

SISTEMA DE SUSTENTACION NEUMATICA

ENRIQUE HERNANDO FLORIAN GAVIRIA  
ERICK ANDRES CARVAJAL MUÑOZ

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
DIVISION DE INGENIERIA  
INGENIERIA MECATRONICA  
SANTIAGO DE CALI  
2003

SISTEMA DE SUSTENTACION NEUMATICA

ENRIQUE HERNANDO FLORIAN GAVIRIA  
ERICK ANDRES CARVAJAL MUÑOZ

Trabajo De Grado Para Optar Al Titulo De Ingeniero Mecatrónico

Director  
JIMMY TOMBE  
Ingeniero Eléctrico

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
DIVISION DE INGENIERIA  
INGENIERIA MECATRONICA  
SANTIAGO DE CALI  
2003

Nota de aceptación:

Trabajo aprobado por el comité  
de grado en cumplimiento de  
los requisitos exigido por la  
**Corporación Universitaria  
Autónoma De Occidente**

Fredy Naranjo

---

Mauricio Agudelo

---

Firma del Jurado

---

Santiago De Cali 15 julio de 2003

## AGRADECIMIENTOS

Presentamos agradecimientos a:

**Jimmy Tombe** Ingeniero eléctrico de la Universidad Autónoma de Occidente profesor en el área de control director de tesis.

**Freddy Naranjo** Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle, P.H.D en automatización de sistemas, director del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Autónoma De Occidente por sus aportes técnicos y recursos bibliográficos suministrados.

**Jesús Alfonso López** Ingeniero electrónico de la Universidad del Valle, profesor en el área de sistemas inteligentes por apoyo en el área de lógica difusa.

**Arnaldo Méndez Pupo** Ingeniero Electrónico de la Universidad De la Habana, Magíster en automática profesor en el área de diseño Mecatrónico en la Universidad Autónoma de Occidente, por la metodología acerca del diseño y construcción de sistemas mecatrónicos.

**Henry Florián Moreno** lic. de ciencias matemáticas de La Universidad Del Valle magíster en educación de la Universidad del valle por el apoyo financiero y logístico.

## GLOSARIO

**SUSTENTADOR NEUMATICO:** Prototipo para practicas de control de posición en el cual un elemento se desplaza de forma vertical al interior de un cilindro impulsado por una corriente de aire generada en la parte inferior del tubo. La posición es verificada en cada instante para la realimentación del sistema.

**ELECTROVALVULA PROPORCIONAL:** Dispositivo electromecánico que contiene un actuador que controla flujo de salida de aire de manera incremental de acuerdo a un rango de polarización definido

**SENSOR ULTRASONICO:** Es un elemento que emite cíclicamente impulsos ultrasónicos, que al igual que en el sonido en la gama audible, son reflejados por objetos y superficies. El detector determina la distancia del objeto en base al tiempo necesario para que dichos impulsos retorne a el.

**SINERGIA:** Concurso activo y concertado de varios elementos para realizar una función y cuyo efecto es mayor a la suma de los elementos individuales.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN   |    |
| INTRODUCCIÓN  |    |
| 1. FASE INICIAL DEL PRODUCTO  | 14 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DE LA MISIÓN  | 14 |
| 1.2 IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES   | 15 |
| 1.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS   | 16 |
| 1.4 LISTADO DE ESPECIFICACIONES PRELIMINARES                                | 17 |
| 2. DISEÑO CONCEPTUAL  | 18 |
| 2.1 DESCOMPOSICIÓN FUNCIONAL  | 18 |
| 2.2 GENERACION Y SELECCION DE CONCEPTOS                                     | 19 |
| 2.2.1 Árboles de clasificación  | 20 |
| 2.2.2 Tabla de combinación de conceptos                                     | 21 |
| 2.3 SELECCIÓN DE CONCEPTOS  | 23 |
| 2.3.1 Tamizaje de conceptos   | 23 |
| 2.4 PRUEBA DE CONCEPTOS   | 24 |
| 2.4.1 Matriz para evaluar conceptos   | 24 |
| 3. ARQUITECTURA DE PRODUCTOS  | 25 |
| 3.1 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA ARQUITECTURA                          | 25 |
| 3.2 AGRUPACIÓN DE ELEMENTOS FUNCIONALES                                     | 26 |
| 3.3 DISTRIBUCION GEOMETRICA DE LOS ELEMENTOS                                | 27 |
| 3.4 INTERACCIONES INCIDENTALS DE ELEMENTOS FUNCIONALES                      | 27 |
| 4. DISEÑO INDUSTRIAL  | 29 |
| 5. DISEÑO PARA MANUFACTURA  | 31 |
| 5.1 DISEÑO PARA ENSAMBLE  | 34 |
| 5.2 LISTA DE COMPONENTES  | 35 |
| 6. PROTOTIPADO  | 36 |
| 6.1 TIPOS DE PROTOTIPO  | 36 |
| 7. DISEÑO DETALLADO   | 39 |
| 7.1 DISEÑO MECANICO   | 40 |
| 7.1.1 Materiales Usados en El Dispositivo                                   | 40 |
| 7.2 DISEÑO ELECTRONICO  | 42 |
| 7.2.1 Elementos Electronicos Implementados                                  | 42 |
| 7.2.2 Conexiones De Los Dispositivos Del Sistema De Sustentación Neumático. | 46 |
| 7.2.3 Acondicionamiento de Señales  | 48 |
| 7.3 DISEÑO DE SOFTWARE DE CONTROL   | 50 |
| 7.3.1 Conceptos Básicos Sobre Lógica Difusa                                 | 50 |
| 7.3.2 Sistema De Control Difuso   | 53 |
| 7.3.3 Diseño Del Controlador Para Un Sistema De Sustentación Neumática      | 65 |
| 8. CONCLUSIONES   | 91 |
| 9. RECOMENDACIONES  | 92 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS  |    |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1. Función Principal  | 18 |
| Ilustración 2. Descomposición Funcional de la Función Principal   | 18 |
| Ilustración 3. Muestra posibles opciones para sensar el elemento  | 20 |
| Ilustración 4. Muestra posibles opciones para generar el flujo de aire  | 21 |
| Ilustración 5. Muestra las opciones de control que se pueden implementar  | 21 |
| Ilustración 6. Muestra las posibles variables combinatorias   | 21 |
| Ilustración 7. Combinación de conceptos A.  | 22 |
| Ilustración 8. Combinación de conceptos B.  | 22 |
| Ilustración 9. Combinación de conceptos C.  | 22 |
| Ilustración 10. Combinación de conceptos D.   | 22 |
| Ilustración 11. Combinación de conceptos E.   | 23 |
| Ilustración 12. Combinación de conceptos F.   | 23 |
| Ilustración 13. Agrupación de elementos funcionales   | 26 |
| Ilustración 14. Muestra las relaciones incidentales entre los elementos funcionales   | 27 |
| Ilustración 15. Muestra la valoración del nivel de importancia del Diseño Industrial  | 30 |
| Ilustración 16. Muestra la orientación del producto   | 30 |
| Ilustración 17. Muestra el esquema de manufactura   | 31 |
| Ilustración 18. Costos de manufactura   | 33 |
| Ilustración 19. Muestra el despiece del sustentador neumático   | 34 |
| Ilustración 20. Sustentador Neumático en su estado final  | 35 |
| Ilustración 21. Muestra los prototipos realizados.  | 36 |
| Ilustración 22. Muestra la entrada y la salida de señales para la evaluación de prototipos  | 37 |
| Ilustración 23. Muestra las especificaciones de los acrílicos   | 41 |
| Ilustración 24. Muestra el esquema cilindro-embolo  | 43 |
| Ilustración 25. Angulo cónico del sensor  | 44 |
| Ilustración 26. Fuente Swichada del Sistema de Sustentación Neumática   | 45 |
| Ilustración 27. Muestra arreglo de cables de la electroválvula  | 46 |
| Ilustración 28. Muestra el arreglo de cables del sensor   | 47 |
| Ilustración 29. Etapa de Instrumentación. Conversor de Corriente en Voltaje   | 48 |
| Ilustración 30. Muestra el circuito conversor digital / análogo   | 49 |
| Ilustración 31. Muestra (a) Conjuntos Borrosos. (b) Conjuntos no Borrosos (Crisp sets)  | 51 |
| Ilustración 32. Muestra operaciones en lógica difusa.   | 52 |
| Ilustración 33. Muestra el funcionamiento de un sistema de control difuso.  | 55 |
| Ilustración 34. Muestra las diferentes formas de la función de pertenencia a un conjunto.   | 57 |
| Ilustración 35. Muestra los conjuntos borrosos para la temperatura  | 57 |
| Ilustración 36. Muestra conjuntos borrosos para la velocidad.   | 59 |
| Ilustración 37 Obtención de la función de pertenencia del nuevo conjunto de valores de salida. (a) Producto Aritmético ; (b) Producto Lógico Borroso. | 62 |
| Ilustración 38. Muestra función de pertenencia global y centroide.  | 63 |
| Ilustración 39. Diagrama de Flujo del control de un sistema de sustentación neumático   | 65 |
| Ilustración 40. Muestra la interfaz donde se elabora el sistema de control de Matlab  | 67 |
| Ilustración 41. Muestra funciones de pertenencia para la entrada al sistema del error   | 68 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 42. Muestra funciones de pertenencia para la entrada derivada del error de la Planta.                                     | 69  |
| Ilustración 43. Muestra las funciones tipo sugeno para la salida del Sistema de control   | 70  |
| Ilustración 44. Muestra las reglas de control.  | 71  |
| Ilustración 45. Muestra la generación de la superficie Difusa.  | 72  |
| Ilustración 46. Muestra simulación evaluación de entradas.  | 72  |
| Ilustración 47. Muestra la simulación del controlador en simulink.  | 74  |
| Ilustración 48. Muestra las grafica de las entradas del sistema difuso  | 75  |
| Ilustración 49. Muestra grafica de la salida del sistema difuso   | 75  |
| Ilustración 50. Muestra la grafica de la acción del Integrador.   | 76  |
| Ilustración 51. Muestra la grafica de la salida de la planta con y sin Controlador, referencia.                                       | 77  |
| Ilustración 52. Muestra la Interfaz con el usuario del sistema de sustentación neumática.   | 80  |
| Ilustración 53. Tarjeta de evaluación M68EVB12B32   | 82  |
| Ilustración 54. Muestra la interfaz con el usuario del software MINIDE.   | 86  |
| Ilustración 55. Similitud de las funciones de pertenencia generadas en matlab, para ahora ser trabajadas en el microcontrolador HC-12 | 88  |
| Ilustración 56. Muestra representación grafica de una función de pertenencia.   | 89  |
| Ilustración 57. Distribución geométrica del prototipo.  | 94  |
| Ilustración 58. Distribución Geométrica de los Elementos  | 94  |
| Ilustración 59. Muestra el aspecto de la tarjeta.   | 95  |
| Ilustración 60. Muestra Distribución de la tarjeta  | 96  |
| Ilustración 61. Muestra una vista isométrica de la electroválvula   | 97  |
| Ilustración 62. Muestra especificaciones de la electroválvula.  | 98  |
| Ilustración 63. Muestra una ficha técnica para el dimensionado de válvulas  | 99  |
| Ilustración 64. Selección de Electroválvula   | 100 |
| Ilustración 65. Manejo De Las Vias Por Voltaje Aplicado   | 101 |
| Ilustración 66. Muestra una vista isométrica del sensor.  | 102 |
| Ilustración 67. Muestra especificaciones técnicas.  | 102 |
| Ilustración 68. Muestra características operativas.   | 103 |
| Ilustración 69. Muestra el modo de conexión.  | 104 |
| Ilustración 70. Muestra las medidas del sensor  | 104 |
| Ilustración 71. Interfaz de Programación del Sensor   | 105 |
| Ilustración 72. Parámetros Programables del Sensor  | 105 |
| Ilustración 73. Software de Programación del Sensor   | 105 |
| Ilustración 74. Características del Software de Programación  | 106 |
| Ilustración 75. Muestra el plano electrónico de la fuente   | 107 |
| Ilustración 76. Muestra características geométricas de la fuente.   | 108 |
| Ilustración 77. Muestra un prototipo de sustentación  | 109 |
| Ilustración 78. Muestra un sistema de levitación  | 110 |
| Ilustración 79. Muestra un prototipo de sustentación son sensor fotoeléctrico.  | 111 |
| Ilustración 80. Muestra una vista en detalle de la parte inferior del sustentador   | 111 |
| Ilustración 81. Muestra la interfaz de usuario del sistema de sustentación  | 112 |
| Ilustración 82. Ejemplo de Fuzzificación con la función   | 131 |
| Ilustración 83. Fuente Mean Well  | 147 |



## LISTA TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Listado de Necesidades   | 15  |
| Tabla 2. Elimina Redundancias, Agrupa Necesidades Según Similitud                 | 15  |
| Tabla 3. Describe lo que hace el producto pero no se como dice como se hará.      | 16  |
| Tabla 4. Da medidas y unidades relacionadas con la Métrica del dispositivo        | 16  |
| Tabla 5. Proporciona valores y unidades en correspondencia a la métrica escogida  | 17  |
| Tabla 6. Ponderación de los criterios a seleccionar                               | 23  |
| Tabla 7. Ponderación numérica de los conceptos más fuertes                        | 24  |
| Tabla 8. Muestra la relación del color y función en el cable de la Electrovalvula | 46  |
| Tabla 9. Muestra la relación de color y función en el cable del Sensor            | 47  |
| Tabla 10. Algunas Aplicaciones de la Lógica Difusa                                | 54  |
| Tabla 11. Muestra Especificaciones Electromecánicas                               | 97  |
| Tabla 12. Muestra Especificaciones de servicio.                                   | 97  |
| Tabla 13. Muestra las especificaciones eléctricas de la electrovalvula            | 107 |

## LISTA DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| Anexo A. Distribución Geométrica De Los Elementos                            | 94  |
| Anexo B. NI DAQ PCI 1200   | 95  |
| Anexo C. Válvula proporcional 5 vías 3 posiciones MPYE 1/8                   | 97  |
| Anexo D. Sensor Ultrasónico Bero Sonar                                       | 102 |
| Anexo E. Fuente De Alimentación Mean Well                                    | 107 |
| Anexo F. Productos Similes en el Mercado                                     | 109 |
| Anexo G. Planos Del Sistema De Sustentación Neumática                        | 113 |
| Anexo H. Información en detalle de las Funciones Difusas del HC-12           | 130 |
| Anexo I. Especificaciones Técnicas del Micro MC68HC912B32                    | 138 |
| Anexo J. Programa Para el Sistema de Control Fuzzy del Sustentador Neumático | 139 |
| Anexo K. Plano Eléctrico del Conversor Digital – Análogo                     | 145 |
| Anexo L. Manual del Usuario  | 146 |

## RESUMEN

Se ha logrado construir un dispositivo para prácticas de control basado en el principio de suspensión neumática.

En la primera etapa se definieron todas las bases teóricas sobre las cuales se cimentó el proyecto, se concluyo cuales debían ser los elementos que tomarían parte en la toma de datos, movimiento, alimentación, control, materiales y conformación física de las partes todo lo anterior obedeciendo a un cronograma de diseño lógico y concurrente.

Se define la forma física del sistema de suspensión neumática, la forma geométrica y medida de todos los conjuntos mecánicos generados por el grupo de diseño; teniendo estos parámetros totalmente esclarecidos y con la ayuda de cálculos matemáticos se procede a realizar la escogencia de los actuadores y sensores que se implementaran en el dispositivo con sus respectivas consideraciones técnicas para el buen desempeño de la planta de sustentación. Una vez culminada la etapa de selección se emprende la etapa de construcción en la cual toman parte aspectos interesantes como la distribución de los elementos al interior de la base, cual sería la forma mas adecuada para una rápida y sencilla instalación tratando de utilizar la menor cantidad de piezas posibles tratando de manejarse siempre una arquitectura modular.

Por último se realizo la integración sinérgica de los distintos módulos que se implementaron para poner en funcionamiento el sistema de sustentación neumático tanto la parte mecánica, como la parte electrónica y el sistema de control implementado en el dispositivo.

## INTRODUCCIÓN

La idea de un dispositivo de suspensión neumático en Colombia al parecer no tiene antecedentes y no se cuenta con mucha información acerca de su origen, se sabe que en la Universidad Politécnica de Valencia (España) poseen un dispositivo que funciona de manera similar, Jose Vicente Roig realizo un proyecto llamado " Tubos **Con Sensor De Proximidad** ", en Francia existe uno llamado "**Asservissement de la hauteur d'une balle par un flux d'air**" para todos ellos la fuerza aplicada para la suspensión del elemento es generada por un motor de hélice por la parte inferior del dispositivo. El dispositivo existente ha probado ser una herramienta útil para poner en práctica los conocimientos teóricos en el área de control. El desarrollo de plantas didácticas para realizar prácticas es una herramienta fundamental para el aprendizaje de una rama importante de la Ingeniería como lo es el control automático. Contar con un dispositivo de control no convencional en el ámbito académico brindará a los estudiantes beneficios adicionales en el desarrollo de habilidades y destrezas en el área técnica del control de procesos industriales. La disponibilidad del equipo en mención le permitirá a la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, iniciar la construcción de una línea de evolución tecnológica en el desarrollo de equipos de laboratorio innovadores.

Se ha decido entonces desarrollar un sistema de sustentación neumático que pueda ser utilizado para prácticas de laboratorio y que pueda simular procesos de control industrial. Este dispositivo permitirá a los estudiantes conocer y utilizar una máquina elaborada bajo el principio de la una integración sinérgica de elementos mecánicos, electrónicos, de software y controladores inteligentes que podrían ser incorporados en distintos procesos productivos de l vida cotidiana.

El objetivo del proyecto es controlar la altura de un elemento al interior de un cilindro por medio de una electro válvula, la cual regula el paso de aire necesario para la suspensión del elemento.

Esta electroválvula suministra cantidades variables de aire por la parte inferior del cilindro generando un desplazamiento del elemento proporcional al caudal del aire ingresado; dicho desplazamiento va a ser monitoreado por un sensor que entregará información, la cual será procesada por un sistema de control que determina la apertura proporcional de la electroválvula en razón a la señal suministrada logrando así el nivel deseado.

El comportamiento dinámico de esta planta la hace apropiada para la implementación de un control difuso, por lo tanto el control será un elemento esencial en la realización del proyecto. Esto redundaría en un producto con buen nivel tecnológico muy similar al tipo de control en los procesos más sofisticados de la industria mundial.

Se hace acopio de un sistema de diseño concurrente por medio del cual se realizó la construcción de la máquina Mecatrónica. Se muestran los pasos que se han de seguir de acuerdo a la estrategia y metodología utilizada para su realización. Por último se presentan los fundamentos teóricos de todos los dispositivos que se implementan en la construcción de la máquina, así como una breve descripción del campo en el cual se incursiona con la realización de dicho proyecto, es decir, como se implementará la neumática junto con la electrónica y mecanismos de control de procesos y demás.

# 1 FASE INICIAL DEL PRODUCTO

## 1.1 PLANTEAMIENTO DE LA MISIÓN

- **Objetivos De Marketing:** Entrega para el mes de julio de 2003 a un empresa educativa que manifiesta su interés por el dispositivo ya que es idóneo para las prácticas de los diferentes tipos de control (análogo, digital, inteligente).
  
- **Mercado Primario:** Empresas encargadas de la educación superior, tales como universidades o centros educativos en los cuales la enseñanza de control sea imprescindible
  
- **Mercado Secundario:** Empresas que vinculen en sus procesos el control de la altura de un elemento dentro de un cilindro, o empresas que requieran en algunos de sus procesos la sustentación neumática
  
- **Premisas y Restricciones:**
  - Dispositivo automático manipulado por su un software de control.
  - El volumen máximo del cilindro es determinado por el cliente junto con el peso a soportar para así mismo efectuar el análisis pertinente.
  - El dispositivo debe ser preciso en el posicionamiento y repetible a través de varios ciclos de funcionamiento.
  
- **Partes Implicadas:**
  - Cliente (Empresa)
  - Grupo de Diseño

## 1.2 IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES

**Tabla 1. Listado de Necesidades**

|   |  |
|---|--|
| El dispositivo es rápido de controlar.                      | El dispositivo tiene buena resolución.                             |
| El dispositivo es preciso.                                  | El dispositivo es flexible a un rediseño                           |
| El dispositivo tiene buena repetibilidad al ser controlado. | El dispositivo es estético en ambientes industriales y educativos. |
| El dispositivo es liviano.                                  | El dispositivo tiene garantía                                      |
| El dispositivo es fiable.                                   | El dispositivo tiene una larga vida.                               |
| El dispositivo se puede manejar fácilmente.                 | El dispositivo consume poca de energía                             |
| El dispositivo es de fácil mantenimiento.                   | El dispositivo es Verificable                                      |
| El dispositivo es seguro                                    | El dispositivo trabaja en ambientes pesados u hostiles             |
| El dispositivo debe ser fácil de instalar                   | El dispositivo es autónomo.  |
| El dispositivo tiene un volumen determinado                 | El dispositivo es resistente a la Corrosión                        |
| El dispositivo debe ser fácil de transportar                | La interfaz con el usuario es amigable                             |

**Tabla 2. Elimina Redundancias, Agrupa Necesidades Según Similitud**

| <b>POR ROBUSTES</b>  | <b>IMPORTANCIA</b> |
|--|--------------------|
| El dispositivo es preciso                                  | 5                  |
| El dispositivo tiene buena repetibilidad.                  | 5                  |
| El dispositivo es de bajo consumo de energía neumática     | 5                  |
| El dispositivo es flexible a un rediseño                   | 3                  |
| El dispositivo es de fácil mantenimiento                   | 3                  |
| El dispositivo es estético y trabaja en ambientes pesados. | 4                  |
| <b>POR OPERACIONES</b>                                     |                    |
| El dispositivo es autónomo.                                | 3                  |
| La interfaz con el usuario es amigable                     | 4                  |
| El dispositivo se puede manejar fácilmente.                | 5                  |
| <b>OTROS</b>   |                    |
| El dispositivo tiene garantía.                             | 3                  |
| El dispositivo tiene una larga vida.                       | 4                  |
| El dispositivo es económico                                | 3                  |
| El dispositivo es seguro                                   | 5                  |
| El dispositivo es resistente a la corrosión.               | 5                  |
| <b>CARACTERISTICAS FISICAS</b>                             |                    |
| El dispositivo es liviano.                                 | 4                  |
| El dispositivo tiene un volumen determinado                | 4                  |
| El dispositivo es rápido de controlar                      | 5                  |
| El dispositivo es verificable                              | 5                  |

### 1.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

**Tabla 3. Describe lo que hace el producto pero no se como dice como se hará.**

| #         | NECESIDADES   | IMP      |
|-----------|---|----------|
| 1         | El dispositivo es preciso   | 5        |
| 2         | El dispositivo tiene buena repetibilidad.                                 | 5        |
| 3         | El dispositivo es de bajo consumo de energía                              | 5        |
| 4         | El dispositivo es flexible a un rediseño                                  | 3        |
| 5         | El dispositivo es de fácil mantenimiento                                  | 3        |
| 6         | El dispositivo es estético y trabaja en ambientes pesados.                | 4        |
| 8         | El dispositivo es autónomo.   | 3        |
| 9         | La interfaz con el usuario es amigable                                    | 4        |
| 10        | El dispositivo se puede manejar fácilmente.                               | 5        |
| 12        | El dispositivo tiene garantía.  | 3        |
| 13        | El dispositivo tiene una larga vida.                                      | 3        |
| 14        | El dispositivo es económico   | 2        |
| 15        | El dispositivo es seguro  | 5        |
| 16        | El dispositivo resistente a la corrosión del medio ambiente               | 5        |
| 17        | El dispositivo es liviano.  | 4        |
| 18        | El dispositivo tiene un volumen determinado                               | 4        |
| 19        | El dispositivo es rápido.   | 5        |
| <b>20</b> | <b>Un dispositivo que controle el nivel de un elemento reumáticamente</b> | <b>5</b> |

**Tabla 4. Da medidas y unidades relacionadas con la Métrica del dispositivo**

| MÉTRICA # | NEED # | MÉTRICA                          | IMP | UNIDAD          |
|-----------|--------|----------------------------------|-----|-----------------|
| 1         | 1      | Precisión en el control.         | 5   | Cv < %          |
| 2         | 7,8    | Rango de ubicación en el control | 5   | Cant            |
| 3         | 19,20  | Tiempo de ejecución a controlar  | 5   | Seg             |
| 4         | 17     | Peso                             | 4   | Kg              |
| 5         | 14     | Precio                           | 2   | US \$           |
| 6         | 15     | Seguridad                        | 5   | Subj (Fs)       |
| 7         | 16     | Resistencia a factores externos  | 5   | Subj            |
| 8         | 12     | Garantía                         | 3   | Días            |
| 9         | 2      | Repetitividad en el control      | 5   | %               |
| 10        | 18     | Volumen del dispositivo          | 4   | cm <sup>3</sup> |
| 11        | 3      | Consumo                          | 5   | Vatios          |
| 12        | 4,6,13 | Calidad                          | 3   | Subj            |
| 13        | 5,9,10 | Facilidad de Uso                 | 4   | Subj            |
| 14        | 11     | Visualización                    | 5   | mm              |



#### 1.4 LISTADO DE ESPECIFICACIONES PRELIMINARES

Para el desarrollo de las especificaciones preliminares tomamos en cuenta las métricas obtenidas en la identificación de necesidades para fijar los valores ideales y aceptables según la prioridad de cada caso.

Se debe tener en cuenta que todas las medidas de carácter subjetivo se toman en una escala de 1 a 5.

**Tabla 5. Proporciona valores y unidades en correspondencia a la métrica escogida**

| MÉTRICA # | NEED # | MÉTRICA                         | IMP | UNIDAD          | VALOR       |
|-----------|--------|---------------------------------|-----|-----------------|-------------|
| 1         | 1      | Precisión                       | 5   | Cv < %          | CV < 3      |
| 2         | 7,8    | Rango de ubicación en el contr. | 5   | mm.             | 800         |
| 3         | 19,20  | Tiempo de ejecución a control   | 5   | Seg             | < 10        |
| 4         | 17     | Peso                            | 4   | Kg              | < 7         |
| 5         | 14     | Precio                          | 2   | US \$           | 1500 - 2000 |
| 6         | 15     | Seguridad                       | 5   | Subj (Fs)       | 4 – 5       |
| 7         | 16     | Resistencia a factores externos | 5   | Subj            | 4           |
| 8         | 12     | Garantía                        | 3   | Días            | 365         |
| 9         | 2      | Repetitividad en el controlador | 5   | %               | < 3         |
| 10        | 18     | Volumen de manipulación         | 4   | cm <sup>3</sup> | 31400       |
| 11        | 3      | Consumo                         | 5   | Watts           | 30          |
| 12        | 4,6,13 | Calidad                         | 3   | Subj            | 4           |
| 13        | 5,9,10 | Facilidad de Uso                | 4   | Subj            | 5           |
| 14        | 11     | Visualización                   | 5   | Mm              | 1000        |

## 2 DISEÑO CONCEPTUAL

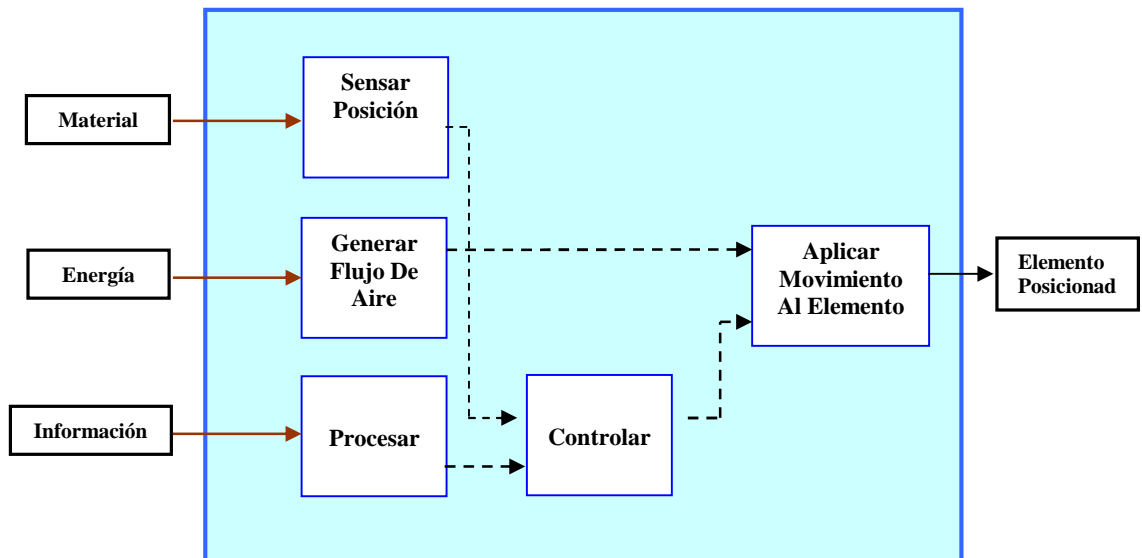
### 2.1 DESCOMPOSICIÓN FUNCIONAL

Con base en la función principal que debe cumplir el dispositivo y los requerimientos planteados realizamos una descomposición funcional, en la cual se expresan los principales flujos de información, materia y energía con sus correspondientes subfunciones para llegar al dispositivo con las características deseadas.

**Ilustración 1. Función Principal**



**Ilustración 2. Descomposición Funcional de la Función Principal**



## 2.2 GENERACION Y SELECCION DE CONCEPTOS

Estos tipos de búsqueda se realizan para generar conceptos tanto del problema entero como de las sub. funciones que lo rigen y de ahí seleccionar los mejores en pro de cumplir los requerimientos establecidos (Ver Anexo F). Según lo anterior se obtiene los siguientes conceptos:

Conceptos generados para la sub. función “Energía”:

- Energía Eléctrica.
- Energía neumática.

Conceptos generados para la sub. función “Procesar”:

La generación de conceptos para esta sub. función esta ligada a un requisito planteado por el usuario, la utilización de una interfaz, la cual recibe los parámetros necesarios para iniciar el proceso; La generación de conceptos muestra que la obtención de estos parámetros (señales) puede hacerse por un software especializado.

- V.Basic 6.0
- Software realizado en Matlab 6.0
- Minide (programa para generar código embebido para micros)

Conceptos generados para la subfunción “Ejercer Control”:

- Controlador Analógico
- Controlador Digital
- Controlador Difuso

Cuando se habla de control se refiere a cualquier tipo de tratamiento de las señales según sea el mecanismo escogido de modelamiento del sistema de control.

Para ello podemos utilizar un microcontrolador o utilizar el computador con un software especializado donde se realizan los modelos matemáticos de control.

En cualquiera de las opciones será necesario sacar las señales por algún puerto de fácil acceso y manejo. Adicionalmente se identifica la posibilidad de realizar tal tarea con una tarjeta de adquisición de datos.

Conceptos generados para la sub. función “Identificar Elemento”:

- El peso determinado que tendrá el elemento a controlar
- El tamaño que tiene el elemento.
- Posición inicial del elemento.

Conceptos generados para la sub. función “Transformar energía a movimiento”:

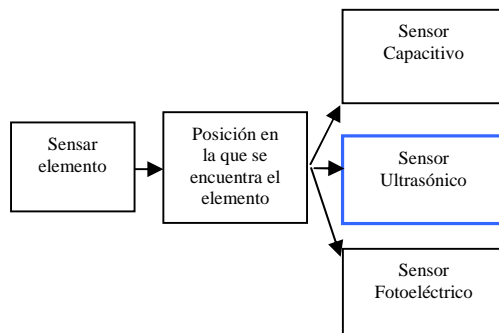
- Energía Eléctrica  
Motores eléctricos (ventiladores)
- Energía Neumática  
Electroválvula

Conceptos generados para la sub. función “Aplicar movimiento al material”:

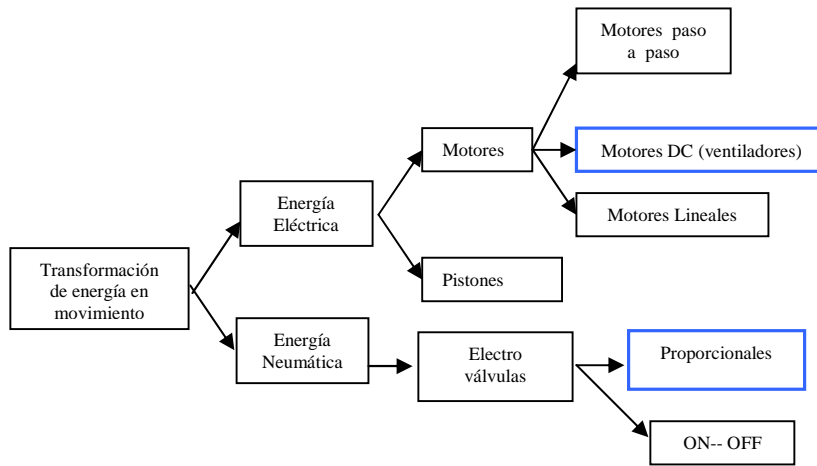
- Sustentador Neumático

### 2.2.1 Árboles de clasificación

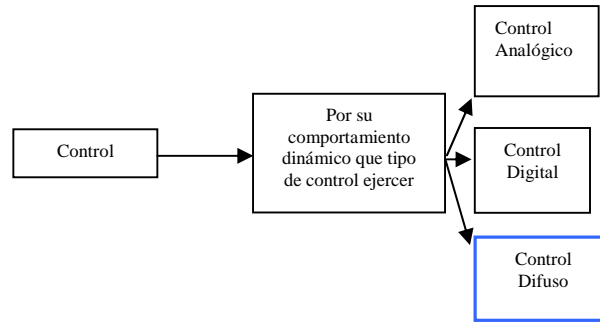
**Ilustración 3. Muestra posibles opciones para sensar el elemento**



**Ilustración 4. Muestra posibles opciones para generar el flujo de aire**



**Ilustración 5. Muestra las opciones de control que se pueden implementar**



**2.2.2 Tabla de combinación de conceptos**

**Ilustración 6. Muestra las posibles variables combinatorias**

|   | Tipo de Energía   | Capturar Señal | Sensado de la Señal | Control           | Energía en Movimiento | Movimiento del Material |
|---|-------------------|----------------|---------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | Energía Eléctrica | Visual Basic 6 | Sensor Ultrasónico  | Control Analógico | Motores               | Sustentador Neumático   |
| 2 | Energía Neumática | Matlab 6.5     | Sensor Capacitivo   | Control Digital   | Electroválvulas       |                         |
| 3 |                   | MINIDE         |                     | Control Difuso    |                       |                         |

A partir de la tabla de combinación de conceptos se obtienen alrededor de 72 conceptos diferentes. De los cuales se trabajaran los más relevantes para el grupo de diseño.

Primera combinación: (A) 122111

### Ilustración 7. Combinación de conceptos A.



Segunda combinación: (A) 211121

### Ilustración 8. Combinación de conceptos B.



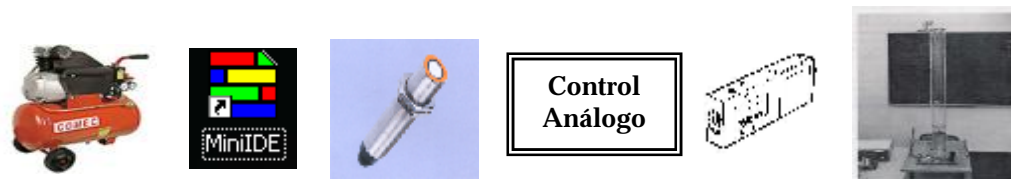
Tercera combinación: (C) 111211

### Ilustración 9. Combinación de conceptos C.



Cuarta combinación: (D) 231121

### Ilustración 10. Combinación de conceptos D.



Quinta combinación: (E) 221321

**Ilustración 11. Combinación de conceptos E.**



Sexta combinación: (F) 212221

**Ilustración 12. Combinación de conceptos F.**



**2.3 SELECCIÓN DE CONCEPTOS**

**2.3.1 Tamizaje de conceptos**

**Tabla 6. Ponderación de los criterios a seleccionar**

| Criterio de Selección                          | Variantes de Conceptos |    |    |    |    |    | Ref |
|--|------------------------|----|----|----|----|----|-----|
|  | A                      | B  | C  | D  | E  | F  |     |
| El dispositivo es preciso en su control        | -                      | -  | 0  | +  | -  | -  | 0   |
| El dispositivo tiene buena repetibilidad.      | -                      | -  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0   |
| La interfaz con el usuario es amigable         | +                      | +  | +  | -  | +  | 0  | 0   |
| El dispositivo se puede manejar fácilmente.    | +                      | +  | +  | -  | +  | 0  | 0   |
| El dispositivo tiene una larga vida.           | 0                      | +  | +  | +  | +  | +  | 0   |
| El dispositivo es económico                    | +                      | -  | -  | +  | -  | -  | 0   |
| E l dispositivo es seguro                      | +                      | +  | 0  | +  | +  | 0  | 0   |
| El concepto impulsa nuevas técnicas de control | -                      | -  | -  | -  | +  | +  | 0   |
| El tipo de control estabiliza rápido           | -                      | -  | 0  | +  | 0  | 0  | 0   |
| El dispositivo tiene buena resolución          | 0                      | +  | -  | 0  | 0  | +  | 0   |
| Positivos                                      | 4                      | 5  | 3  | 5  | 5  | 3  |     |
| Iguales  | 2                      | 0  | 4  | 2  | 4  | 5  |     |
| Negativos                                      | 4                      | 5  | 2  | 3  | 2  | 2  |     |
| Total  | 0                      | 0  | 1  | 2  | 3  | 1  |     |
| Orden  | 3                      | 3  | 0  | 2  | 1  | 3  |     |
| Continuar?                                     | no                     | no | no | si | si | no |     |

Se suman el puntaje de los positivos con los negativos indicando el total, el orden en el cual los conceptos se deberían seguir elaborando. Los concepto D y E son los que se seguirán evaluando por haber obtenido mayor puntaje en el tamizaje de conceptos.

## 2.4 PRUEBA DE CONCEPTOS

### 2.4.1 Matriz para evaluar conceptos

**Tabla 7. Ponderación numérica de los conceptos más fuertes**

|   |               | Variante de Conceptos |                    |      |                    |
|---|---------------|-----------------------|--------------------|------|--------------------|
|   |               | D                     |                    | E    |                    |
| Criterio de Selección                       | % Ponderación | Nota                  | Criterio Ponderado | Nota | Criterio Ponderado |
| El dispositivo es preciso en su control     | 12            | 4                     | 0.48               | 4    | 0.48               |
| El dispositivo tiene buena repetibilidad.   | 12            | 4                     | 0.48               | 4    | 0.48               |
| La interfaz con el usuario es amigable      | 6             | 2                     | 0.12               | 4    | 0.24               |
| El dispositivo se puede manejar fácilmente. | 6             | 2                     | 0.12               | 4    | 0.24               |
| El dispositivo tiene una larga vida.        | 14            | 3                     | 0.42               | 4    | 0.56               |
| El dispositivo es económico                 | 10            | 4                     | 0.4                | 3    | 0.3                |
| El dispositivo es seguro                    | 12            | 3                     | 0.36               | 3    | 0.36               |
| El dispositivo es liviano.                  | 8             | 3                     | 0.24               | 3    | 0.24               |
| El control es rápido es estabilizarse       | 10            | 3                     | 0.3                | 3    | 0.3                |
| El dispositivo tiene buena resolución       | 10            | 4                     | 0.4                | 4    | 0.4                |
| <b>Total:</b>                               | 100 %         |                       | 3.32               |      | 3.6                |
|   | Orden         |                       | 2                  |      | 1                  |
|   | Continuar?    |                       | <b>Opcional</b>    |      | <b>Desarrollar</b> |

Utilizamos el método de Matriz Para Evaluar Conceptos, por considerarlo el más efectivo para la selección de los conceptos a desarrollar. Los porcentajes de ponderación se ponen según la experticia del grupo de diseño.

Después de realizado todo el proceso pertinente de evaluación de conceptos, arrojo como resultado que el concepto **E** es el mejor para desarrollar, sin embargo el concepto **D** tiene un porcentaje muy cercano por tanto se considero opcional. La única diferencia apreciable entre estos dos conceptos es el software en el cual se va ejercer el control. Por lo tanto el grupo de trabajo determino realizar ambos conceptos. Se evaluara el control del dispositivo en el software Matlab 6.5 y también se realizara en el microcontrolador para así desligar el proceso del dispositivo del Pc, el software en el cual se trabajara será en el MINIDE el cual se encargara de descargar el programa en el Microcontrolador.



### 3 ARQUITECTURA DE PRODUCTOS

La arquitectura de productos busca el arreglo de elementos funcionales en conjuntos físicos (*chunks*) que constituirán los ladrillos del producto o de la familia de productos. Existen diversos tipos de Arquitectura de Productos las cuales se implementa de acuerdo a las necesidades del producto o proceso. El tipo de arquitectura a trabajar en el Sustentador Neumático será una arquitectura modular por se acorde a lo que se quiere llevar a cabo con el dispositivo. La arquitectura modular se define de la siguiente forma:

- Los conjuntos implementan una o pocas funciones completamente.
- La interacción entre los conjuntos está bien definida.
- La arquitectura modular tiene la ventaja de la simplicidad y reutilización para una familia de productos o plataforma

#### 3.1 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA ARQUITECTURA

Para la simplicidad en el manejo de la arquitectura del producto se subdivide el problema en niveles de trabajo.

- **Nivel de Sistema** (arquitectura modular). Para obtener sencillez en el diseño, ensamble, fácil manipulación y mantenimiento del dispositivo.
- **Nivel de Subsistemas** (arquitectura modular). Los subsistemas están encargados de realizar una función a excepción de las sub. funciones procesar y control que se podrían resumir en una, sin embargo esta situación no quebranta el carácter modular a este nivel.
- **Nivel de componentes** (arquitectura modular seccional). A nivel de componentes resulta mejor para el equipo implementar una arquitectura modular por las facilidades de diseño, control, construcción y consecución de los dispositivos y por lo tanto una considerable reducción en el tiempo de desarrollo.



