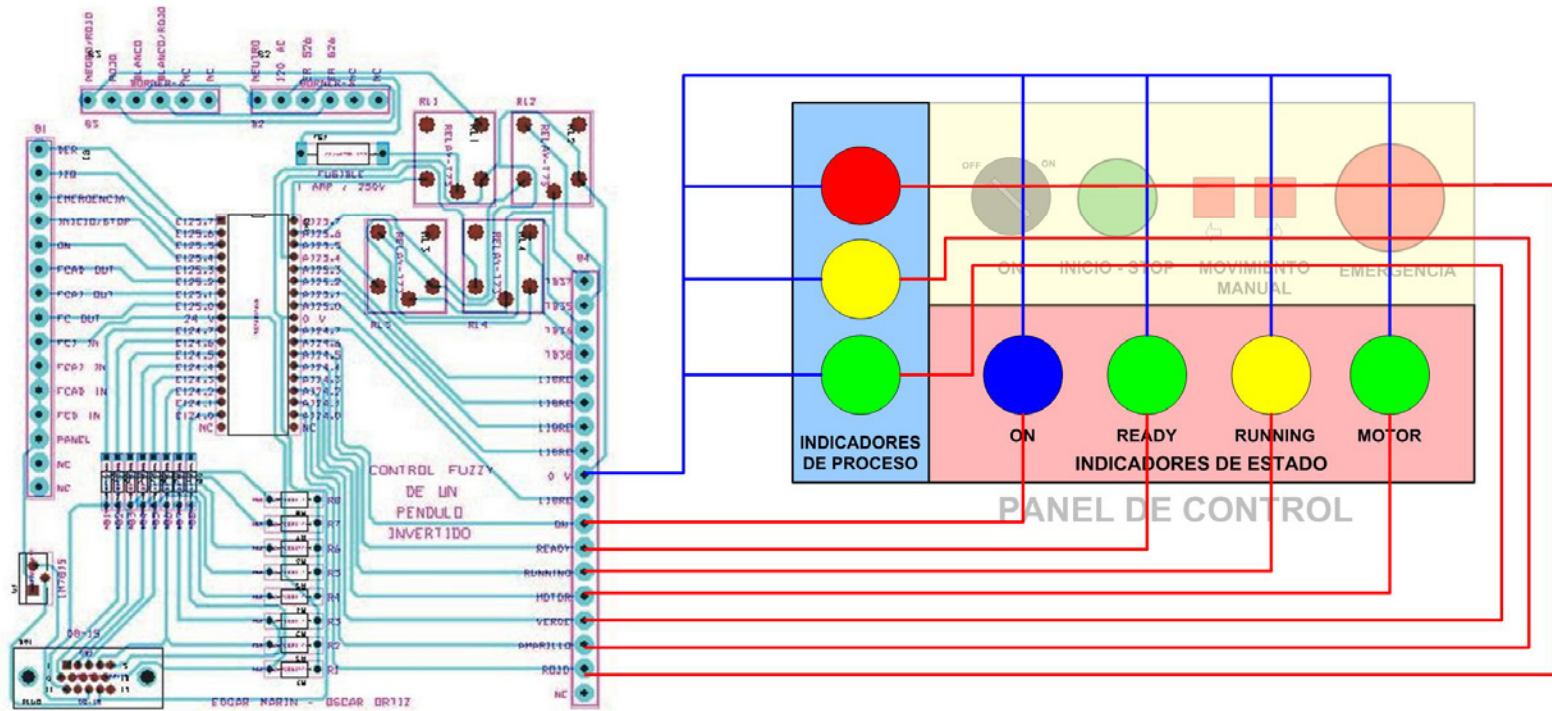
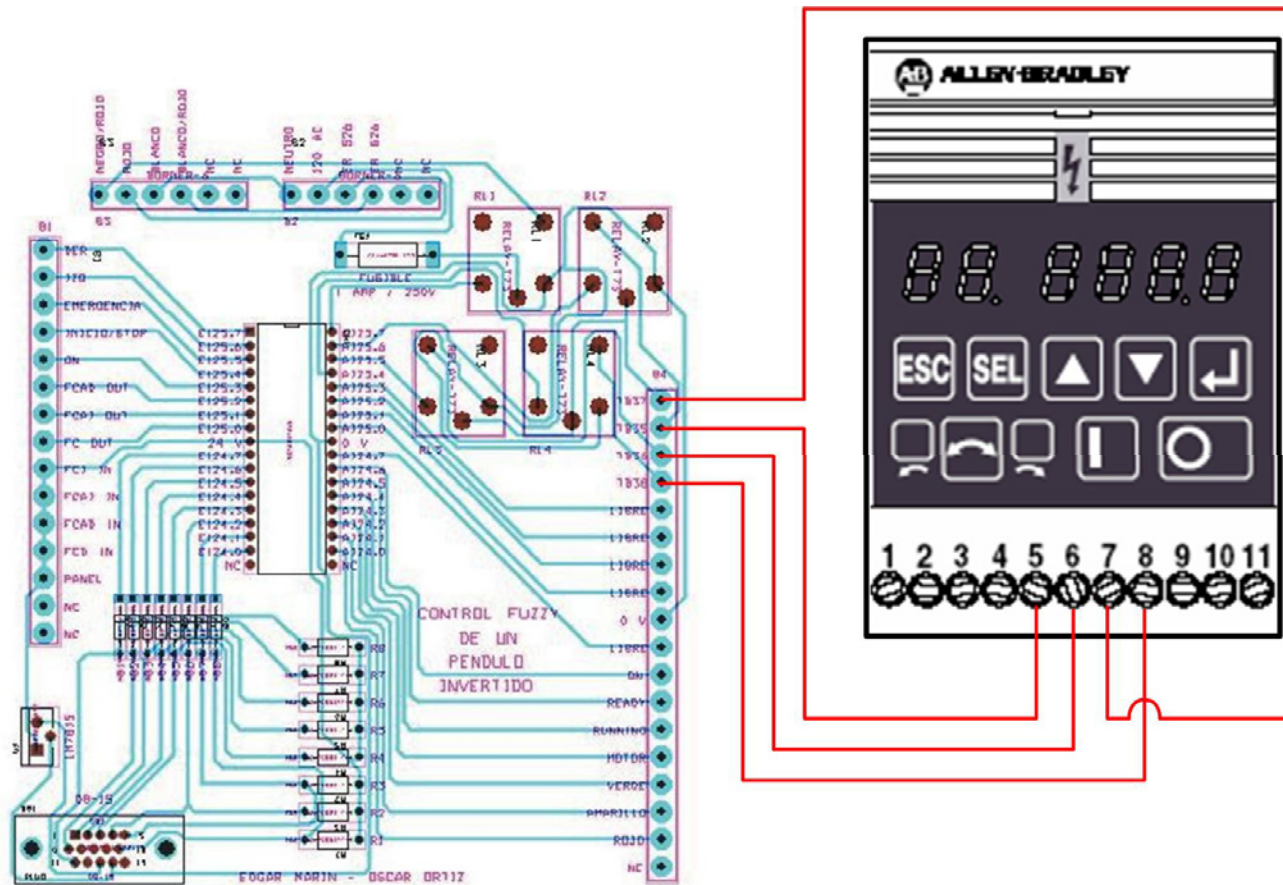


Figura 69. Conexión del variador.



11 EL PROGRAMA

11.1 GRAFCET y GEMMA

El GRAFCET y el GEMMA son modelos de representación gráfica de sistemas automatizados. Con el tiempo se han convertido en estándares básicos de diseño de sistemas de control, siendo incluso un lenguaje de programación incluido en la actualidad en muchos autómatas de gama alta. El GEMMA se constituye en una poderosa herramienta para evaluar los estados de emergencia, puestas en marcha y paradas de un automatismo. A continuación se desarrollan los esquemas básicos de programación del banco, utilizando la representación gráfica basada en estos métodos. Para este diseño, se siguieron las reglas y parámetros consignados en el libro “Autómatas Programables”, de Josep Balcells y José Luis Romeral.⁶

11.1.1 GRAFCET

Para desarrollar el diseño del automatismo basado en GRAFCET, se utilizaron las etapas de funcionamiento del sistema definidas anteriormente. En nuestro caso, se tomarán estas etapas como subrutinas del programa, para facilitar de esta forma el diseño. Esta estructura de rutina principal y subrutinas es acorde con la estructura del programa y los bloques utilizados, como se verá en ítems posteriores. Se diseña una rutina principal que incluye la evolución del sistema por las diversas etapas. Para entender las reglas de evolución y las variables implicadas en las mismas, se hace necesaria la definición previa de ellas, según lo estipulado en el diseño del sistema de control y en la selección de los sensores. Se utilizará el GRAFCET nivel uno en esta etapa del diseño, esto es, una representación

⁶ BALCELLS, Josep; ROMERAL, Jose Luis. Autómatas Programables. México DF. Alfaomega – Marcombo editores. 1998, p 19.

gráfica descriptiva del proceso sin vinculación a las variables utilizadas finalmente en la programación.