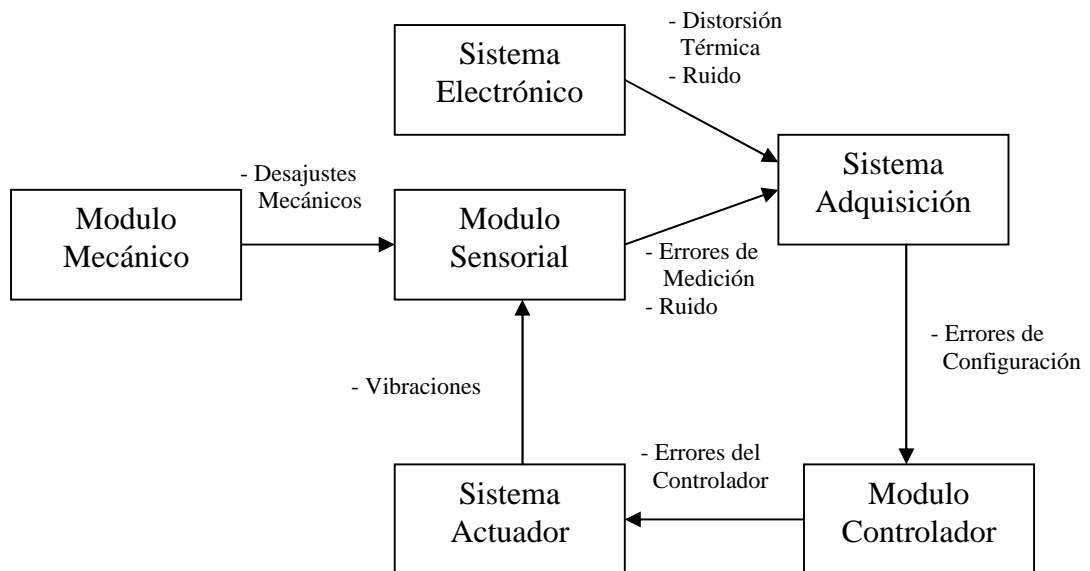
### 3.3 DISTRIBUCION GEOMETRICA DE LOS ELEMENTOS

Permite determinar si es posible la distribución de los conjuntos en un espacio dado y si es posible mejorar la distribución o agrupar de forma diferente los mismos. Analizando características como compatibilidades mecánicas, físicas y teniendo en cuenta los requerimientos del cliente y de ingeniería se llega a un esquema global, el cual cumple de manera óptima con todo lo planteado en las etapas anteriores de diseño (Ver Anexo A).

### 3.4 INTERACCIONES INCIDENTALES DE ELEMENTOS FUNCIONALES

Las relaciones incidentales se derivan de la implementación física de elementos funcionales o por la distribución geométrica de los conjuntos. Con base en este concepto se analizan las interacciones incidentales resultantes del dispositivo. Ver Ilustración 14.

**Ilustración 14. Muestra las relaciones incidentales entre los elementos funcionales**



- **Sensar – Posicionar.** Pueden presentarse fallas en la medición cuando el elemento se esta posicionando, es posible que este llegue a ubicarse en la zona muerta o rango muerto del sensor, una de las maneras de solucionar esta interacción es definir de una manera clara y concisa los rangos de control o sintonizar el sistema para que la acción de control no produzca un sobre impulso tal que pueda llegar a esta zona.
- **Aplicar movimiento – Posicionar.** Puede suceder que al aplicar movimiento la turbulencia del flujo produzca un atascamiento de elemento que se quiere controlar, esto se soluciona con un corte milimétrico de los discos que se sustentan dentro del cilindro.
- **Controlar - Posicionar.** Es muy posible que en principio el controlador no funcione adecuadamente y no se logre con exactitud la posición deseada, para esto es necesario realizar un proceso de sincronización del controlador.
- **Sensar - Procesar.** Aunque el comportamiento dinámico de la planta sea el adecuado eso no garantiza que la medición también lo sea ya que el ruido del flujo, el material o la cercanía de las paredes pueden inducir incoherencias, por esta razón es necesario implementar un instrumento de medición robusto que tome en cuenta estas limitaciones y además que se adapte a posibles cambios.

## 4 DISEÑO INDUSTRIAL

*‘Servicio profesional de crear y desarrollar conceptos y especificaciones que optimicen la función, valor y apariencia de los productos y sistemas para el beneficio mutuo, tanto del usuario como del productor’* Descripción de Diseño Industrial Según *The Industrial Designer Society of América (IDSA)*. El Diseño Industrial busca evaluar lo que el dispositivo va a comunicar, la filosofía corporativa y su misión, por medio de la apariencia visual.

Para esta etapa se tuvo en cuenta algunos aspectos propios de cualquier dispositivo mecatrónico actual, entre ellos esta la seguridad, utilidad, apariencia, facilidades de mantenimiento, facilidad de manipulación, bajo costo y comunicación. Siendo la primera la de más relevancia para el grupo de trabajo, por ser esta una característica fundamental en cualquier dispositivo y en cualquier ambiente industrial.

Para evaluar que tan productivo va a ser el diseño industrial, identificamos unas necesidades ergonómicas y estéticas que a su vez integran un sin número de conceptos relevantes para el diseño final del producto Mecatrónico. Se plantearon preguntas de relevancia para cada necesidad en particular.

Según las necesidades ergonómicas se tienen los siguientes interrogantes:

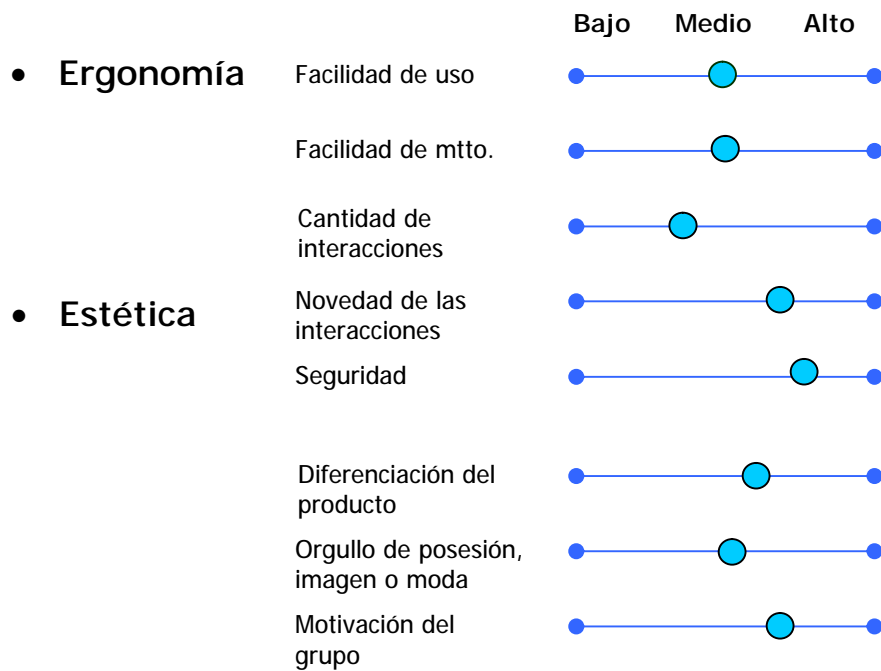
- Ø ¿Cuán importante es la **facilidad de uso**?
- Ø ¿La **facilidad de mantenimiento**?
- Ø ¿Cuántas deben ser las **interacciones que se requieren con el usuario** para hacer que el producto funcione?
- Ø ¿Cuánta **novedad involucran esas interacciones**?
- Ø ¿Cuáles son los **aspectos de seguridad a considerar**?

Según las necesidades estéticas se tienen los siguientes interrogantes:

- Ø ¿Se requiere una **diferenciación visual del producto**?
- Ø ¿Cuán importante es el **orgullo de posesión, la imagen y la moda**?
- Ø ¿Podría la estética del producto **motivar al equipo de desarrollo**?

Se obtiene los resultados evaluados por el grupo de diseño al dar respuestas a los anteriores cuestionamientos en la Ilustración15.

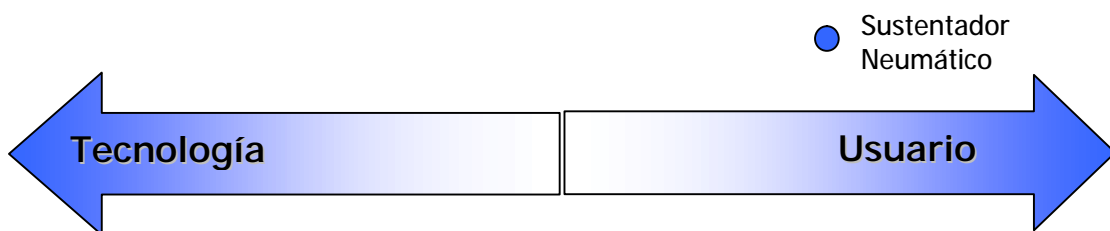
**Ilustración 15. Muestra la valoración del nivel de importancia del Diseño Industrial**



Se procede a identificar en que campo esta ubicado el producto. Si esta dominado por el usuario o dominado por la tecnología según sea el criterio del grupo de diseño.

Para el equipo de desarrollo los requerimientos ingenieriles y técnicos tienen un alto nivel de importancia pero la importancia mayor esta puesta en la comodidad de utilización del usuario. Como se observa en la Ilustración16 el dispositivo esta orientado al usuario.

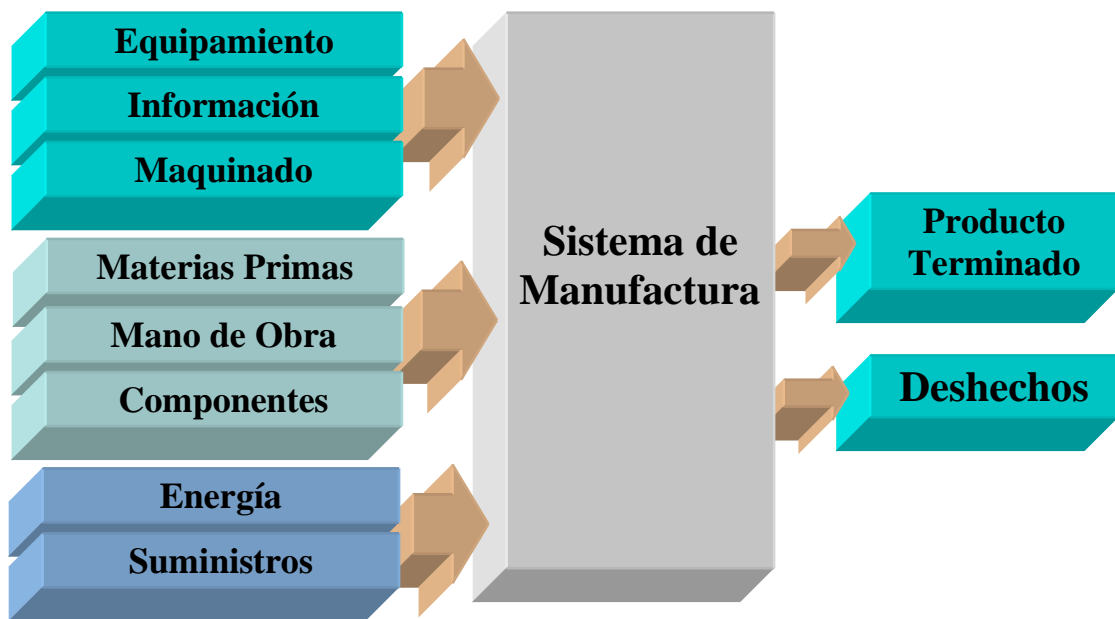
**Ilustración 16. Muestra la orientación del producto**



## 5 DISEÑO PARA MANUFACTURA

El diseño para manufactura busca como su principal objetivo reducir los costos de producción de cualquier tipo de dispositivo sin sacrificar bajo ninguna circunstancia su calidad, ya que es preferible, y así se asumió en el grupo de diseño, sacrificar costos por calidad. Se realiza una planeación estratégica en cuanto al modelo a usar en el sistema de manufactura.

**Ilustración 17. Muestra el esquema de manufactura**



Al final del proceso de manufactura lo que se obtiene es el producto terminado y funcionando como se expuso desde el primer momento. También es posible que obtengan unos deshechos por la misma realización del producto Mecatrónico, lo que el grupo quiere es minimizar al máximo estos deshechos ya que estos implican dinero y tiempo perdido.

A continuación se explicaran cada uno de los argumentos que serán manejados por el sistema de manufactura para así poder obtener un buen producto reduciendo costos pero sin sacrificar la calidad como se menciono anteriormente.

Se tiene claro cada uno de los elementos de entrada al sistema de manufactura para así poder tener claro cuales serán los costos y obtener un mínimo de desechos. Las entradas al sistema de manufactura están definidas de la siguiente forma:

- Ø **Equipamiento:** El equipamiento hace referencia a los recursos tanto humanos como tecnológicos con los que cuenta el equipo de diseño. Para el caso particular se cuenta con un muy buen equipo humano con ganas de aprender para ganar experiencia; en cuanto a lo tecnológico se cuenta con instrumentos de alta tecnología suficiente para emprender a la elaboración del trabajo.
- Ø **Información:** La información hace referencia a una investigación realizada con anterioridad en la cual se conoce con que se cuenta y que se necesita para encaminar el proyecto a un feliz término.
- Ø **Materias Primas:** En cuanto a materias primas se refiere; se utilizara acrílico para la composición de la estructura y aluminio para la base del sistema.
- Ø **Mano de Obra:** La mano de obra en el caso particular serán los miembros del grupo de diseño y técnicos con mayor experiencia que puedan servir de ayuda en un momento determinado.
- Ø **Componentes:** Se cuentan con diversidad de componentes básicos necesarios para la buena elaboración y un buen funcionamiento del proyecto. (Todos los componentes serán referenciados en detalle mas adelante).
- Ø **Energía:** La energía a la cual se hace referencia es al tipo de energía con la que se va a trabajar; para el particular habrán dos tipos de energía que se utiliza. La energía Eléctrica y Energía Neumática.
- Ø **Suministros:** Los suministros que utilizara el grupo de trabajo serán las compañías FESTO y SIEMENS.



Los costos de manufactura están dados por tres componentes básicos que a su vez se subdividen en otros costos de manufactura como se observa en la Ilustración 18.

Ø **Costo de los componentes:**

§ Partes estándares: se compran (motores, switches, ICs, tornillo, etc.)

§ Partes propias: fabricadas según el requerimiento a partir de materia prima (láminas de acero, plástico, aluminio, etc.)

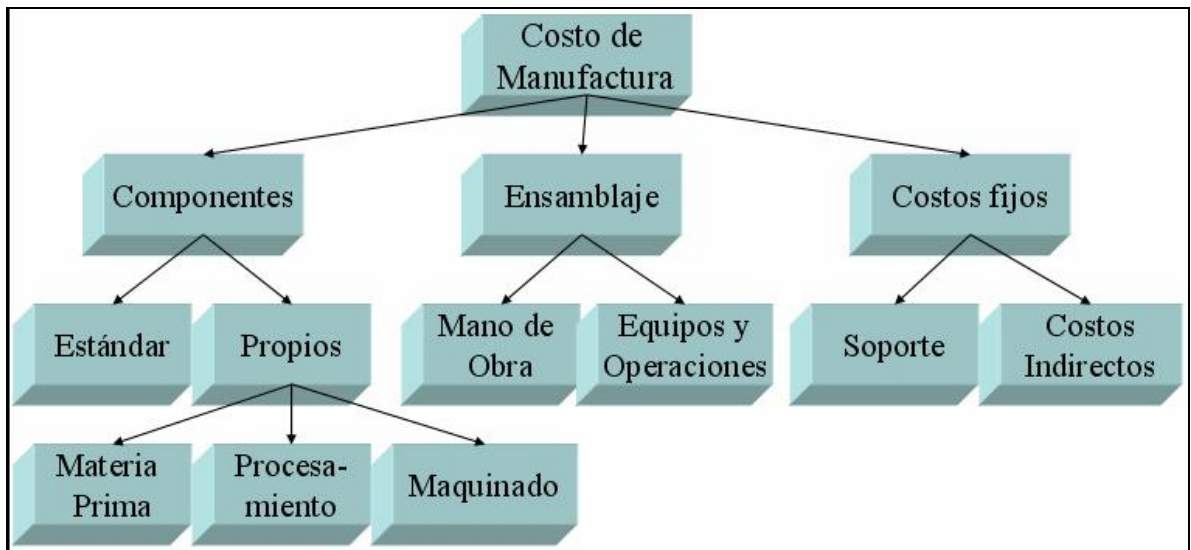
Ø **Costos de Ensamblaje.** Válido para productos discretos

Ø **Costos fijos:** abarca todos los otros costos.

§ **Costos de aseguramiento:** manipulación de materiales, aseguramiento de la calidad, compras, embarque, recepción, mantenimiento de equipos y maquinaria, etc.

§ **Costos indirectos:** no se pueden asociar directamente. Ej. Salario personal de seguridad, mantenimiento del edificio, etc.

**Ilustración 18. Costos de manufactura**

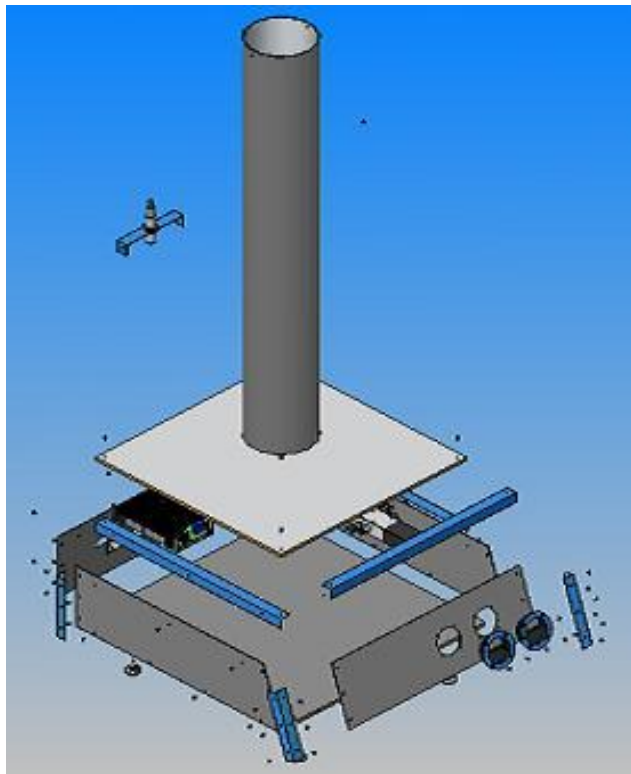


Para el producto del sustentador neumático no existe el costo de ensamble ni costos fijos debido a que solo se va a generar un dispositivo y no se cumple con sus requerimientos.

## 5.1 DISEÑO PARA ENSAMBLE

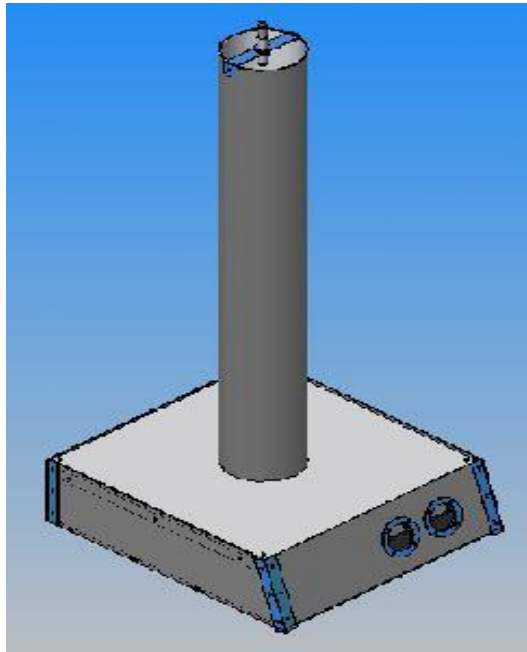
El diseño para ensamble es una parte muy importante en el diseño para manufactura ayudando en la reducción de costos en la producción de un producto; ya que si economizamos tiempo en el ensamblaje los costos de manufactura serán menores y en una producción masiva el ahorro seria mayor. Se realiza un despiece del sistema de sustentación neumática (Ilustración19) para evaluar la forma en que podrá ensamblar el dispositivo.

### Ilustración 19. Muestra el despiece del sustentador neumático



Como se observa en el despiece del sustentador, las partes son colocadas intuitivamente por el usuario, muchas partes se insertan desde arriba del dispositivo, existen partes autoajustables; estas características son benéficas para maximizar la facilidad de ensamble y obtener en un tiempo mínimo de ensamblaje y terminado del producto. Generando un ahorro de tiempo el cual se ve reflejado en la disminución de costos del diseño de manufactura. En la Ilustración20 se observa el dispositivo terminado después del ensamble.

**Ilustración 20. Sustentador Neumático en su estado final**



## 5.2 LISTA DE COMPONENTES

|   |              |
|---|--------------|
| Ø Electro válvula Proporcional reguladora de Caudal | \$ 1,483,525 |
| o 4 Racores   | \$ 28,169    |
| o 2 Silenciadores                                   | \$ 17,464    |
| o 5m Manguera de Conexión                           | \$ 27,492    |
| o DHL(envío)  | \$ 200,000   |
| o Plug de Conexión Electro válvula                  | \$ 45,756    |
| o Dispositivo de conexión con la tubería            | \$ 15,250    |
| Ø Sensor Bero Sonar Ultrasónico                     | \$ 1,250,000 |
| o Plug de Conexión                                  | \$ 83,520    |
| o DHL (envío)                                       | \$ 150,000   |
| Ø Montaje estructura de acrílico                    | \$ 180,000   |
| Ø Tubo de acrílico inyectado (importado)            | \$ 220,000   |
| Ø Base de Aluminio                                  | \$ 100,000   |
| Ø 30 Tornillos                                      | \$ 3,000     |
| Ø Fuente swichada VCD 24v                           | \$ 320,000   |
| Ø 7 m de cable para conexiones                      | \$ 2,000     |
| Ø Conector Para cable                               | \$ 2,600     |
| Ø Cable de AC                                       | \$ 3,200     |
| Ø Swiche de encendido                               | \$ 3,900     |
| Ø Plugs para conexión                               | \$ 4,500     |

Se tiene un número de piezas establecidas de 16 piezas totalmente independientes y se estima un costo alrededor de \$ 4'140.376.

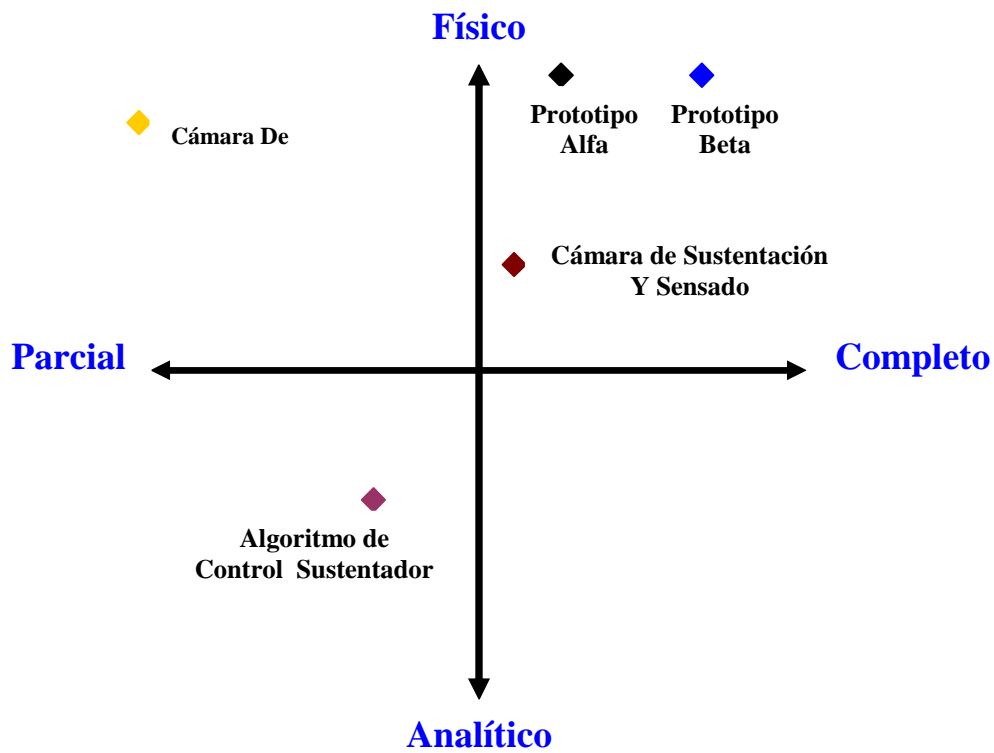
## 6 PROTOTIPADO

La fase de prototipado es una aproximación al producto a través de una o más dimensiones de interés. Puede ser un boceto de los conceptos, modelos matemáticos y versiones totalmente funcionales de preproducción. Durante la fase de diseño se realizaron varios prototipos en su gran mayoría virtuales ya que permiten anticipar inconvenientes geométricos, hacer simulaciones de colisión sin riesgo, combinar los subsistemas resultantes mas relevantes en uno solo para acercarse a lo que será el prototipo final y de una manera casi paralela permiten comunicar las características de funcionamiento y la conformación estructural. Comunicaron de una manera visual los avances del proyecto y sirvieron para detectar posibles mejoras que efectivamente se hicieron.

### 6.1 TIPOS DE PROTOTIPO

Cada uno de los prototipos parciales se planteó con la idea de validar uno o dos subsistemas Independientemente; teniendo en cuenta las señales de entrada y salida de unos y otros para luego verificar el sistema total en un prototipo beta lo cual se refleja en la Ilustración21.

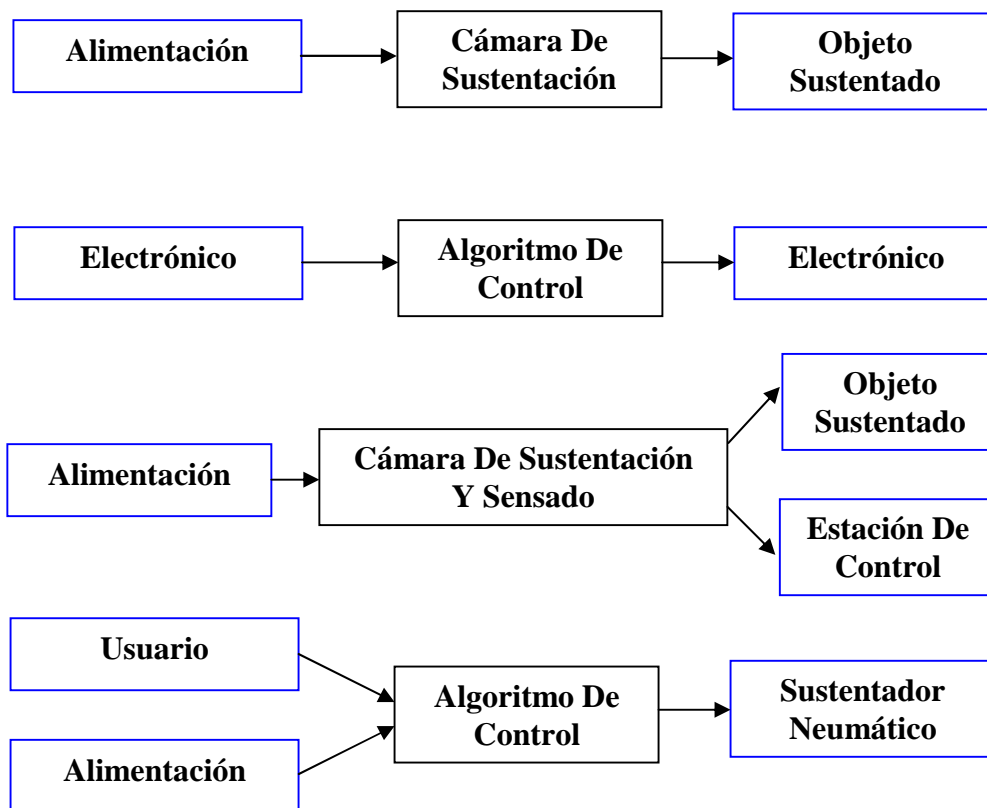
**Ilustración 21. Muestra los prototipos realizados.**



Las señales de entrada salida necesitan ser validadas para asegurarse que los valores son correctos y la dinámica del sistema adecuada. Para este caso los prototipos virtuales sirven para ofrecer una noción aritmética de cómo se comporta el dispositivo.

Para la fase de prototipado se escogieron los puntos críticos del sistema para evaluarlos como subsistemas y de esta manera detectar de forma rápida las fallas en cada uno de ellos y darle solución de acuerdo al prototipo en su conjunto y con ello garantizar una sinergia adecuada entre todos. Ver Ilustración22.

**Ilustración 22. Muestra la entrada y la salida de señales para la evaluación de prototipos**



Como se dijo anteriormente para esta fase se realizan prototipos virtuales ya que estos permiten realizar cambios rápidamente y a un costo comparativamente bajo. Los prototipos físicos se realizaron una vez que se realizaron la mayor cantidad de pruebas posibles pues su alto costo y tiempo de fabricación así lo exigen.

Se realizó un prototipo alpha en esta fase el cual fue un acercamiento al prototipo final y tenía el ánimo de probar el comportamiento de los subsistemas en su conjunto para localizar posibles fallas que no se detectaron en etapas anteriores, corregirlas, para posteriormente realizar una versión beta que es el prototipo final con que los usuarios empezaran a experimentar.

El prototipo realizado incluirá el subsistema cámara de levitación, el subsistema de sensado, un subsistema de posicionamiento controlado por una interacción con el Pc o Un Microcontrolador y un subsistema de software de control.

## 7 DISEÑO DETALLADO

Esta etapa de diseño se llevo a cabo teniendo en cuenta un enfoque mecatrónico sobre el dispositivo por lo cual se aplico un proceso de diseño estructurado y concurrente, acompañado de tres metodologías:

- Diseño Mecánico, para los mecanismos de sustentación y estructura, soporte y algunas consideraciones de tipo industrial.
- Diseño Electrónico, para el acondicionamiento de la señales del sensor, alimentación de los actuadores así como de las señales del computador o del microcontrolador.
- Diseño de Software, siendo esta última, una de las facetas de mas consideración ya que las técnicas de control difuso son muy nombradas pero pobremente documentadas e implementadas.

En el diseño detallado se especifican las medidas de los elementos, el material utilizado, las técnicas de control y los componentes electrónicos usados en la construcción de un sistema de sustentación neumático.

Se realizo un manual del usuario para la correcta manipulación del dispositivo de sustentación neumática. Ver Anexo L.

## **7.1 DISEÑO MECANICO**

Al comenzar la fase de diseño mecánico se pensó que debía ser un diseño flexible sobre el cual se pudiesen realizar algún tipo de actualización o rediseño, más aun si sufriese un desperfecto repararlo de forma rápida, es por esto que todas las piezas mecánicas excepto el cilindro de acrílico inyectado, son de bajo coste, fácil consecución. Para la fabricación se requieren conocimientos básicos de herramientas muy comunes.

### **7.1.1 Materiales Usados en el Dispositivo**

Para la conformación de la estructura en su parte inferior se escogió Aluminio 2024 debido a que presenta ventajas significativas respecto de otros materiales como el acero o la madera. Las ventajas que tienen estos materiales son:

- Debido a la gran afinidad del aluminio con el oxígeno forma con el paso del tiempo una fina capa de óxido en la superficie del metal que lo protege
- No induce corrientes eléctricas, no genera chispas, no es tóxico por eso se utiliza en empaques de alimentos, es incombustible y seguro pues no genera gases venenosos en combustión y es 100 % reciclable con un alto valor de recompra de la chatarra, fácil consecución y bajo coste
- Estabilidad en su brillo y textura.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Altas resistencias mecánicas reflejadas en un óptimo comportamiento en procesos de maquinado como curvado y troquelado.
- Resiste impacto de 2.5 Nm Impacto: ASTM D-2794
- Cambios mínimos a las 500 horas

Las partes que están hechas en este material son las caras laterales, la frontal, la trasera, perfiles, soportes, porta sensor, tornillos y remaches. Para sus geometrías y medidas (Ver Anexo G), El vidrio y acrílico poseen la característica de ser transparentes a la luz pero se descarta el vidrio por ser un material muy frágil haciendo que el prototipo en su conjunto sea inseguro e incumpla las especificaciones planteadas anteriormente. Entonces se opta por realizar consideraciones distintas de clases de acrílico (ver Ilustración23).



**Ilustración 23. Muestra las especificaciones de los acrílicos**

| Propiedad                                     | Método ASTM | Compuesto polimérico XT 2000 | Compuesto polimérico XT 250 | Compuesto polimérico XT 375 | Compuesto polimérico XT X800RG | Compuesto polimérico XT X800RH |
|---|-------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <b>CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS</b>                |             |                              |                             |                             |                                |                                |
| Transmisión lumínica, %                       | D-1003      | 92                           | 88                          | 86                          | 89                             | 86                             |
| Opacidad, %                                   | D-1003      | 2.5                          | 2.5                         | 3.0                         | 3.0                            | 3.5                            |
| Índice reflectivo                             | D-542       | 1.515                        | 1.515                       | 1.515                       | 1.515                          | 1.515                          |
| <b>CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS</b>             |             |                              |                             |                             |                                |                                |
| Factor de fluidez, g/10 min a 230 °C y 5.0 kg | D-1238      | 4.0                          | 3.5                         | 2.1                         | 14.0                           | 10.0                           |
| <b>CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS</b>              |             |                              |                             |                             |                                |                                |
| Resistencia a la tracción, MPa (psi)          | D-638       | 61.4 (8,900)                 | 55.2 (8,000)                | 48.3 (7,000)                | 43.4 (6,300)                   | 38 (5,500)                     |
| Módulo de elasticidad, GPa (Mpsi)             | D-638       | 3.4 (0.50)                   | 3.0 (0.43)                  | 2.6 (0.37)                  | 3.0 (0.43)                     | 2.0 (0.30)                     |
| Elongación al punto de fluencia, %            | D-638       | 3.0                          | 3.6                         | 3.6                         | 3.6                            | 3.5                            |
| Elongación al punto de rotura, %              | D-638       | 11.0                         | 15                          | 28                          | 5.6                            | 8.3                            |
| Resistencia a la flexión, MPa (psi)           | D-790       | 89.6 (13,000)                | 89.6 (13,000)               | 75.8 (11,000)               | 66.9 (9,700)                   | 62 (9,000)                     |
| Módulo de flexión, GPa (Mpsi)                 | D-790       | 2.8 (0.40)                   | 2.8 (0.40)                  | 2.4 (0.35)                  | 2.2 (0.32)                     | 2.0 (0.29)                     |

El compuesto Polimérico XT 2000 fue escogido por que presenta con un 92% la mayor transmisión lumínica, la mayor resistencia a la tracción con 61.3 MPa y la mayor resistencia a la flexión con 89.6 MPa entre otras características. Las partes que están hechas en este material son la tapa de la base y el tubo de sustentación, permitiendo la visualización del recorrido del elemento sustentado al interior del prototipo; cabe anotar que el tubo necesita tener una superficie deslizante uniforme, esto solo se logra con un cilindro que tenga un conformado por inyección. Para sus geometrías y medidas (Ver Anexo G).

Para la tapa inferior se eligió madera MDF, es un aglomerado de la madera que presenta características especiales, para este caso en particular hablamos de la textura y el color que conserva una evidente armonía con el resto del dispositivo, además tiene la capacidad de atenuar fácilmente las vibraciones producidas por el movimiento del actuador, en este caso la electroválvula, se consigue fácilmente y a bajo costo (Ver Anexo G).

## **7.2 DISEÑO ELECTRONICO**

Una de las secciones de mas interés es la del diseño electrónico del sistema de sustentación neumático ya que de este ítem depende el buen tratamiento que se la hagan a las señales. Para que estas puedan ser evaluadas de una forma correcta y adecuada según se requiera.

### **7.2.1 Elementos Electronicos Implementados**

Los elementos electrónicos que se utilizan en el sistema de sustentación neumática son tres:

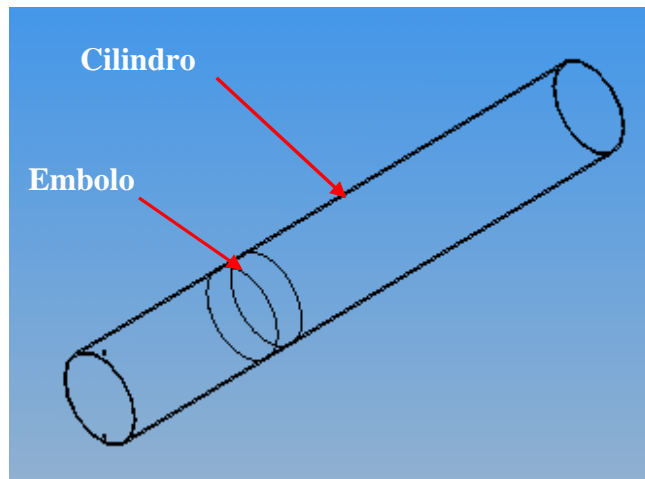
- Electroválvula Proporcional de Caudal
- Sensor Ultrasónico Bero Sonar
- Fuente Swichada Mean Well

#### **7.2.1.1 Dimensionado De La Electroválvula Proporcional De Caudal.**

La empresa Pneumatics Festo posee gran cantidad de aplicaciones para sus productos, entre ellas está el sistema Cilindro-Embolo que es susceptible de ser montado con válvulas on-off o electro válvulas proporcionales. Para este caso se hablara de un cilindro de simple efecto (Ver Ilustración 24) es decir que analizaremos la carrera de subida y se establecerá que la válvula MPYE-5-B es apropiada para los requerimientos del sistema.

En la tabla de dimencionamiento de valvulas suministrada por el fabricante (Ver Anexo C) se encuentra que para una carga aproximada de 200gr un diametro de 150mm y un diametro de racord de 1/8in podremos alcanzar una velocidad del embolo, que esta en un rango de 56 a 62.2 mm/s ya que el fabricante advierte que según las influencias técnicas del montaje o los condicionamientos de mando, la velocidad del embolo puede varias en  $\pm 10\%$ .

#### Ilustración 24. Muestra el esquema cilindro-embolo



Una vez que se tiene la velocidad que puede alcanzar el embolo, podremos hallar el caudal necesario para la carga de trabajo establecida y terminar el proceso de selección de la electroválvula;

$$Q = A * V$$

Donde:

Q = Caudal ( $m^3/s$ ) ; V = Velocidad (m/s) ; A = Sección transversal del cilindro

$$r = 1.28g / cm^3$$

$$A = p * (0.15m)^2 \quad A = 0.7m^2$$

$$V = 62mm / s \quad V = 0.062m / s$$

$$Q = 0.071m^2 * 0.062m / s = 0.00438m^3 / s$$

$$Q = 0.263m^3 / min$$

$$Q = 0.263 \frac{m^3}{min} * 1280 \frac{Lt}{m^3} = 336 \frac{Lt}{min}$$

Existe una tolerancia de 2mm entre el cilindro y el elemento sustentado al momento de ingresar el fluido al sistema se presentaran perdidas, y esto significa que el flujo necesario será un poco mayor por esta razón se escoge la electroválvula MPYE\_5\_B High Flow 1/8 de 700 l/min.

### 7.2.1.2 Dimensionamiento Del Sensor Ultrasónico Bero Sonar.

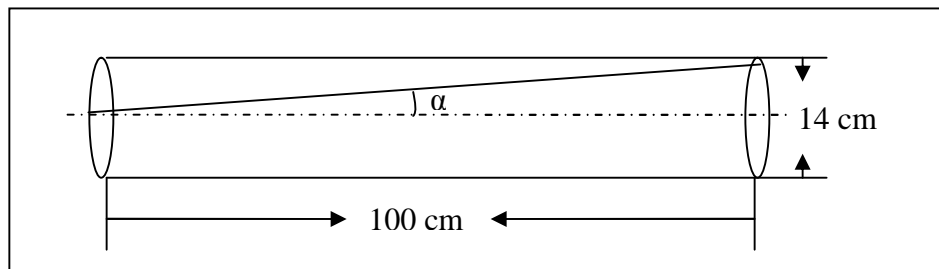
Establecidas las condiciones físicas del sistema de sustentación neumática se crea la necesidad de elegir un sensor que cumpla con los requerimientos de la planta. Las ondas sonoras que emita el sensor deben de estar en un rango de cono sónico de aproximadamente  $5^\circ$ , para que no valla a chocar las ondas con las paredes del cilindro y valla a emitir datos erróneos al sistema de control. Para llegar a estas conclusiones se realizaron los siguientes cálculos.

Se tiene un cilindro de diámetro 14 cm y de largo 100 cm.

$$\tan \alpha = \frac{7}{100} = 0.07 \quad ; \quad \arctan(0.07) = 4.0041 \quad ; \quad 4.0041 \cdot 2 = 8.0082$$

Donde  $\alpha$  es el la mitad máxima que el ángulo sónico del sensor puede tener, por eso cualquier sensor que posea un ángulo sónico menor a  $8.0082^\circ$  va a servir para el sistema de sustentación neumática de las características propias mencionadas con anterioridad. Ver Ilustración 25.

#### Ilustración 25. Angulo cónico del sensor

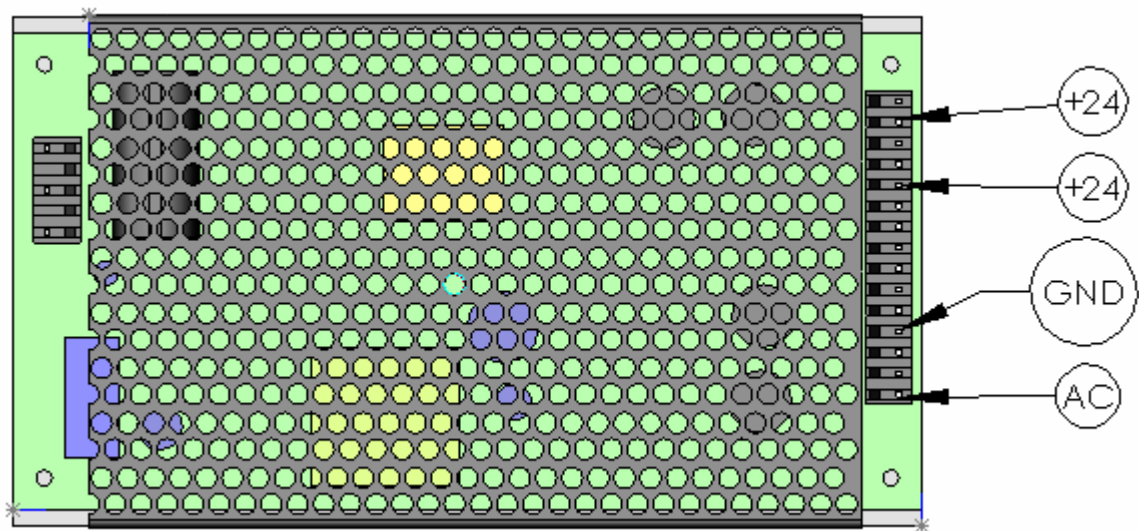


Por tal razón se escoge un sensor Ultrasónico Bero Sonar Siemens que cumple con los requerimientos de poseer un ángulo sónico de 5 grados. Este sensor posee las características de ser reprogramado para cambiar sus características de funcionamiento. Ver anexo D.

### 7.2.1.3 Dimensionamiento de la Fuente Swichada Mean Well.

La fuente que se implementa en el sistema de sustentación neumática será una fuente swichada Mean Well, con la cual se podrán alimentar los circuitos electrónicos mencionados anteriormente. Esta fuente solo utiliza de la línea la potencia que necesita por esta característica no traduce ninguna energía sobrante en calor. Por lo cual no va a inducir ruido en los elementos que alimenta ayudando a su conservación y vida útil de los mismos. Esta fuente posee una entrada de corriente alterna 120VAC y dos salidas de 24VDC. Como se observa en la Ilustración 26.

**Ilustración 26. Fuente Swichada del Sistema de Sustentación Neumática**



## 7.2.2 Conexiones De Los Dispositivos Del Sistema De Sustentación Neumático.

Se explicara en detalle como se deben realizar las conexiones de los sistemas eléctricos en el sistema de sustentación neumático.

### 7.2.2.1 Conexión De La Electroválvula Proporcional de Caudal.

La Ilustración 27 muestra los 4 cables con que cuenta la electroválvula para su manipulación, los colores de los cables de conexión son los identificadores.

**Ilustración 27. Muestra arreglo de cables de la electroválvula**



**Tabla 8. Muestra la relación del color y función en el cable de la Electroválvula**

|               |                           |
|---------------|---------------------------|
| <b>Blanco</b> | Entrada de control (0-5)V |
| <b>Azul</b>   | Tierra                    |
| <b>Café</b>   | 24V                       |
| <b>Negro</b>  | Tierra                    |

Los cables azul y negro hacen las veces de tierra, de la misma manera el cable café es la alimentación positiva de 24 V, por último el cable blanco se encarga de recibir la acción de control que puede ir de (0-5) V y es el encargado de abrir proporcionalmente la electroválvula.

### 7.2.2.2 Conexión Del Sensor Ultrasónico Bero Sonar.

La Ilustración 28 muestra los 5 cables con que cuenta el sensor para su manipulación, los colores de los cables de conexión son los identificadores.

**Ilustración 28. Muestra el arreglo de cables del sensor**



**Tabla 9. Muestra la relación de color y función en el cable del Sensor**

|               |                |
|---------------|----------------|
| <b>Blanco</b> | Reservado      |
| <b>Azul</b>   | Tierra         |
| <b>Café</b>   | 24V            |
| <b>Gris</b>   | Reservado      |
| <b>Negro</b>  | Salida 4-20 mA |

Los cables blanco y gris no se conectan, esto se debe a que el sensor tiene la posibilidad de ser reprogramado para distintos rangos de posición y para variar el ángulo de cono sónico mediante un software y una interfaz especializada. El cable azul es la tierra del sensor y el cable café es la alimentación positiva del sensor de 24 V. Por último el cable negro es la salida del sensor la cual me va a identificar la posición del elemento de (4-20) mA.

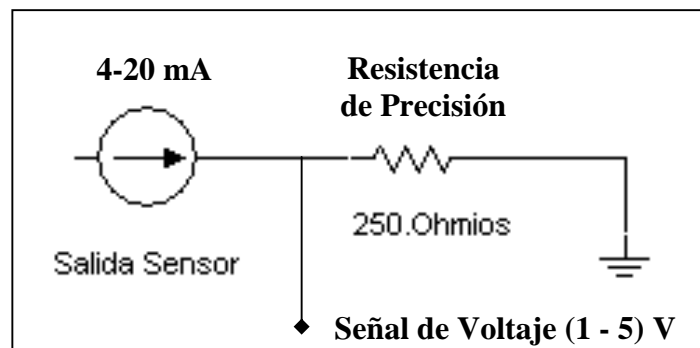
### 7.2.3 Acondicionamiento de Señales

Para el Dispositivo de Suspensión Neumático el sistema electrónico no será muy extenso por la composición de sus elementos y la facilidad de tratamiento de las señales.

Para la adquisición de las señales del sensor, se usara una tarjeta de adquisición de datos en el caso de ejercer el control en el Pc con Matlab 6.5, dicha tarjeta de adquisición es la PCI-1200 de la National Instruments (Ver Anexo B); o un conversor digital/análogo en caso de ejercer el control bajo un microcontrolador.

El sensor que se utiliza es el Bero Sonar de Siemens (Ver Anexo D); un sensor ultrasónico que se adapta perfectamente a las necesidades de la planta, dicho sensor envía una señal de corriente proporcional a la posición de elemento sustentado de (4-20) mA, que equivale a un rango de medida de (150-1000) mm. Se debe realizar la debida conversión de corriente (señal enviada por el sensor) en voltaje para poder acceder a estos datos por los sistemas de captura de señales. Para ello se realiza una etapa de instrumentación para convertir corriente en voltaje. (Ver Ilustración 29).

**Ilustración 29. Etapa de Instrumentación. Conversor de Corriente en Voltaje**



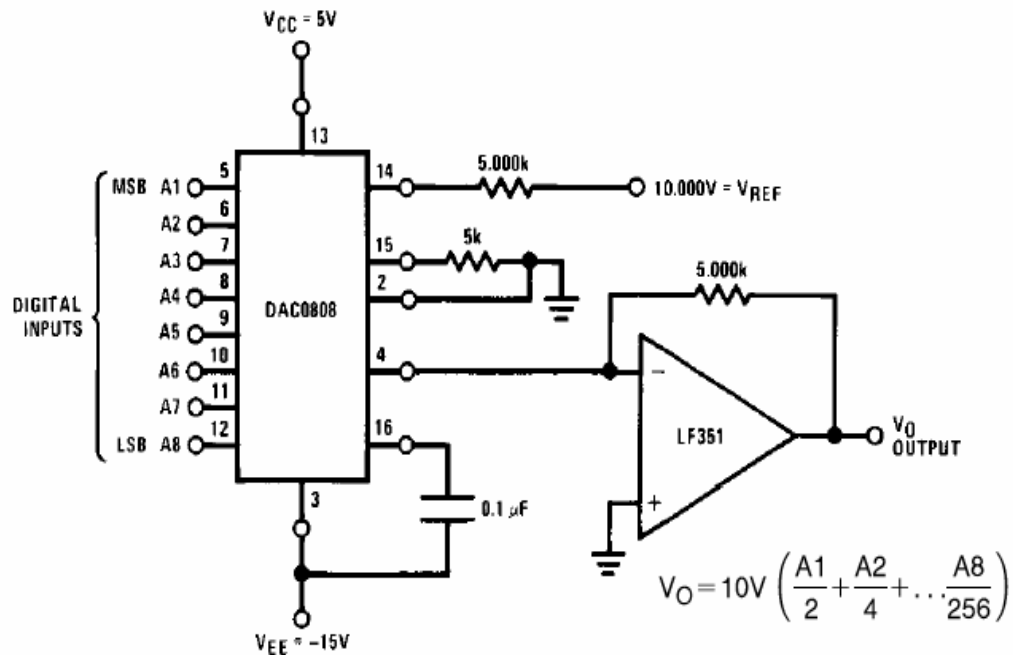
Como se observa en la Ilustración 29, la señal de voltaje obtenida esta en el rango de (1 – 5) V, si se quiere trabajar en un rango entre (0 - 5) V, siendo este el mas adecuado para el sistema a implementar, se debe realizar la siguiente conversión por software o hardware: Primero restar 1 al resultado obtenido y después multiplicar el resultado por 1.25. Así se obtiene el rango adecuado de entrada queda entre (0 - 5) V.

$$x_i = x_{obtenido} - 1 \quad ; \quad x_{final} = 1.25 \cdot x_i$$



Para el manejo de las señales de salida; la tarjeta de adquisición tiene la posibilidad de sacar voltajes directamente, cuando se ejerce el control en el Pc, y para el caso del microcontrolador no se posee una salida análoga y se debe implementar una fase de conversión digital/análoga (Ver Ilustración 30). Estas salidas serán las correspondientes entrada a la electroválvula proporcional de caudal Mpye-5-1/8 que se controla en un rango de (0-5) V. (Ver Anexo C). Plano eléctrico Ver Anexo K.

**Ilustración 30. Muestra el circuito conversor digital / análogo**



Se utiliza una fuente de alimentación Mean Well (Anexo E) para proporcionarle la alimentación de corriente a los elementos que la necesiten como lo son el circuito de instrumentación, la Electroválvula Proporcional, el Sensor ultrasónico; estos dispositivos su alimentación es de 24V DC.

### **7.3 DISEÑO DE SOFTWARE DE CONTROL**

Cuando el grupo de trabajo se ve en la necesidad de realizar el control al sistema de suspensión neumático se evaluaron diversas posibilidades de control. Ejercer un control análogo, implementar un control digital o un control difuso. El grupo de trabajo opta por implementar un control difuso en vista que la dinámica de la planta se prestaba para ejercer este tipo de controladores. Además de su buen desempeño en comparación con otro tipo de controladores, su sencillez de elaboración e implementación y también por hecho de ir a la vanguardia de implementar estas nuevas técnicas de control (aunque su teoría no sea nueva, son muy pocas las implementaciones con que se cuentan).

#### **7.3.1 Conceptos Básicos Sobre Lógica Difusa**

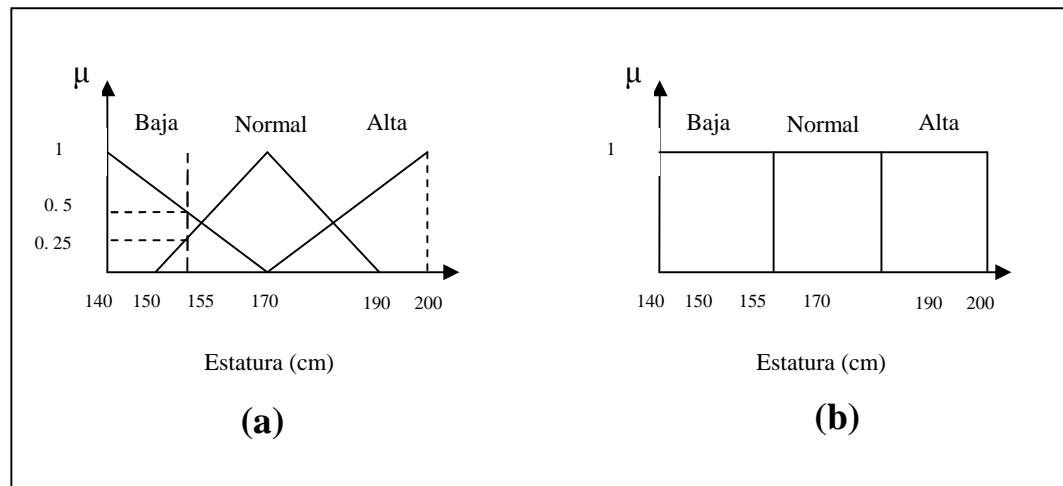
En la década de los años de 1920, J. Lukasiewicz desarrollo los principios de la lógica multivaluada, cuyos enunciados pueden tener valores de verdad comprendidos entre el 0 (False) y el 1 (True) de la lógica binaria clásica. Por ejemplo, el enunciado “El vaso esta lleno”, en lógica binaria tendría el valor de verdad 1 (True) si el recipiente contiene tanto liquido como su capacidad máxima admite; por el contrario, si el vaso contiene el 90% de su capacidad total, el enunciado seria falso, con un valor de verdad de 0. En tal caso, aunque falso, parece evidente que es casi cierto, puesto que casi esta lleno. La lógica multivaluada permitiría asignar diferentes grados de certeza; de esta forma, si el vaso esta al 90% de su capacidad, el valor de verdad del enunciado seria 0.9 (Casi Cierto), mientras que si contiene, por ejemplo, un 10 % de liquido el valor de verdad seria 0.1 (Poco Cierto). En 1965, L. Zadeh aplico la lógica multivaluada a la teoría de conjuntos, estableciendo la posibilidad de que los elementos pudieran tener diferentes grados de pertenencia a un conjunto (por ejemplo, el caso anterior del vaso, con el 90% de liquido, tendría un grado de pertenencia al conjunto de Vasos Llenos de 0.9, en el rango de  $0, \dots, 1$ ). Zadeh introdujo el termino Fuzzy (borroso) y desarrollo un álgebra completa para los conjuntos fuzzy, aunque estos conjuntos no tuvieron aplicación practica hasta mediados de los años setenta, cuando E. Madani diseño un controlador borroso para un motor de Vapor.

Por tanto, en lógica borrosa se trabaja con conjuntos, que se definen por sus funciones de pertenencia, que se denotan como  $\mu_c(x)$  e indican el grado de pertenencia (Entre 0 y 1) del elemento con valor  $x$  al conjunto  $C$ . Por ejemplo, se podrían tener tres conjuntos de tipos de estatura de personas que tuvieran valores dentro de los siguientes rangos:

Baja = { 140,...,170 cm } ; Normal = { 150,...,190 cm } ; Alta = { 170,...,200 cm }

Las funciones de pertenencia a estos conjuntos borrosos podrían tener la forma indicada en la Ilustración 31 (a). En este caso, una persona con una estatura de 155 cm pertenecería en un 50% ( $\mu_{Baja}(155) = 0.5$ ) al conjunto de personas Bajas y en un 25% ( $\mu_{Normal}(155) = 0.25$ ) a las de estatura Normal. En contraposición con los conjuntos borrosos, en la lógica binaria tradicional (también conocida como crisp logic) se utilizan los denominados conjuntos no borrosos (conjuntos Crisp), donde los grados de pertenencia son binarios (0 ò 1) como se observa en la Ilustración 31 (b).

**Ilustración 31. Muestra (a) Conjuntos Borrosos. (b) Conjuntos no Borrosos (Crisp sets)**



En lógica borrosa, las operaciones entre conjuntos se plantean en forma de operaciones borrosas entre sus funciones de pertenencia. Las utilizadas son las de Unión ( $\cup$ ), Intersección ( $\cap$ ) y Complemento ( $\bar{\cdot}$ ) para los conjuntos, y las correspondientes suma lógica borrosa ( $\vee$ ), producto lógico borroso ( $\wedge$ ) y negación borrosa para las funciones de pertenencia.

Así, estas operaciones aplicadas sobre dos conjuntos borrosos A y B con sendas funciones de pertenencia  $\mu_A$  y  $\mu_B$  serian:

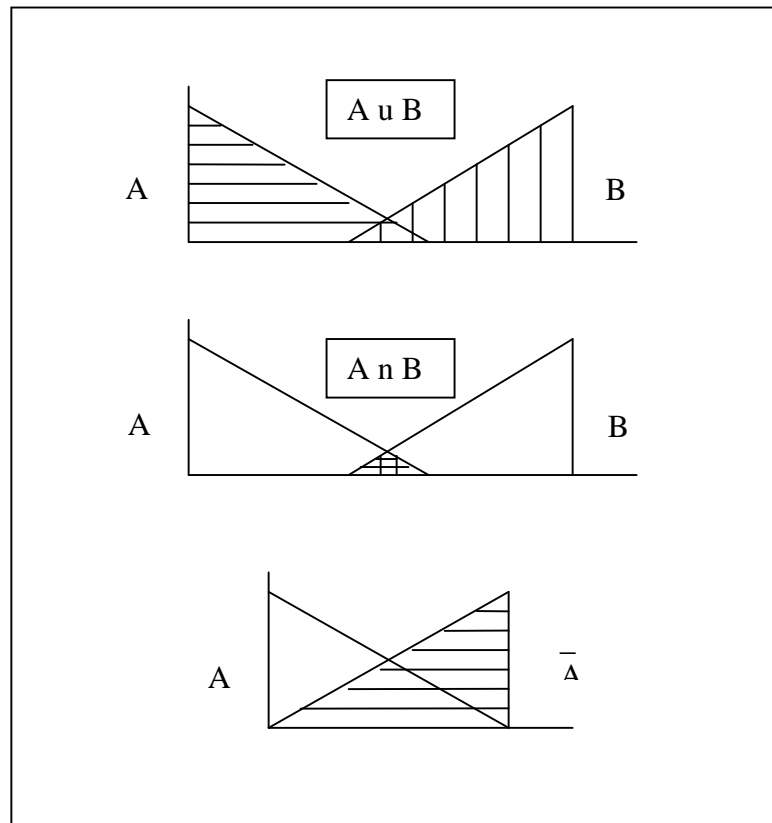
**Unión:**  $\mu_{A \cup B} = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$

**Intersección:**  $\mu_{A \cap B} = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$

**Complemento:**  $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$

En el caso de la Unión, la función de pertenencia del conjunto resultante se obtiene realizando la operación de suma lógica borrosa entre los grados de pertenencia de cada posible elemento (x) a cada uno de los conjuntos. Ilustración 32.

**Ilustración 32. Muestra operaciones en lógica difusa.**



El resultado de una suma lógica borrosa coincide con el mayor (max) de los grados de pertenencia (por ejemplo, si los conjuntos fuesen Alta y Delgada, una persona un 70% Alta y un 20% Delgada pertenecería en un 70% al conjunto de personas Altas o Delgadas).

En el caso de la intersección, se realiza el producto lógico o determinación del menor (min) de los grados de pertenencia de un mismo elemento (x) a cada conjunto. (Siguiendo con el ejemplo, aquella persona pertenecería en un 20% al conjunto de personas Altas que son Delgadas). Finalmente, la función de un conjunto complementario coincide con la función de no pertenencia al conjunto original (en el ejemplo, una persona un 70% Alta sería un 30% No Alta).

### **7.3.2 Sistema De Control Difuso**

Una de las principales aplicaciones de la lógica difusa es el diseño de sistemas de control que, a partir de unas entradas, deben generar unas salidas para actuar sobre determinado mecanismo. Un ejemplo podría ser el sistema de control para regular la velocidad de un ventilador en función de la temperatura ambiente. En este caso, la única entrada del sistema sería el valor de la temperatura, por ejemplo en grados centígrados, y la única salida, el valor, en revoluciones por minuto (rpm), de la necesaria velocidad del ventilador para conseguir una temperatura ideal.

En 1980, una empresa danesa Smidth & Company utilizó por primera vez un sistema borroso para supervisar el funcionamiento de un horno de cemento. En 1987, la empresa japonesa Hitachi desarrolló un sistema borroso para el control del metro de la ciudad de Sendai. Esta empresa comprobó que un sistema de control borroso era superior a uno convencional, especialmente en lo que respecta a la mayor suavidad en las operaciones de frenado y aceleración de los trenes, lo que aumentaba el confort de los viajeros y, sobre todo, reducía el consumo de energía eléctrica. El rendimiento comprobado en este sistema fue tal que en doce meses, más de 50 empresas japonesas estaban trabajando para desarrollar tecnologías basadas en la lógica difusa, utilizando este tipo de lógica para hacer funcionar cientos de aparatos electrodomésticos (hornos, lavadoras, carros y demás), y otros productos electrónicos de todo tipo (computadoras, cámaras y demás), alcanzando en 1992 una facturación de casi dos mil millones de dólares en este tipo de productos. Aunque la lógica difusa utiliza sobre todo para el diseño de controladores, existen otras aplicaciones de esta tecnología. En la tabla 10 se muestran algunas de ellas.

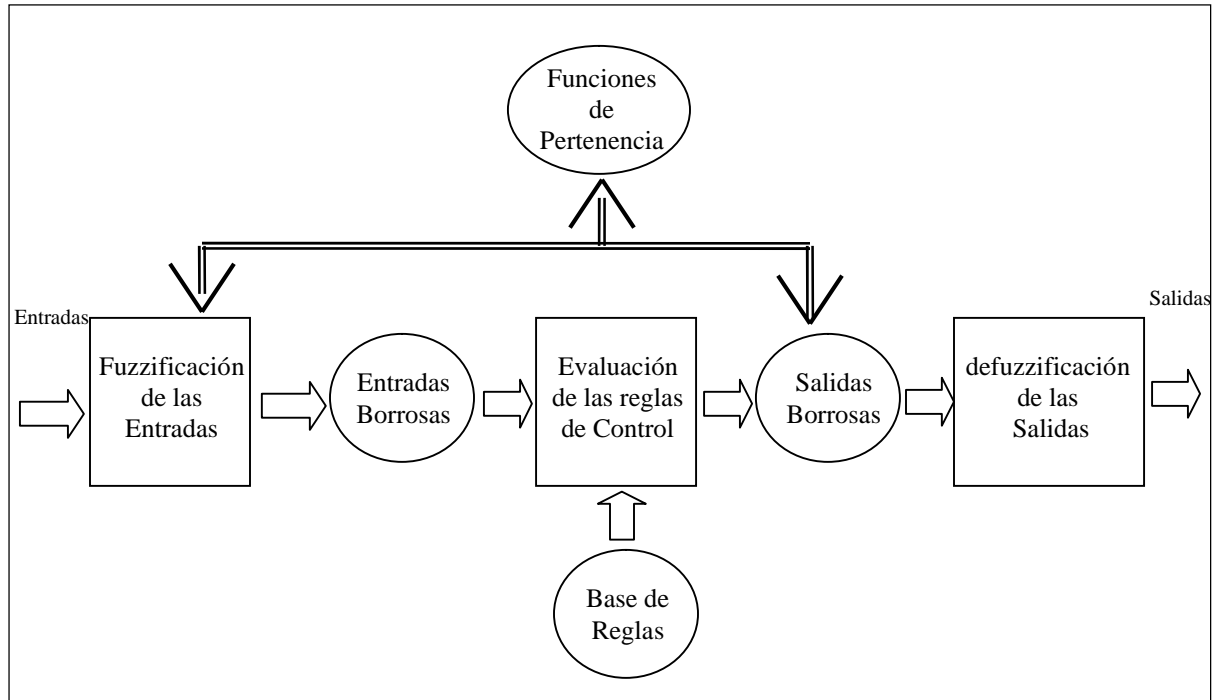
**Tabla 10. Algunas Aplicaciones de la Lógica Difusa**

| Aplicaciones de la Lógica Difusa |   |
|----------------------------------|---|
| Área                             | Aplicaciones  |
| Informática                      | Computadores, desarrollo de software, procesamiento de datos.   |
| Transportes                      | Sistemas de transmisión y frenado de automóviles, regulación del consumo.                               |
| Industria                        | Robots, reconocimiento de patrones (voz, texto), visión artificial, procesamiento de señales, sensores. |
| Electrodomésticos                | Lavadoras, aire acondicionado, hornos.  |
| Economía                         | Análisis de mercados y de riesgos, estimaciones, sistemas de decisión.                                  |
| Simulación                       | Modelado de sistemas no lineales.   |
| Medicina                         | Diagnostico Clínico   |
| Microelectrónica                 | Fabricación de Chips.   |
| Consumo                          | cámaras de video y TV.  |

Los motivos por los que se empieza a utilizar la lógica difusa en los controladores, se refieren, sobre todo, a su simplicidad, ya que no requiere de constructores matemáticos complejos (no es preciso conocer la expresión algebraica exacta que gobierna el funcionamiento del sistema), permitiendo en cambio diseñar mediante la descripción del funcionamiento con lenguaje natural y facilitando también las tareas de prueba y mantenimiento del sistema. Otras características de los sistemas difusos son su mayor suavidad en el control que en el caso de sistemas convencionales y su posible combinación con tecnologías clásicas ya establecidas y con otras más modernas, como las redes neuronales.

En la Ilustración 33 se muestra el funcionamiento de los sistemas de control difuso. Se pueden distinguir 3 partes fundamentales: Una primera etapa de Fuzzificación (emborramiento) de los valores de entrada, otra de evaluación de reglas de control borrosas y una última de defuzzificación (desemborramiento) para obtener valores concretos de salida.

**Ilustración 33. Muestra el funcionamiento de un sistema de control difuso.**



### 7.3.2.1 Fuzzificación De Las Entradas

La fuzzificación o emborramiento de una entrada es el proceso por el cual se calcula su grado de pertenencia a uno o a varios de los conjuntos borrosos en que se divide el rango de valores posibles para dicha entrada. Por ejemplo, si se trata de un sistema de control de la velocidad de giro de un ventilador cuya entrada es la temperatura ambiente, el rango (dominio) de posibles temperaturas se podría considerar dividido en tres conjuntos borrosos, que se podrían denominar: Fría, que incluiría las temperaturas, por ejemplo, en el rango de 5 °C - 13 °C; el conjunto Fresca, con valores desde 9 °C - 21 °C; el conjunto de temperatura Agradable, con los valores 17 °C - 29 °C; Calida 25 °C - 37 °C; y el conjunto de temperatura Tórrida, con los valores entre 33 °C - 40 °C.

Fría = {5,...,13} ; Fresca = {9,...,21} ; Agradable = {17,...,29}

Calida = {25,...,37} ; Tórrida = {33,...,40}

Estos conjuntos pueden considerarse borrosos si se supone que los valores de temperatura que contienen no pertenecen en el mismo grado al conjunto. En este caso, es evidente que la temperatura de 20 °C es menos fresca que una de 15 °C, con lo que la primera pertenecerá en menor grado que la segunda al conjunto de temperaturas Frescas. De hecho, la primera, 20 °C también puede considerarse como agradable, ya que pertenece a este conjunto, aunque en menor medida que otra, por ejemplo, de 23 °C, que sería la más Agradable, al ser la temperatura ambiente ideal.

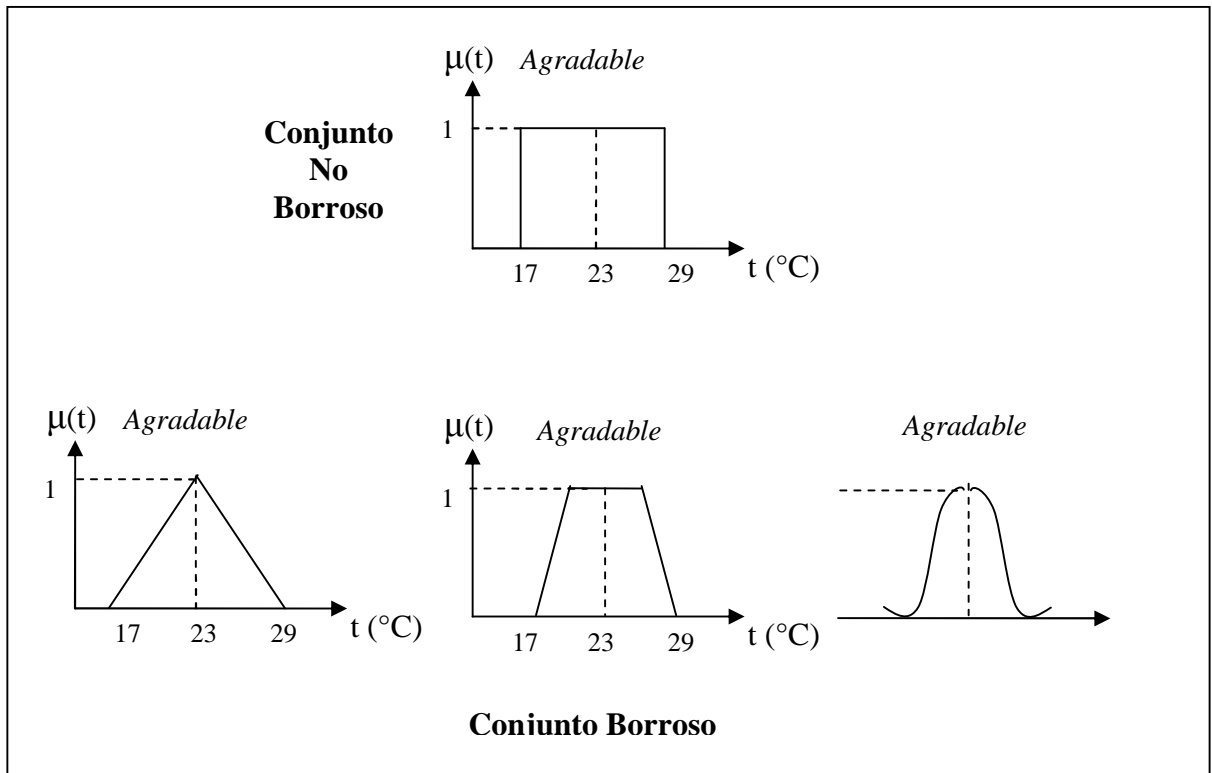
Cuando se trabaja con conjuntos borrosos como los anteriores, hay que establecer unas funciones de pertenencia de los elementos a los diferentes conjuntos, lo cual permite determinar, a partir del valor de un elemento, su grado de pertenencia al conjunto, siendo este un valor real normalizado entre 0 (no pertenece en absoluto) y 1 (pertenece al 100%). Esta función se denota como  $\mu(x)$ , siendo  $x$  el valor del elemento. Las funciones de pertenencia deben definirse a partir de la experiencia o la intuición o simplemente utilizando el sentido común, y suelen tener forma triangular, trapezoidal o gaussiana, a diferencia de las funciones escalón que se utilizan cuando se trabaja en la lógica binaria (crisp logic) con los conjuntos no borrosos (crisp sets). En la Ilustración 34 se muestran algunas formas posibles para la función de pertenencia a un conjunto de temperaturas Agradables.

Si utilizamos funciones triangulares en el ejemplo del controlador del ventilador, podríamos tener unas funciones de pertenencia para todo el dominio de posibles valores de entrada como las indicadas en la Ilustración 35. Según esta figura, si la temperatura ambiente de entrada al sistema fuese 15 °C, se trataría de una temperatura totalmente Fresca. En cambio, si fuese de 16 °C, sería 83 % Fresca; mientras que 18 °C se podría considerar como Fresca (en un 50 %) o como Agradable (en un 17 %).

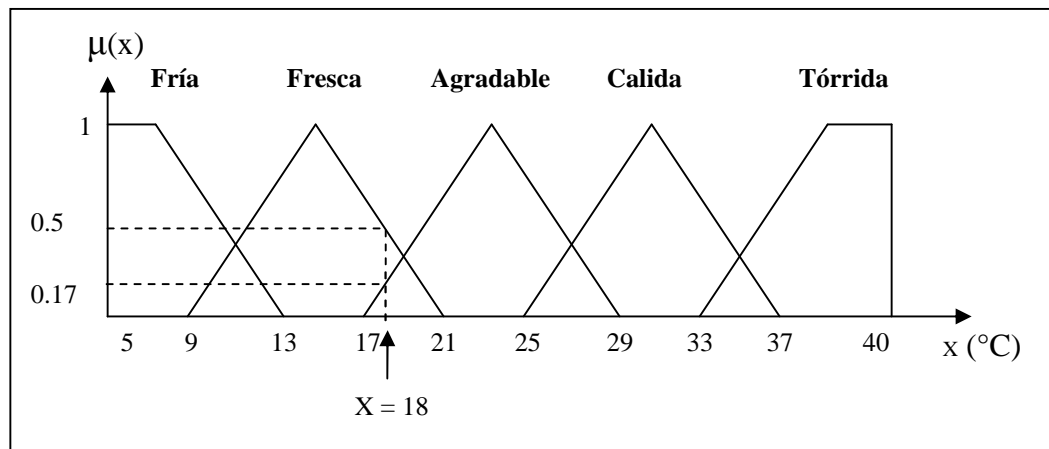
Formalizando la notación y considerando, en general, el dominio de valores de entrada dividido en  $N$  conjuntos difusos, denominados  $A_1, A_2, \dots, A_N$ , los valores que se obtienen después de la etapa de fuzzificación son los grados de pertenencia del valor de entrada  $x$  a cada uno de estos conjuntos difusos:  $\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x), \dots, \mu_{A_N}(x)$ .



**Ilustración 34. Muestra las diferentes formas de la función de pertenencia a un conjunto.**



**Ilustración 35. Muestra los conjuntos borrosos para la temperatura**



En el ejemplo de las temperaturas, si  $x = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , los grados de pertenencia serian :

$$\mu_{\text{Fría}}(18) = 0.0 ; \mu_{\text{Fresca}}(18) = 0.5 ; \mu_{\text{Agradable}}(18) = 0.17$$

$$\mu_{\text{Calida}}(18) = 0.0 ; \mu_{\text{Tórrida}}(18) = 0.0$$

### 7.3.2.2 Evaluación De Las Reglas De Control

Para gobernar el comportamiento del sistema, el diseñador debe establecer una serie de reglas de la forma Si – Entonces para indicar la acción a realizar en función del conjunto al que pertenece la entrada al sistema, La forma general de un regla es:

$$R : \text{Si } (x \text{ es } A) \text{ Entonces } (y \text{ será } C)$$

También se pueden utilizar las notaciones:

$$R : A \rightarrow C \quad R : (A ; C)$$

La primera parte de la regla (Si) se denomina antecedente, y contiene una o varias condiciones referidas a si cada una de las entradas del sistema pertenece a tal o cual conjunto borroso. La segunda parte (Entonces), denominada consecuente, contiene los nombres de los conjuntos borrosos a los que deben pertenecer las salidas del sistema si se cumple el antecedente correspondiente.

En el caso del ejemplo del control de la velocidad de un ventilador, para poder establecer las reglas, es preciso realizar una división del dominio de posibles valores de salida, en este caso velocidades de rotación, creando una serie de conjuntos borrosos, de forma similar a como se hizo con la temperatura de entrada. En la Ilustración 36 se muestran estos conjuntos para la velocidad, que se han denominado de la siguiente forma: Parado, incluye las velocidades entre 0 – 20 rpm ; Lenta con velocidades entre 10 – 30 rpm ; Media con velocidades entre 20 – 40 rpm ; Rápida entre 30 – 50 rpm ; y máxima con velocidades entre 40 – 60 rpm. Una vez establecidos los conjuntos, se pueden crear las reglas de control que determinen el tipo de velocidad en función de la temperatura. Estas reglas podrían ser:

Regla 1: Si (Temperatura es Fría) Entonces (Velocidad será Parado)

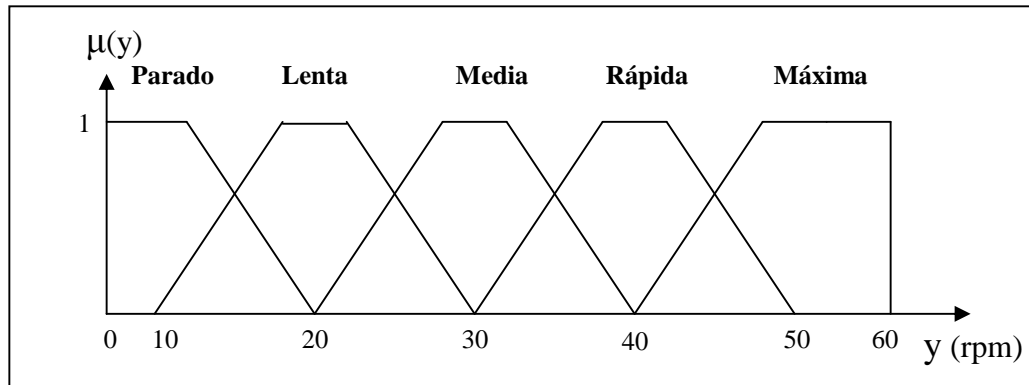
Regla 2: Si (Temperatura es Fresca) Entonces (Velocidad será Lenta)

Regla 3: Si (Temperatura es Agradable) Entonces (Velocidad será Media)

Regla 4: Si (Temperatura es Calida) Entonces (Velocidad será Rápida)

Regla 5: Si (Temperatura es Tórrida) Entonces (Velocidad será máxima)

**Ilustración 36. Muestra conjuntos borrosos para la velocidad.**



Estas reglas componen lo que se denomina base de reglas del sistema. Su evaluación consiste en determinar que regla (o reglas) se activara ante un determinado valor de entrada. Para averiguarlo, se parte del grado de pertenencia de dicho valor a cada uno de los diferentes conjuntos borrosos del dominio de entrada. En el ejemplo anterior para una temperatura de 18°C, los grados de pertenencia eran  $\mu_{\text{Fresca}}(18) = 0.5$ ,  $\mu_{\text{Agradable}}(18) = 0.17$  y el resto cero, por lo que es evidente que se activarían (o dispararían) las reglas 2 y 3, ya que esa temperatura es fresca (50 %) y agradable (17 %).

A cada regla  $R_i : (A_i ; C_i)$  se le asocia un valor denominado “peso” que en principio, coincide con el grado de pertenencia de la entrada (x) al conjunto indicado en el antecedente ( $\mu_{A_i}(x)$ ). Este peso será el que permitirá establecer el grado de pertenencia de la salida (y) del sistema al conjunto indicado en el consecuente de la regla ( $\mu_{C_i}(y)$ ).

Regla i : Si (x es  $A_i$ ) Entonces (y será  $C_i$ )

Peso de la Regla i =  $\mu_{A_i}(x)$

$\mu_{C_i}(y) = \text{Peso de la Regla i} = \mu_{A_i}(x)$

Si se utilizase en el antecedente de alguna regla el operador de negación, el peso de la regla sería la diferencia entre la unidad y el grado de pertenencia:

Regla i : Si (x NO es  $A_i$ ) Entonces (y será  $C_i$ )

Peso de la Regla i =  $1 - \mu_{A_i}(x)$

$\mu_{C_i}(y) = \text{Peso de la Regla i} = 1 - \mu_{A_i}(x)$

Cuando del sistema tiene varias entradas, el antecedente se compone de varias condiciones referidas a los conjuntos a los que pertenecen estas. En el caso de dos entradas, se tendrían reglas como:

Regla i : Si ( $x_1$  es  $A_i$ ) Y ( $x_2$  es  $B_i$ ) Entonces (y será  $C_i$ )

Regla j : Si ( $x_1$  es  $A_j$ ) Y ( $x_2$  es  $B_j$ ) Entonces (y será  $C_j$ )

Para calcular el peso asociado a cada una de estas reglas, se aplican los operadores producto y suma lógica difusa presentados anteriormente.

$$\text{Peso Regla i : } \min ( \mu_{A_i}(x_1) , \mu_{B_i}(x_2) )$$

$$\text{Peso Regla j : } \max ( \mu_{A_i}(x_1) , \mu_{B_i}(x_2) )$$

$$\mu_{C_i}(y) = \text{Peso Regla i : } \min ( \mu_{A_i}(x_1) , \mu_{B_i}(x_2) )$$

$$\mu_{C_j}(y) = \text{Peso Regla j : } \max ( \mu_{A_i}(x_1) , \mu_{B_i}(x_2) )$$

Si se tienen combinaciones de ambas operaciones, se aplicara el criterio por partes. Por ejemplo:

Si (( $x_1$  es  $A$ ) Y ( $x_2$  es  $B$ )) o ( $x_3$  es  $A$ ) Entonces (y será  $C$ )

$$\text{Peso Regla} = \max ( \min( \mu_A(x_1) , \mu_B(x_2) ) , \mu_A(x_3) )$$

$$\mu_{C}(y) = \text{Peso Regla} = \max ( \min( \mu_A(x_1) , \mu_B(x_2) ) , \mu_A(x_3) )$$

Finalmente, en el caso de sistemas con más de una salida, el grado de pertenencia de la salida a un conjunto se corresponderá con el mayor peso de todas las reglas en cuyo consecuente aparezca el conjunto:

Regla i : Si ,..., Entonces ( $y_1$  será  $C$ ) Y ( $y_2$  será  $D$ )

Regla j : Si ,..., Entonces ( $y_1$  será  $C$ ) Y ( $y_2$  será  $E$ )

$$\mu_{C}(y_1) = \max ( \text{Peso Regla i} , \text{Peso Regla j} )$$

$$\mu_{D}(y_2) = \text{Peso Regla i}$$

$$\mu_{E}(y_2) = \text{Peso Regla j}$$

Una vez ponderadas las reglas que van a gobernar el funcionamiento del sistema, se procede a la defuzzificación de las salidas.

### 7.3.2.3 Defuzzificación De Las Salidas

La defuzzificación o desemborramiento de las salidas consiste en obtener un valor numérico para cada una de las salidas del sistema a partir de los conjuntos difusos a los que pertenecen. En el ejemplo del ventilador, se puede llegar a la conclusión, mediante la evaluación de las reglas, de que la velocidad debe ser Media, pero esto no es suficiente, ya que es preciso obtener un valor numérico que indique la velocidad exacta a la que debe girar el ventilador.

Existen varias técnicas de defuzzificación. Una de estas técnicas es la del método del centroide, otra se denomina método del semifallo y otra es el método de la media ponderada, siendo estos tres métodos los más comunes que se utilizan en la defuzzificación.

- **Método del Centroide o Centro de Gravedad.**

Es la más utilizada. Consiste en crear para la salida del sistema una función de pertenencia a un nuevo conjunto obtenido como unión de aquellos a los que pertenece parcialmente el valor de salida.