Para mantener la coherencia del documento, se utilizaron los nombres de las etapas definidos previamente, numerando las mismas de acuerdo a las reglas básicas y elementos de base definidos en la bibliografía mencionada.

En la [tabla 8](#) se resumen las variables utilizadas en el GRAFCET.

Tabla 8. Relación de variables utilizadas en el GRAFCET.

Variable	Descripción
ON	Interruptor de llave ON
INICIO	Pulsador INICIO - STOP
IZQUIERDA	Pulsador IZQUIERDA
DERECHA	Pulsador DERECHA
EMERGENCIA	Pulsador de enclavamiento EMERGENCIA
FCAD	Final de carrera de alarma derecho
FCAI	Final de carrera de alarma izquierdo
FCA	Presencia de cualquiera de los finales de carrera de alarma
FC	Final de carrera extremo (izquierdo o derecho)
L – ON	Led indicador ON
L – READY	Led indicador READY
L – RUNNING	Led indicador RUNNING
L – MOTOR	Led indicador MOTOR
L – ROJO	Led indicador ROJO
L – AMARILLO	Led indicador AMARILLO
L – VERDE	Led indicador VERDE

En las figuras posteriores se muestra el GRAFCET de la rutina principal y de las subrutinas, según los parámetros establecidos. Hay que recordar que en el álgebra booleana la operación Y se representa por un * (es decir, A y B = A*B) y la operación O se representa por un + (A o B = A+B).

Figura 70. GRAFCET rutina principal.

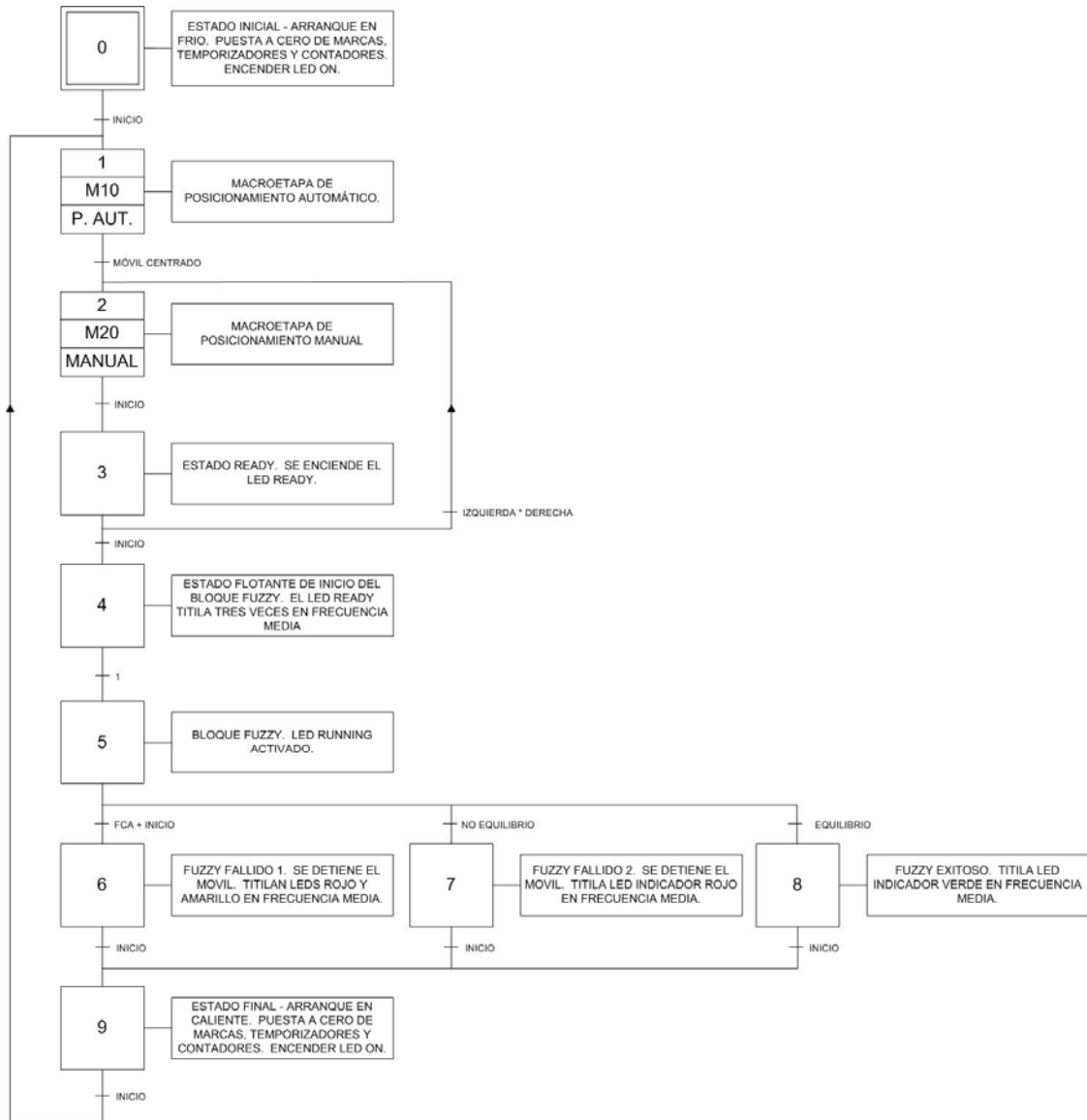


Figura 71. Macroetapa posicionamiento automático.