Esta nueva función puede calcularse mediante la suma de las funciones de pertenencia de estos conjuntos, pero multiplicadas aritméticamente por el grado de pertenencia de la salida al subconjunto, que ya fue calculado en la fase anterior de evaluación de reglas de control. Si, por ejemplo, se han activado dos reglas ( $R_i$  y  $R_j$ ), obteniéndose que la salida ( $y$ ) pertenece a los conjuntos  $C_i$  y  $C_j$  en los grados dados por los pesos de las correspondientes reglas, entonces la función de pertenencia del nuevo conjunto  $C$ , unión de los anteriores sería:

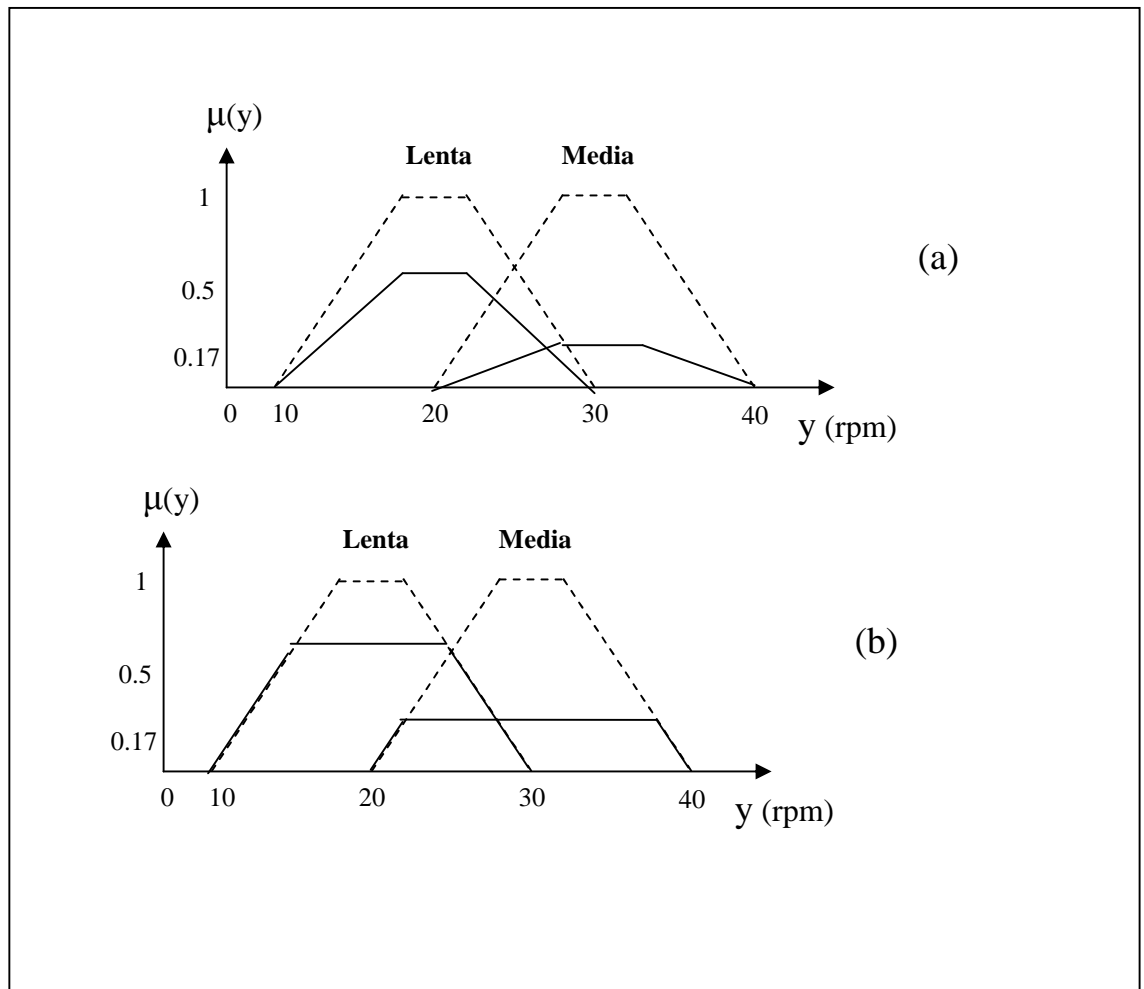
$$\mu_C(y) = \text{Peso Regla } R_i * \mu_{C_i}(y) + \text{Peso Regla } R_j * \mu_{C_j}(y)$$

Otra posibilidad, sería el considerar las funciones originales simplemente limitadas superiormente por el valor de los pesos. En este caso se estaría utilizando el producto lógico borroso, en lugar del producto aritmético:

$$\mu_C(y) = \min(\text{Peso Regla } R_i, \mu_{C_i}(y)) + \min(\text{Peso Regla } R_j, \mu_{C_j}(y))$$

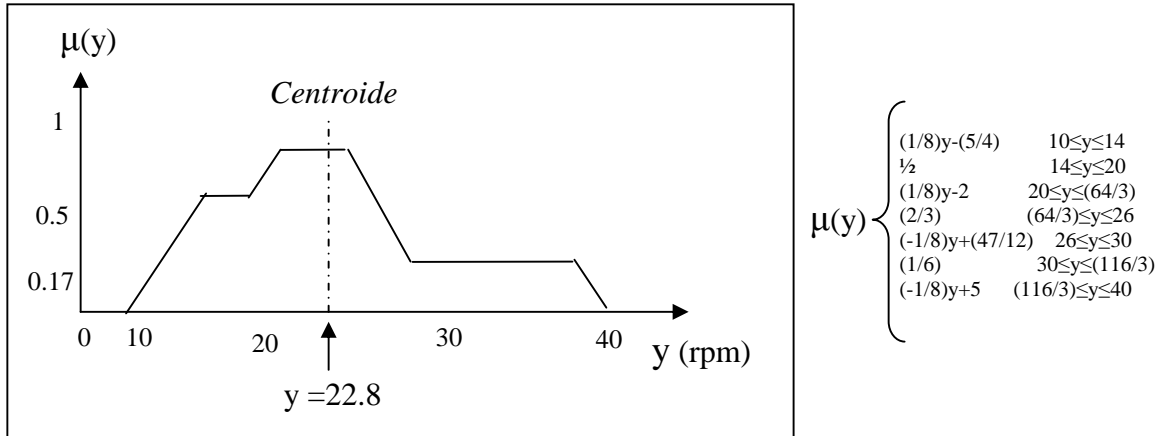
En el caso del ejemplo del ventilador, si la temperatura es de 18 °C, se activaron las reglas 2 y 3, correspondientes a velocidades Lenta y Media, con pesos 0.5 y 0.17, respectivamente, por lo que el nuevo conjunto de valores de salida, unión de los anteriores se calcularía sumando las funciones sombreadas en la Ilustración 37 (a) si se sigue el primer criterio (producto aritmético), o sumando las el área sombreada de la Ilustración 37 (b). Si se utiliza el segundo criterio (producto lógico difuso).

**Ilustración 37. Obtención de la función de pertenencia del nuevo conjunto de valores de salida. (a) Producto Aritmético ; (b) Producto Lógico Borroso.**



Así, en el segundo de los casos (producto lógico difuso), si se calcula dicha suma, la función de pertenencia global sería la mostrada en la Ilustración 38.

**Ilustración 38. Muestra función de pertenencia global y centroide.**



Una vez obtenida la función de pertenencia global, se calcula el valor exacto de la salida como el centroide (centro de gravedad) de esta función mediante la expresión general :

$$y = \frac{\int y \cdot m(y) \cdot dy}{\int m(y) \cdot dy}$$

En el caso de trabajar con valores de salida discretos, las integrales se podrían sustituir por sumatorias en el rango de los  $n$  valores posibles para la salida:

$$y = \frac{\sum_{k=1}^n y_k \cdot m(y_k)}{\sum_{k=1}^n m(y_k)}$$

En el ejemplo del ventilador, si consideramos una función de pertenencia como la de la Ilustración8, el valor del centroide calculado es:

$$y = \text{Centroide} = \frac{\int_{10}^{40} y \cdot m(y) \cdot dy}{\int_{10}^{40} m(y) \cdot dy} = \frac{253.3}{11.1} = 22.8$$

Existe otra forma de obtener este valor, ya que puede demostrarse que la expresión anterior es equivalente a otra en la que el numerador se exprese como la suma de los productos del centroide de cada subconjunto, que al tener funciones de pertenencia simétricas coinciden con su centro geométrico, multiplicado por el área encerrada por la función, y el denominador, como la suma de las áreas de ambos subconjuntos:

$$y = \text{Centroide} = \frac{\text{Centroide}_{Lenta} \cdot \text{SubArea}_{Lenta}(y) + \text{Centroide}_{Media} \cdot \text{SubArea}_{Media}(y)}{\text{SubArea}_{Lenta} + \text{SubArea}_{Media}}$$

$$y = \frac{20 \cdot 8 + 30 \cdot 3.1}{8 + 3.1} = \frac{253.3}{11.1} = 22.8 \cdot rpm$$

- **Método Singleton (Semifallo)**

Consiste en calcular un promedio de los centroides de las funciones de pertenencia de los conjuntos de salida activados. Al ser funciones simétricas, los centroides coinciden con el punto medio. Para la ponderación se utilizan los pesos de las reglas activadas, o grados de pertenencia de la salida a los subconjuntos correspondientes.

$$y = \frac{\text{Centroide}_{Lenta} \cdot m_{Lenta}(y) + \text{Centroide}_{Media} \cdot m_{Media}(y)}{m_{Lenta}(y) + m_{Media}(y)}$$

$$y = \frac{20 \cdot 0.5 + 30 \cdot 0.17}{0.5 + 0.17} = 22.5 \cdot rpm$$

- **Método De La Media Ponderada**

Se trata de un sencillo calculo del promedio entre los valores de salida que se obtendrían para cada uno de los conjuntos difusos multiplicados (ponderados) por el peso correspondiente regla o grado de pertenencia al subconjunto.

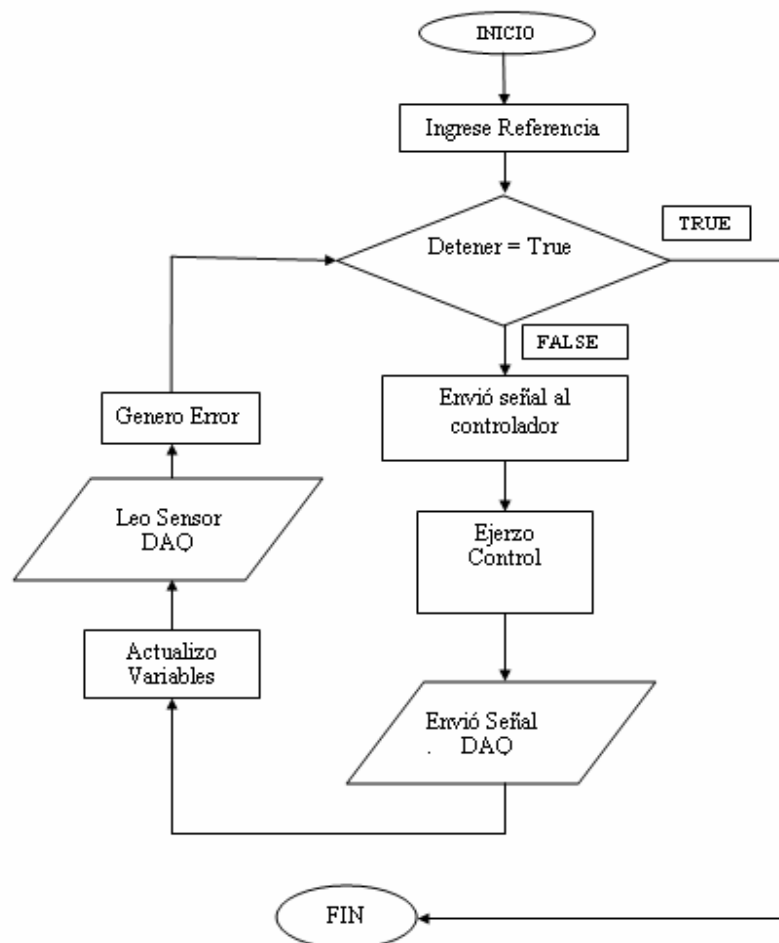
$$y = \frac{y_{Lenta} \cdot m_{Lenta}(y_{Lenta}) + y_{Media} \cdot m_{Media}(y_{Media})}{m_{Lenta}(y_{Lenta}) + m_{Media}(y_{Media})}$$



### 7.3.3 Diseño Del Controlador Para Un Sistema De Sustentación Neumática

Ya conociendo los conceptos básicos y puntuales de cómo diseñar un controlador difuso; se mostrara a continuación la implementación de este tipo de teorías en dos opciones que el grupo de trabajo se propuso llevar a cabo. La primera opción que se mostrara será, la implementación de un controlador difuso en base al programa Matlab 6.1 o Matlab 6.5; y mas adelante se buco desligar el sistema de control del Pc y se implemento dicho controlador en un microcontrolador de la familia HC-12 de la Motorola. El diagrama de flujo del controlador esta dado en la Ilustración 39.

**Ilustración 39. Diagrama de Flujo del control de un sistema de sustentación neumático**



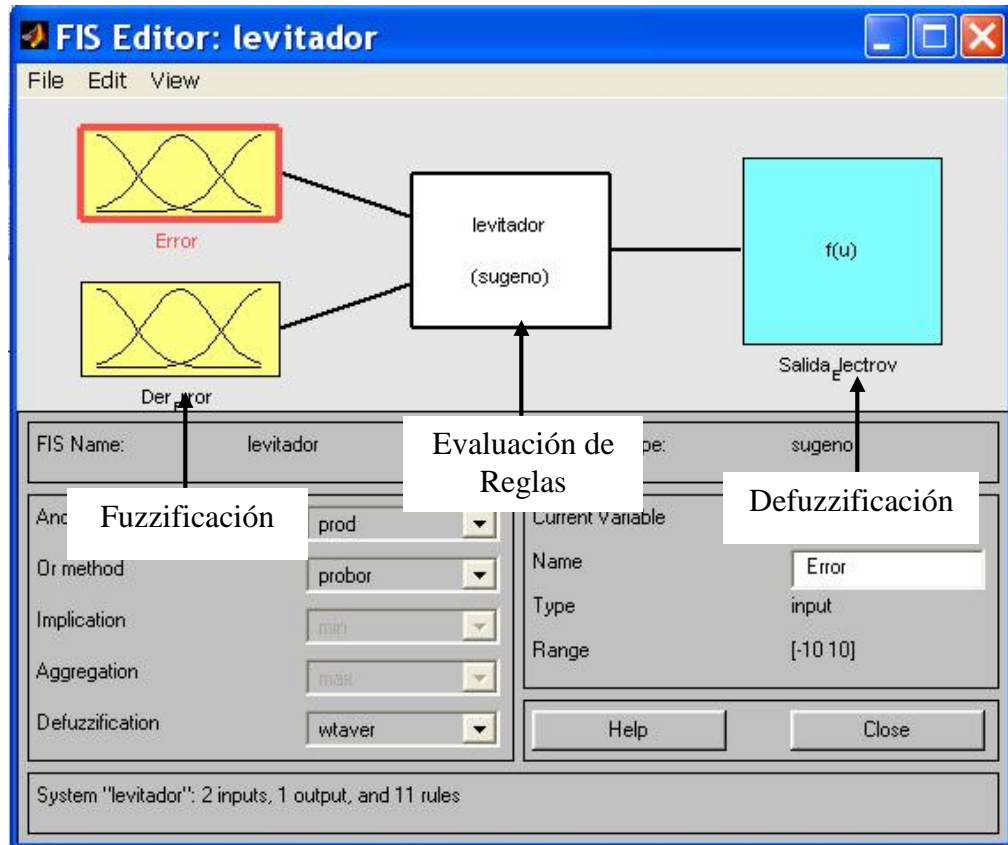
### 7.3.3.1 Controlador Fuzzy Bajo Matlab

Como se explicaba anteriormente el sistema de control esta basado en tres secciones de igual carácter de importancia. Como se observa en la Ilustración 40, la primera sección es la de Fuzzificación; para el caso particular del sistema que se va controlar se van a ingresar dos variables (aunque puede ser configurado para una sola variable o  $n$  variables), la primera variable corresponde al Error, que es equivalente a la Referencia, que ingresa el usuario con antelación, menos el Error de la Planta, y la otra entrada será la derivada del Error de la Planta con la cual se da cuenta el sistema de evaluación de Reglas hacia donde esta tendiendo el Error, si va en aumento o por el contrario esta decreciendo.

Para acceder a esta interfaz mostrada en la Ilustración 40, basta con escribir en el workspace del matlab “Fuzzy” y es hay donde se empieza a configurar nuestro sistema de control.

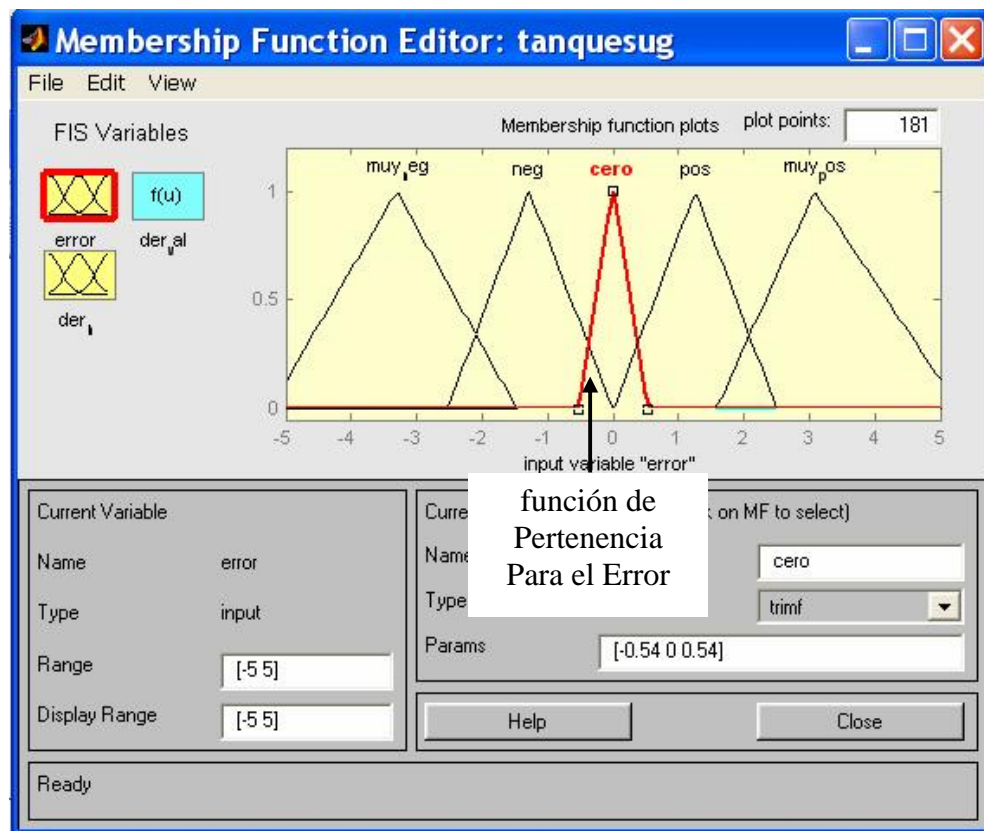
Para poder acceder a los conjuntos mostrados en la Ilustración 41 basta con dar un doble click sobre cada uno. Ahora se van a definir las funciones de pertenencia de cada uno de los conjuntos que se van a encargar de la Fuzzificación, se van a utilizar funciones de transferencia de tipo triangular, debido a que cumplen con todos los requerimientos y su manejo es sencillo, (aunque se pueden usar otro tipo de funciones como son las Gaussianas, Trapezoidales y demás, dependiendo también del sistema a ser implementado).

**Ilustración 40. Muestra la interfaz donde se elabora el sistema de control de Matlab**



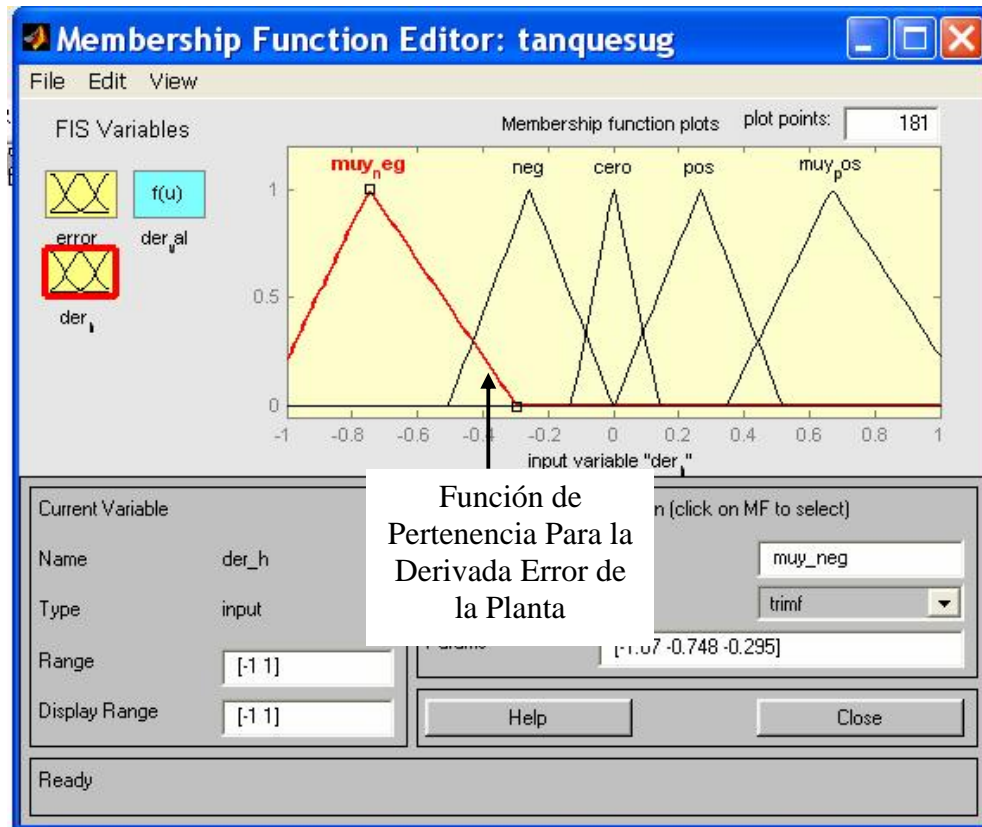
Para la entrada del Error se define un rango entre (5 y -5) V, debido a que el sensor va a enviar una señal proporcional de (0 a 5) V asegurando que ninguna entrada va a estar fuera del rango de evaluación. Para el caso del sistema de Sustentación Neumático se crean 5 Funciones de Pertenencia (aunque podrían ser tantas como lo necesite el sistema). Cada función con su respectivo nombre lingüístico con el cual será identificado a la hora de ejercer la evaluación de reglas. Como por ejemplo la función “cero” que abarca un rango entre (-0.54; 0.54), como lo muestra la Ilustración 41.

**Ilustración 41. Muestra funciones de pertenencia para la entrada al sistema del error**



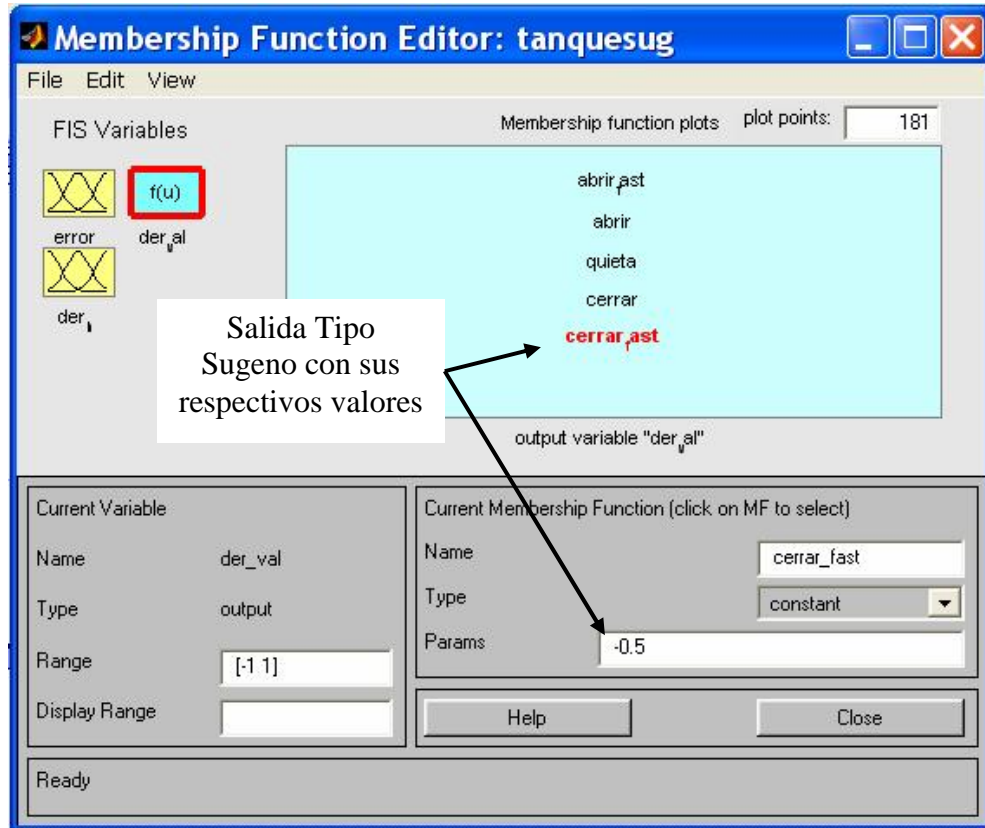
Para la segunda entrada “La Derivada del Error de la Planta” se define un rango entre (1 y -1); debido a que la evaluación aritmética de un derivador aplicado en una señal siempre va estar en el rango de 0 a 1 con su respectivo signo, siendo este, el signo (+) ò (-), el indicador de hacia donde tiende el Error, si a aumentar o por el contrario esta disminuyendo. Y se puede observar como quedaron conformadas las funciones de pertenencia de la entrada Derivada del Error de la Planta en la Ilustración 42.

**Ilustración 42. Muestra funciones de pertenencia para la entrada derivada del error de la Planta.**



Después de haber definido las funciones de pertenencia de las entradas pasamos a la parte en la cual se van a construir las variables que se utilizan cuando se realice el proceso de defuzzificación. Es una salida tipo sugeno; donde se definen 5 variables que van a corresponder al porcentaje de abertura de la electroválvula proporcional. Se fija el rango de trabajo de esta salida entre (-0.5 ; 0.5) ya que es una buena proporción de abertura de la electroválvula, para manejar una respuesta rápida en el tiempo de estabilización y no ir a tener sobreimpulsos. Cada variable en mención tendrá un valor específico abarcado en el rango escogido. Las funciones de pertenencia tipo sugeno de la salida del controlador se pueden observar en la Ilustración 43.

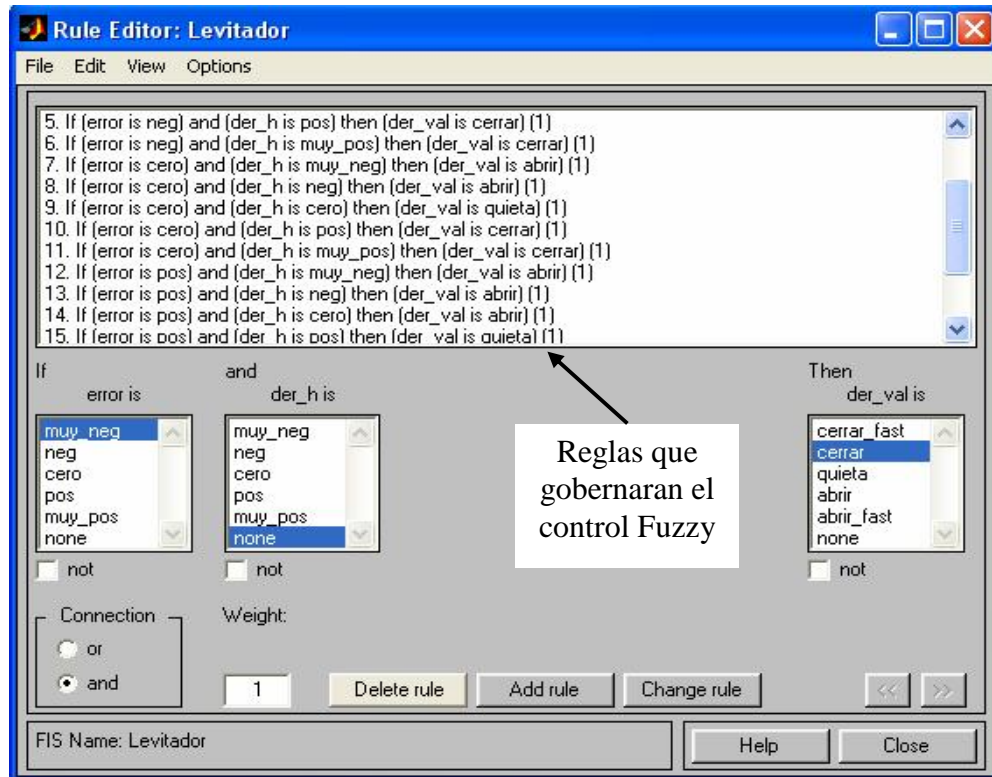
**Ilustración 43 Muestra las funciones tipo sugeno para la salida del Sistema de control**



Teniendo establecidas las Entradas y Salida del sistema de control difuso, se entra a fijar unas reglas de control por medio de las cuales se sabrá como será el comportamiento del sistema en función de unas entradas establecidas. Cuando se accede a la parte de formar las reglas que gobernarán el sistema se encuentran tanto el conjunto de entradas definidas anteriormente, como también la salida definida por sus conjuntos lingüísticos. Conociendo los conceptos básicos de la lógica difusa, esta fijación de reglas son del tipo “if (a and b) then c “; con antelación se debe saber el comportamiento del sistema de sustentación neumática (para cada caso es particular) y por ende se fijan las reglas de control tantas como se quieran. Para el caso particular del sistema de sustentación se fijaron 18 reglas con las cuales se regirá el control del sistema Fuzzy. Se pueden cambiar, borrar o añadir las

reglas según lo valla necesitando el usuario; en la Ilustración 44 se muestran como quedaron establecidas las reglas para el sistema de Sustentación Neumático.

**Ilustración 44. Muestra las reglas de control.**



El software ofrece la facilidad de ver como quedo generado la superficie del sistema de control difuso. Accediendo por el menú View > Surface (Ilustración 45); y también da la posibilidad de tener una opción de evaluación de reglas en la cual se puede simular los parámetros de entrada y calificar si es acertada la salida que genera. Accediendo por el menú View > Rules (Ilustración 46).

Ilustración 45. Muestra la generación de la superficie Difusa.

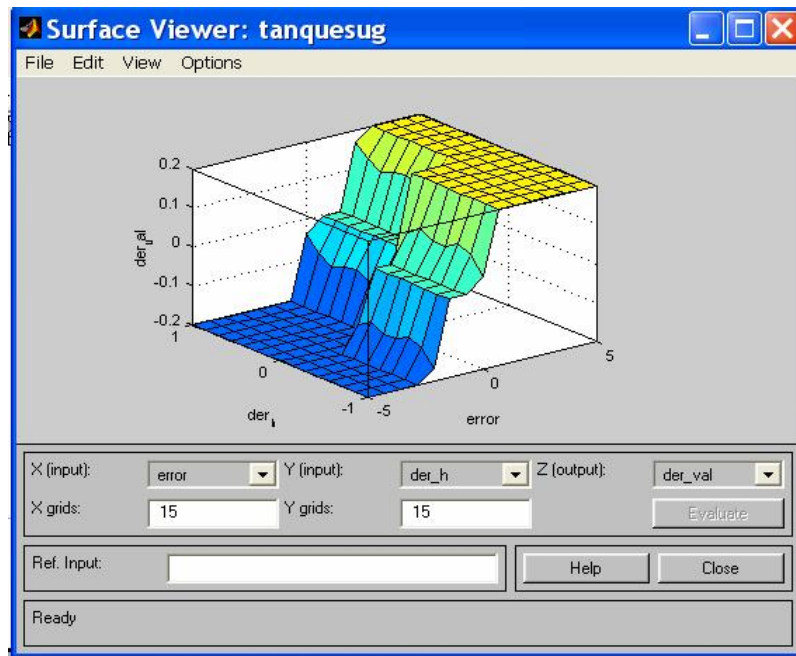
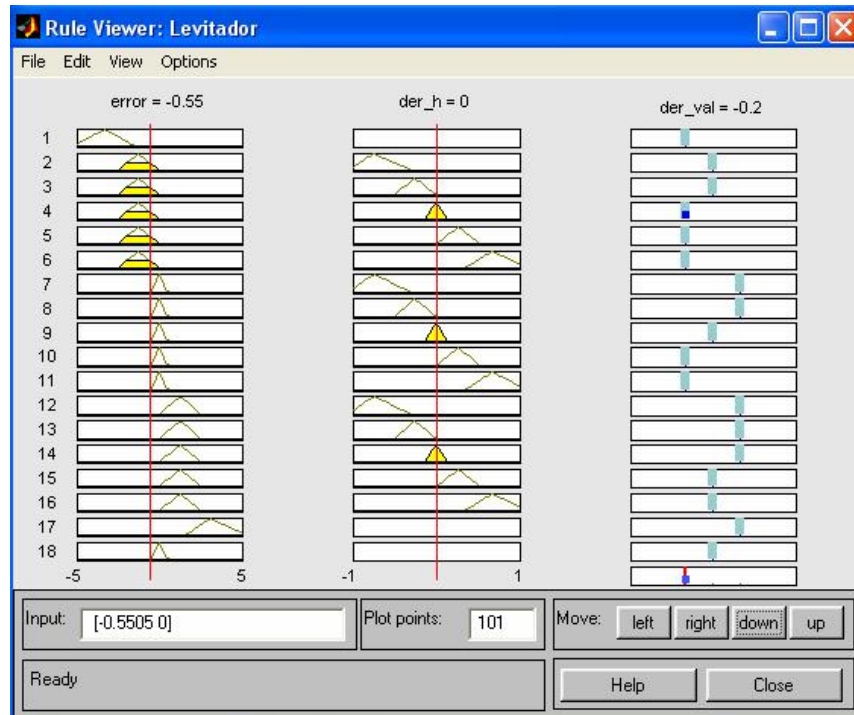


Ilustración 46. Muestra simulación evaluación de entradas.



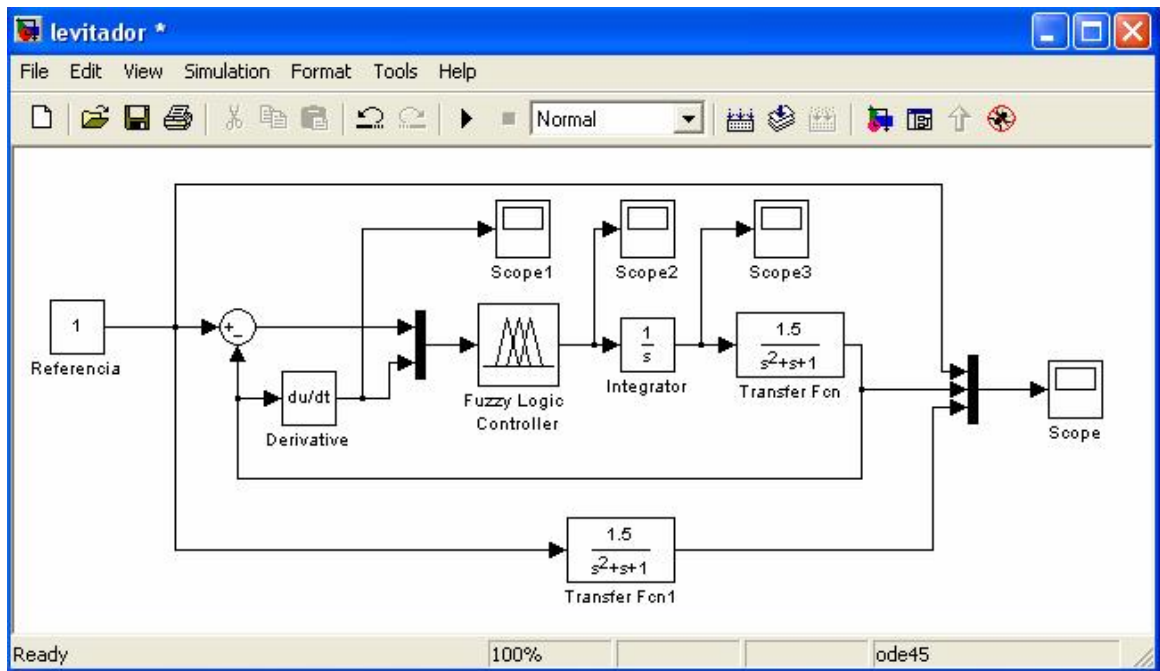


Habiendo realizado un buen estructuramiento del controlador difuso se realiza una simulación con el paquete del Matlab llamado Simulink, donde se podrá comprobar la veracidad del control Fuzzy sobre algún tipo de sistema. Por la misma estructura de los controladores difusos, de no ser necesario el conocimiento algebraico del sistema que se valla a controlar, se colocara una planta de segundo orden (cualquiera) a controlar solo para evaluar el hecho del buen funcionamiento del control. Para que pueda ser utilizado el controlador difuso desde otra interfaz como lo que se va realizar es indispensable exportar el archivo del controlador al workspace del matlab para que así pueda ser accedido por otra aplicación.

Se arma entonces una estructura de bloques en la intervenga una variable Referencia, que será el objetivo que se quiera alcanzar al ejecutar la simulación, como lo citábamos anteriormente, las dos variable que van a entrar en el conjunto difuso serán la Derivada del Error de la Planta y el Error, que es la substracción de la Referencia con el Error de la Planta. Es de notar que la salida del sistema difuso se pasa por un integrador para que la salida del mismo sea la entrada controlada al sistema. Luego la salida de la planta pasa a ser el Error de la Planta y género un ciclo hasta ver después de cierto número de iteraciones el sistema estabilizado en el valor de entrada (Referencia). Cuando se valla invocar el sistema difuso en el bloque de simulink, se debe hacer con el mismo nombre con el cual se exporto al workspace de matlab. Se genera el siguiente diagrama de bloques que se muestra en la Ilustración 47.

Es de vital importancia ver los resultados del procedimiento y para ello se pueden observar en los Scope que están colocados en la plantilla. Esto para ver con exactitud el desempeño del controlador, la acción de control, y lo más importante si se estabiliza y elimina el error en estado estacionario propio de la planta. (Hay que tener en cuenta arreglar unos parámetros de simulación para no incurrir en errores no inherentes al proceso, como el tiempo de simulación).

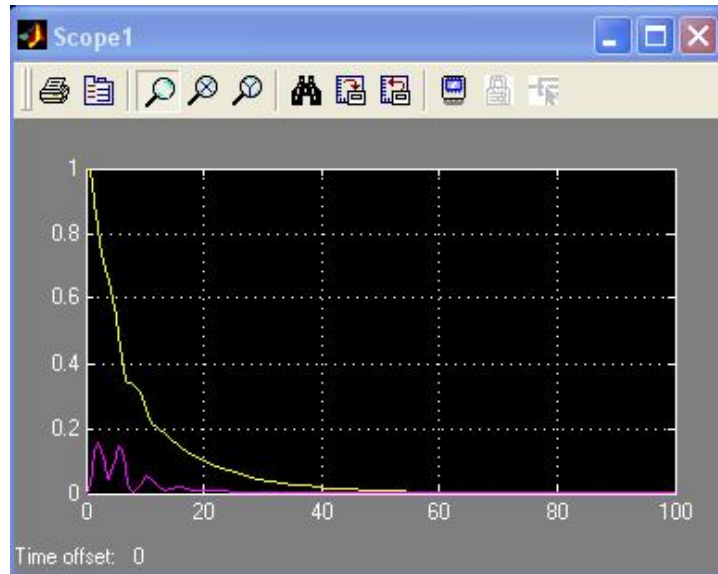
**Ilustración 47. Muestra la simulación del controlador en simulink.**



A continuación se verán los resultados que arrojo el sistema difuso aplicado a un sistema de segundo orden.

En la Ilustración 48 se puede observar las entradas al sistema difuso; la derivada del Error de la Planta (de color morado), en las primera iteraciones se encuentra oscilando pero en un rango muy pequeño y tratando cada ves mas de acercarse al 0 donde el error de la planta ya seria el mínimo y el sistema se estabilizaría, algo similar ocurre con la entrada del Error (de color amarillo), cada ves que ocurren mas iteraciones el error se va disminuyendo, siendo esto lo que se busca, hasta que encuentre el 0, queriendo decir que la salida de la planta es igual a la referencia.

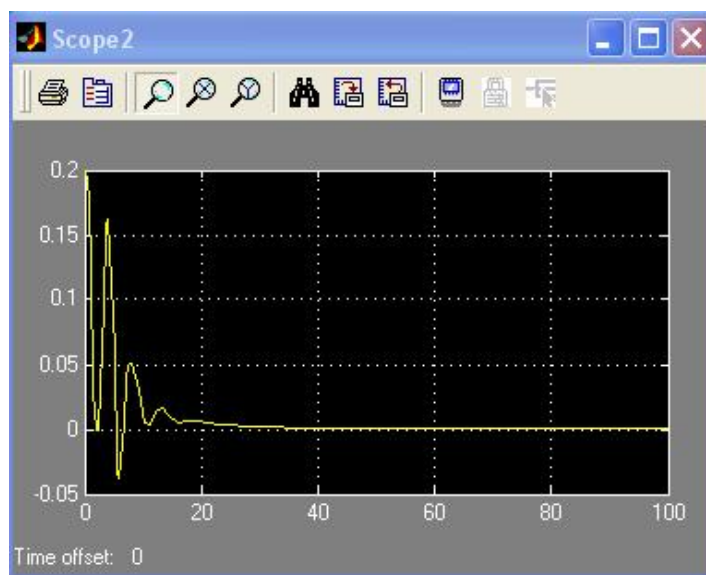
**Ilustración 48. Muestra las graficas de las entradas del sistema difuso**



■ Error de la Planta                      ■ Error

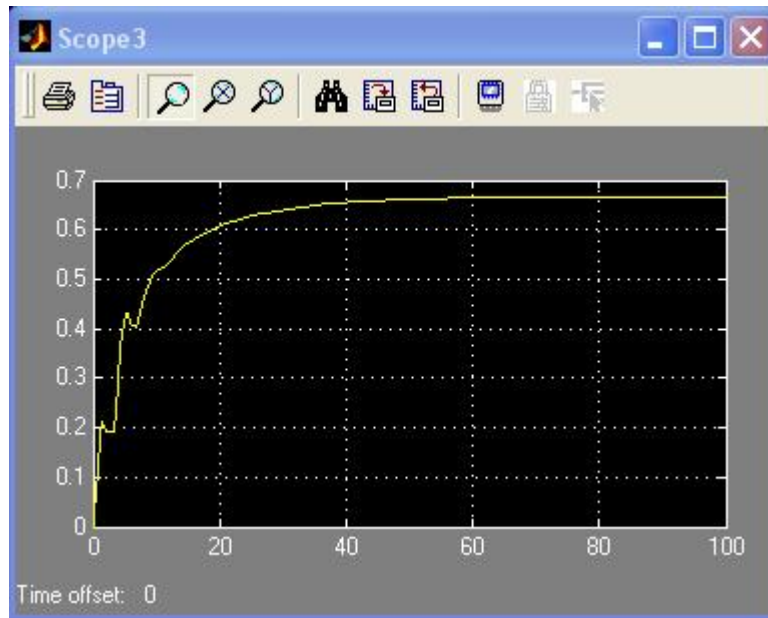
La Ilustración 49 muestra la salida del sistema difuso, es coherente lo que se observa en esta grafica, todos los valores en los cuales oscila exceptuando unos pocos, son positivos y esto indica que esta alimentado al integrador de una señal que cuando alcance la estabilización no aumentara ni disminuirá, que es lo acontece cuando alcanza la estabilidad del proceso, y la salida se vuelve 0.

**Ilustración 49. Muestra grafica de la salida del sistema difuso**



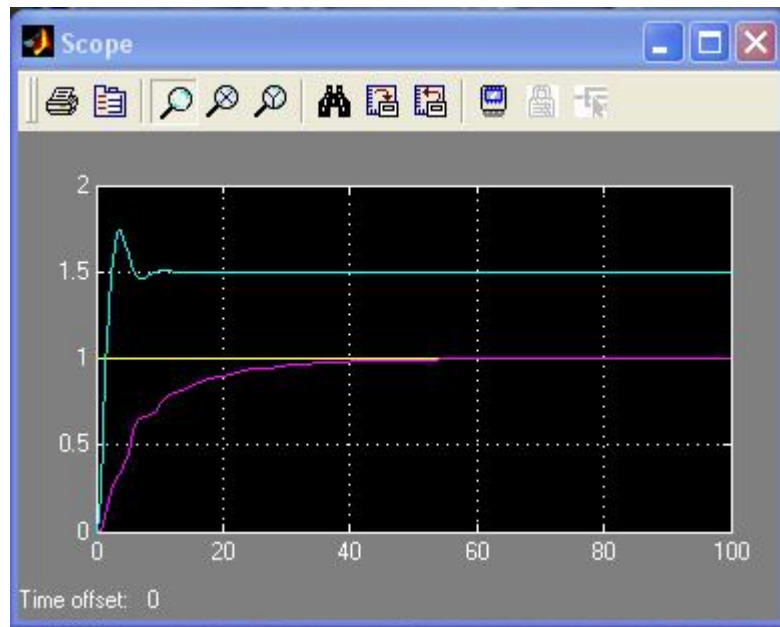
La Ilustración 50 muestra la acción del integrador sobre la señal enviada del conjunto difuso, lo que se observa es que realiza la labor según lo planificado, ya que integra y va sumando las señales actuales con las anteriores. Esta grafica también viene a ser la acción de control del sistema entero, y se nota que la acción de control es mínima y por ende no va generar ningún problema su implementación.

**Ilustración 50. Muestra la grafica de la acción del Integrador.**



En la Ilustración 51, se observa lo mas interesante de la simulación, en ella se ve graficada la referencia, que es a donde se quiere llegar (de color amarillo), la salida de la planta sin ejercer ningún tipo de controlador (de color verde) donde se observa que es estable, pero que posee un error en estado estacionario; y por ultimo se observa la salida de la planta después de haberse implementado un controlador discreto. Aquí se ve que como el controlador fuzzy elimina el error en estado estacionario y su buen desempeño en el control. Dejando por conclusión la buena labor en el diseño del control Difuso.

**Ilustración 51. Muestra la grafica de la salida de la planta con y sin Controlador, referencia.**



- Salida de la Planta con Controlador
- Salida de la Planta sin Controlador
- Referencia

### **7.3.3.2 Implementación Del Controlador Difuso Bajo Matlab**

Ahora se debe de llevar estos resultados al complemento con la parte física del sistema de sustentación neumática, para ello se usara una tarjeta de adquisición de datos; en el caso particular se implementara la tarjeta de adquisición de la Nacional Instruments PCI-1200, que posee una entrada análoga y una salida análoga entre muchas mas de sus características, siendo estas dos las que sirven para el caso en mención.

Por la entrada análoga se captura la señal del sensor que indica la posición del elemento en dicho momento; y por la salida análoga se sacaran valores de voltajes según lo disponga el controlador. Hay que tener en cuenta que lo primero que se debe hacer es configurar los canales de entrada y salida de la tarjeta PCI-1200 y para ello se hace de la siguiente forma:

```

AO = analogoutput('nidaq',1);
AI = analoginput('nidaq',1);
set(AI,'DriveAISenseToGround', 'ON');
set(AI,'InputType','SingleEnded');
addchannel(AI,[0]);
addchannel(AO,[0]);

```

Se crean dos variables para direccionar el canal de entrada y el de salida, después se activa una tierra virtual que es necesaria para la buena adquisición de los datos del canal de entrada y por ultimo se adhieren los canales quedado listos para ser utilizados, tanto el canal 0 para la entrada análoga como el canal 0 para la salida análoga (se poseen 8 canales de entradas análogas y 2 canales de salidas análogas).

Después se debe leer el sistema difuso, es decir, que sea cargado en una variable para que se pueda implementar mas adelante, y para cargarlo se usa la siguiente función:

```
Fis = readfis ('levitador.fis')
```

El último paso antes de empezar a ejercer el controlador es la inicialización de variables y la captura de la referencia en una variable digitada por el usuario.

```

putsample(AO,5);    %inicialización de Voltaje de la Electroválvula
T = 0.05           %Periodo en milisegundos
Error_Ant = 0
Ui = 5             %Inicialización de Variables
u_ant = 0
ref = input ('Ingrese la referencia = ');

```

Para el caso particular del sistema de sustentación neumático es necesario que la inicialización de la salida análoga no sea en 0V sino en 5V, debido a que la electroválvula proporcional su máxima abertura es cuando se le han enviado 0V y su mínima cuando el voltaje enviado es de 5V.

Se requiere ahora, implementar un ciclo infinito en el cual se este capturando la señal del sensor, se le haga el tratamiento respectivo a las señales de acuerdo a lo dispuesto anteriormente, que el sistema difuso me entregue una salida y que esta sea aplicada a la electroválvula después de ser pasada por un integrador, para que después de un periodo previamente establecido se vuelva a realizar este ciclo en mención hasta que se decida para con el control.

```

while(1)
    Error_Planta = getsample(AI)
    Error = ref - Error_Planta
    M = (Error-Error_Ant)/T
    U = evalfis([Error m],fis)
    N = ((u_ant+u)/2)*T
    Ui = ui+n
        if ui>5
            ui=5
            putsample(AO,ui)
        else
            if ui<0
                ui=0
                putsample(AO,ui)
            else
                putsample(AO,ui)
            end
        end
    end
    pause (0.05)
    u_ant = u
    Error_Ant = Error
end

```

El ciclo infinito se implementa con la función while(1); se prosigue a capturar la señal enviada por el sensor con la función getsample( ) y la guardo en la variable Error\_Planta; después hago la sustracción de la referencia (ya ingresa por el usuario) y el Error\_Planta para obtener la primera entrada al sistema difuso; para la segunda entrada se requiere de implementar un derivador del Error\_Planta que llevado a expresiones algebraicas correspondería a:

$$m = \frac{Error\_Planta - Error\_Planta\_Ant}{Periodo}$$

así se obtiene la segunda entrada del sistema difuso, la primera almacenada en Error y la segunda en la variable *m*, con la función evalfis([Error m],fis) envío las entradas y obtengo una variable correspondiente a la salida del sistema difuso después de ser evaluadas almacenada en la variable U. La última operación antes de ser enviada esta señal a la electroválvula es aplicar un integrador, lo cual se hace de la siguiente forma:

$$n = \frac{U + U_{-Ant}}{2} * Periodo$$

$$U_i = U_i + n$$

$U_i$  es la señal que se le aplica a la electroválvula para que esta abra mas, cierre o se quede quieta. Por ultimo se implementan unos saturadores para delimitar la salida de voltaje, actualizo variables, se realiza el delay correspondiente 50 mSug tiempo que doy de espera para volver a ejecutar el programa y repetir el ciclo.

Todo lo señalado en color azul es código para matlab; para detener la ejecución del programa basta con dar “Ctrl C” para terminar; Se realizo además una interfaz con usuario un poco más amigable pero donde se aplica exactamente lo mismo explicado ahora. Y esta interfaz la podemos observar en la Ilustración 52.

**Ilustración 52. Muestra la Interfaz con el usuario del sistema de sustentación neumática.**





### 7.3.3.3 Controlador Fuzzy Bajo El Microcontrolador HC-12

El núcleo 68HC912 es la CPU12 la cual posee el primer conjunto de instrucciones de un microcontrolador para dirigirse específicamente a las necesidades de la lógica difusa. La CPU12 incluye en su set de instrucciones cuatro nuevas tareas específicas de la lógica difusa además de otras instrucciones de esencial utilidad en la elaboración de programas de lógica difusa. Las cuatro instrucciones del núcleo de lógica difusa del 68HC912 son:

- MEM, (determina el grado de pertenencia), la cual evalúa funciones de pertenencia trapezoidales
- REV, (evaluación de reglas de lógica difusa).
- REVW, (evaluación ponderada de reglas de lógica difusa), las que realizan evaluación MIN-MAX de reglas no ponderadas o ponderadas.
- WAV, esta función realiza la defuzzificación por promedio ponderado con funciones de pertenencia de salida tipo singlenton (barra).

*(Información en detalle de estas funciones Anexo H)*

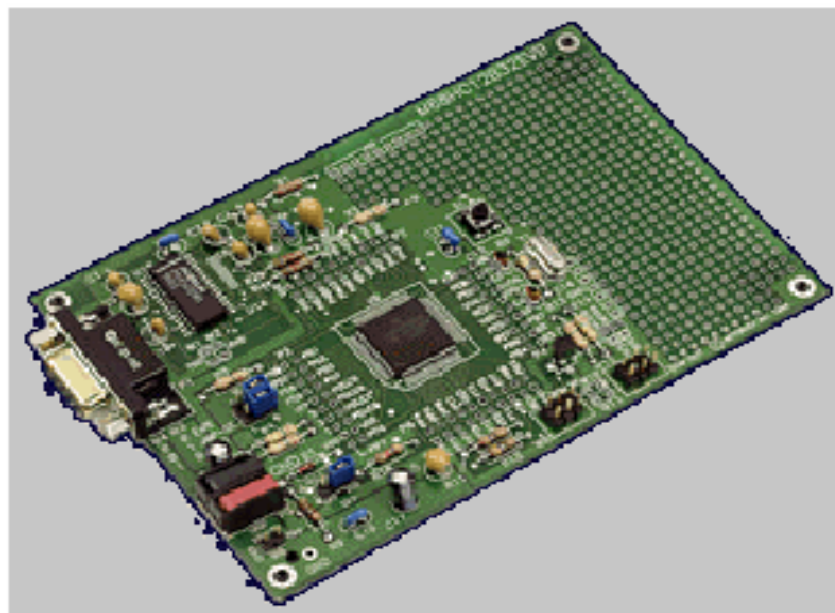
Otras instrucciones de gran utilidad para programas de lógica difusa:

- MINA, coloca el menor de dos valores sin signo de 8 bits en el Acum A.
- EMIND, coloca el menor de dos valores sin signo de 16 bits en el Acum D.
- MAXM, coloca el mayor de dos valores sin signo de 8 bits en memoria.
- EMAXM, coloca el mayor de dos valores sin signo de 16 bits en memoria.
- TBL, búsqueda en tablas e interpolación.
- ETBL, búsqueda extendida en tablas e interpolación
- EMACS, multiplicación y acumulación extendida, con signo; 16 X 16 bits para obtener 32 bits.

Para mayor resolución de programas Fuzzy, las instrucciones matemáticas rápidas de precisión extendidas de la CPU12 son también benéficas. Los modos de direccionamiento indexado flexibles ayudan a simplificar el acceso da la lógica difusa a estructuras de datos almacenados como listas o tablas como estructuras en memoria.

Un núcleo de inferencia fuzzy para la CPU12 requiere un quinto a lo más de espacio de código, y se ejecuta quince veces por lo menos, mas rápido que un núcleo comparable implementado en un microcontrolador típico de rango medio. Al incorporar el soporte de lógica difusa a una familia de productos de microcontroladores de propósito general, Motorola ha hecho que la lógica difusa este disponible para diversas aplicaciones de una forma sencilla y económica. En el Anexo I se puede ver en detalle las especificaciones técnicas con las que cuenta el micro **MC68HC912B32**. Motorola ofrece herramientas de desarrollo tanto de software como de hardware para la familia 68HC12. Las tarjetas de evaluación (EVB) son la herramienta económica para diseñar, evaluar y comprobar las operaciones realizadas en el **MC68HC912B32**; en la Ilustración 53 se puede observar la tarjeta de evaluación **M68EVB912B32** de la motorota la cual se va a utilizar en el diseño del controlador fuzzy.

**Ilustración 53. Tarjeta de evaluación M68EVB12B32**



- **Descripción del Hardware a Implementar**

Esta tarjeta de evaluación posee unas características propias de hardware las cuales son:

- Fuente de (+3) V a (+5) V DC en la entrada.
- Fuente de (+8) V a (+12) V DC de entrada para el borrado.
- Interfaz RS-232C.
- Conectores BDM de entrada y BDM de salida para la tarjeta.
- Cristal de 16 MHz para un bus de operaciones de 8 MHz.
- Jumper de selección y conexión de hardware:
  - § Aislamiento de RS-232 (W1,W2).
  - § Selección del modo EVB (W3,W4).
  - § Selección del modo de microcontrolador (W5, W6).
  - § Selección Vpp / Vdd (W7).
  - § Entrada Vpp (W8).
  - § Desconectar BDM OUT Vdd / Reset (W10, W11).
  - § BDM OUT (W12).
  - § Inhibir el bajo voltaje (LVI), reset (W15).
  - § Acceder y controlar fuente EXTAL (W16).
- Cuatro conectores para acceso de la entrada y salida del micro (P2,P3,P4,P6).
- Prototipo de área de expansión con interconexión modificada para requisitos particulares del microcontrolador.
- Swich de Reset (S1).
- Protección para inhibición de bajos voltajes.

La tarjeta EVB usa una comunicación serial configurada de la forma en que la rata de Baudio es de 9600, Bits de datos 8, Bits de Parada 1 y paridad ninguno; el único parámetro que puede ser modificado es la rata de baudio para casos excepcionales, de lo contrario se le deja la configuración que trae por defecto y no habrá ningún problema al compartir datos.

La configuración de los jumper desde W1 hasta W16, se dejan por defecto para aplicaciones simples de software. Los únicos jumper se selección con los que se va a interactuar serán los jumpers del modo de operación del EVB (W3,W4), el jumper W7 Selección de Vpp / Vdd, y el jumper W8.

Con el jumper W8 es por donde vamos a aplicar un voltaje superior a 8 VDC y menor a 12VDC para poder borrar la memoria Flash y EEPROM; Con el jumper W7 seleccionamos Vpp cuando queremos tener acceso a la tensión aplicada en W8, y por ende borrar las memorias; y cuando cambiamos a Vdd, se vuelve al voltaje nominal de la tarjeta y es hay donde se pueden ejecutar los programas en la tarjeta de evaluación.

Existen cuatro modos de operación el primer es el modo EVB (W3=0;W4=0), el segundo es el modo Jump-EEPROM (W3=1;W4=0), el tercer modo es el modo POD (W3=0;W4=1), y por ultimo el modo Bootload (W3=1;W4=1)

### **Modos de evaluación de la Tarjeta EVB:**

- Modo EVB (W3=0;W4=0); En el modo EVB, el MC68HC912B32 comienza a ejecutar el código desde el vector que se encuentra en la dirección \$F7FE, el apunta al vector del D-Bug12 (valor por defecto de fabrica) o al programa del usuario que esta en la Flash-EEPROM.
- Modo Jump-EEPROM (W3=1;W4=0); El código de usuario se ejecuta en la byte-Erasable EEPROM desde la dirección \$0D00.
- Modo POD (W3=0;W4=1); El EVB y el D-Bug12 sirven como interfase entre una tarjeta y el usuario. Comunicación entre el EVB y la tarjeta son por medio de el modo de Background Debug (BDM), usando el EVB encabezado por el W12.
- Modo Bootload (W3=1;W4=1); El programa del usuario puede ser cargado en el servidor del EVB en la byte-erasable o en la Flash-EEPROM.

Para el caso particular del sistema de sustentación neumática solo vamos a utilizar dos de los cuatro modos mencionados anteriormente. Uno será el modo Bootload (W3=1;W4=1), para cargar los programas que sean necesarios evaluar en la tarjeta, y el segundo modo que se utilizara será el de JUMP-EEPROM (W3=1;W4=0), que será para cuando estén cargados los programa, cambiamos los jumper para pasarlo a este modo e inmediatamente se ejecutara el programa diseñado.

- **Descripción del Software a Implementar:**

El software que se va utilizar para que sirva de interfaz entre el Pc y la tarjeta de evaluación será un software llamado MinIde el cual es freeware y se le puede descargar de la pagina [www.mgtek.com](http://www.mgtek.com). El MinIde es un software muy sencillo que nos permite descargar los programas a la tarjeta vía serial RS-232, además de compilar los programas desarrollados antes para que no exista ningún error de nomenclatura.

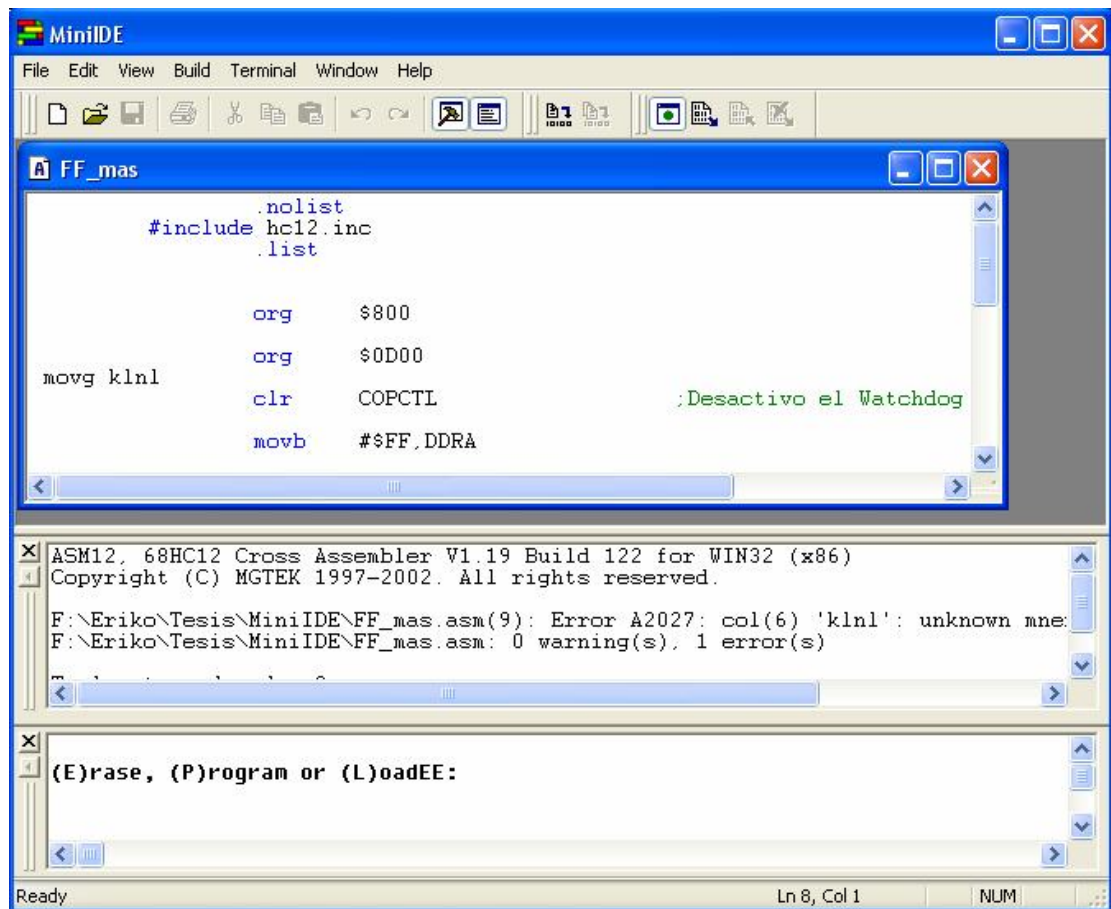
La interfaz que nos presenta este software MINIDE la podemos observar en la Ilustración 54, se identifican 3 partes importantes, la primera es el área donde escribimos el programa en lenguaje ensamblador, el software coloca las palabras reservadas de color azul para un mejor entendimiento y orden para el desarrollador. La segunda parte importante es la concerniente al área donde después de compilado el programa se indica si hay errores o alertas o por lo contrario el programa ya está listo para ser descargado en la tarjeta de evaluación, esta ventana es conocida con el nombre de Output Window, la cual se vuelve visible después de la primera compilación de un programa. Y por último el área de Terminal Window, donde se da cuenta el usuario de que está bien conectada la tarjeta de evaluación y donde podemos descargar los programas después de compilados.

Al compilar un programa y de quedar correcto el software genera un archivo con extensión .S19 y este archivo el cual se descarga a la tarjeta de evaluación. Los archivos que se escriben deben de estar en la carpeta que contenga el MINIDE para poder ser compilados ya que en esta carpeta es que está direccionado el compilador asm12.exe que es el encargado de convertir el programa de lenguaje ensamblador de extensión .ASM a lenguaje de máquina interpretado por la tarjeta de evaluación.

Para compilar un programa basta con escribirlo, guardarlo con extensión .ASM ya que no lo hace directamente el software, y ejecutar el comando Build Current o Ctrl + F7.

Antes de descargar un programa de extensión .S19 se debe configurar el MINIDE, indicar por qué COM del serial está conectado la Tarjeta de evaluación así mismo de configurar su Rata de Baudio, bits de datos, bits de parada y paridad igual a la configuración de la Tarjeta EVB. Con el comando Terminar Connect/Disconnect se conecta con la tarjeta de evaluación y se queda en espera para descargar el programa.

**Ilustración 54. Muestra la interfaz con el usuario del software MINIDE.**



Cuando se va a descargar un programa lo primero que se debe hacer es borrar las memorias, y para esto se digita la letra E (Erase); ya borrado, si se desea cargar en la memoria EEPROM digitamos L (Load) e invocamos la función Dowloads, donde se busca el programa .S19 y se descarga, el mismo proceso cuando se quiera descargar en la memoria Flash, pero se digita antes P (Program).

#### **7.3.3.4 Implementación Del Controlador Difuso Bajo El Microcontrolador HC-12**

Conociendo ya el proceso para trabajar con el microcontrolador HC-12 tanto de su manejo de software y el manejo de hardware, procedemos a escribir el programa en lenguaje ensamblador del controlador fuzzy. Se va a manejar tanto la memoria Ram, como la Flash y la EEPROM, todas para los respectivos procedimientos que se necesitan.

- **Memoria Ram (\$800)**

En la Memoria Ram se declaran las variables que se necesitan a través de todo el programa y también se declaran las variables lingüísticas con las que vamos a llamar a las funciones de pertenencia de los grupos difusos, tanto para sus entradas, como para su salida difusa. (Para simplicidad y comodidad se utilizaran los mismos nombres que se utilizaron en el controlador fuzzy bajo matlab).

Todas las variables que se utilizan poseen su respectiva etiqueta o nombre que las identificaran y por las que se podrán tener acceso, y el espacio en memoria reservado para cada una de estas es de 1 byte. También se diferencian los grupos de EntFuzzy con sus 10 etiquetas para las dos entradas y SalFuzzy con 5 etiquetas para la salida Fuzzy de las funciones de pertenencia; los cuales se van a acceder cuando sean requeridos por los vectores tanto de la Fuzzificación como para la defuzzificación.

- **Memoria EEPROM (\$0D00)**

En la memoria EEPROM se definen las funciones de pertenencia para las dos entradas difusas. Se realiza un símil con las funciones de transferencia definidas para el controlador difuso realizado en matlab se puede observar en la Ilustración 55. Debido a que ahora el rango en el cual se van a manejar los valores de entrada serán entre (00 – FF hexadecimal) y no entre (-5; 5) como en matlab.

Con los conjuntos definidos se procede a reservar una en un arreglo de 4 bytes cada función trapezoidal, que para el caso en particular son triangulares. El primer byte se refiere al punto de inicio, el segundo byte al punto final o de llegada, el tercer byte a la pendiente de la línea que compone el punto inicial, y el último a la pendiente que compone la línea del punto final. Ilustración 56.

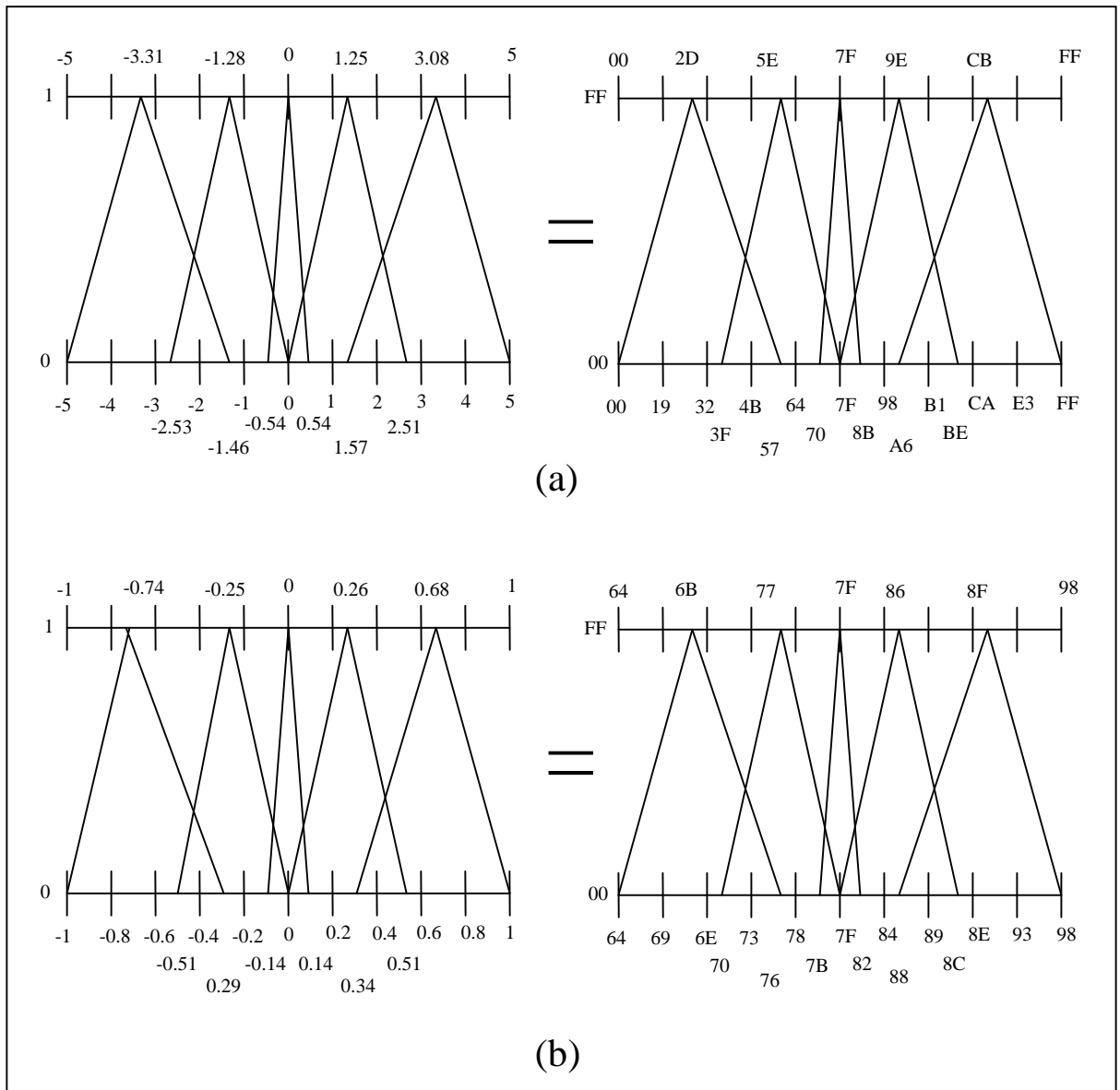
Para hallar estas pendientes basta con dividir la base, que para todos los casos sería FF, ya que todas las rectas van hasta el máximo punto, sobre la altura. Por ejemplo, para las funciones de pertenencia de la primera entrada (Error); la primera función triangular el primer byte sería 00H, por ser el punto de inicio, el segundo byte será el punto en el que

finalice la función triangular es decir, 57H; el tercer byte será  $x = \frac{base}{altura} = \frac{FF}{2D - 00} = 05$ ,

lo mismo para el cuarto byte  $x = \frac{base}{altura} = \frac{FF}{57 - 2D} = 06$ . Y así sucesivamente para las

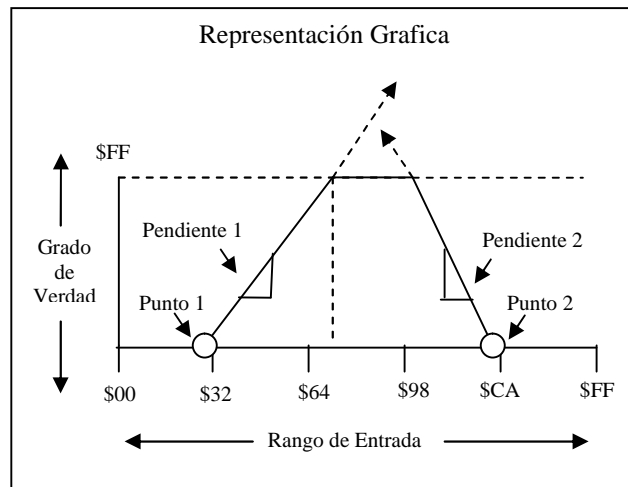
demás funciones de pertenencia.

**Ilustración 55. Similitud de las funciones de pertenencia generadas en matlab, para ahora ser trabajadas en el microcontrolador HC-12**





**Ilustración 56. Muestra representación grafica de una función de pertenencia.**



Después de tener definidas las funciones de transferencia se fijan unos sesgos para relacionar las entradas y salidas definidas en la memoria Ram con la creación de las reglas y que sea entendido por la tarjeta de evaluación. Se crean dos variables antes de empezar a crear las reglas de control, que son necesarias para el entendimiento de las funciones del núcleo de inferencia difuso. La primera variable se usa para entender la separación de las reglas cuando se llamen a evaluar la lista de reglas, esta variable se carga con un valor de FEH y la otra es para señalar el fin de la evaluación de reglas, esta variable se carga con un valor de FFH.

Como se hizo para el caso de la creación de las funciones de pertenencia se definió un arreglo de 4 bytes para cada función de pertenencia, ahora, para el caso de la concepción de las reglas se genera un arreglo pero esta vez de 5 bytes para cada regla, los dos primeros bytes son las dos entradas difusas, el tercer byte es la separación ya cargada en una variable con antelación, el cuarto byte es la salida difusa la cual se activaría si se cumplen las reglas anteriores, el quinto y ultimo byte es el fin de la regla que viene a ser la misma variable de separación de las reglas. Cuando se termina de generar las reglas que para el caso propio, del sistema de sustentación neumática serian 18 reglas como se comprobó en matlab, invoco en ese momento la variable fin de evaluación de reglas cargada con FFH en memoria. Por ultimo como en matlab defino cinco valores de salida en el rango (00H-FFH), para la salida de barras singlenton del microcontrolador.

- **Memoria Flash (\$8000)**

En la dirección \$8000 comienza la memoria flash y es aquí donde también va a empezar el programa que se ejecuta cuando se inicia el microcontrolador, después de ser descargado el programa. El programa entero se puede observar en el anexo I con sus respectivos comentarios para la fácil comprensión del mismo.

En esta parte del programa se hace lo mismo que en el programa controlador de matlab exceptuando que hay que realizar algunos tipos de conversiones para ajustar tanto las entradas como las salidas a los rangos manejados por el microcontrolador. Pero el manejo del controlador difuso, su derivador, e integrador es idéntico al realizado anteriormente.

Hay que tener en cuenta que al final del programa se debe relacionar la dirección \$F7FE con la dirección \$8000; esto con el fin de cuando se resetea al microcontrolador el va a la dirección en mención y de ahí para a la dirección de inicio de la memoria Flash. También se debe tener en cuenta el encabezado en el cual se relaciona la librería del HC-12 y así poder acceder sus variables internas y facilitar el manejo.

## 8 CONCLUSIONES

El diseño propuesto cumple con las expectativas planteadas, sin embargo es necesario validarlo mediante prototipos más completos que incluyan un rediseño para perturbaciones.

Los logros más significativos, culminada esta primera etapa, fueron:

- Diseño mecánico del dispositivo sustentación neumática, optimizado progresivamente respecto a los conceptos iniciales y en un gran porcentaje innovado en relación a prototipos del mismo tipo en todo el mundo.
- Implementación de los recursos existentes en el plantel educativo, que hasta el momento estaban subutilizados en conjunción con las técnicas de control contemporáneo, que se constituyen en un aporte a este entorno universitario y la base de futuros desarrollos en diversas aplicaciones de control.
- Utilización de una metodología de diseño concurrente de los sistemas de control, mecánico y eléctrico que garantizan un correcto funcionamiento global del sistema, aunque presenta limitaciones en lo que se refiere a las perturbaciones este se diseño pensando en mejoras futuras mencionadas mas adelante.
- Adquisición y aplicación de conocimiento de tecnología de punta como lo son actuadores y sensores, ampliamente utilizados en los ambientes industriales y prototipos mecatronicos actuales.
- Creación de un manual de usuario que contiene información detalla acerca de cómo se debe manejar el prototipo. Es decir como manejar las señales que voltajes polarizan los elementos que componen el prototipo y que cuidados se deben tener.

## 9 RECOMENDACIONES

Las mejoras susceptibles de realizar sobre el prototipo están encaminadas a obtener un producto totalmente funcional y además terminado en estética y ergonomía.

- Es necesario un rediseño del soporte del sensor ya que por razones de seguridad debe retirarse el sensor una vez acabada la práctica y hacerlo en las condiciones actuales se reflejaría en un deterioro de cilindro acrílico.
- Realizar nuevamente el cableado con cable de un solo color e identificación en los extremos de acuerdo a las normas de cableado estructural y de esta forma dar un aspecto de uniformidad.
- Mejorar la conformación del elemento sustentado de tal forma que podamos identificar en el solo un elemento.
- Considerar la posibilidad de generar las perturbaciones con las vía de la electroválvula que no esta siendo utilizada.
- Realizar la culminación de la fase de diseño industrial en la que se añade una mejora de tipo estético al prototipo y además una señalización clara de los elementos, modo de uso y valores de operación.

## **BIBLIOGRAFIA**

- **ULLMAN David**, the Mechanical Design Process. New York: McGraw Hill, 1992. 450p.
- **Ulrich, Karl; Eppiinger, Steven**. Product design and development. 2 ed. California: McGraw Hill, 2000. 572p.
- Manual técnico Válvulas Electrónicas Proporcionales **Festo**, [s.f]. pag 15-23.
- Manual Técnico Detectores de proximidad ultrasónicos Bero sonar **Siemens**, [s.f]. pag 10-28.

## Anexo A

### Distribución Geométrica De Los Elementos

Ilustración 57. Distribución geométrica del prototipo.

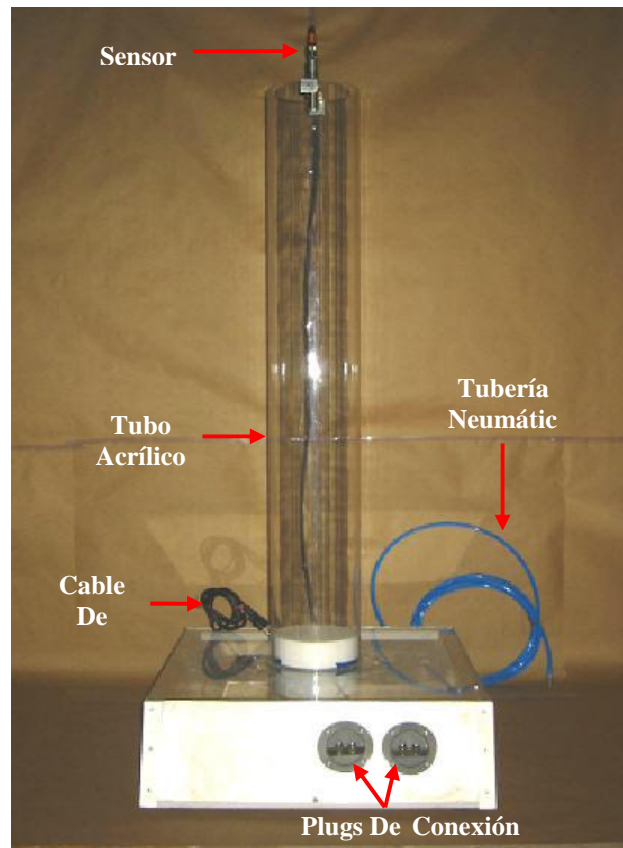
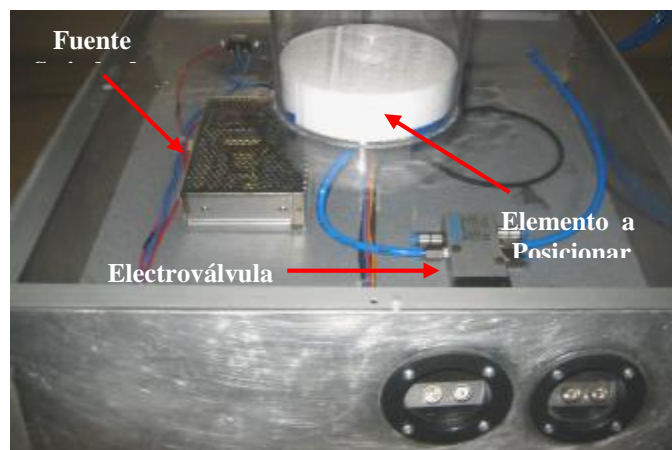


Ilustración 58. Distribución Geométrica de los Elementos



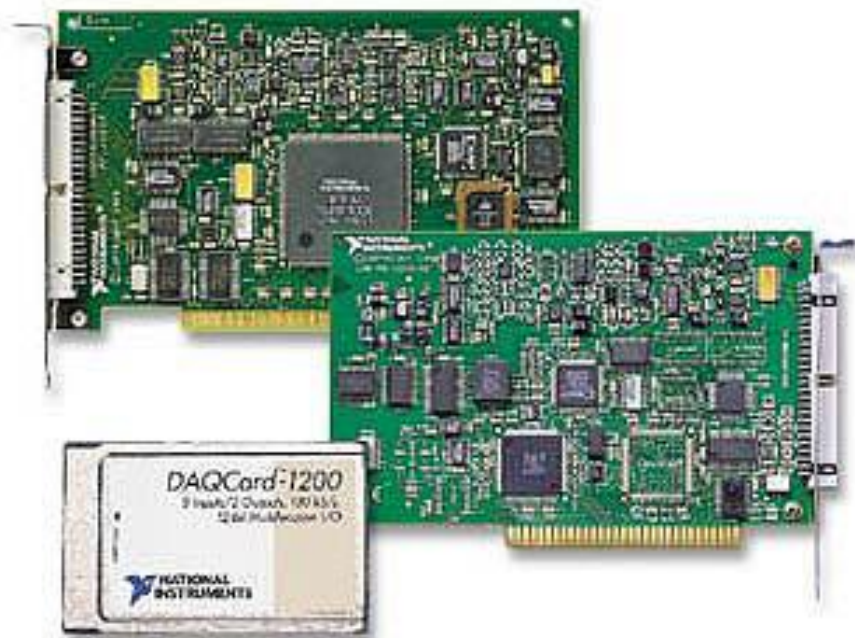
## Anexo B

### NI DAQ PCI 1200

La tarjeta de Adquisición de datos PCI-1200 tiene las siguientes características:

- 2 analog outputs, 24 digital I/O lines
- **Consider our newer PCI-6025E low-cost DAQ**
- For PCI; legacy 12-bit, 100 kS/s, 8 analog inputs
- NI-DAQ driver software, Version 6.9.1 or earlier
- Three 16-bit, MHz counter/timers

**Ilustración 59. Muestra el aspecto de la tarjeta.**



A continuación se muestra la distribución de canales y de señales de la tarjeta de adquisición de datos PCI-1200.