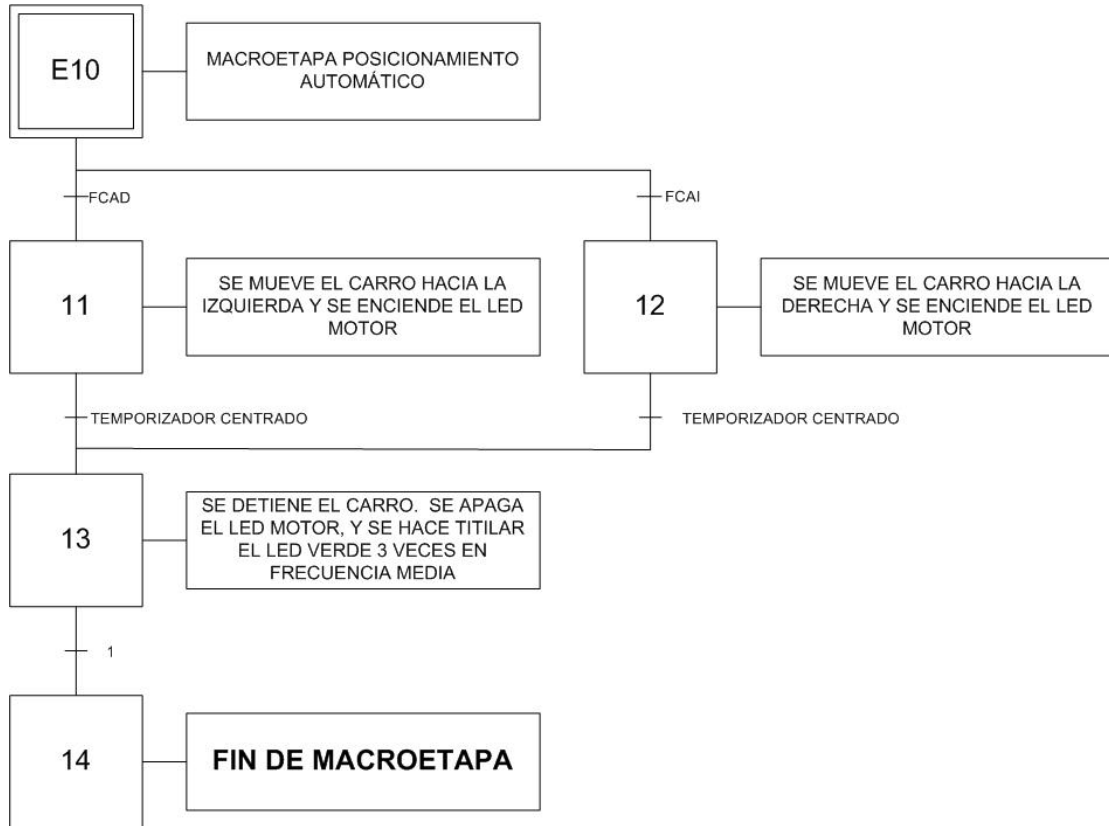
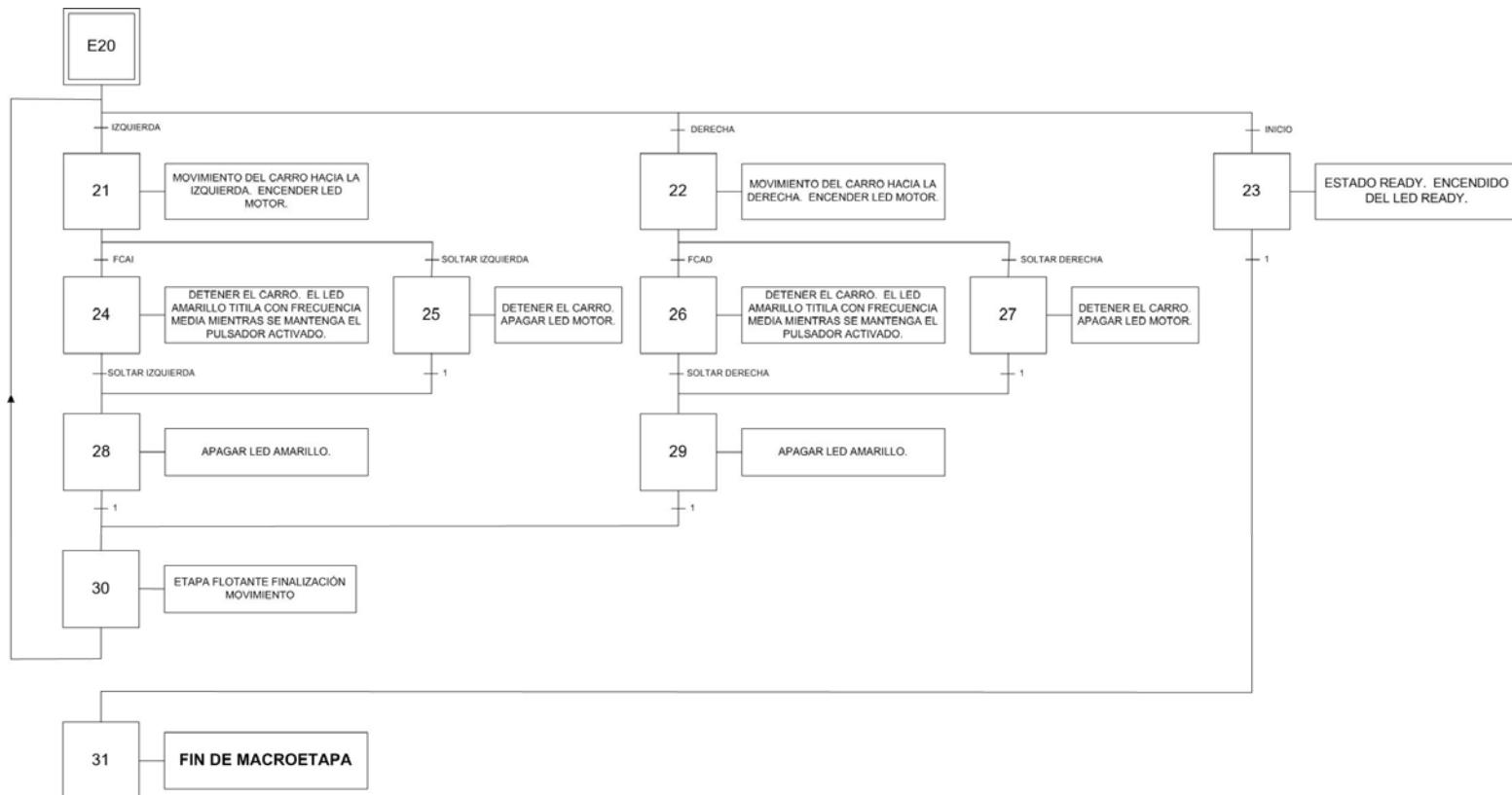


Figura 72. Macroetapa posicionamiento manual.



11.1.2 GEMMA

El GEMMA es un método para el estudio de las posibles situaciones de marcha y parada en que puede encontrarse la parte operativa (PO) de un proceso y las formas de evolucionar de unas a otras. Está apoyado en un útil gráfico que representa una serie de estados tipificados de la PO y muestra las posibles formas de evolución de unos a otros.

Habiendo estudiado los diversos estados posibles de marcha y parada del sistema, se ha llegado a un GEMMA preliminar de diseño, consignado en la [figura 73](#).⁷

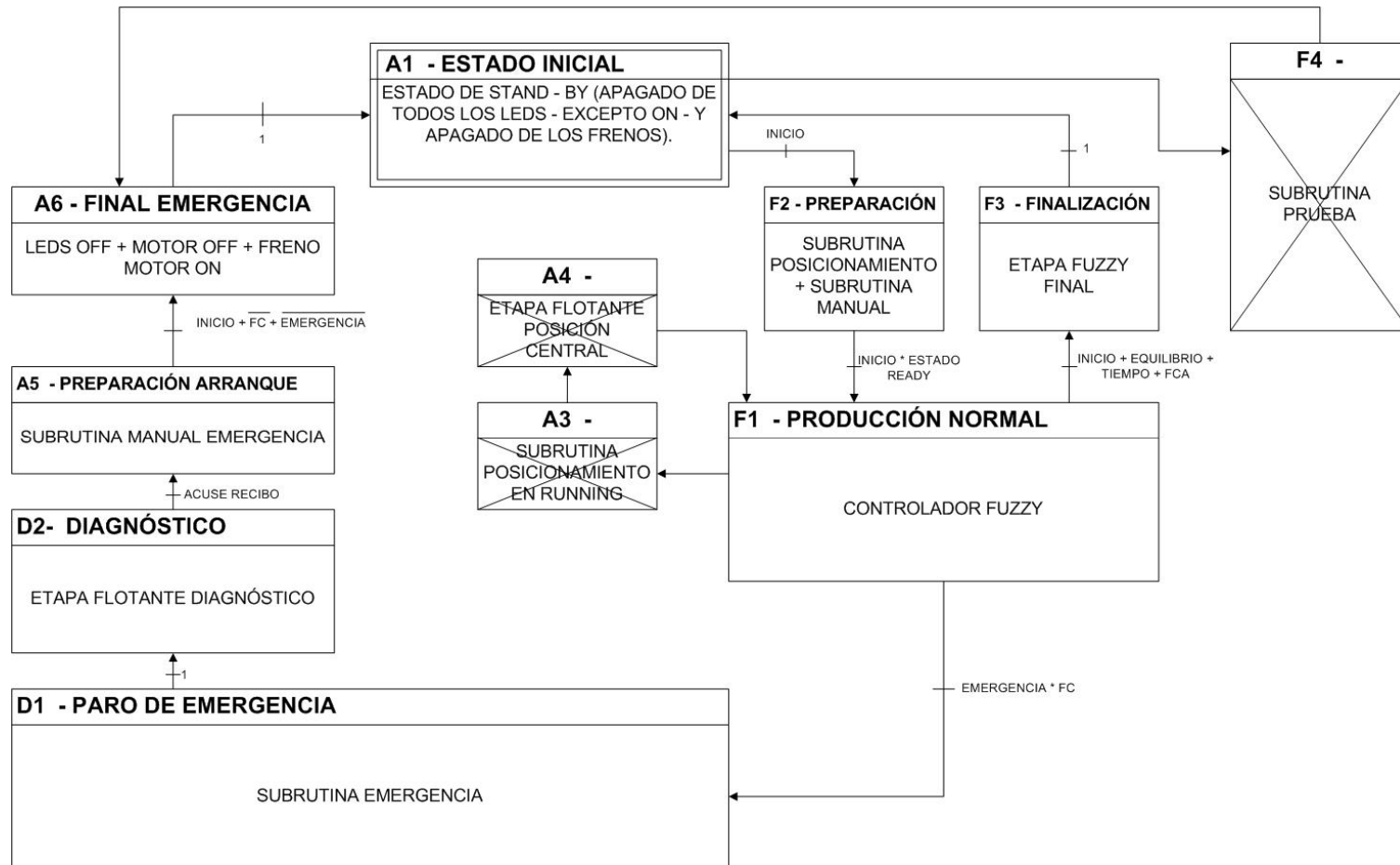
11.2 EL PROGRAMA

La integración funcional de los elementos físicos que hacen parte de este automatismo se logra a través del programa de control, definido como la combinación lógica de un conjunto de instrucciones, órdenes y símbolos reconocibles por el autómatas e incorporados en él a través de su unidad de programación. Conjunto que le permite ejecutar las secuencias de control deseadas definiendo así la capacidad operativa del automatismo, es decir como debe funcionar el proceso que se diseña. Al conjunto total de estas instrucciones, ordenes y símbolos que están disponibles para escribir un programa se le denomina lenguaje de programación.

Para el caso del autómatas utilizado en este proyecto, el lenguaje de programación asociado es el STEP 7, lenguaje diseñado para la programación de la familia de autómatas Simatic S7 de la casa fabricante Siemens. Mediante este lenguaje es posible obtener las siguientes formas de representación del programa de control:

⁷ Cualquier inquietud sobre el diseño basado en GEMMA, remítase a BALCELLS, Josep; ROMERAL, Jose Luis. Autómatas Programables. México DF. Alfaomega – Marcombo editores. 1998, p 19.

Figura 73. GEMMA del automatismo.



- Esquema de Funciones (FUP). Por medio del cual se representan gráficamente las operaciones combinacionales (lógicas) usando los símbolos habituales en electrónica digital.
- Esquema de Contactos (KOP). A través del cual se representan gráficamente las funciones de mando usando símbolos de esquemas eléctricos.
- Lista de Instrucciones (AWL). De esta forma se representa el programa como una sucesión de abreviaturas de instrucciones. El programa del banco ha sido cargado en este lenguaje, y puede observarse en el ANEXO H.

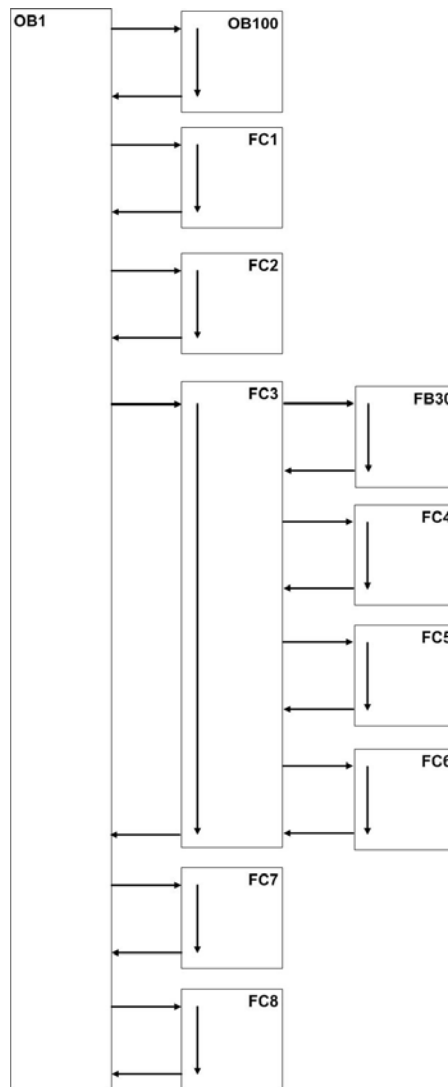
Otra de las características del lenguaje de programación STEP 7 es que posee las siguientes zonas de operandos, con los cuales se realizan las operaciones requeridas en cada una de las instrucciones del programa.

- E (Entradas) Interfaces del proceso al autómeta.
- A (Salidas) Interfaces del autómeta al proceso.
- M (Marcas) Memorias para resultados binarios intermedios.
- D (Datos) Memorias para resultados digitales intermedios.
- T (Temporizaciones) Memorias para la realización de Temporizaciones.
- Z (Contadores) Memorias para la realización de contadores.
- P (Periferia) Interface del proceso al autómeta (direccionamiento de imágenes del proceso de alarmas).
- OB, FB, FC, UDT, DB (Módulos software) auxiliares para estructurar el programa.

11.2.1 Estructura del programa del banco

El Programa de control del banco tiene la estructura mostrada en la [figura 74](#). Se estudian a continuación las características de los módulos estructurales de este programa. La estructura mostrada no debe confundirse con un diagrama secuencial de la operación del sistema, ya que es solamente una representación jerárquica de los módulos utilizados.

Figura 74. Estructura del programa.



11.2.1.1 OB1

La estructura del programa tiene su núcleo en el módulo de organización “OB1”, desde donde se generan las señales para realizar las siguientes acciones:

- Llamado del bloque organizacional de inicio “OB100”.
- Llamado de los cinco módulos funcionales anidados en el nivel 2 de la estructura de la programación.
- Inicialización del generador de pulsos.
- Inicialización del variador de velocidad.
- Generación de la señal que controla el freno del motor.

11.2.1.2 OB100

Este módulo organizacional se ejecuta siempre que se arranca en frío el programa. Se utiliza para poner en cero todos los temporizadores, contadores y marcas. Su inicio es automático, no requiere llamada desde el bloque organizacional principal.

11.2.1.3 FC1

Módulo funcional encargado de realizar la etapa de posicionamiento automático del móvil, generando las señales necesarias para la visualización definida.

11.2.1.4 FC2

Módulo funcional encargado de realizar la etapa de posicionamiento manual del móvil. En este se encuentra el estado intermedio “Ready” observado en el GRAFCET. Se generan las señales de visualización mencionadas.

11.2.1.5 FC3

Bloque de función en el cual se realiza el control mediante lógica difusa. Incluye la captura de las señales del sensor rotativo tipo encóder, la

conversión del código gray de estas a código binario, y la transformación de la señal generada en un número real. Calcula de igual forma un real representativo de la velocidad angular instantánea del péndulo. Hace los llamados del bloque fuzzy y de los estados de finalización del fuzzy, anidados en el nivel 3 de la estructura de programación.

11.2.1.6 FB30

Este bloque es el directo encargado de recibir los datos de control fuzzy generados por el programa FuzzyControl++, y generar la rutina de control mediante lógica difusa sobre el péndulo. Este bloque es del tipo no editable.

11.2.1.7 FC4

Módulo funcional vinculado a la etapa de finalización del bloque fuzzy fallido por finales de carrera o interruptor inicio.

11.2.1.8 FC5

Módulo funcional vinculado a la etapa de finalización del bloque fuzzy fallido por no equilibrio del péndulo en el tiempo definido.

11.2.1.9 FC6

Módulo funcional vinculado a la etapa de fuzzy exitoso, cuando se alcanza el equilibrio del péndulo durante un tiempo determinado.

11.2.1.10FC7

Bloque de función encargado de finalizar el ciclo de funcionamiento del banco, dejándolo listo para uno nuevo. Realiza las operaciones de puesta a cero necesarias para que el siguiente ciclo operacional no presente fallos.

11.2.1.11 FC8

Bloque de manejo del estado de emergencia. Este bloque inhabilita totalmente los demás.

11.2.2 Relación de Operandos.

En el ANEXO H se muestra la relación de operandos y los módulos en los que intervienen cada uno de ellos, llamado técnicamente CUADRO DE REFERENCIAS CRUZADAS.