**Ilustración 60. Muestra Distribución de la tarjeta**

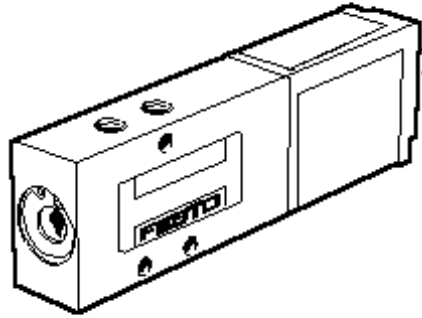
|               |    |    |          |
|---------------|----|----|----------|
| ACH0          | 1  | 2  | ACH1     |
| ACH2          | 3  | 4  | ACH3     |
| ACH4          | 5  | 6  | ACH5     |
| ACH6          | 7  | 8  | ACH7     |
| AISENSE/AIGND | 9  | 10 | DAC0OUT  |
| AGND          | 11 | 12 | DAC1OUT  |
| DGND          | 13 | 14 | PA0      |
| PA1           | 15 | 16 | PA2      |
| PA3           | 17 | 18 | PA4      |
| PA5           | 19 | 20 | PA6      |
| PA7           | 21 | 22 | PB0      |
| PB1           | 23 | 24 | PB2      |
| PB3           | 25 | 26 | PB4      |
| PB5           | 27 | 28 | PB6      |
| PB7           | 29 | 30 | PC0      |
| PC1           | 31 | 32 | PC2      |
| PC3           | 33 | 34 | PC4      |
| PC5           | 35 | 36 | PC6      |
| PC7           | 37 | 38 | EXTTRIG  |
| EXTUPDATE*    | 39 | 40 | EXTCONV* |
| OUTB0         | 41 | 42 | GATB0    |
| OUTB1         | 43 | 44 | GATB1    |
| CLKB1         | 45 | 46 | OUTB2    |
| GATB2         | 47 | 48 | CLKB2    |
| +5 V          | 49 | 50 | DGND     |



## Anexo C

### Válvula proporcional 5 vías 3 posiciones MPYE 1/8

**Ilustración 61. Muestra una vista isométrica de la electroválvula**



**Tabla 11. Muestra Especificaciones Electromecánicas**

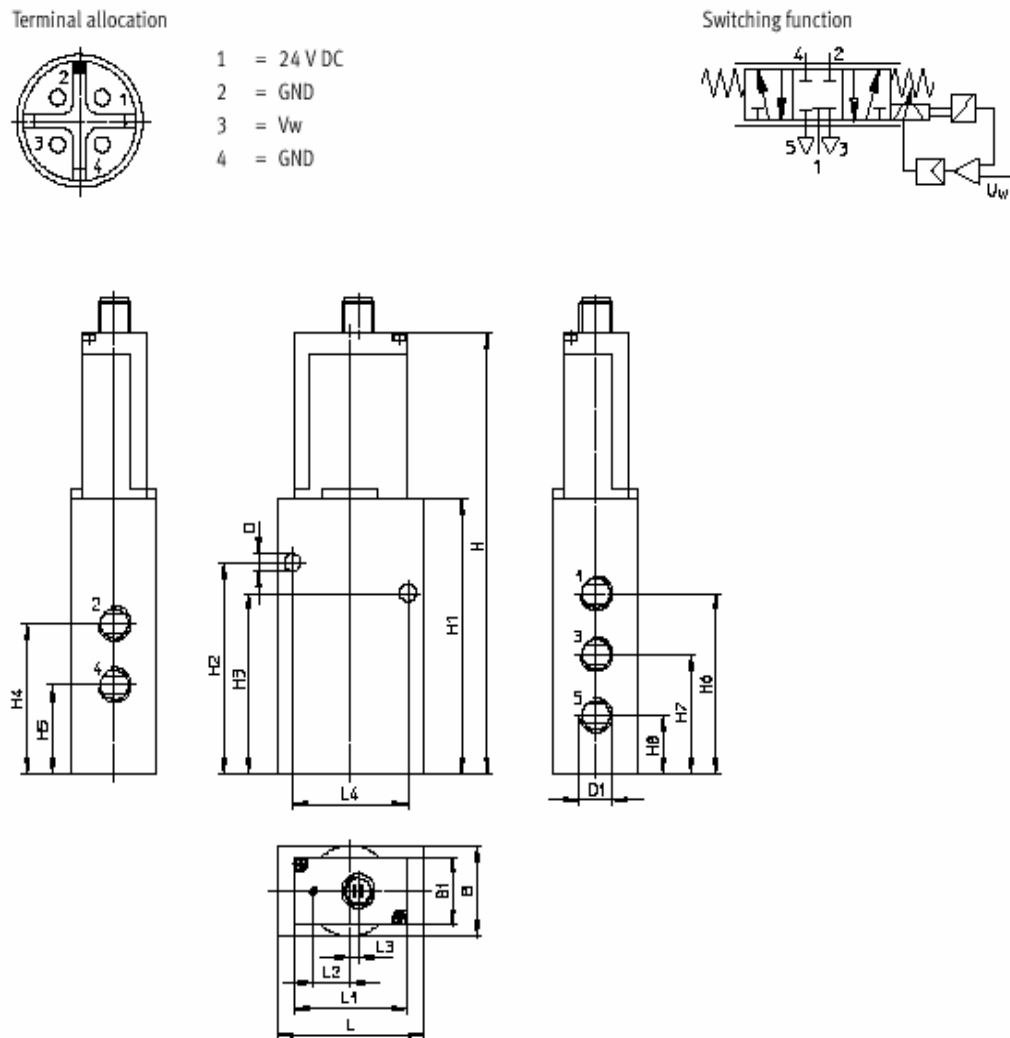
|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| Voltaje de alimentación              | $V_b = 24 \text{ V DC} \pm 25\%$                            |
| Consumo de Potencia $P_{max}$        | 20W a 30V<br>2w cuando el pistón esta en posición media     |
| Voltaje para configurar vías         | 0-5V flujo de 2 a 3 y 1 a 4<br>5-10V flujo de 4 a 5 y 1 a 2 |
| Salida Proporcional                  | 4-20mA  |
| Histéresis                           | 0.4%  |
| Limite de frecuencia Max             | 100 Hz  |
| Protección ante dolarización inversa |   |

**Tabla 12. Muestra Especificaciones de servicio.**

| Datos Neumáticos | Conexión | Rata de Flujo<br>5 a 6 bar | Tamaño Nominal |
|------------------|----------|----------------------------|----------------|
| MPYE-5 HF        | G        | 700 l/min                  | 6 mm           |

- **Conexión, funcionamiento y Geometría.**

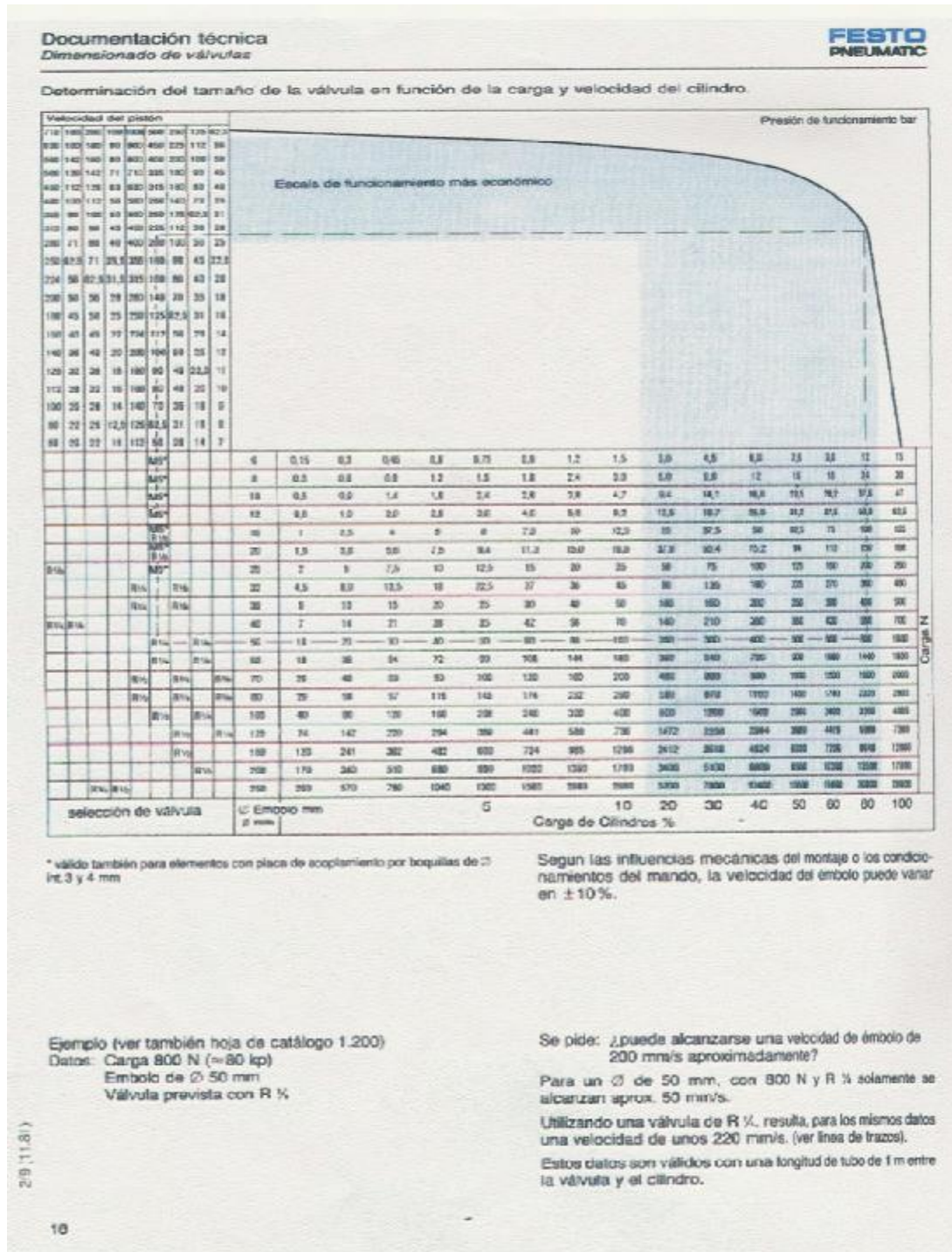
**Ilustración 62. Muestra especificaciones de la electroválvula.**



| Type             | B    | B1   | D    | D1   | H     | H1   | H2   | H3   | H4   |
|------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| MPYE-5-1/8-...-B | 26.8 | 55.3 | 36.3 | 17.3 | 45    | -    | 14.8 | 3.2  | 35   |
| Type             | H5   | H6   | H7   | H8   | L     | L1   | L2   | L3   | L4   |
| MPYE-5-1/8-...-B | 26   | -    | 5.5  | G1/8 | 148.8 | 88.4 | 71.3 | 55.1 | 45.8 |

- Dimensionado de válvulas

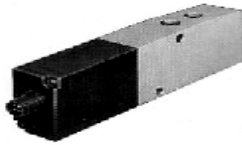
Ilustración 63. Muestra una ficha técnica para el dimensionado de válvulas



- **Tipos de Electrovalvula**

### **Ilustración 64. Selección de Electrovalvula**

Tipo MPYE-5-1/8-...-B



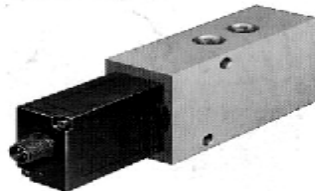
Caudal hasta 350 l/min  
(bajo caudal)

Tipo MPYE-5-1/8-...-B



Caudal hasta 700 l/min  
(alto caudal)

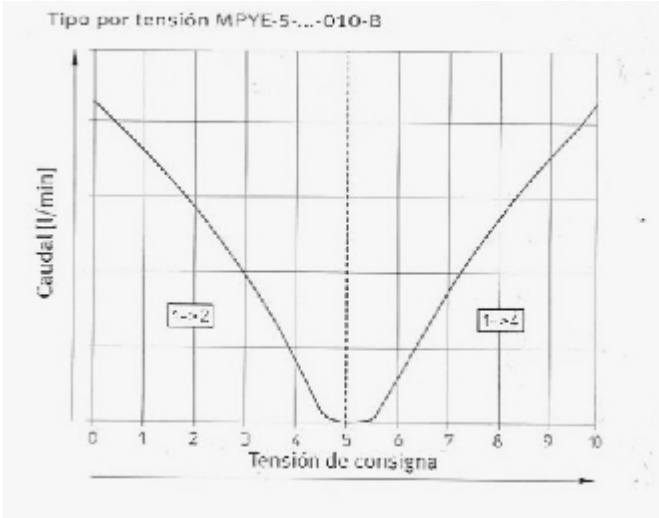
Tipo MPYE 5 1/4 ... B



Caudal hasta 1400 l/min.

- **Manejo de Electrovalvula**

**Ilustración 65. Manejo De Las Vias Por Voltaje Aplicado**



## Anexo D

### Sensor Ultrasónico Bero Sonar

**Ilustración 66. Muestra una vista isométrica del sensor.**



|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| Zona de detección         | 15 a 100 cm  |
| Tensión de empleo         | 20 a 30 V DC |
| Frecuencia de conmutación | 4 Hz         |
| Cargabilidad              | 100 mA       |
| Frecuencia ultrasónica    | 200 kHz      |
| Dimensiones               | M18 x 101 mm |
| Grado de protección       | IP 65        |
| Rango de temperatura      | -25 a +70 °C |

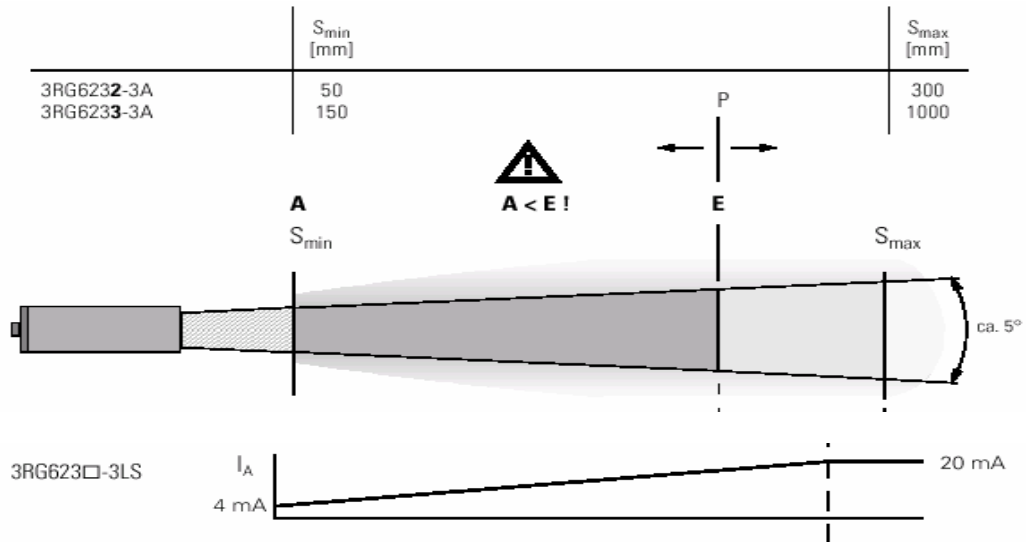
- **Especificaciones Eléctricas**

**Ilustración 67. Muestra especificaciones técnicas.**

| Instrucciones   |                               | Español   |      |           |                      |              |                               |                        |  |  |  |
|---|-------------------------------|---|------|-----------|----------------------|--------------|-------------------------------|------------------------|--|--|--|
|  <p><b>¡Debido a condicionantes físicos, los Sonar-BERO no deben utilizarse para la protección de personas o para funciones de parada de emergencia!</b></p> <p><b>Fig. I:</b> Para dimensiones (en mm).</p> <p><b>Fig. II:</b> Mantener libre de objetos perturbadores la distancia "x" alrededor del eje del cono de radiación. La desviación angular de 3° rige para superficies lisas.</p> <p><b>Fig. III:</b> Conexión. Las conexiones están <b>protegidas contra la permutación de polos</b> y son <b>resistentes a los cortocircuitos y a las sobrecargas</b>. Se recomienda emplear cables apantallados si hay fuertes perturbaciones eléctricas.</p> <p><b>Fig. IV:</b> Zona operativa<br/>A: Inicio zona operativa (programable)<br/>E: Final zona operativa</p> <p><b>Fig. V:</b> Sincronización: Uniendo los pines XI máx. 10 BERO.</p> <p><b>Desbloqueo (XI: Enable / sync)</b><br/>Mientras no está aplicada la señal de desbloqueo (XI), permanece memorizado el último estado de conmutación. Cuando se aplica nuevamente la señal de desbloqueo, la salida se actualiza.</p> <p><b>Datos técnicos</b></p> <table border="0"> <tr> <td>Grado de protección</td> <td>IP 67</td> </tr> <tr> <td>Peso</td> <td>máx. 67 g</td> </tr> <tr> <td>Temperatura ambiente</td> <td>-25 ... 70°C</td> </tr> <tr> <td>Error en punto de conmutación</td> <td>± 2,5 % (-25 ... 70°C)</td> </tr> </table> | Grado de protección           | IP 67   | Peso | máx. 67 g | Temperatura ambiente | -25 ... 70°C | Error en punto de conmutación | ± 2,5 % (-25 ... 70°C) | <p>Tensión asignada de servicio <math>U_a</math></p> <p>Margen de tensión de servicio <math>U_B</math></p> <p>Ondulación residual admisible</p> <p>Corriente en vacío <math>I_0</math></p> <p><b>Salida de conmutación (NC/NO) / Salida de frecuencia (FA):</b></p> <p>Intensidad asignada de servicio <math>I_a</math></p> <p>Caída de tensión <math>U_d</math></p> <p><b>Salida analógica (UA / IA):</b></p> <p>Margen de corriente</p> <p>Carga</p> <p>Spannungsbereich</p> <p>Carga</p> <p>Precisión</p> <p><b>Entrada de desbloqueo</b></p> <p>Detector activo</p> <p>Detector inactivo</p> | <p>24 V DC</p> <p>20...30 V DC (con 12...20 V DC, sensibilidad reducida en hasta un 20 %)</p> <p>10 %</p> <p>&lt; 50 mA</p> <p><math>\leq 150</math> mA</p> <p><math>\leq 3</math> V a 150 mA</p> <p>3RG623□-3TS: 0 ... 20 mA</p> <p>3RG623□-3LS: 4 ... 20 mA</p> <p>0 bis 300 <math>\Omega</math></p> <p>3RG623□-3JS: 0 ... 10 V</p> <p>&gt; 2k<math>\Omega</math></p> <p>± 2,5 %</p> <p>Tensión asignada de servicio ó alto valor óhmico</p> <p>Corriente de entrada <math>I_e</math> máx. 16 mA</p> <p>0...3 V. Corriente de entrada <math>I_e</math> máx. -11 mA</p> |  |
|   | Grado de protección           | IP 67   |      |           |                      |              |                               |                        |  |  |  |
|   | Peso                          | máx. 67 g   |      |           |                      |              |                               |                        |  |  |  |
|   | Temperatura ambiente          | -25 ... 70°C  |      |           |                      |              |                               |                        |  |  |  |
|   | Error en punto de conmutación | ± 2,5 % (-25 ... 70°C)  |      |           |                      |              |                               |                        |  |  |  |
|   |                               | <p><b>Para más detalles sobre programación y accesorios, véase el catálogo NSK y el folleto E20001-P285-A528.</b></p> |      |           |                      |              |                               |                        |  |  |  |

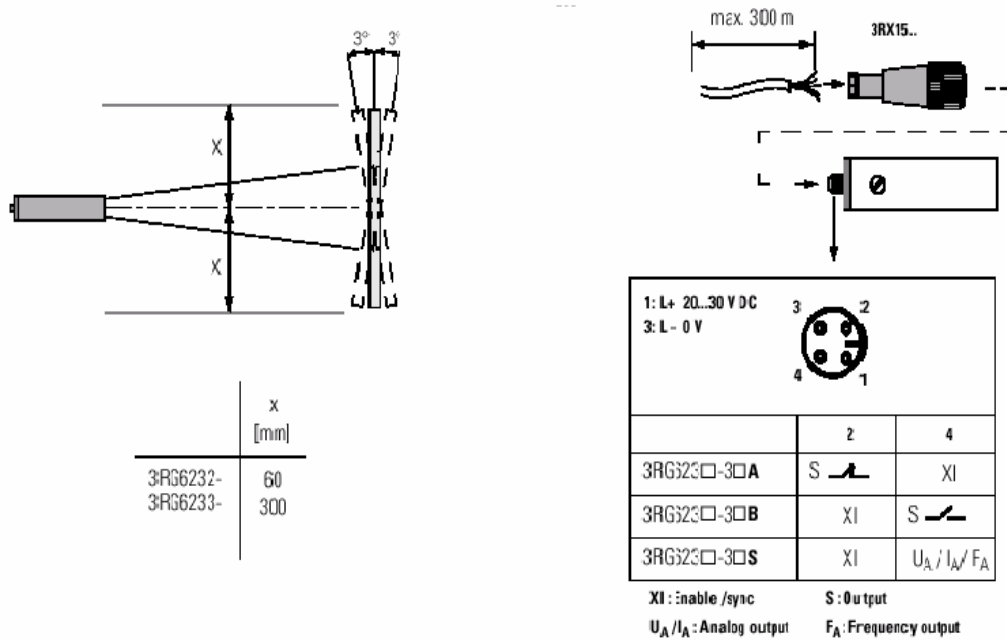
- **Características Operativas**

**Ilustración 68. Muestra características operativas.**



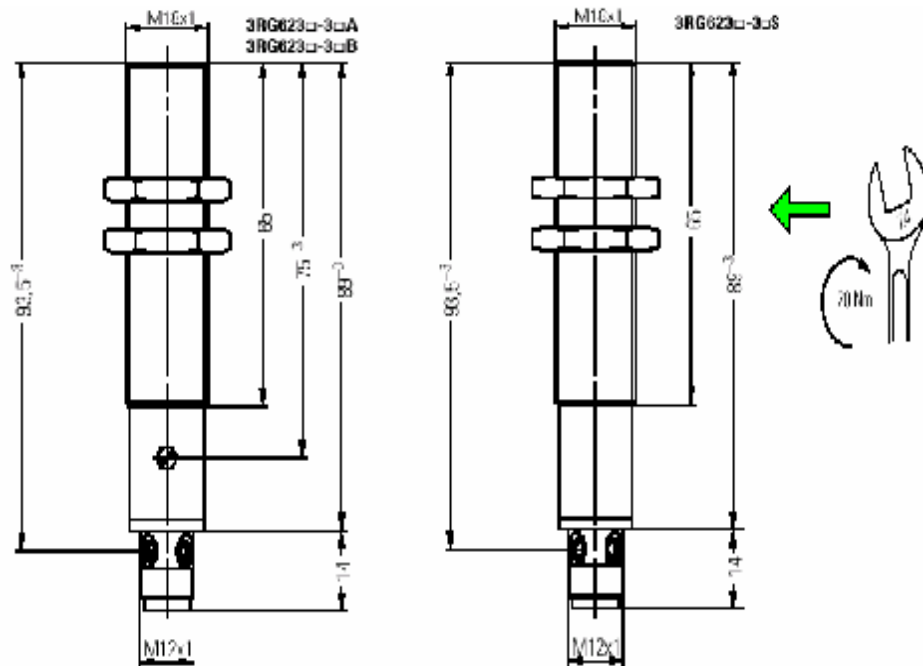
- **Modo de Conexión**

**Ilustración 69. Muestra el modo de conexión.**



- Geometría del Sensor

**Ilustración 70. Muestra las medidas del sensor**



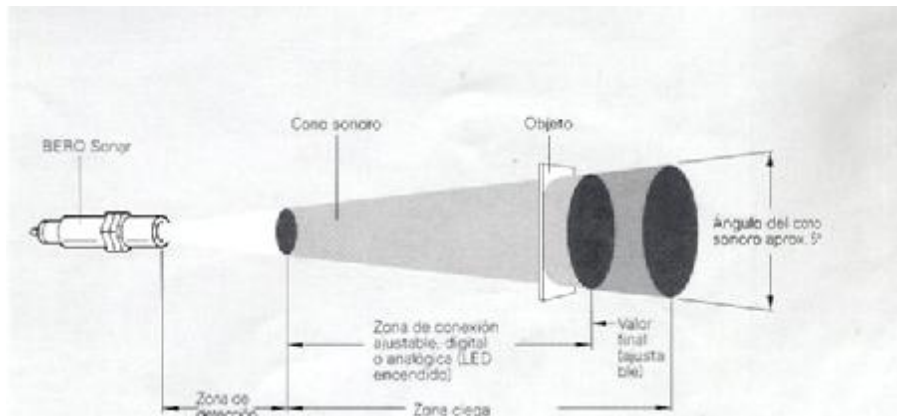
- Software de Programación del Sensor



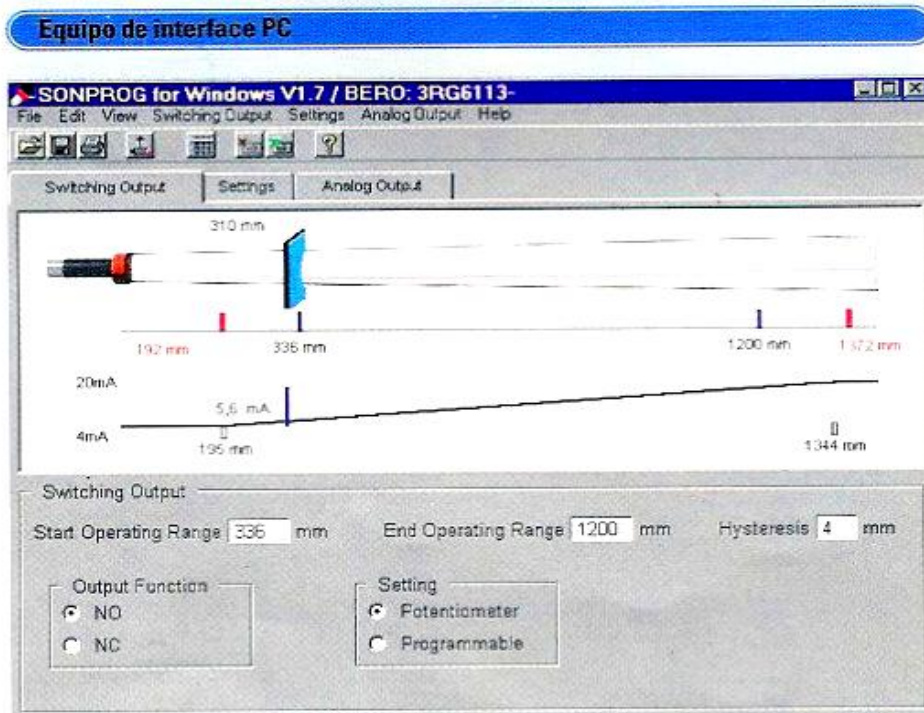
**Ilustración 71. Interfaz de Programación del Sensor**



**Ilustración 72. Parámetros Programables del Sensor**



**Ilustración 73. Software de Programación del Sensor**



## Ilustración 74. Características del Software de Programación

El equipo de interface PC SONPROG y el software correspondiente permiten adaptar individualmente los BERO Sonar de las series compactas M18 (únicamente con 3RX4000), II y III a los requisitos asociados a cada aplicación, optimizando sus parámetros de funcionamiento.

El equipo de interface se conecta a un PC normal o portátil a través de un puerto serie (RS 232). El segundo cable sirve para conectar el BERO Sonar.

El software SONPROG permite modificar, entre otros, los parámetros siguientes:

- Límite superior e inferior de la zona de conexión
- Histéresis de conexión
- Valor de inicio y fin de la curva analógica
- Curva analógica creciente/decreciente
- Formación de valor medio
- Zona ciega
- Fin del Zona de detección
- Función de multiplexado
- Función de conexión (NA/NC)
- Activación/desactivación del ajuste por potenciómetro

Los valores programados pueden imprimirse y guardarse en soporte de datos. De esta forma quedan inmediatamente disponibles, p. ej. en caso de sustitución de un BERO Sonar.

Los aparatos de la serie compacta M18 son únicamente programables por medio del equipo de interface 3RX4000/1.

El equipo de interface 3RX3/4001 corresponde al 3RX3/4000, pero está concebido para una tensión de 115 V AC.

## Anexo E

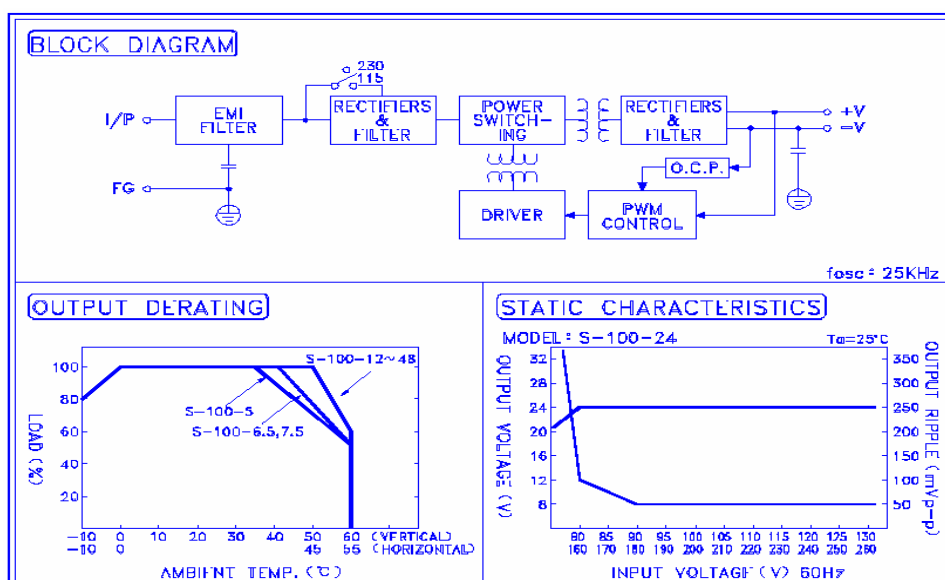
### Fuente De Alimentación Mean Well

Tabla 13. Muestra las especificaciones eléctricas de la electroválvula

| Especificaciones del Modelo  | S-100   |
|------------------------------|---|
| Voltaje de salida            | 24V   |
| Tolerancia                   | ± 1   |
| Corriente de salida          | 4.5A  |
| Rango de salida de corriente | 0- 4.5A   |
| Ruido                        | 100mVp-p  |
| Línea de regulación          | ± 0.2   |
| Potencia max                 | 108W  |
| Eficiencia                   | 84%   |
| Voltaje de entrada           | 85~132VAC / 180~264VAC SELECTED BY SWITCH 47~63Hz; 255~370VDC |

- Características Eléctricas

Ilustración 75. Muestra el plano electrónico de la fuente





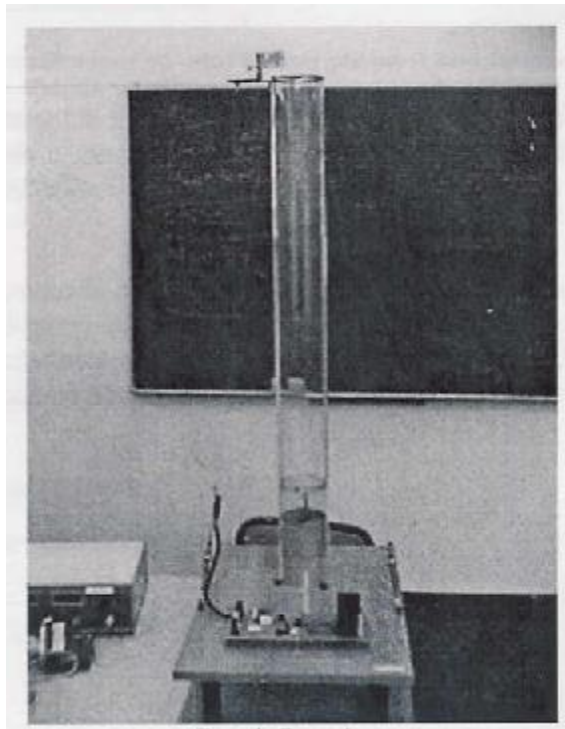
## **Anexo F**

### **Productos Similes en el Mercado**

El mercado es fundamental para tener una percepción acerca de los productos similares existentes en él. Después de un proceso de búsqueda se escogieron dos prototipos de sustentación neumática con el ánimo de evaluar sus características con base en los requerimientos anteriormente especificados para valorar sus puntos más fuertes y poder analizar posibles ventajas competitivas que se puedan aprovechar con el presente diseño.

- **Tubo Con Sensor De Proximidad** (Proyecto Realizado por: José Vicente Roig)

#### **Ilustración 77. Muestra un prototipo de sustentación**

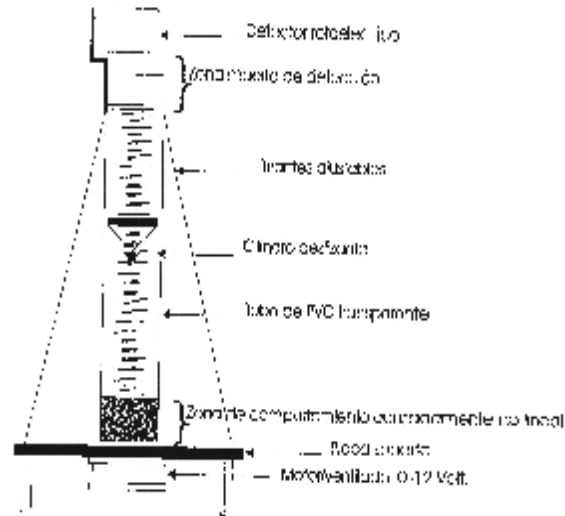


El tubo con sensor de proximidad esta conformado por un tubo de metacrilico transparente, por el interior del cual se puede deslizar un cilindro impulsado por un ventilador ubicado en la base de tubo. Además se dispone de un sensor fotoeléctrico y del la señal de control del ventilador.

El objetivo de las prácticas desarrolladas sobre este prototipo será el control de la posición del cilindro deslizable actuando sobre el ventilador de la base del tubo. Dicho control se puede implementar, mediante un diseño de un controlador continuo utilizando componentes electrónicos o mediante el diseño de un controlador continuo utilizando un PC con una tarjeta de adquisición de datos.

### Esquemático del Sistema Sustentador con Ventilador

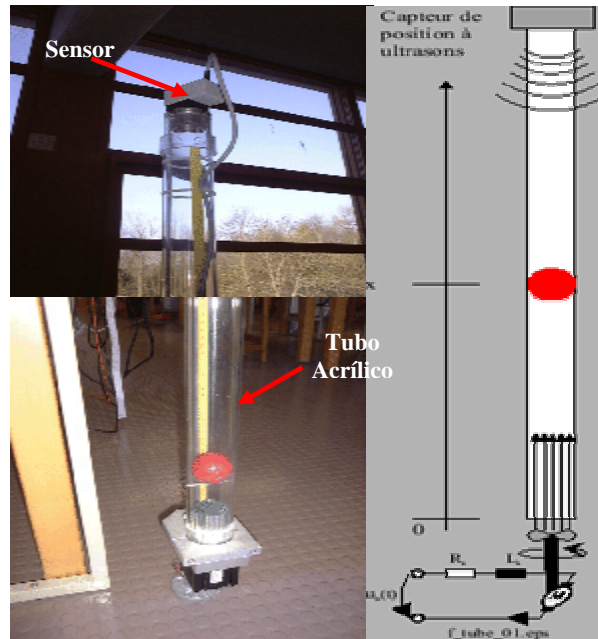
**Ilustración 78. Muestra un sistema de levitación**



- **Control De Un Elemento Por Un Flujo De Aire**

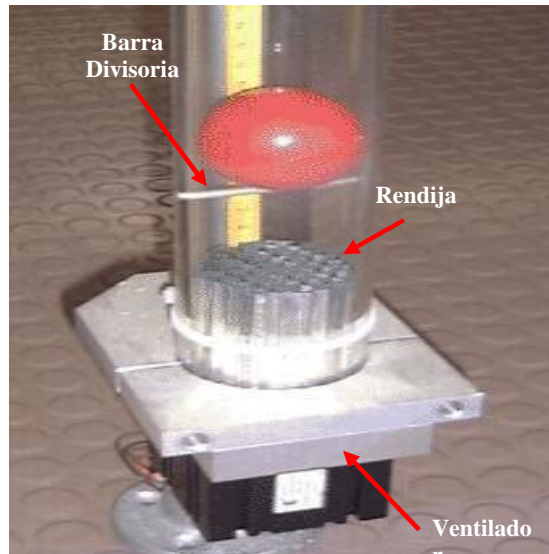
Invoca el mismo principio de sustentación pero introduce un nuevo concepto para el manejo del comportamiento turbulento del fluido, consiste en una rendija en la parte superior del ventilador que permite el paso del aire de una manera unidireccional. El elemento de sustentación cambia en este sistema creando otras condiciones de comportamiento de la planta. La función de sensado físicamente se ubica en el mismo sector pero cambia el sensor fotoeléctrico por un sensor ultrasónico a diferencia del mostrado anteriormente.