11.2.3 Sistema de entradas / salidas digitales

En las *tablas 9 y 10* se relacionan las entradas y salidas utilizadas en el sistema de control. Las señales de entrada provienen principalmente de los sensores y los interruptores montados en el panel de control. Las señales de salida son las encargadas de realizar las diversas etapas de control del sistema. Las especificaciones técnicas de los bloques de entrada y salidas del API Siemens Simatic S7 pueden ser consultadas en los manuales del mismo. En este caso, se cuenta con disponibilidad de 16 entradas y 16 salidas digitales.

En la tabla de entradas puede apreciarse que los dos finales de carrera de fallo generan una única señal sobre el autómatas. Esto se debe a la cantidad de entradas disponibles en el mismo. Es posible hacer control direccional con la señal proveniente de estos interruptores de posición, debido a que mecánicamente no es posible que se encuentre activado el interruptor extremo sin estar activado el interruptor de alarma.

Como se observa en la *tabla 10*, el control del banco se realiza básicamente mediante relés. Esto se debe a que este control está vinculado al manejo del variador de velocidad. La bornera de conexiones de control de este variador funciona a 10 VDC, y la fuente de alimentación de este voltaje está incluida en el dispositivo, por lo que se cuenta con una señal de alimentación para los puertos de la bornera.

Tabla 9. Relación de entradas digitales utilizadas.

ENTRADAS DIGITALES			
ENTRADAS DEL ENCÓDER			
#	NOMBRE	TIPO	DIRECCIÓN
1	BIT 1	CÓDIGO GRAY	E124.0
2	BIT 2	CÓDIGO GRAY	E124.1
3	BIT 3	CÓDIGO GRAY	E124.2
4	BIT 4	CÓDIGO GRAY	E124.3
5	BIT 5	CÓDIGO GRAY	E124.4
6	BIT 6	CÓDIGO GRAY	E124.5
7	BIT 7	CÓDIGO GRAY	E124.6
8	BIT 8	CÓDIGO GRAY	E124.7
SENSORES E INTERRUPTORES			
#	NOMBRE	TIPO	DIRECCIÓN
1	DERECHA	PULSADOR	E125.0
2	IZQUIERDA	PULSADOR	E125.1
3	EMERGENCIA	PULSADOR ENCLAVAMIENTO	E125.2
4	INICIO – STOP	PULSADOR	E125.3
5	ON	INTERRUPTOR CON LLAVE	E125.4
6	FCAD	FINAL DE CARRERA	E125.5
7	FCAI	FINAL DE CARRERA	E125.6
8	FC	FINAL DE CARRERA (2)	E125.7

Según especificaciones del fabricante, el control se debe realizar mediante la implementación de contactos secos que cierren el circuito entre esta fuente y el terminal. De esta forma, se utilizan los relés mencionados. El relé de freno controla el dispositivo de activación del freno ensamblado al motor. Este dispositivo se activa a 110 VAC. No es posible realizar el control de ninguno de estos elementos mediante señales directas provenientes del autómeta.

11.2.4 Salidas analógicas

Para poder realizar un control proporcional de la velocidad del motor, y por tanto de la velocidad del móvil, de forma que responda de manera adecuada al dominio completo de las reglas fuzzy planteadas, se hace necesario el

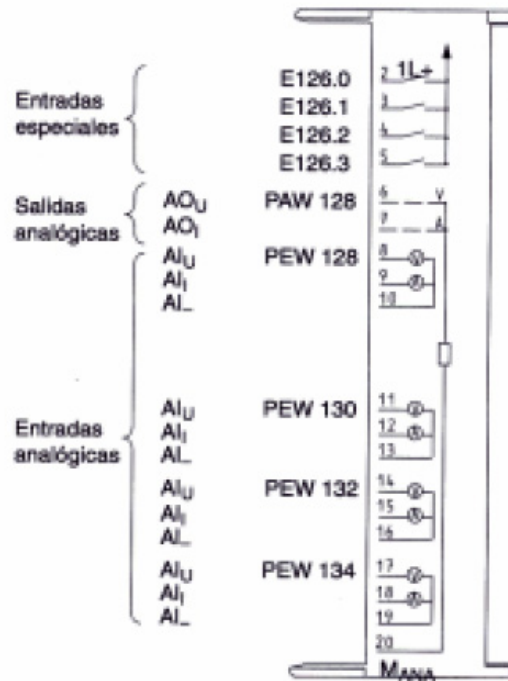
control mediante una señal analógica generada por el autómeta. Este cuenta con un módulo de 4 entradas y 1 salida analógicas.

Tabla 10. Relación de salidas digitales utilizadas.

SALIDAS DIGITALES			
PILOTOS DE VISUALIZACIÓN			
#	NOMBRE	TIPO	DIRECCIÓN
1	ST – ROJO	LED DIGITAL ø22mm	A124.0
2	ST – AMARILLO	LED DIGITAL ø22mm	A124.1
3	ST – VERDE	LED DIGITAL ø22mm	A124.2
4	MOTOR	LED DIGITAL ø22mm	A124.3
5	RUNNING	LED DIGITAL ø22mm	A124.4
6	READY	LED DIGITAL ø22mm	A124.5
7	ON	LED DIGITAL ø22mm	A124.6
8	LIBRE		A124.7
SEÑALES DE CONTROL			
#	NOMBRE	TIPO	DIRECCIÓN
1	LIBRE		A125.0
2	LIBRE		A125.1
3	LIBRE		A125.2
4	LIBRE		A125.3
5	RELÉ STOP	CONTROL DE RELÉ 24 VDC	A125.4
6	RELÉ START	CONTROL DE RELÉ 24 VDC	A125.5
7	RELÉ FORWARD	CONTROL DE RELÉ 24 VDC	A125.6
8	RELÉ FRENO	CONTROL DE RELÉ 24 VDC	A125.7

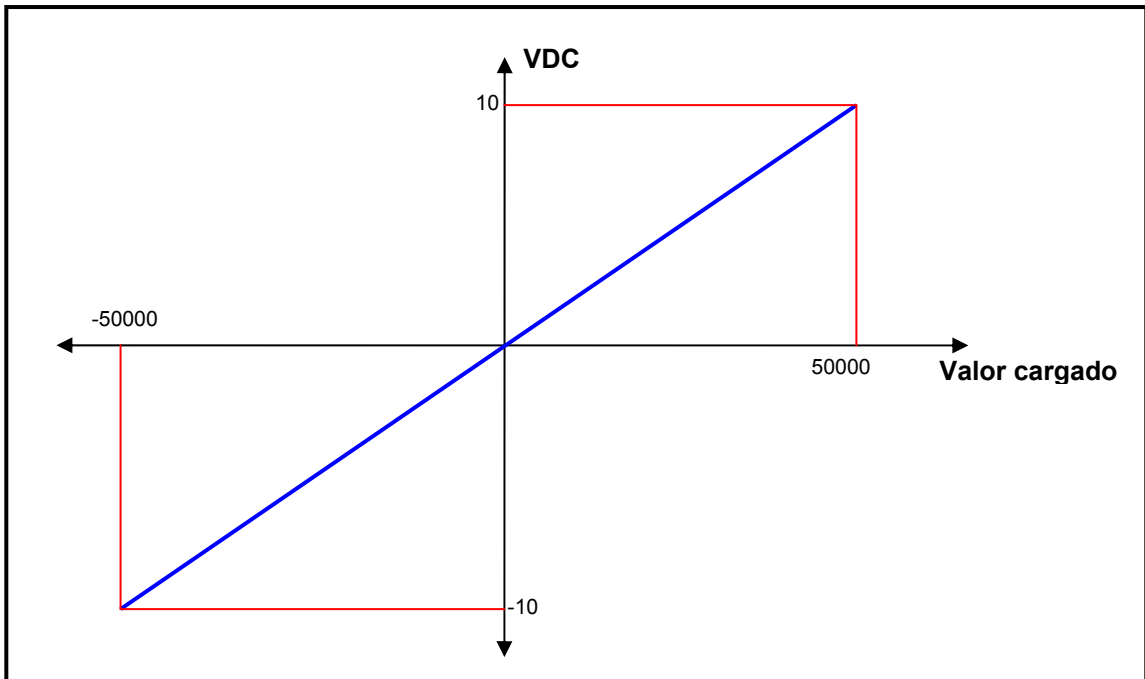
El terminal de conexión de la salida analógica se denomina PAW 128, con un puerto para control mediante voltaje y otro para control con amperaje. Los límites de control de esta salida son -10 a 10VDC y -20 a 20 mA. En este sistema, se ha decidido utilizar el control por voltaje. En la [figura 75](#) se muestra el módulo de salidas analógicas.

Figura 75. Módulo de salidas analógicas del autómata.



Para realizar el control utilizando salidas analógicas es necesario conocer los límites de voltaje generados en la operación de carga del valor a la salida. Esta operación de carga se hace mediante el comando “MOVE” del lenguaje de programación STEP 7, teniendo como variable de destino de la operación la salida analógica, esto es, PAW 128. Mediante este operando, se envía un valor real a la salida. Para comprender entonces el funcionamiento real de la salida analógica, es decir, la señal de voltaje enviado en función del número real cargado, se dibuja una curva que represente la relación de tensión vs valor cargado. Para realizar esta gráfica, se midieron los voltajes en la salida analógica correspondientes a diversos valores reales cargados al PAW 128. El resultado se muestra en la [figura 76](#).

Figura 76. Relación entre PAW 128 y voltaje de la salida analógica.



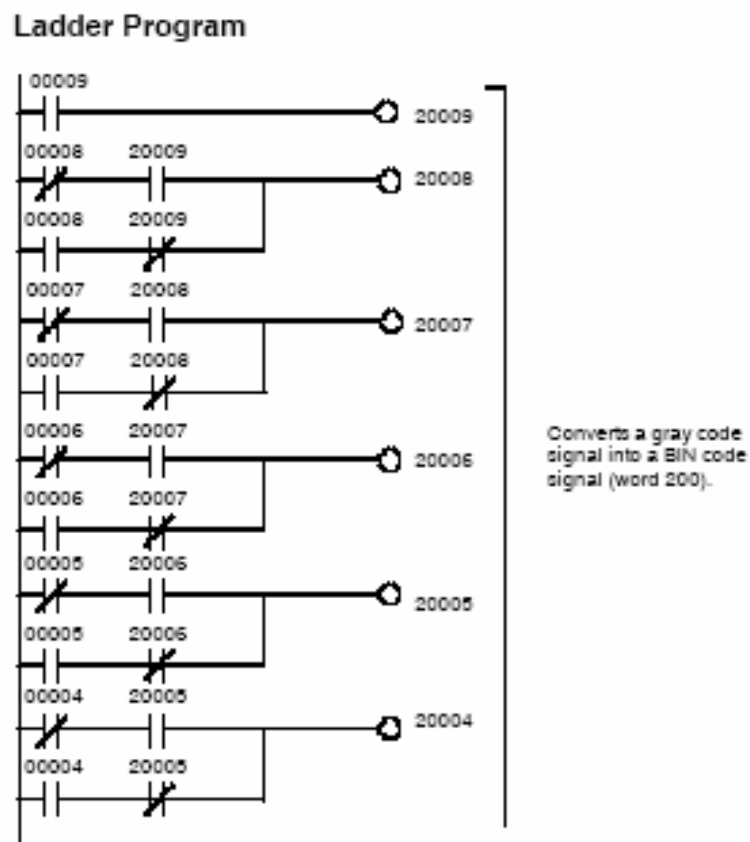
11.2.5 El sensor rotativo (encóder)

Como se ha descrito anteriormente, el encóder genera una señal de salida codificada en código gray. La gran ventaja que tiene este código es que evita la generación de señales erróneas, ya que se basa en el cambio de un único bit en cada pulso de rotación del sensor. Sin embargo, para poder manejar la señal del sensor en el programa, se hace necesaria la conversión al código binario tradicional.

Lo primero a tener en cuenta es que el sensor trabaja con lógica negativa, por lo que no es posible programar con la presencia de las señales de los diversos bits, sino con la ausencia de las mismas. Esto, en términos prácticos, implica añadir una negación a las señales de entrada del encóder en la estructura de programación en la cual se haga el manejo de las mismas. Para convertir el código gray a código binario, se utiliza una estructura de programación suministrada por los fabricantes del dispositivo

en sus manuales de funcionamiento. En la [figura 77](#) se muestra esquemáticamente el tipo de estructura a utilizar.

Figura 77. Conversión de código gray a binario.

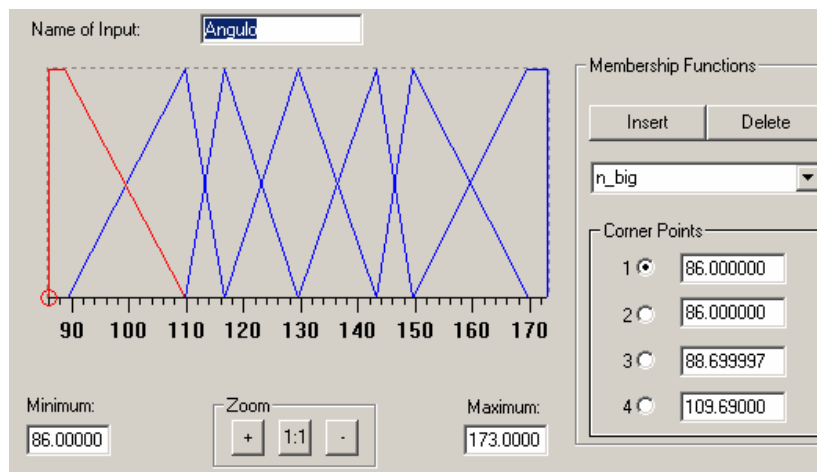


En el bloque FC3 del programa, consignado en el ANEXO H, se observa la programación de manejo de la señal del encóder.

12 ENSAYOS PRELIMINARES

Se han desarrollado unos ensayos preliminares para probar la respuesta del banco a las acciones de control. Se han definido las funciones de pertenencia de las entradas y salidas como se muestra en las figuras siguientes. Como se observa, cada variable tiene siete conjuntos, definidos en diversas formas. Para facilitar la programación, la señal de salida representa el valor analógico cargado de forma directa a la señal de control del variador.

Figura 78. Función de pertenencia de la variable “Ángulo”.



Para las variables de entrada, los conjuntos de la función de pertenencia se denominan, de izquierda a derecha, n_big, n_midd, n_small, zero, p_small, p_midd y p_big. A diferencia de las entradas, las salidas permiten la asignación de nueve conjuntos en el dominio. De esta forma, además de los conjuntos mencionados, a la variable de salida se le agregaron dos valores extremos a izquierda y derecha, llamados n_vbig y p_vbig respectivamente.

Figura 79. Función de pertenencia de la variable “Angular”.