**Ilustración 79. Muestra un prototipo de sustentación con sensor fotoeléctrico.**



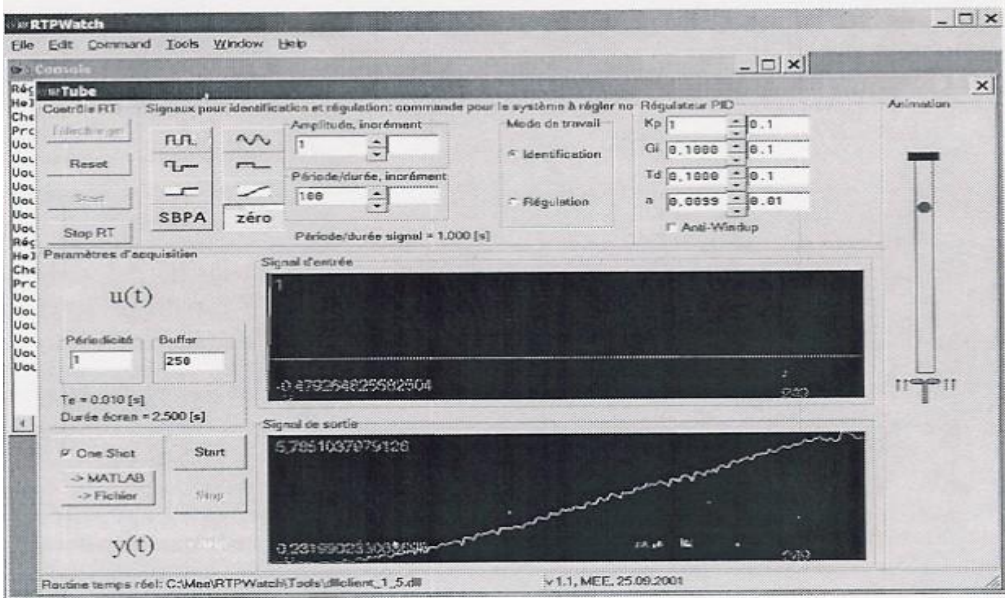
Vemos en detalle que también en este prototipo se presenta una zona de turbulencia del fluido. De ahí la necesidad de implementar una barra que sirva para separar al elemento a sustentar de esta zona y que pueda iniciar su recorrido de sustentación de otra forma el elemento quedaría atrapado en esta zona

**Ilustración 80. Muestra una vista en detalle de la parte inferior del sustentador**



**Interfaz con el Usuario del Sistema de Sustentación**

Ilustración 81. Muestra la interfaz de usuario del sistema de sustentación

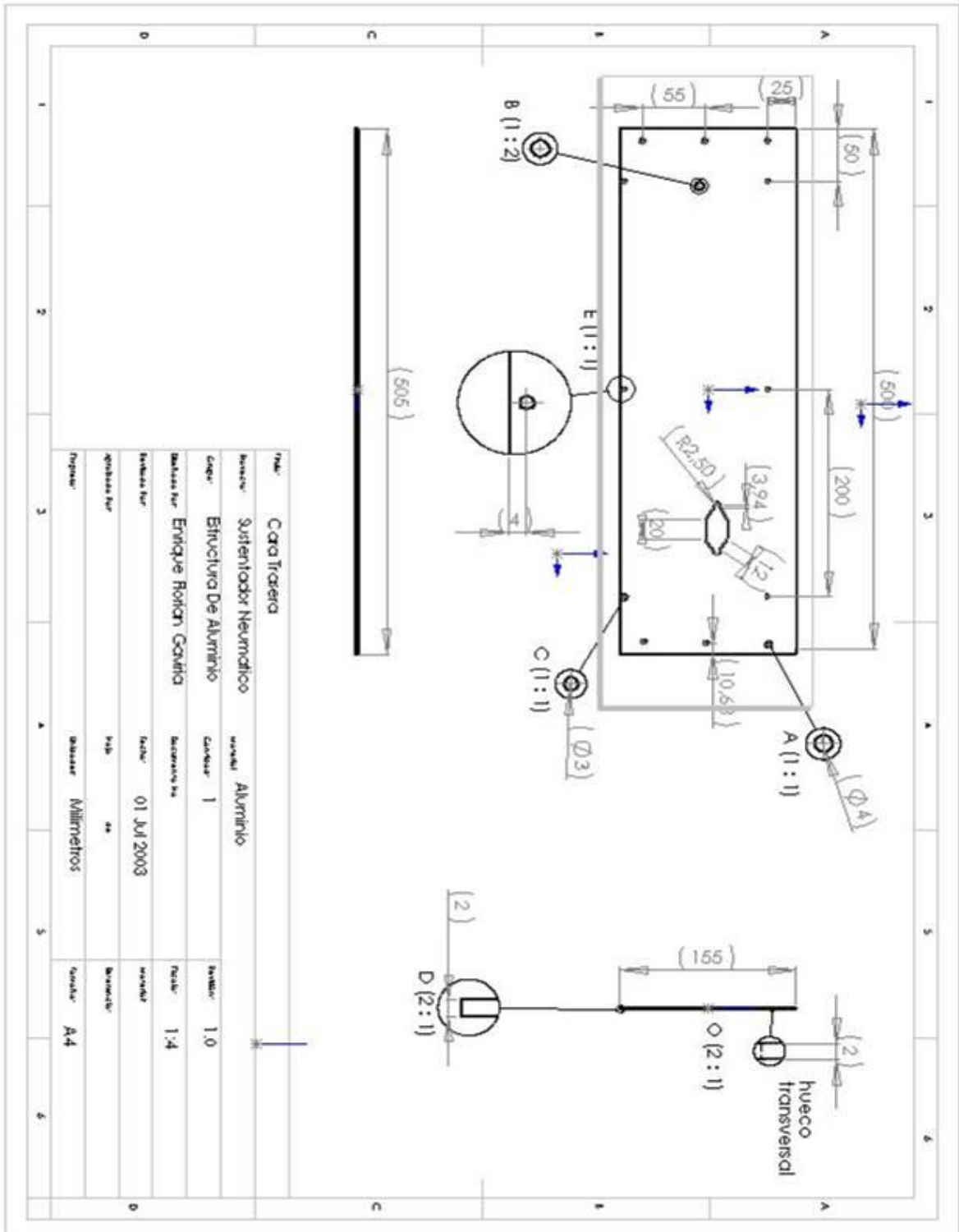




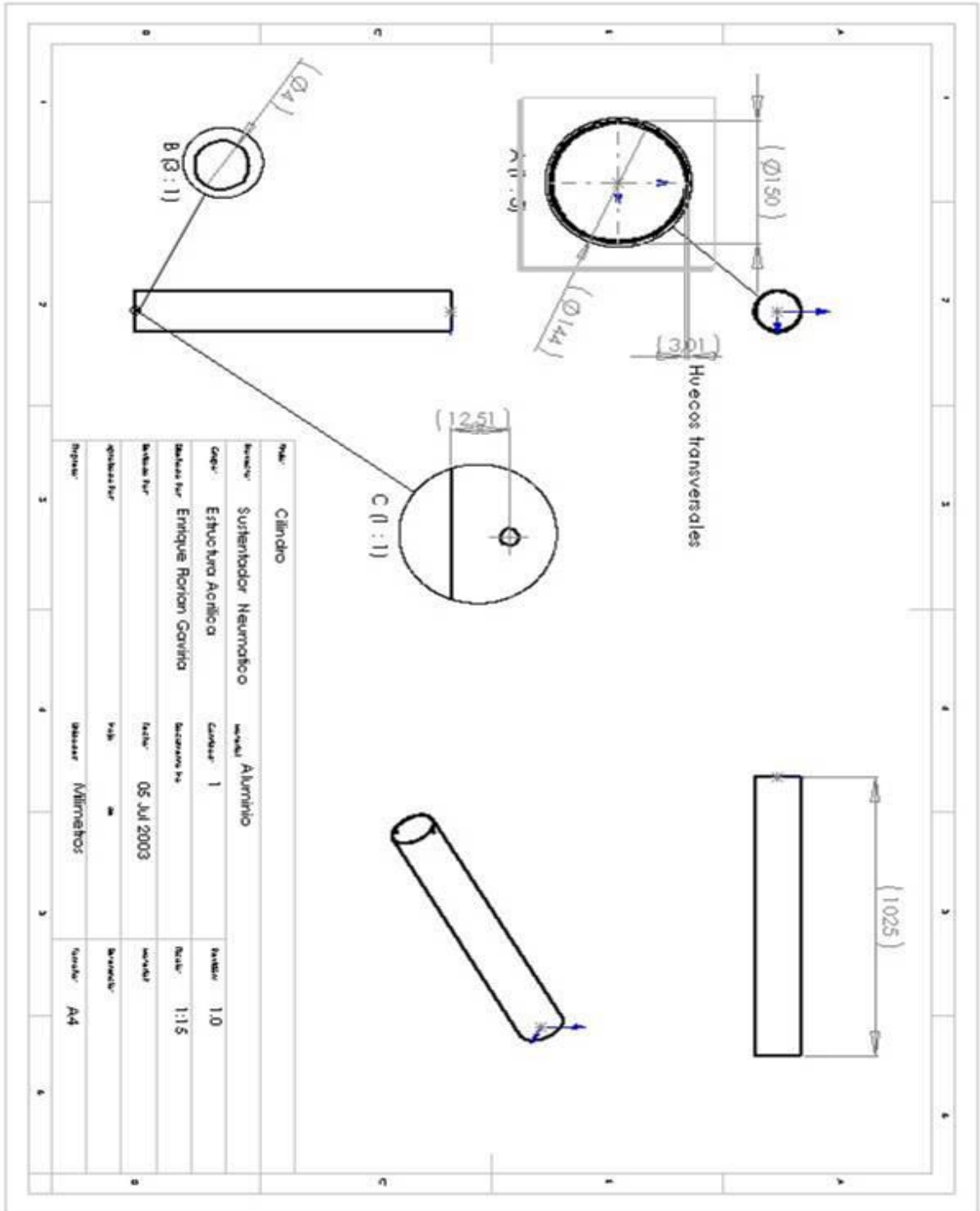




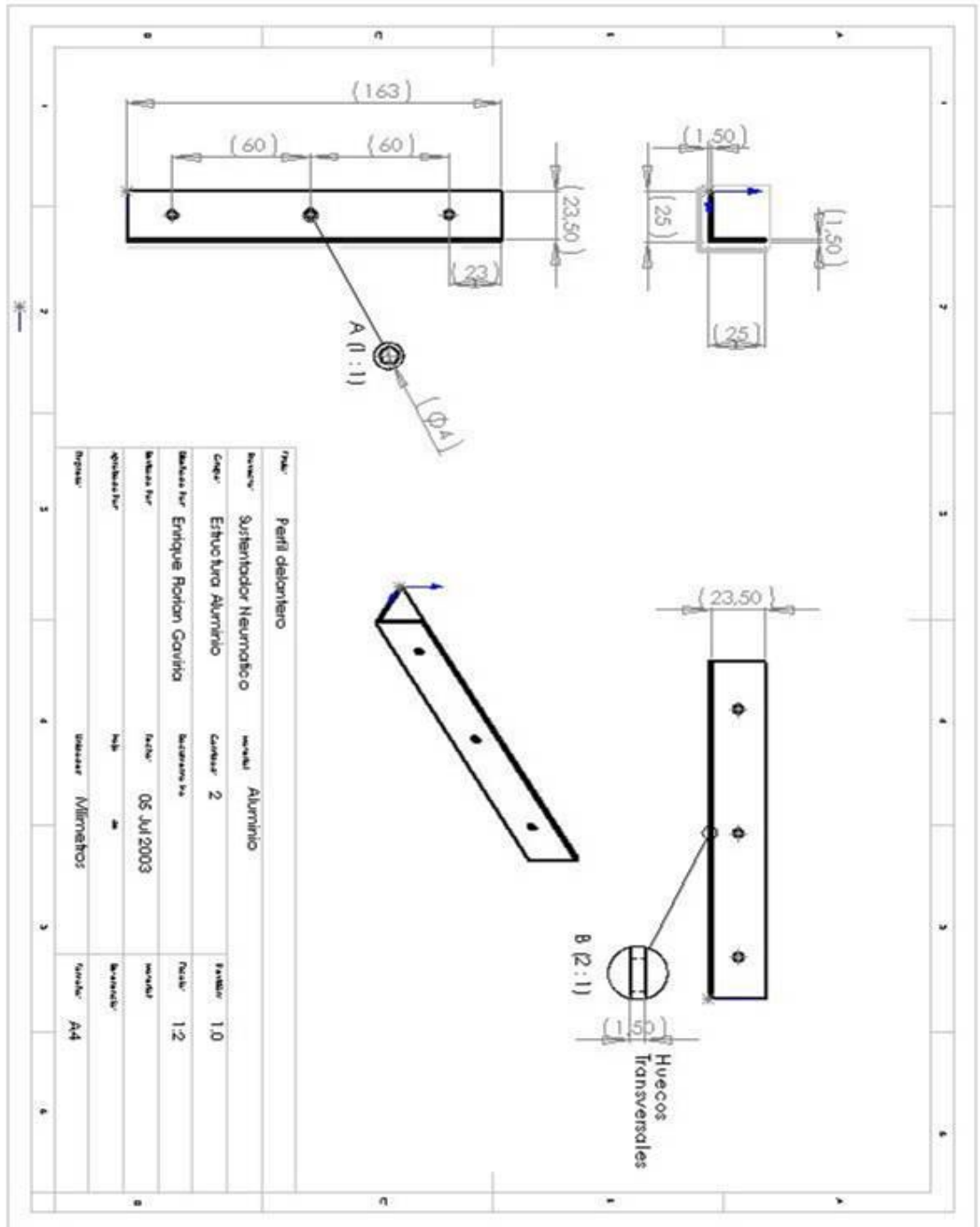
- Cara Trasera



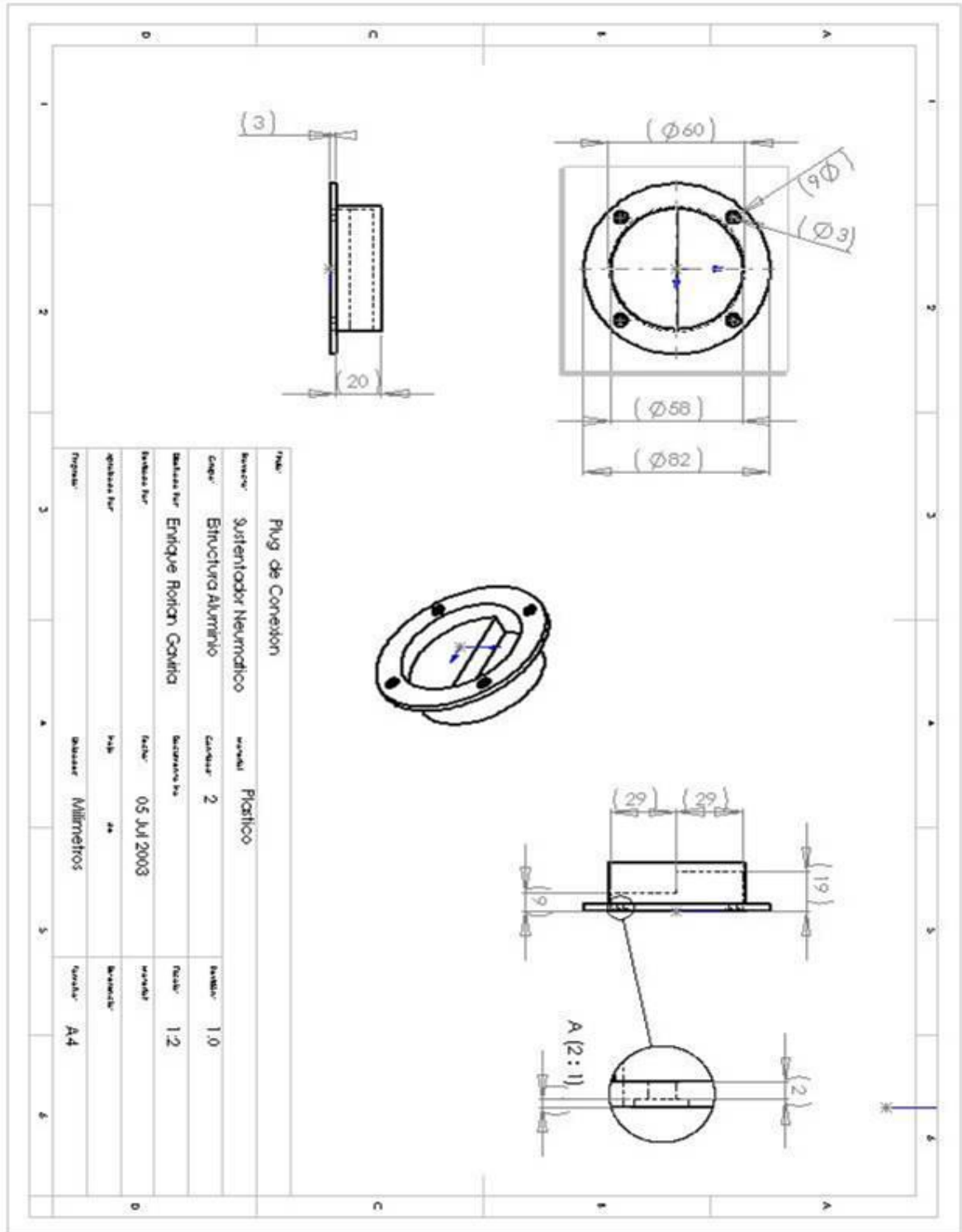
- Cilindro de Acrílico



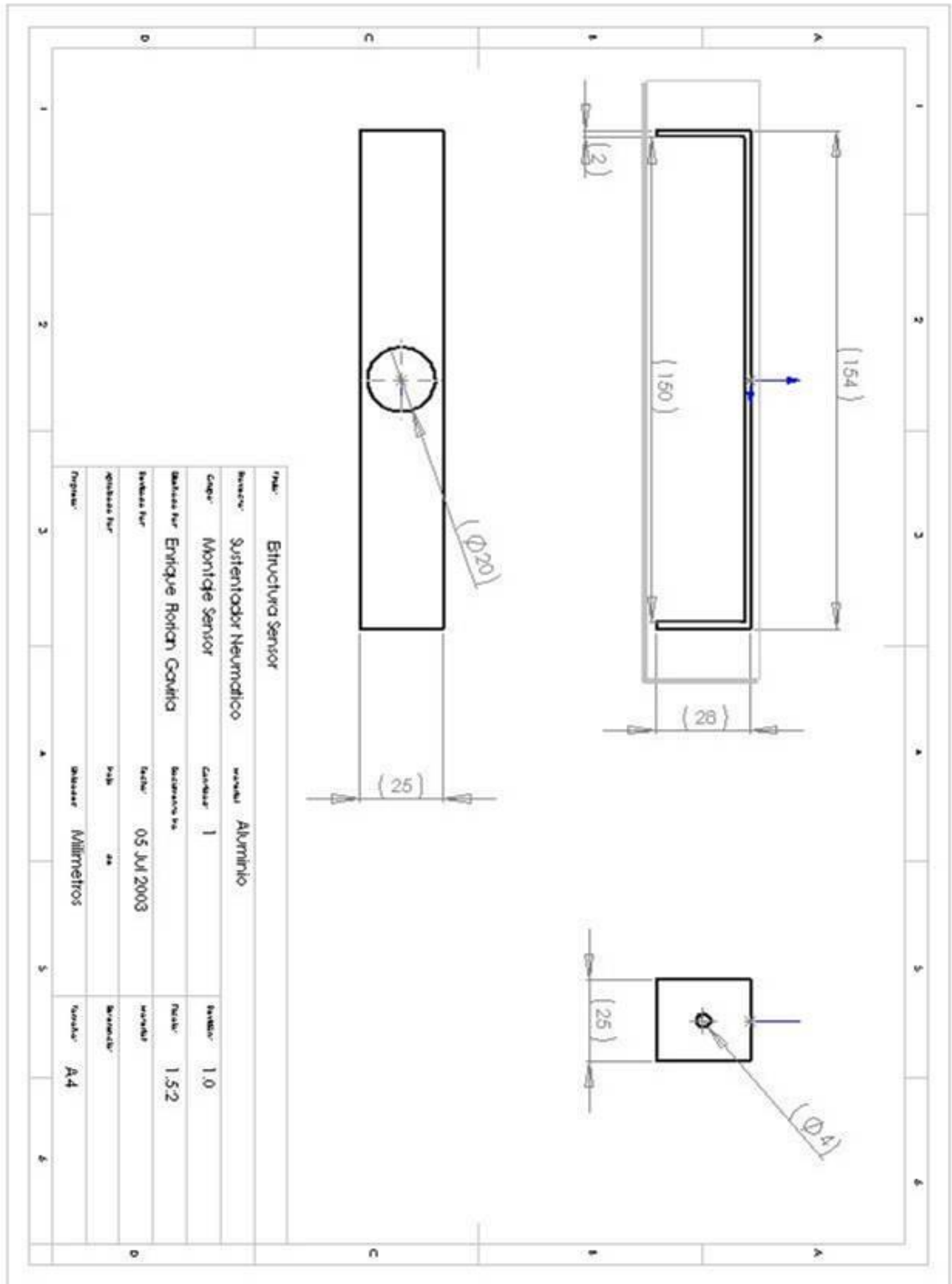
- Perfil Delantero



- Plug De Conexión



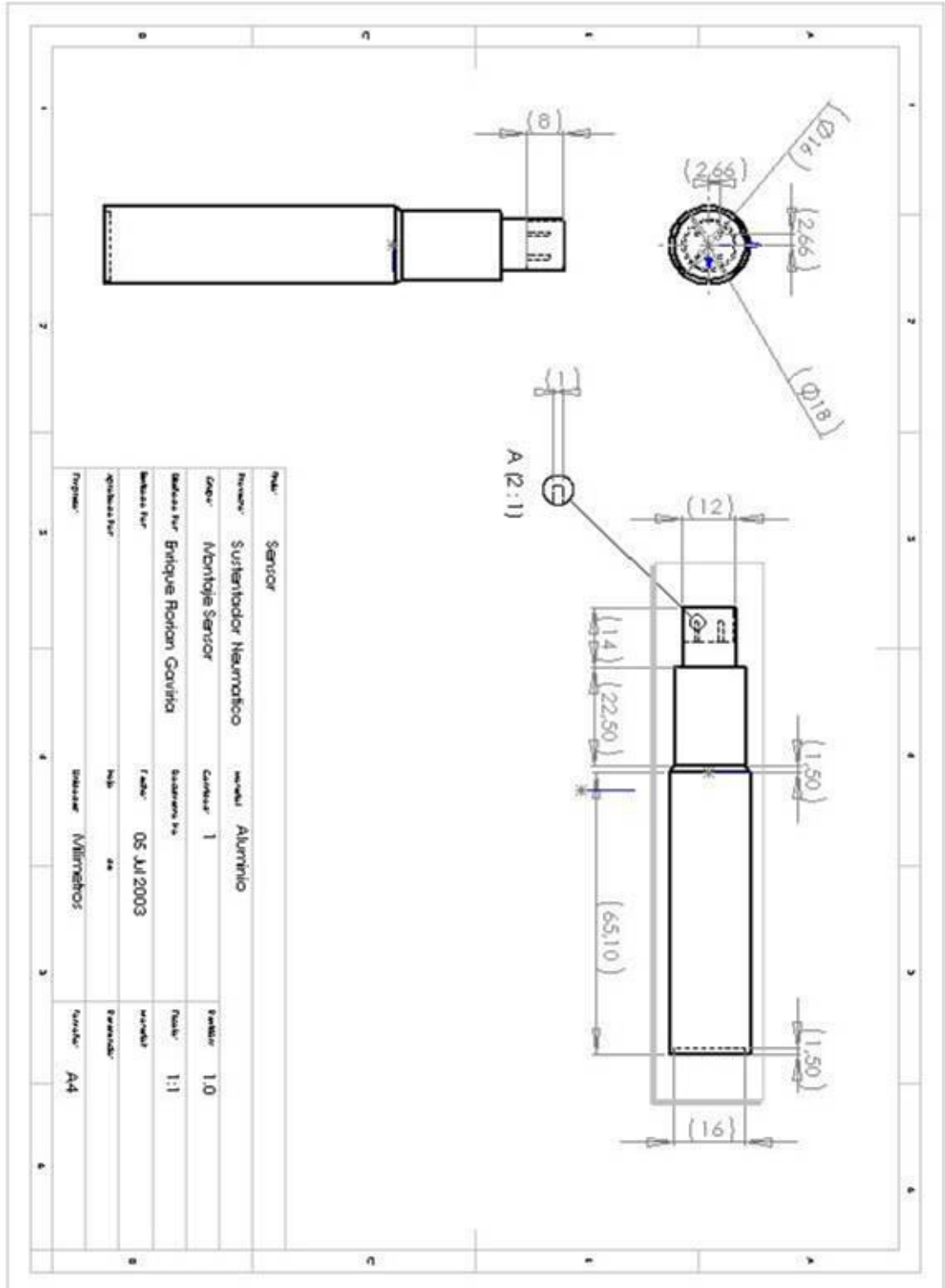
- Placa Sustenta el Sensor



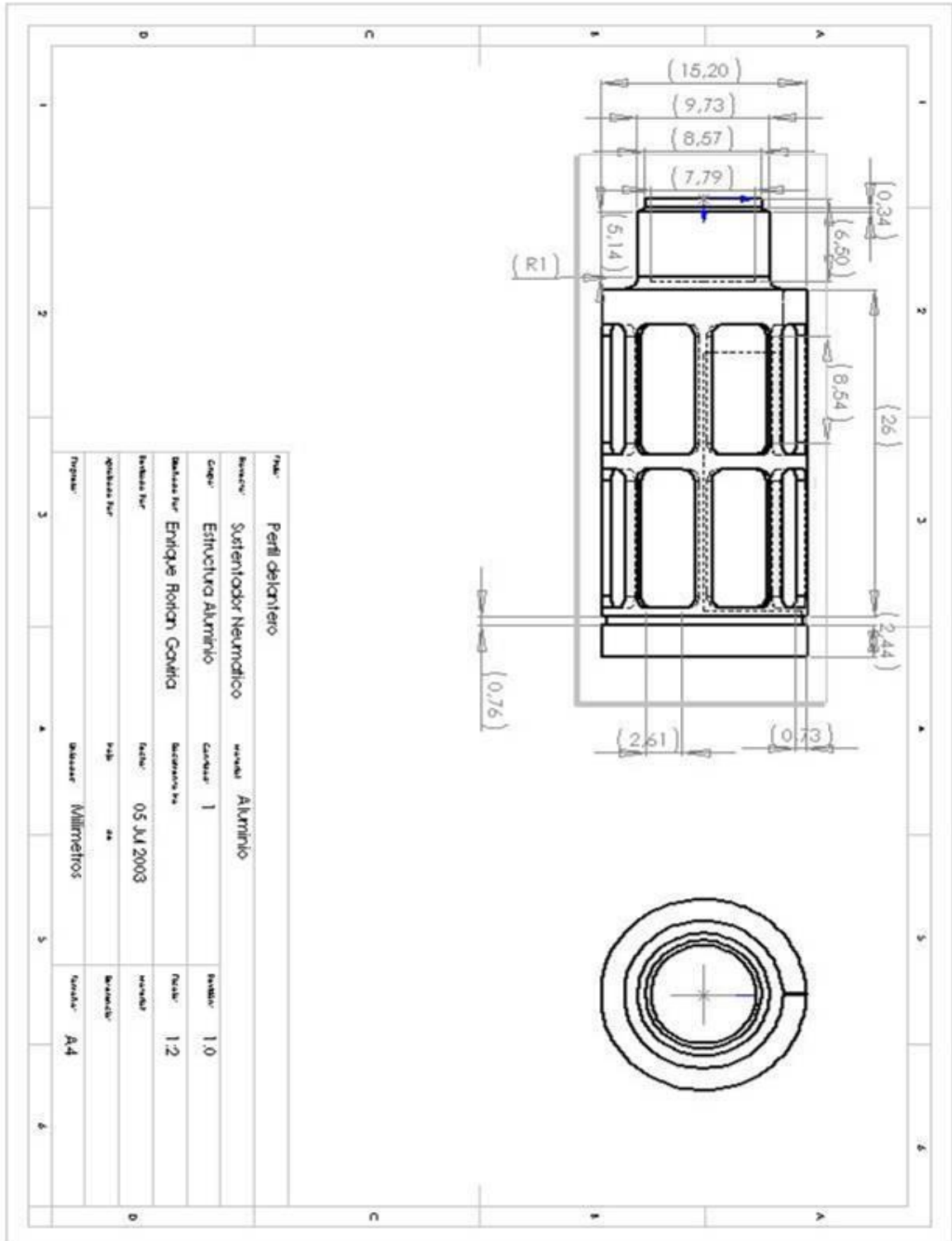




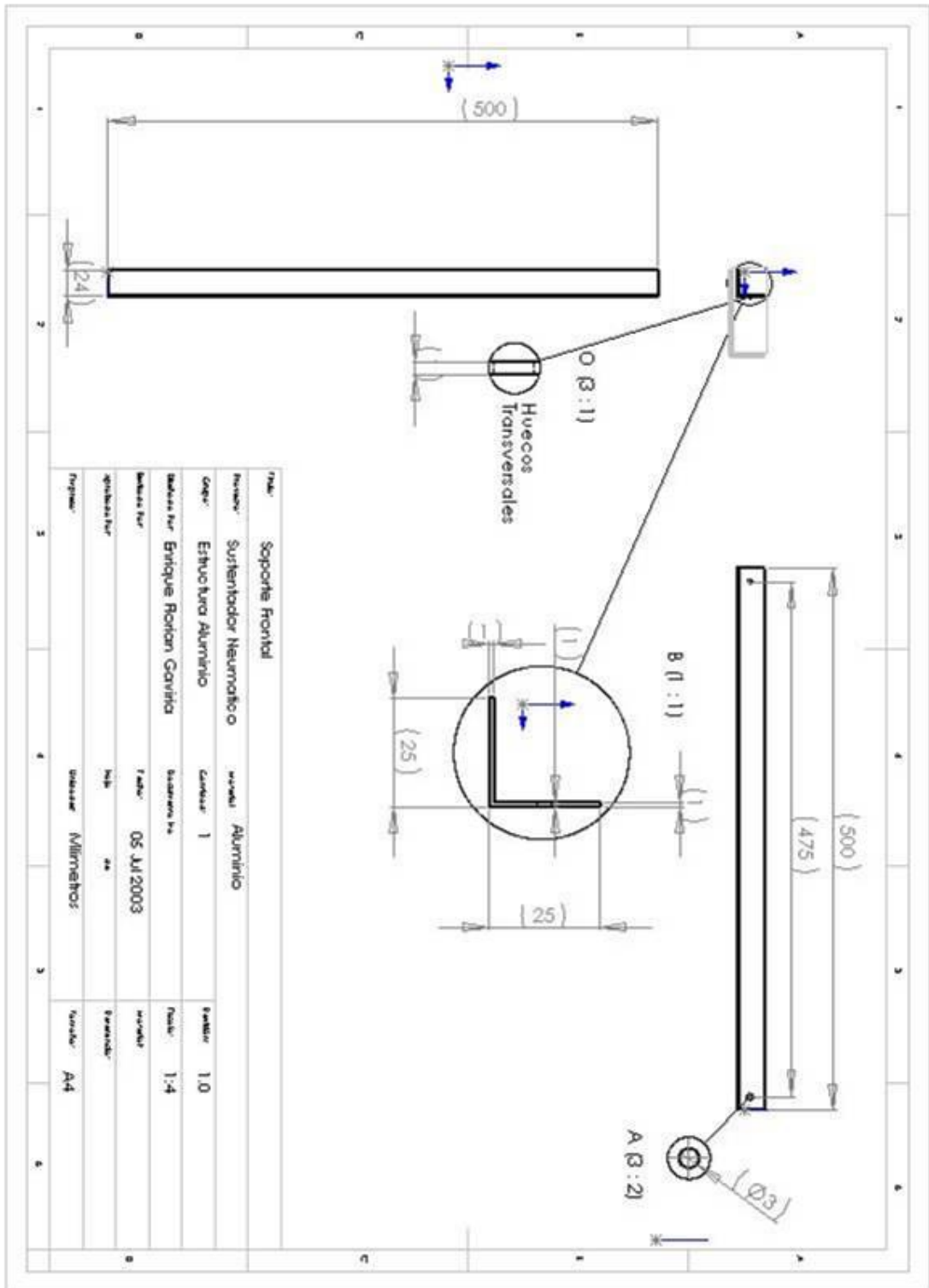
- Sensor Ultrasónico



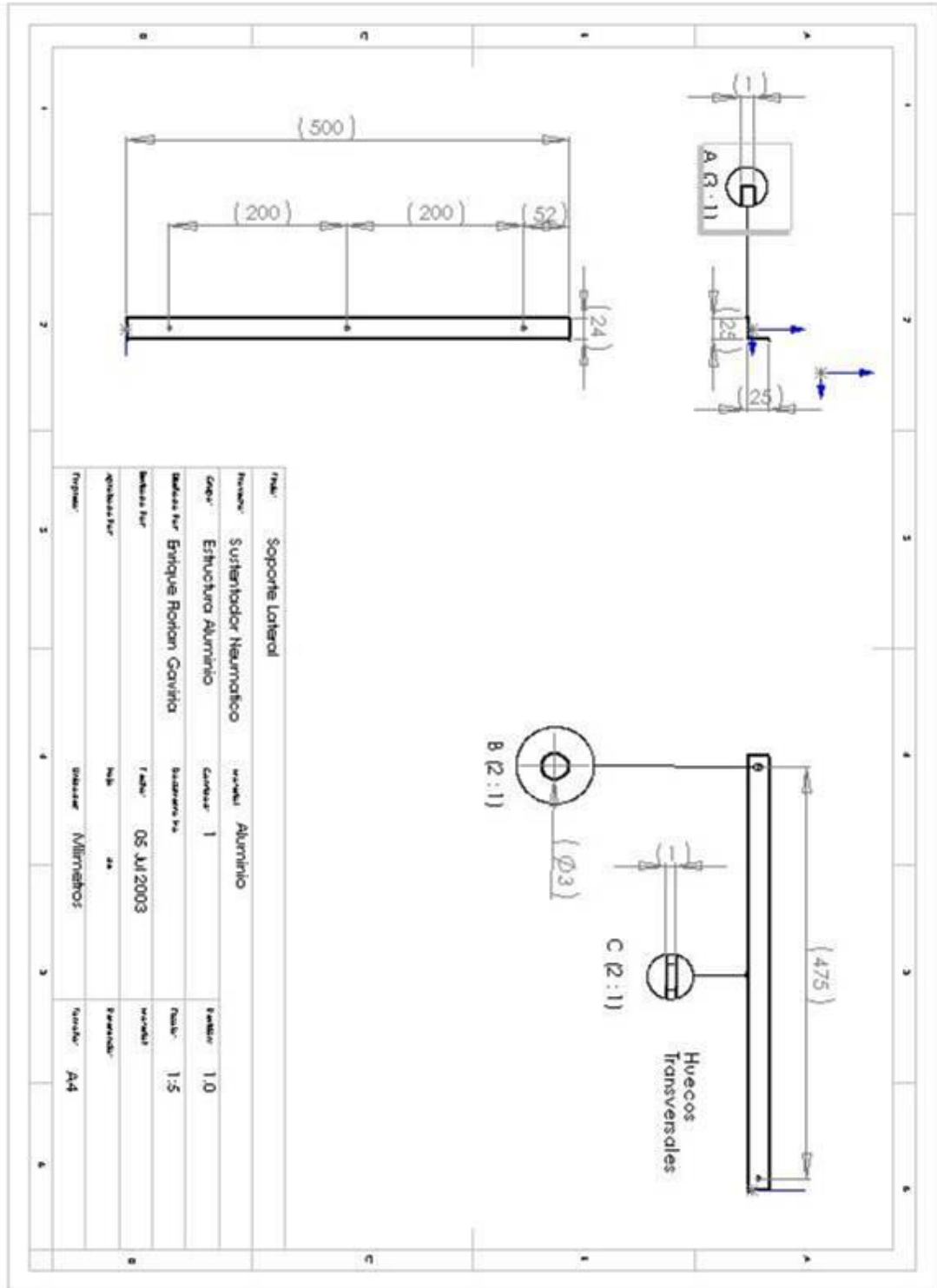
- Silenciador de la Electrovalvula



- Soporte Frontal



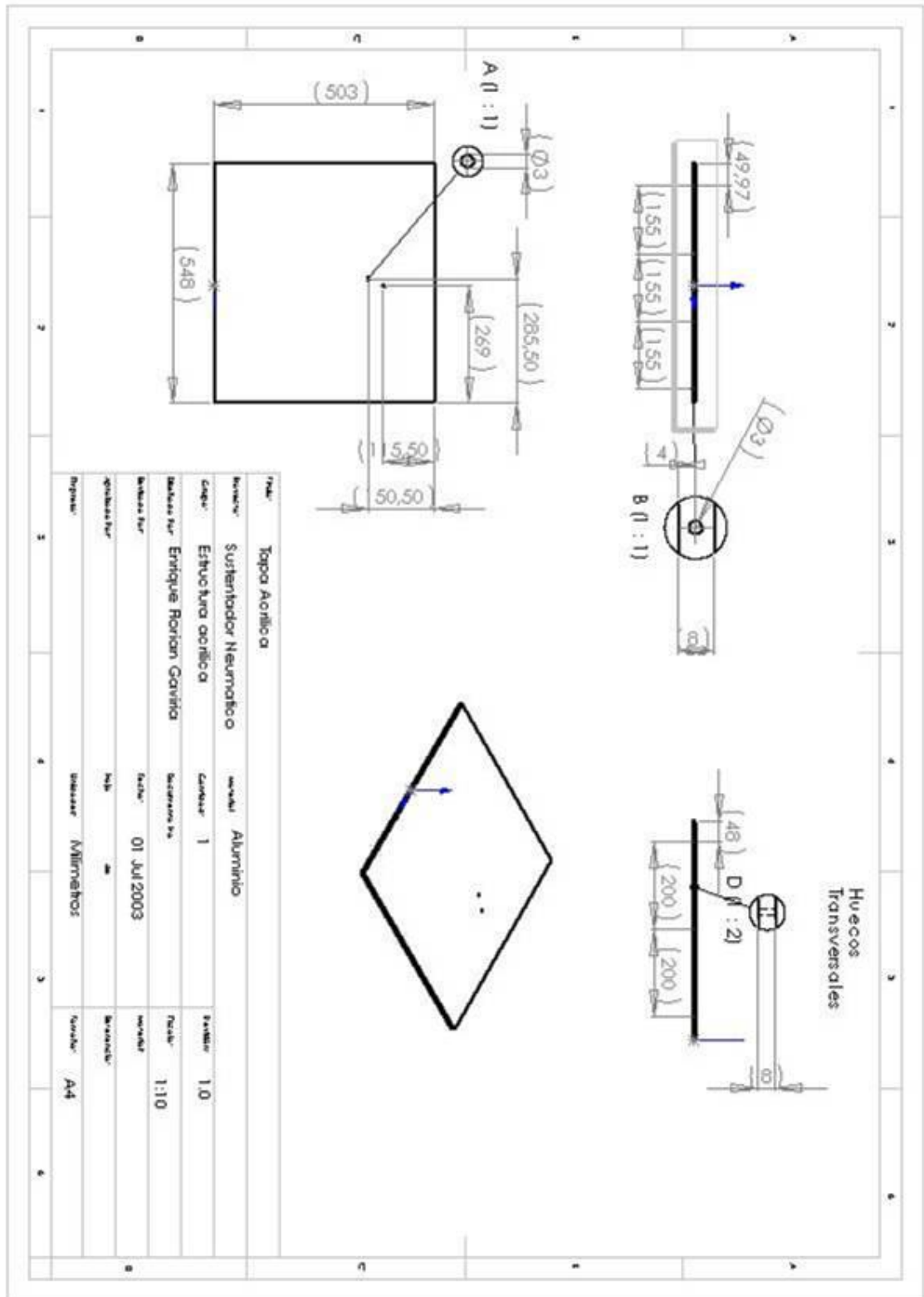
- Soporte Lateral



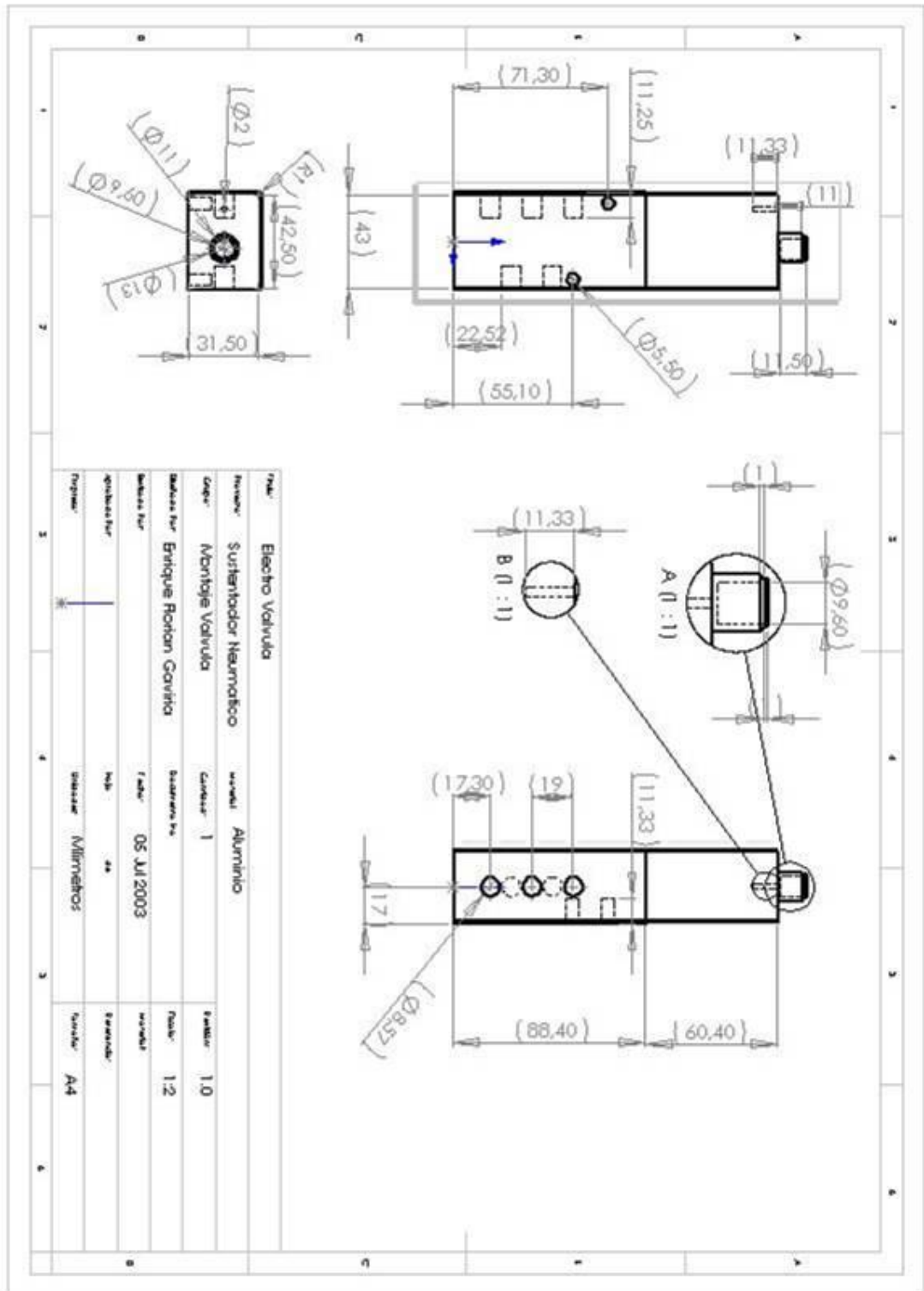




- Tapa Inferior

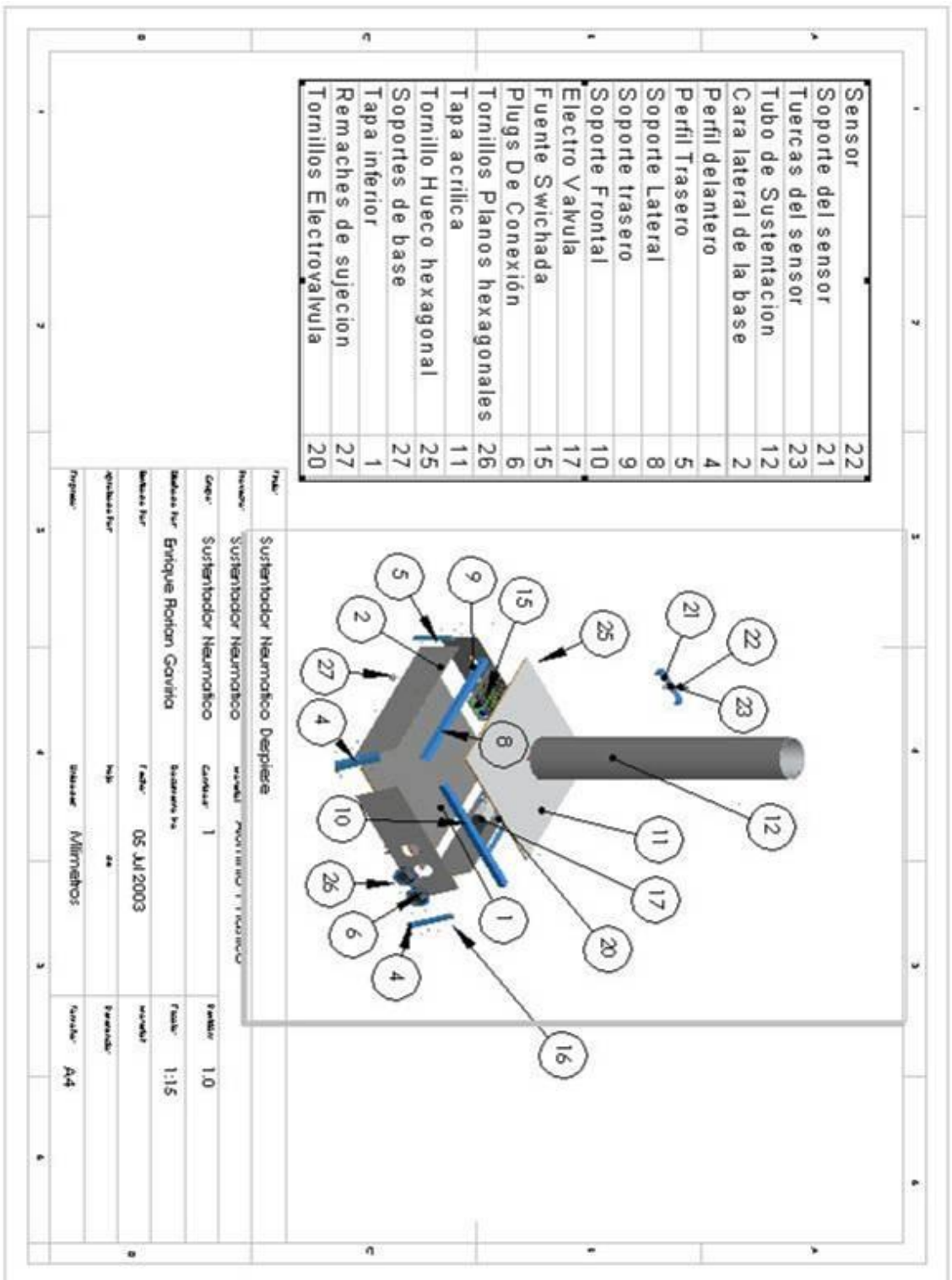


- Electroválvula





- Despiece Sustentador neumático



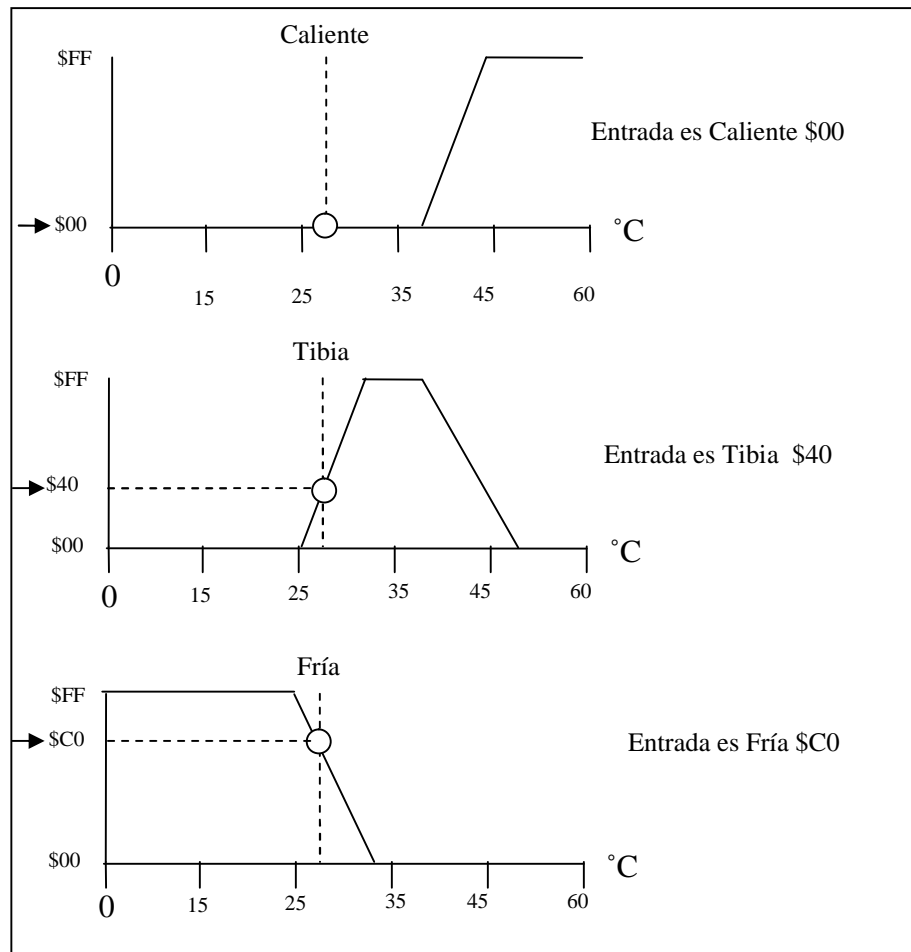
## Anexo H

### Información en detalle de las Funciones Difusas del HC-12

Estas funciones referentes al núcleo de inferencia difusa del micro HC-12 son las encargadas de realizar el proceso de fuzzificación, evaluación de reglas, y defuzzificación.