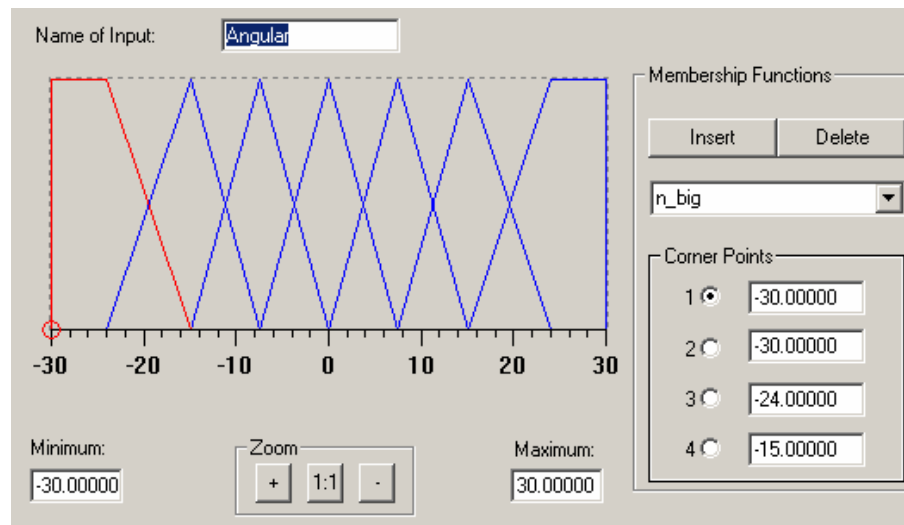
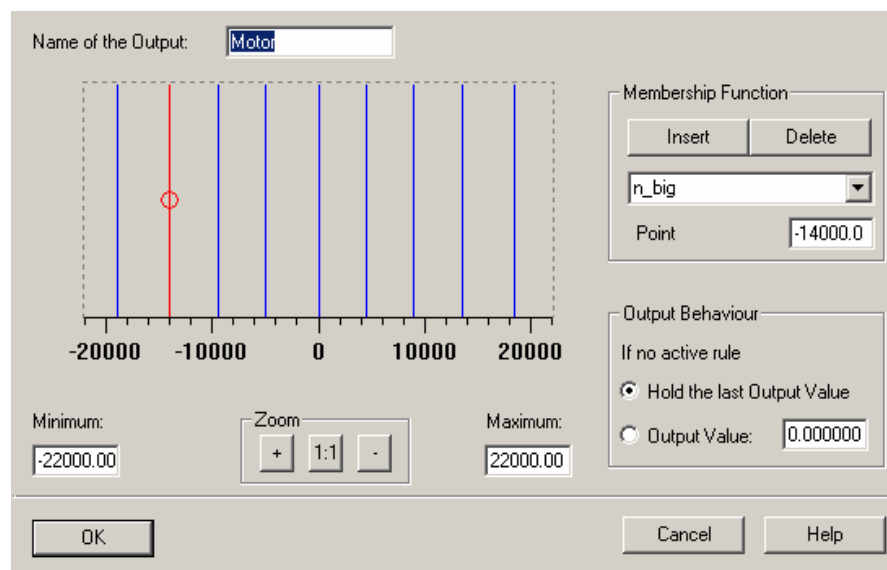
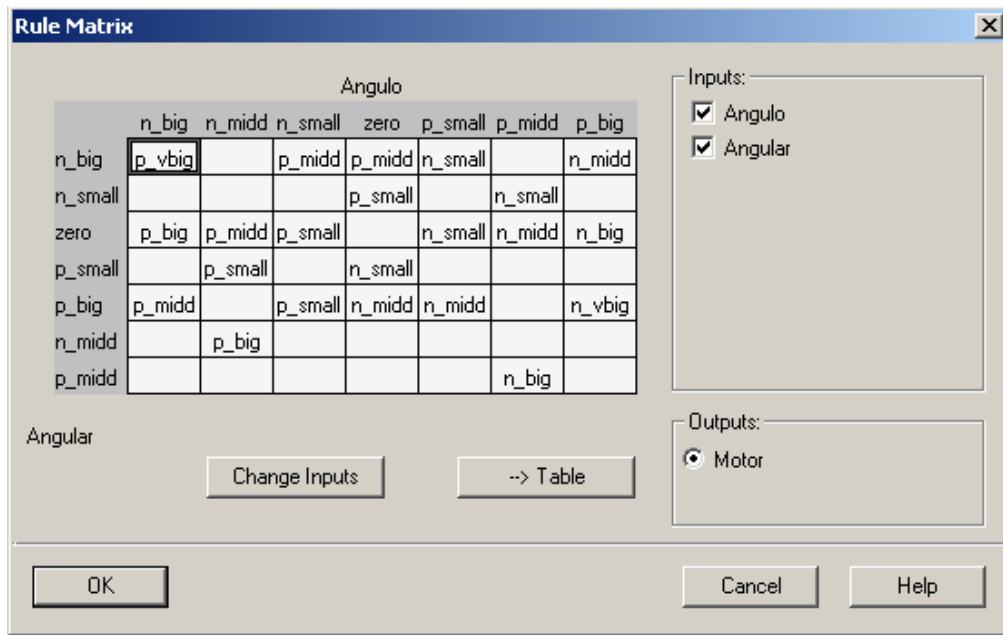


Figura 80. Función de pertenencia de la variable “Motor”.



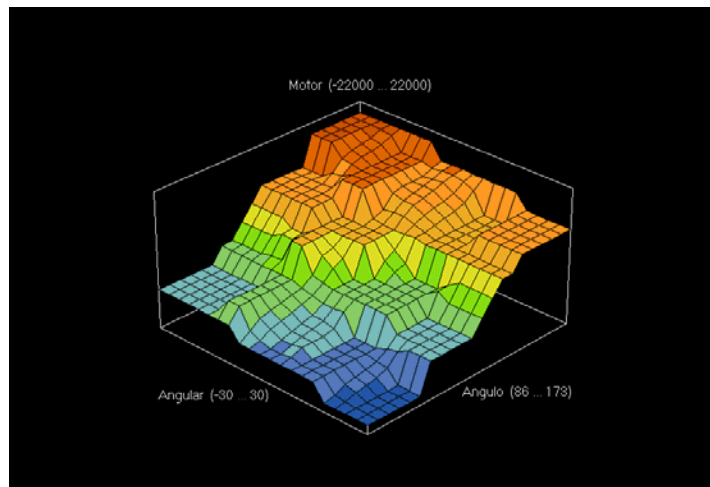
Utilizando la literatura disponible y haciendo ensayos preliminares, se desarrolló la matriz de reglas mostrada en la [figura 81](#).

Figura 81. Matriz de reglas.



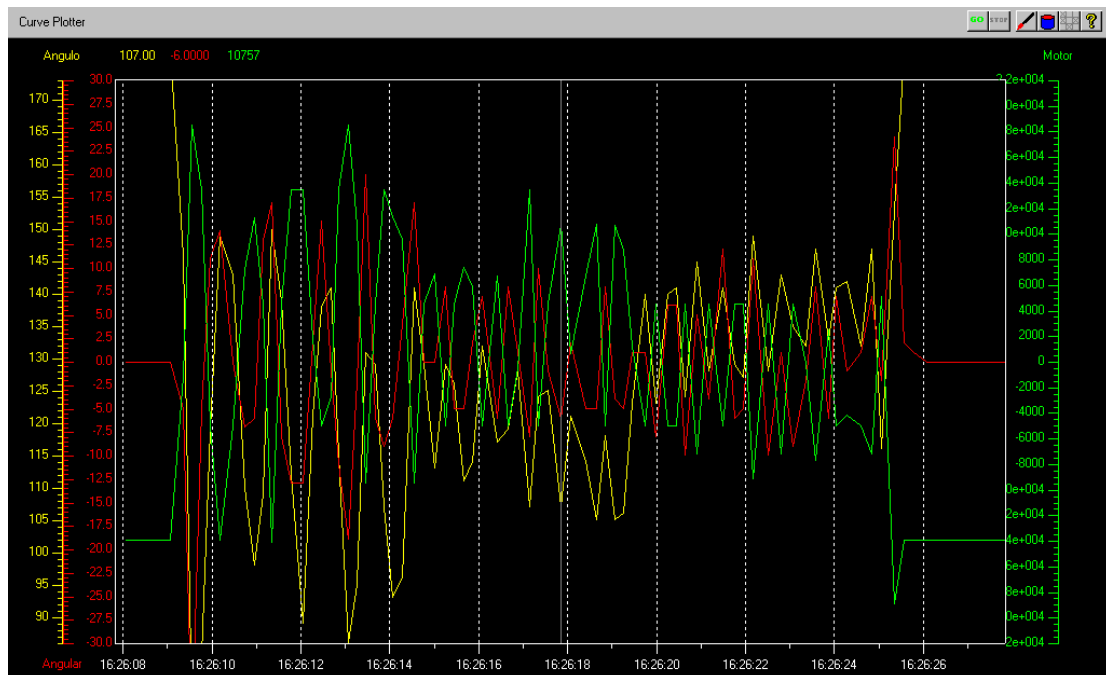
Con esta matriz, y utilizando la herramienta de visualización tridimensional, tenemos una región fuzzy de salida así:

Figura 82. Región tridimensional fuzzy de salida.



Utilizando el sistema fuzzy descrito, se obtuvieron los siguientes resultados gráficos con herramienta de monitoreo de variables.

Figura 83. Resultados de los ensayos preliminares.

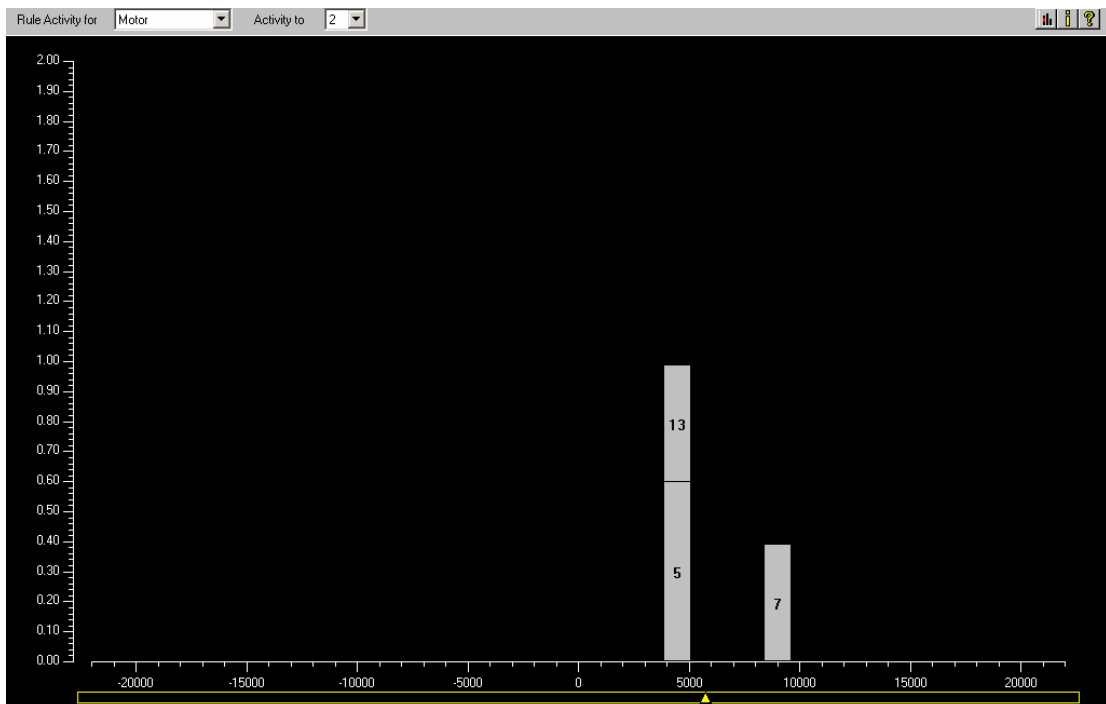


Como se observa en la gráfica, el motor (color verde) responde en sentido contrario al ángulo y la aceleración angular (colores amarillo y rojo, respectivamente). Esta respuesta depende siempre de la magnitud de los valores de entrada. Lo que se puede observar en la figura es que el péndulo tiende al equilibrio sin lograrlo totalmente en esta serie de prácticas. Es evidente la tendencia que tiene la curva amarilla a estabilizarse alrededor del cero, pero como se observa después de la línea de tiempo 16:26:20, el valor del ángulo es netamente positivo, sin que los esfuerzos del motor por equilibrarlo logren cambiar el sentido de la señal. Al final, el sistema entra en estado de desequilibrio y se pierde el control.

De estas pruebas preliminares se deduce que el sistema no ha sido sintonizado en su totalidad, lo que requiere un tiempo bastante extenso. Sin embargo, se estima que la respuesta de los componentes ha sido lo suficientemente buena para deducir el equilibrio posterior del péndulo, habiendo culminado las labores de sintonización del mismo. Se entiende que se han cumplido los objetivos trazados, ya que se ha desarrollado la herramienta con todos sus componentes para permitir el estudio de la lógica difusa.

A continuación se muestra la gráfica de monitoreo de reglas, la cual permite conocer la función de pertenencia de la señal de salida y el porcentaje de la misma, lo que permite observar las señales que pueden estar generando inestabilidades para la sintonización final.

Figura 84. Monitoreo de reglas.



13 CONCLUSIONES

- El resultado final del desarrollo de este proyecto es una herramienta totalmente operativa y versátil para el estudio del control mediante lógica difusa. Esta herramienta incluye todas las utilidades y paquetes requeridos para realizar la programación, sintonización y manipulación del proceso. El tamaño, peso y diseño del banco garantizan su manejabilidad en el entorno de laboratorio.
- Con el desarrollo de este tipo de tecnología aplicada a los laboratorios en la Universidad Industrial de Santander, se evidencia nuevamente su carácter innovador y de institución de amplia calidad y reconocimiento a nivel nacional. Debido a la reducida cantidad de desarrollos similares en nuestro país, este proyecto se convierte en el punto de inicio para el estudio del control mediante inteligencia artificial en nuestro medio.
- La multiplicidad de elementos y tecnologías que integran este tipo de equipos, hace que su diseño y construcción sean bastante extensos y costosos. Sin embargo, esta característica de interacción entre diversos campos de la ingeniería, como lo son el diseño mecánico, el diseño eléctrico, el diseño electrónico, el diseño de sistemas automatizados, el diseño y la programación del sistema de control y el desarrollo de las interfaces con el operario; es lo que al final hace tan valiosa la concepción de proyectos de este tipo, los cuales tendrán un impacto favorable en la formación a futuro de los profesionales egresados de la universidad.
- Los componentes seleccionados como elementos del banco permiten desarrollos posteriores sobre el mismo, como la implementación de

control mediante redes neuronales integradas con lógica fuzzy (neurofuzzy), así como el estudio de otros algoritmos de control sobre el péndulo invertido.

- La sintonización de un sistema controlado mediante lógica fuzzy es una tarea bastante compleja, ya que depende de muchas variables que al final pueden ser fuente de inestabilidades en el sistema. En este caso, se realizaron pruebas preliminares de sintonización, las cuales evidenciaron la importancia de realizar una programación adecuada de los parámetros del variador de velocidad, así como la dificultad asociada con la generación de la matriz de reglas y las funciones de pertenencia de las variables.

14 RECOMENDACIONES

- Algunas de las inestabilidades del control provienen de la potencia reducida del motor, lo que hace que en algunas ocasiones la respuesta del mismo a las órdenes de control no sea suficiente para alcanzar el equilibrio del péndulo. Para mejorar la respuesta del sistema al control, es recomendable reemplazar en un futuro el motor utilizado en el desarrollo actual del banco por uno de potencia mayor, dentro de los límites permitidos por el variador de velocidad.

BIBLIOGRAFIA

BALCELLS, Joseph ROMERAL, José Luis. Autómatas Programables. España. Marcombo Ediciones, 1997.

NORTON, Robert L. Diseño de Máquinas. México DF. Prentice Hall – Pearson Editores, 1999.

GARCIA, Emilio. Automatización de procesos industriales. México D.F. Alfaomega Grupo Editor, 2001.

OGATA, Katsuhiko. Dinámica de sistemas. México. Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1987.

KLIR, George J.; CLAIR, Ute St.; YUAN, Bo. Teoría de conjuntos Fuzzy: Fundamentos y aplicaciones. Pearson Education POD. 1997.

COX, Earl. Manual de los sistemas Fuzzy: Una guía práctica para la construcción, el uso y el mantenimiento de sistemas Fuzzy. Morgan Kaufmann. 1999.

ERONINI, Umez Eronini. Dinámica de Sistemas y Control. Thomson Learning International. 2001.

DORF, Richard C; BISHOP, Robert H. Modern Control Systems. Prentice Hall Inc. 2001.

SPOONER, Jeffrey; MAGGIORE, Manfredi; ORDÓNES, Raúl; PASSINO, Kevin. Control estable adaptativo para sistemas no lineales. Prentice Hall Inc. 1998.

MENESES, Jorge Enrique. Inteligencia artificial en el control de procesos: Control Fuzzy basado en PLC'S Simatic S5. Instituto Superior Tecnológico. Lima, 1997.

ALLEN BRADLEY – ROCKWELL AUTOMATION. Web site.
www.allenbradley.com

OMRON. Web site.
www.omron.com

SCHNEIDER ELECTRIC. Productos. Colombia.
http://www.schneider-electric.com.co/c2_productos.htm