**Ø MEM** (Fuzzificación): Durante el paso de Fuzzificación, los valores de entrada actuales del sistema son comparados contra las funciones de pertenencia de entrada almacenadas, para determinar el grado que cada etiqueta de entrada del sistema es verdad. Esto se logra hallando el valor **Y** para el valor actual de entrada en una función de pertenencia trapezoidal para cada etiqueta de cada entrada del sistema. La instrucción MEM en la CPU12 realiza este cálculo para una etiqueta de una entrada del sistema, para realizar la tarea de Fuzzificación completa para un sistema, se deben ejecutar varias instrucciones MEM, usualmente en una estructura de lazo en el programa. La ilustración 76 exhibe un sistema de tres funciones de pertenencia de entrada, una para cada etiqueta de entrada del sistema. EL eje x de las tres funciones de pertenencia representa el rango de valores posibles de la entrada del sistema. La línea vertical a través de las tres funciones de pertenencia representa el grado de verdad y varia desde completamente falso (\$00 ó 0%), hasta completamente cierto (\$FF ó 100%).

### Ilustración 82. Ejemplo de Fuzzificación con la función MEM



El valor  $Y$  donde la línea vertical intercepta a cada una de las funciones de pertenencia, es el grado el cual el valor actual de entrada concuerda con la etiqueta asociada para esta entrada del sistema. Por ejemplo, la expresión “la temperatura es tibia” es 25% verdad (\$40). El valor es almacenado en una localidad RAM, y existe una localidad para cada entrada difusa. Cuando el paso de Fuzzificación inicia, el valor actual de la entrada del sistema esta en un acumulador de la CPU12, un registro índice apunta a la primera definición de función de pertenencia en la base de conocimiento, y un segundo registro índice apunta a la primera entrada difusa en RAM. En cuanto cada entrada difusa es calculada el ejecutar una instrucción MEM, el resultado es almacenado en la entrada difusa y ambos apuntadores son actualizados automáticamente para apuntar a las localidades

asociadas con la siguiente entrada difusa. La instrucción MEM se encarga de todo excepto de contar el número de etiquetas por entrada del sistema y de cargar el valor actual de cualquier entrada subsiguiente del sistema. El resultado final del paso de Fuzzificación es una tabla de entradas difusas representando las condiciones actuales del sistema.

**Ø REV y REVW** (Evaluación de Reglas): La evaluación de reglas es el elemento central de un programa de inferencia de lógica difusa. Este paso procesa una lista de reglas de la base de conocimiento usando valores actuales de entradas difusas en RAM para producir una lista de salidas difusa también en RAM. Dichas salidas difusas pueden considerarse como sugerencias algo burdas de lo que la salida del sistema debería ser en respuesta a las actuales condiciones de entrada. Antes que los resultados puedan aplicarse, las salidas difusas deben de procesarse posteriormente, o defuzzificadas, para producir un solo valor de salida que represente el efecto combinado de todas las salidas difusa.

La CPU12 ofrece dos variaciones de instrucciones para evaluación de reglas. La instrucción REV provee para reglas no ponderadas (todas las reglas se consideran de igual importancia). La instrucción REVW es similar pero permite a cada regla tener un dato de peso separado el cual es almacenado en una estructura separada paralela de datos en la base de conocimiento. Aparte de los pesos, las dos instrucciones para evaluación de reglas también difieren en la manera que las reglas son codificadas en la base de conocimiento.

La comprensión de la estructura y la sintaxis de las reglas es necesaria para entender como un microcontrolador realiza la tarea de evaluación de reglas. La siguiente es un ejemplo de una regla típica, *“Si la temperatura es tibia y la presión es alta entonces el calor es (debería se) apagado”*; A primera vista, parece que codificar esta regla en una forma compacta comprensible para el microcontrolador seria difícil, pero es realmente simple reducir le regla a una lista breve de apuntadores de memoria. La porción izquierda de la regla es un postulado de condiciones de la entrada y la porción derecha de la regla es un

postulado de acciones de salida. La porción izquierda de una regla esta formada de uno o mas (en este caso dos) antecedentes conectados por un operador fuzzy **and**. Cada expresión antecedente consiste del nombre de la entrada del sistema, seguido por **es**, y por un nombre de etiqueta. La etiqueta debe estar definida mediante una función de pertenencia en la base de conocimiento. Cada expresión antecedente corresponde a una de las entradas difusas en RAM. Puesto que **Y** es el único operador permitido para conectar expresiones antecedentes, no hay necesidad de incluir estos en la codificación de la regla. Los antecedentes pueden codificarse como una simple lista de apuntadores hacia (o direcciones de) las entradas difusas a las cuales ellos hacen referencia.

La porción derecha de una regla se forma de una o mas (en este caso una) consecuencias. Cada expresión de consecuencia consiste del nombre de una salida del sistema, seguido por un nombre de etiqueta. Cada expresión de consecuencia corresponde a una salida difusa específica en RAM. Las consecuencias para una regla pueden codificarse como una lista de apuntadores a (o direcciones de) las salidas difusas a las cuales hacen referencia. Las reglas completas son almacenadas en la base de conocimiento como una lista de apuntadores o direcciones de entradas y salidas difusas.

Para que trabaje la lógica de evaluación de reglas, debe haber algunos medios de saber cuales apuntadores se refieren a entradas difusas, y cuales se refieren a salidas difusas. También debe haber una manera de saber cuando la última regla del sistema ha sido alcanzada. Un método de organización es tener un número fijo de reglas con un número específico de antecedentes y consecuencias.

El método utilizado en la CPU12, es marcar el fin de la lista de reglas con un valor reservado, y separar antecedentes y consecuencias con otro valor reservado. Ello permite cualquier número de reglas, y permite a cada regla tener cualquier número de antecedentes y consecuencias, sujeto a los límites impuestos por la disponibilidad de memoria en el sistema.

Cada regla es evaluada secuencialmente, pero las reglas como grupo son tratadas como si ellas fueran todas evaluadas simultáneamente. Dos operaciones matemáticas toman lugar durante la evaluación de reglas. El operador fuzzy and corresponde a la operación matemática de hallar el mínimo y la operación fuzzy or corresponde a la operación matemática de hallar el máximo. La operación fuzzy and es usada para conectar antecedentes dentro de una regla; y la operación or esta implícita entre reglas sucesivas.

Antes de evaluar cualquier Regla, todas las salidas difusas se ponen en cero (lo que significa que nada es verdad). Cuando cada regla es evaluada, el más pequeño (el mínimo) antecedente es tomado para ser la verdad global de la regla. Este valor de verdad de la regla es aplicado a cada consecuencia de la regla (al almacenar este valor a la correspondiente salida difusa) a menos que la salida difusa es ya más grande (máxima).

Si dos o más reglas afectan a la misma salida difusa, la regla que es más verdadera gobierna el valor en la salida difusa porque las reglas se conectan por un fuzzy **or** implícito. En el caso de reglas ponderadas, el valor de verdad para una regla se determina del modo usual hallando el más pequeño antecedente de regla. Antes de aplicar este valor de verdad a las consecuencias para la regla, el valor se multiplica por una fracción de cero

(regla no habilitada) a uno (regla totalmente habilitada). El resultado modificado del valor de verdad se aplica entonces a las salidas difusas.

El resultado final del paso de evaluación reglas es una tabla de salidas difusas sugeridas o “crudas” en RAM. Estos valores fueron obtenidos al alimentar condiciones actual (valores de entradas difusas) en las reglas del sistema en la base de conocimiento. Estos resultados crudos no pueden ser suministrados directamente a las salidas del sistema porque ellos pueden ser ambiguos. Por ejemplo, una salida cruda puede indicar que la salida del sistema debería ser media con a grado de verdad de 50% mientras, al mismo tiempo, otra indica que la salida del sistema debería ser baja con a grado de verdad de 25%. El paso de defuzzificación resuelve tales ambigüedades.

**Ø WAV** (Defuzzificación): El paso final en un programa de lógica difusa es la defuzzificación, en la cual se combinan las salidas difusas crudas en una salida compuesta del sistema. A diferencia de las formas trapezoide usadas para las entradas, la CPU12 típicamente usa barras (singleton) para funciones de pertenencia de salida.

Al igual que con las entradas, el eje x representa el rango de posibles valores para la salida del sistema. Las funciones de pertenencia tipo barra (Singleton) consisten de las posiciones en el eje x para cada etiqueta de la salida del sistema.

Las salidas difusas corresponden a la altura en el eje y de la correspondiente función de pertenencia de salida. La instrucción WAV calcula las sumas del numerador y del denominador para el Promedio ponderado de las salidas difusas de acuerdo con la fórmula:

$$Salida\_del\_Sistema = \frac{\sum_{j=1}^n S_j \cdot F_j}{\sum_{j=1}^n F_j}$$

Donde n es el número de etiquetas de la salida del sistema, S<sub>j</sub> son las posiciones de los singleton de la base de conocimiento, y F<sub>j</sub> son las salidas difusas en RAM. Para un programa común de lógica difusa en la CPU12, n es ocho o menos (aunque esta instrucción puede manejar cualquier valor hasta 255) y S<sub>j</sub> y F<sub>j</sub> son valores de 8 bits. La división final es realizada con una instrucción separada EDIV colocada inmediatamente después de la instrucción WAV. Antes de ejecutar WAV, un acumulador debe haber cargado con el número de iteraciones (n); un registro índice debe apuntar a la lista de posiciones singleton en la base de conocimiento, y un segundo registro índice debe apuntar a la lista de salidas difusas en RAM. Si el sistema tiene más que una salida del sistema, la instrucción WAV es ejecutada una vez por cada salida del sistema.



Ejemplo de las funciones del HC-12:

|           |      |             |                                      |
|-----------|------|-------------|--------------------------------------|
| FUZZYFICA | LDX  | #FMS_ENT    | ; Apunta a definiciones de FM        |
|           | LDY  | #ENT_FUZ    | ; Apunta a tabla de entradas fuzzy   |
|           | LDA  | VALOR_ACT   | ; Trae 1er valor de entrada          |
|           | LDAB | #7          | ; 7 etiquetas por entrada            |
| LAZO1     | MEM  |             | ; Evalúa una FM                      |
|           | DBNE | B,LAZO1     | ; Para 7 etiquetas por entrada       |
|           | LDA  | VALOR_ACT+1 | ; Trae 2do valor de entrada          |
| LAZO2     | LDAB | #7          | ; 7 etiquetas por entrada            |
|           | MEM  |             | ; Evalúa una FM                      |
|           | DBNE | B,LAZO2     | ; Para 7 etiquetas por entrada       |
| EVALUA    | LDAB | #7          | ; contador del lazo                  |
|           | CLR  | 1,Y+        | ; Limpia sal. Fuzzy e incr. Apunt.   |
|           | DBNE | B,EVALUA    | ; hasta limpiar todas las sal. Fuzzy |
|           | LDX  | #REGLA1     | ; Apunta a 1er elemento de reglas    |
|           | LDY  | #ENT_FUZ    | ; Apunta a ent y sal. fuzzy          |
|           | LDA  | #\$FF       | ; Inicia A (y limpia bit V)          |
|           | REV  |             | ; Procesa lista de reglas            |
| DEFUZ     | LDY  | #SAL_FUZ    | ; Apunta a salidas fuzzy             |
|           | LDX  | #POS_SGLTN  | ; Apunta a posiciones singleton      |
|           | LDAB | #7          | ; 7 salidas fuzzy por salida crisp   |
|           | WAV  |             | ; Hace suma por prom ponderado       |
|           | EDIV |             | ; Divide por suma ponderada          |
|           | TFR  | Y, D        | ; Pone resultado en A:B              |
|           | STAB | SAL_COG     | ; Almacena salida del sistema        |

## Anexo I

### Especificaciones Técnicas del Micro MC68HC912B32



- CPU12 de 16 Bits
  - Compatibilidad con el set de instrucciones del M68HC11
  - Pila de interrupciones y modelo de programación idéntico al del M68HC11
  - ALU de 20 bits
  - Cola de instrucciones
  - Direccionamiento indexado mejorado
  - Instrucciones de lógica difusa (Fuzzy Logic)
- Bus Multiplexado
  - Chip solo o expandido
  - Modo ancho 16/16 o estrecho 16/8
- Memoria
  - 32Kbyte de Flash EEPROM con 2Kbyte de bloque de inicio Borrable protegido
  - 768 Byte de EEPROM
  - 1Kbyte de RAM
- 8 canales de conversor de A/D de 8 bits
- Timer de 8 canales
  - Cada canal completamente configurable como Output compare ò como input capture
  - Modo simple de PWM
  - Modulo reset del contador Timer (timer counter)
- Acumulador de pulsos de 16 bits
  - Contador externo de eventos
  - Gated Time Accumulation
- Modulador de Ancho de Pulso
  - 4 canales de 8 bits o 2 canales de 16 bits
  - Control separado para cada ancho de pulso y ciclo útil
  - Programación de las salidas con alienación central o izquierda
- Interfaces Seriales
  - Interfase para comunicaciones seriales Asíncronas SCI
  - Interfase para periféricos seriales síncronos SPI
  - Enlace de comunicaciones de byte de datos j1850 BDLC
- Temporizador Watchdog, monitor de reloj, temporizador periódico de interrupciones
- Empaque de 80 pines QFP
  - Mas de 63 líneas I/O de propósito general
  - Operación de 2.7-5.5V a 8MHz

## Anexo J

### Programa Realizado Para el Sistema de Control Fuzzy del Sustentador Neumático

```

.nolist
#include hc12.inc
.list

org          $800          ;Inicio de la memoria RAM

:
DECLARACION DE VARIABLES
Error        ds.b          1          ;Entrada de error a la planta
Error_Ent    ds.b          1
Error_Ant    ds.b          1          ;Error Anterior
Der_Error    ds.b          1          ;Derivada del Error de la Planta cargada en RAM
Ref          ds.b          1          ;Referencia
Rea          ds.b          1          ;Realimentación
E_Planta     ds.b          1          ;Error de la Planta = Ref-Rea
aux          ds.b          1
ban_Error    ds.b          1
ban_Error_Ant ds.b          1
ban_U        ds.b          1
ban_U_Ant    ds.b          1
ban_N        ds.b          1
ban_Der      ds.b          1
U            ds.b          1
U_Ant        ds.b          1
Periodo      ds.b          1
N            ds.b          1
ui           ds.b          1
cont         ds.b          1
Defuzzyfi    ds.b          1

EntFuzzy:
Muy_Negativo ds.b          1
Negativo     ds.b          1
Cero         ds.b          1          ;Como se colocan las entradas del Error del sistema
Pos          ds.b          1
Muy_Pos      ds.b          1

Muy_Negativo_Der ds.b          1
Negativo_Der    ds.b          1
Cero_Der        ds.b          1          ;Como se colocan las entradas de la Derivada del Error
Pos_Der         ds.b          1          ;del sistema
Muy_Pos_Der     ds.b          1

SalFuzzy:
Cerrar_Fast   ds.b          1
Cerrar        ds.b          1
Quieto        ds.b          1          ;Como se colocan las salidas del sistema
Abrir         ds.b          1
Abrir_Fast    ds.b          1

org          $0D00        ;Inicio de la EEPROM

Entrada_FPs:

dc.b          $00,$57,$05,$06
dc.b          $3F,$7F,$08,$07
dc.b          $70,$8B,$11,$15          ;Funciones de pertenencia trapezoidales para el Error
dc.b          $7F,$8E,$08,$07
dc.b          $A6,$FF,$06,$04

dc.b          $64,$76,$24,$17
dc.b          $70,$7F,$24,$1F
dc.b          $7B,$82,$3F,$55          ;Funciones de pertenencia trapezoidales para la der del Error
dc.b          $7F,$86,$24,$2A
dc.b          $88,$98,$24,$1C

E_Muy_Negativo equ      (Muy_Negativo-EntFuzzy)
E_Negativo      equ      (Negativo-EntFuzzy)
E_Cero          equ      (Cero-EntFuzzy)          ;Sesgos para que las reglas sean mas entendibles
E_Pos          equ      (Pos-EntFuzzy)
E_Muy_Pos      equ      (Muy_Pos-EntFuzzy)

D_Muy_Negativo_Der equ      (Muy_Negativo_Der-EntFuzzy)
D_Negativo_Der equ      (Negativo_Der-EntFuzzy)
D_Cero_Der      equ      (Cero_Der-EntFuzzy)
D_Pos_Der      equ      (Pos_Der-EntFuzzy)
D_Muy_Pos_Der  equ      (Muy_Pos_Der-EntFuzzy)

R_Cerrar_Fast   equ      (Cerrar_Fast-EntFuzzy)
R_Cerrar        equ      (Cerrar-EntFuzzy)
R_Quieto        equ      (Quieto-EntFuzzy)
R_Abrir         equ      (Abrir-EntFuzzy)
R_Abrir_Fast    equ      (Abrir_Fast-EntFuzzy)

```

```

sep                                     equ          SFE          ;Variables necesaria para el entendimiento del de las funciones
Regla_End                               equ          SFF          ;de los conjuntos difusos

Regla_List:                             ;Listas de Reglas a Evaluar

dc.b      E_Muy_Negativo,D_Muy_Negativo_Der,sep,R_Cerrar,sep          ;Regla1
dc.b      E_Negativo,D_Muy_Negativo_Der,sep,R_Quieto,sep            ;Regla2
dc.b      E_Negativo,D_Negativo_Der,sep,R_Quieto,sep                ;Regla3
dc.b      E_Negativo,D_Cero_Der,sep,R_Cerrar,sep                    ;Regla4
dc.b      E_Negativo,D_Pos_Der,sep,R_Cerrar,sep                    ;Regla5
dc.b      E_Negativo,D_Muy_Pos_Der,sep,R_Cerrar,sep                ;Regla6
dc.b      E_Cero,D_Muy_Negativo_Der,sep,R_Abrir,sep                 ;Regla7
dc.b      E_Cero,D_Negativo_Der,sep,R_Abrir,sep                    ;Regla8
dc.b      E_Cero,D_Cero_Der,sep,R_Quieto,sep                        ;Regla9
dc.b      E_Cero,D_Pos_Der,sep,R_Cerrar,sep                          ;Regla10
dc.b      E_Cero,D_Muy_Pos_Der,sep,R_Cerrar,sep                    ;Regla11
dc.b      E_Pos,D_Muy_Negativo_Der,sep,R_Abrir,sep                 ;Regla12
dc.b      E_Pos,D_Negativo_Der,sep,R_Abrir,sep                      ;Regla13
dc.b      E_Pos,D_Cero_Der,sep,R_Abrir,sep                          ;Regla14
dc.b      E_Pos,D_Pos_Der,sep,R_Quieto,sep                          ;Regla15
dc.b      E_Pos,D_Muy_Pos_Der,sep,R_Quieto,sep                      ;Regla16
dc.b      E_Muy_Pos,D_Negativo_Der,sep,R_Abrir,sep                 ;Regla17
dc.b      E_Muy_Pos,D_Cero_Der,sep,R_Abrir,sep                      ;Regla18

Regla_End                               ;Fin de cadena de evaluación de Reglas

Salida_FPs:                             ;Salidas definidas para las barras singleton

dc.b      $00
dc.b      $3F
dc.b      $7F
dc.b      $BE
dc.b      $FF

org      $$8000                          ;Inicio del Programa

;INICIALIZACION DE VARIABLES

clr          COPCTL                       ;Desactivo el Watchdog
movb        #$FF,DDRA                     ;Declaro los Puertos de Salida
movb        #$FF,DDRB
movb        #$FF,DDRT
movb        #$FF,DDRS
movb        #$00,DDRP

ldaa        #$7F                           ;Referencia de la Planta
staa        Ref

ldaa        #$00                           ;inicialización de Variables
staa        U_Ant
staa        ban_U_Ant
staa        cont
staa        Error_Ant
staa        ban_Error_Ant
staa        ui

ldaa        #$02                           ;Periodo
staa        Periodo

;FIN DE INICIALIZACION DE VARIABLES

main:                                           ; Comienzo del ciclo de Control Fuzzy

ldaa        PORTP                          ;Cargo Acum A con el valor del Puerto P
anda        #$10
cmpa        #$10
beq         Dac
bra         main                            ;Salta a main

; INICIO CONVERSION ANALOGO - DIGITAL

Dac:      movb        #80H,ATDCTL2          ;Activa el dac,clearo de banderas manual y
                                                ;sin interrupcion

Retardo:  ldaa        #0C8H
Retar:    deca
          bne

          movb        #01H,ATDCTL4          ;8 bits de conversion y reloj de division total de 4
          movb        #10H,ATDCTL5          ;4 conversiones, conversion unica, 4 ;conversiones ;direccionadas el resultado ;en
                                                ;canales independientes

Esp_Dac:  brclr      ATDSTATH,#80H,Esp_Dac  ;espera a que finalice la conversion

```

```

                                ldaa    $0070    ;carga en A el valor final de la conversion ubicado en ;dicha posicion de memoria
                                staa    Rea
; FIN DE CONVERSION DAC
; CALCULO DEL ERROR (Error=Ref-Rea)
ldaa    Ref                    ;Cargo en A la Referencia
suba    Rea                    ;Calculo el error=Ref-Rea queda en A
bcc     R_Pos                  ;Si el resultado es positivo salta
bra     R_Neg                  ;De lo Contrario Continua

                                R_Neg:    ldaa    Rea
                                        suba    Ref
                                        staa    E_Planta
                                        ldaa    #$FF
                                        staa    ban_Error
                                        bra     Conv

                                R_Pos:    staa    E_Planta    ;Carga en Memoria el Error de la Planta
                                        ldaa    #$00
                                        staa    ban_Error

Conv:    ldaa    #$7F            ;Carga en A, 7F para realizar conversion
        ldab    E_Planta        ;Carga en B, Error de la Planta
        mul     #5               ;Multiplica A * B y el resultado queda en D
        ldx    #$FF            ;Carga X con FF para terminar conversion
        idiv   x,D              ;Divide D / X y carga en X resultado
        tfr    Error           ;Transfiere el resultado de X a D =[A][B]
        stab   #0              ;El valor del Error >00 and <7F

                                ldaa    ban_Error
        cmpa    #$FF
        beq    res_E
        bra     sum_E

                                sum_E:    ldaa    #$7F            ;Cargo A con 7F para sumarlos
                                        ldab    Error           ;Cargo en B aux
                                        aba     Error_Ent        ;Realizo la suma y queda en Acum A
                                        staa    Error_Ent
                                        bra     Fuzzify

                                res_E:    ldaa    #$7F            ;Cargo A con 7F para sumarlos
                                        ldab    Error           ;Cargo en B aux
                                        sba     Error_Ent        ;Realizo la suma y queda en Acum A
                                        staa    Error_Ent
                                        bra     Fuzzify

; FIN DE CALCULO DEL ERROR
; CALCULO DE LA DERIVADA DEL ERROR
; !!!! COLOCARLA CONSTANTE POR AHORA !!!!!
; FIN DE CALCULO DERIVADA DEL ERROR
; FUZZYFICACION DE ENTRADAS DEL SISTEMA
Fuzzify:    ldaa    #$7F
            staa    Der_Error

            ldx    #Entrada_FPs
            ldy    #EntFuzzy

            ldaa    Error_Ent

                                Fuz_Loop:    ldab    #5
                                        mem    B,Fuz_Loop
                                        dbne

            ldaa    Der_Error

                                Fuz_Loop1:    ldab    #5
                                        mem    B,Fuz_Loop1
                                        dbne

; FIN DE FUZZYFICACION DE ENTRADAS
; EVALUACION DE LAS REGLAS DEL SISTEMA DIFUSO

Regla_Eval:    ldab    #5
               clr     1,y+
               dbne   B,Regla_Eval

               ldy    #EntFuzzy

               ldaa    #$FF
               rev

; FIN DE LA EVALUACION DE LAS REGLAS

```

; DEFUZZYFICACION DE LA SALIDA

```
Defuzzy:      ldy      #SalFuzzy
              ldab     #5
              wav
              ediv
              tfr      y,d
              stab     Defuzzyfi
```

; FIN DE LA DEFUZZYFICACION

; INICIO DE CONVERSION DE LA SALIDA DE 00-FF A 00-7F

```
Conversion:  ldaa     Defuzzyfi
              ldab     #$7F
              sba
              bcc     C_Pos      ;Si el resultado es positivo salta
              bra     C_Neg      ;De lo Contrario Continua

              C_Neg:   ldaa     #$7F
                      ldab     Defuzzyfi
                      sba
                      ldab     #$0F
                      mul
                      ldx     #$7F
                      idiv
                      tfr      x,D
                      stab     U
                      stab     PORTA
                      ldaa     #$FF
                      staa     PORTS
                      staa     ban_U ;Bandera para indicar si el resultado es (+) o -
                      bra     Integ_Neg ;Para FF resultado (-) para 00 resultado (+)

              C_Pos:   ldab     #$0F
                      mul
                      ldx     #$7F
                      idiv
                      tfr      x,D
                      stab     U
                      stab     PORTA
                      ldaa     #$00
                      staa     PORTS
                      staa     ban_U
                      bra     Integ_Pos
```

; FIN DE LA CONVERSION DE 00-FF A 00-7F (Cargado en U)

; CALCULAR EL INTEGRADOR DESPUES DE LA SALIDA (Segun el signo de U)

; Integrador con signo positivo

```
Integ_Pos:   ldaa     ban_U_Ant ;Bandera para indicar el signo del U_Ant
              cmpa     #$FF
              beq     Int_Res
              bra     Int_Sum

              Int_Res:  ldaa     U
                      ldab     U_Ant

                      bcc     Int_Res_Neg ;Si el resultado es positivo salta
                      bra     Int_Res_Pos ;De lo Contrario Continua

              Int_Res_Neg:  ldab     Periodo
                      mul
                      ldx     #$02
                      idiv
                      tfr      x,D
                      stab     N
                      ldaa     #$FF
                      staa     ban_N
                      bra     sum

              Int_Res_Pos:  ldaa     U_Ant
                      ldab     U
                      ldab     Periodo
                      mul
                      ldx     #$02
                      idiv
                      tfr      x,D
                      stab     N
                      ldaa     #$00
                      staa     ban_N
```

```

bra sum

Int_Sum:   ldaa    U
           ldab    U_Ant
           aba
           ldab    Periodo
           mul
           ldx    #S02
           idiv
           tfr    x,D
           stab    N
           ldaa    #S00
           staa   ban_N
           bra    sum

; Integrador con signo Negativo

Integ_Neg:   ldaa    ban_U_Ant
             cmpa    #SFF
             beq    Int_Sum2
             bra    Int_Res2

Int_Res2:   ldaa    U_Ant
            ldab    U
            sba

            bcc    Int_Res_Pos2
            bra    Int_Res_Neg2

Int_Res_Pos2:   ldab    Periodo
                mul
                ldx    #S02
                idiv
                tfr    x,D
                stab    N
                ldaa    #S00
                staa   ban_N
                bra    sum

Int_Res_Neg2:   ldaa    U
                ldab    U_Ant
                sba
                ldab    Periodo
                mul
                ldx    #S02
                idiv
                tfr    x,D
                stab    N
                ldaa    #SFF
                staa   ban_N
                bra    sum

Int_Sum2:   ldaa    U
            ldab    U_Ant
            aba
            ldab    Periodo
            mul
            ldx    #S02
            idiv
            tfr    x,D
            stab    N
            ldaa    #SFF
            staa   ban_N
            bra    sum

; FIN DEL CALCULO DEL INTEGRADOR (Guardado en N)

; SALIDA TOTAL DEL SISTEMA CON SATURADORES

sum:   ldaa    N
       staa   PORTT

       ldaa    #SFF
       cmpa   ban_N
       beq    sum_res
       bra    sum_sum

sum_res:   ldaa    ui
           ldab    N
           sba
           bcc    salto
           ldaa    #S00
           staa   ui
           bra    put

sum_sum:   ldaa    ui
           ldab    N
           aba
           bcs    salto2

salto:   staa   ui
         bra    put

salto2:

```

```

                                staa    ui
                                bra     put
salto2:                        ldaa    #$FF
                                staa    ui
                                bra     put

; FIN DE LA SALIDA TOTAL DEL SISTEMA (Almacenado en ui)

; SALIDA POR EL PUERTO A DE LA SEÑAL A LA PLANTA Y ACTUALIZACIONES DE VAR

put:                            ldaa    ui
                                staa    PORTB
                                ldaa    ban_U
                                staa    ban_U_Ant
                                ldaa    U
                                staa    U_Ant
                                ldaa    Error
                                staa    Error_Ant
                                ldaa    ban_Error
                                staa    ban_Error_Ant

; RETARDO PARA DARLE EL TIEMPO AL CICLO
;   Del tiempo del Periodo
; FIN DEL RETARDO DEL PERIODO

lbra    main                    ; Salto al inicio para repetir el ciclo.

; FIN DEL PROGRAMA

; DIRECCION A LA CUAL SE REFIERE CUANDO RESETEO EL MICRO

RESET:  org    $F7FE            ;cuando reset el micro salta a esta posicion
        dw    $8000            ;salto a la posicion 0E00 inicio programa

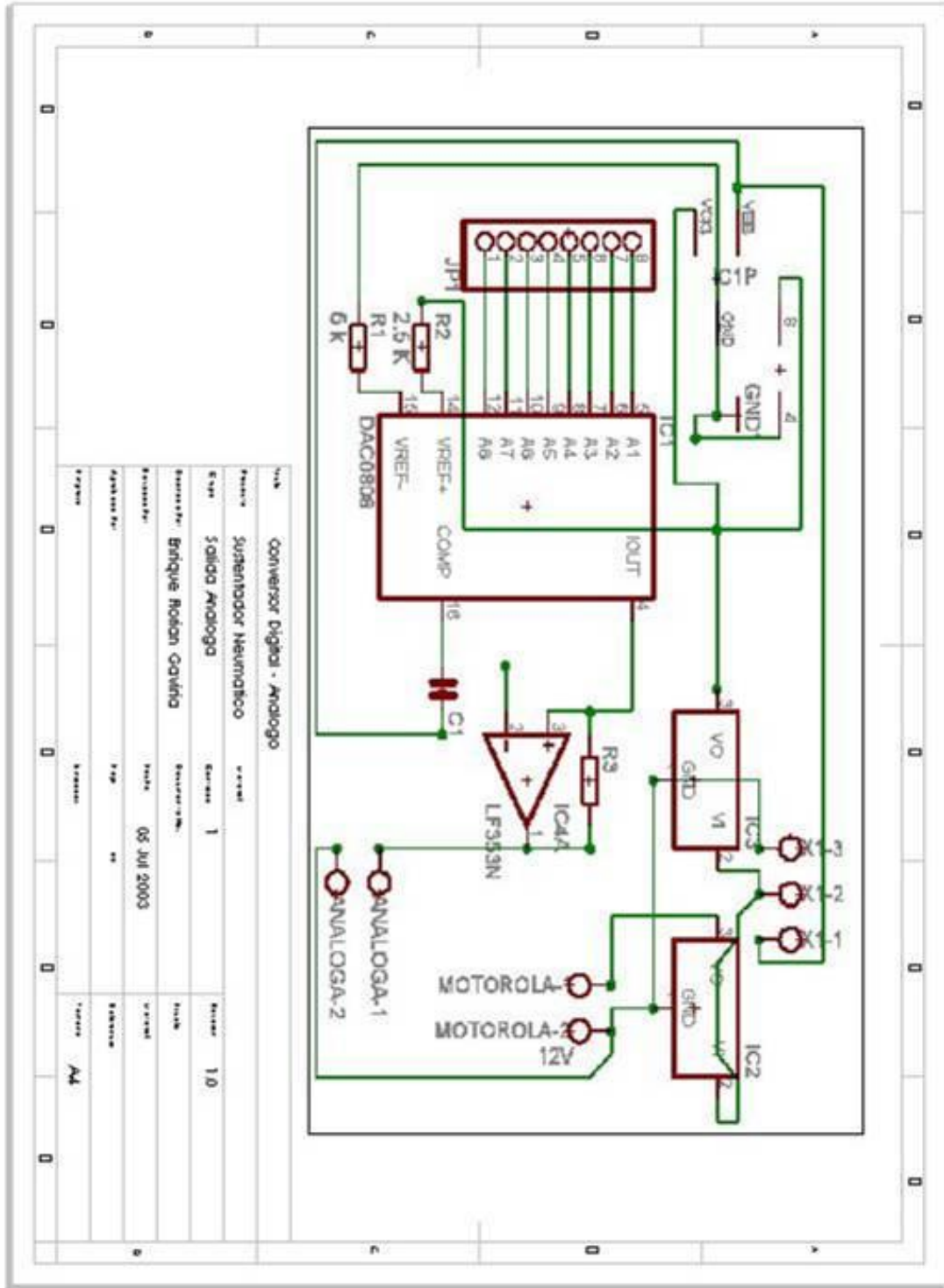
; FIN DEL SALTO DE RESETEO

```



## Anexo K

### Plano Eléctrico del Conversor Digital – Análogo



## **Anexo L**

### **Manual del Usuario**

#### **Introducción**

El dispositivo que se diseñó es un “*Sistema De Sustentacion Neumático Para Prácticas De Control*”, dicha planta cumple con el objetivo de poder ser utilizada de una forma sencilla para la implementación de distintos tipos de control.

Los estudiantes de Ingeniería podrán encontrarse con un dispositivo en óptimas condiciones, el cual requiere de un mínimo de sincronización y en el cual se puede realmente utilizar el tiempo en lo concerniente a las practicas de control y no desgastarse en el acondicionamiento del sistema; que es lo que quita la mayoría del tiempo no siendo esta parte del objetivo primordial.

En este manual se darán pautas y se introducirá al manejo del sistema de sustentación neumático.

#### **Identificación De Los Componentes**

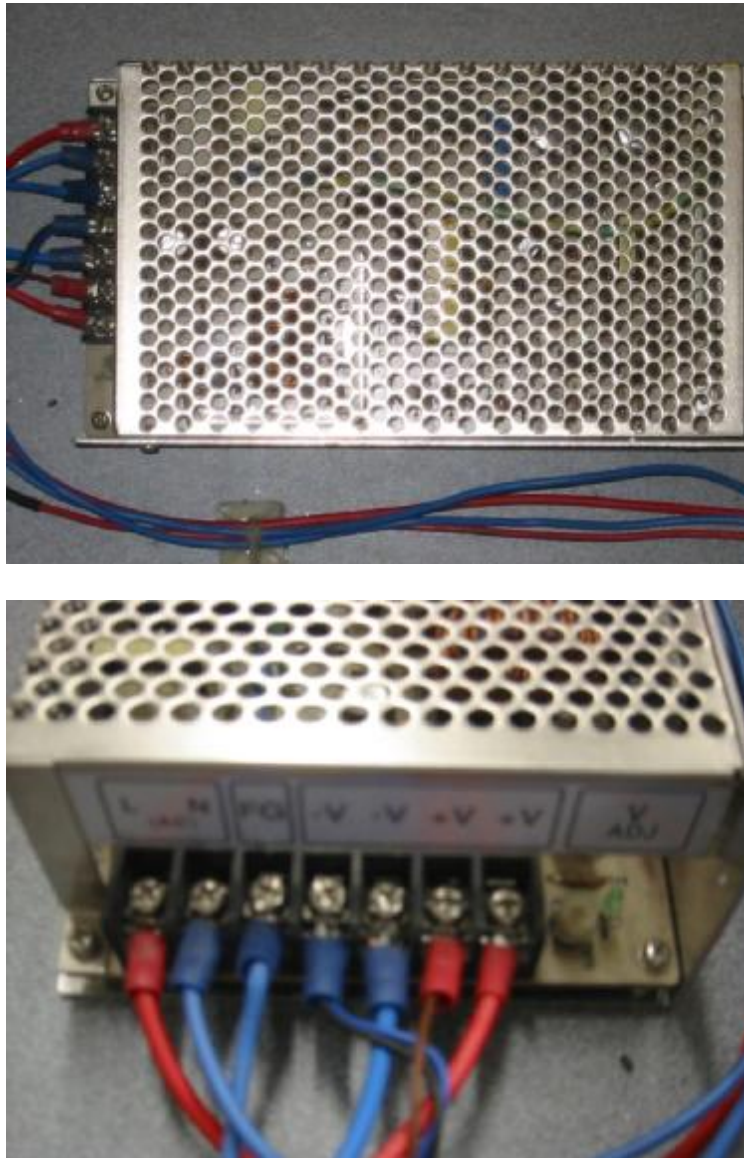
Para la buena manipulación y buen funcionamiento del sistema de sustentación neumático se realiza el siguiente manual del usuario. Lo primero que se debe hacer a la hora de utilizar cualquier dispositivo mecatrónico es identificar por completo todas las partes que intervienen el proceso y lo componen.

Se identifican tres elementos de vital importancia en el sistema de suspensión:

- § Alimentación
- § Sistema de Actuador
- § Sistema Sensorial

**Alimentación:** La alimentación del sistema la ejerce una fuente de Poder swichada Mean Well; esta fuente es alimentada por 110 VAC y después de su etapa de conversión se obtiene dos salida 24VDC. Este voltaje de salida de la fuente es el encargado de alimentar a los dispositivos electrónicos con que cuenta el sistema. Ver Ilustración 83

**Ilustración 83. Fuente Mean Well**



**Sistema de Actuador:** La acción del actuador la ejerce una electroválvula proporcional de caudal, la electroválvula posee una entrada y dos salidas neumáticas; así como su entrada eléctrica de voltaje de 24 VDC, y la entrada en voltaje para manejar la apertura de las vías de salida neumática de (0-10) VDC.

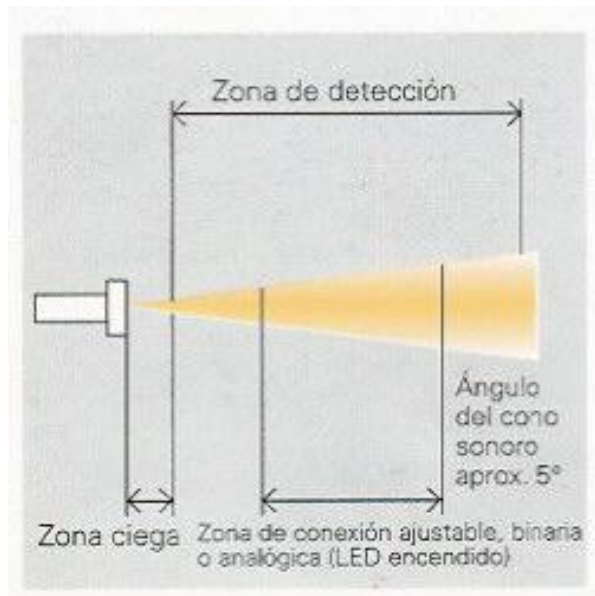
Para manejar la primera salida proporcional de aire, se encuentra que su máxima abertura ocurre cuando la tensión de entrada es de 0 VDC; y su mínima abertura es decir, cuando queda totalmente cerrada sucede cuando la tensión de voltaje es de 5 VDC. Para el manejo de la segunda vía de salida neumática de la electroválvula, su máxima abertura es alcanzada cuando la tensión de entrada es de 5 VDC y queda completamente cerrada esta vía cuando la tensión de entrada es de 10 VDC. Es de notar que el manejo de la electroválvula es por medio de una tensión de entrada que varía en el rango de (0-10) V. Ver Ilustración 84.

### Ilustración 84. Electrovalvula Proporcional



**Sistema Sensorial:** El dispositivo encargado de ejercer la acción de sensado es un sensor ultrasónico de proximidad, el cual posee una entrada de alimentación de 24VDC para poner en funcionamiento su sistema electrónico, y una salida de corriente de 4-20mA según el rango que este detectando. Su rango puede ser programado por un software especializado el cual permite variar algunos parámetros como el rango de captura, el cono sónico para el sensado y demás; para el caso del sistema de sustentación neumático, el rango para el que esta graduado se muestra en la Ilustración 85, y el cono sónico que posee fue programado para un ángulo de 5 grados. Ver Ilustración 86.

### Ilustración 85. Variables del Sensor



### **Ilustración 86. Sensor ultrasónico Bero Sonar**

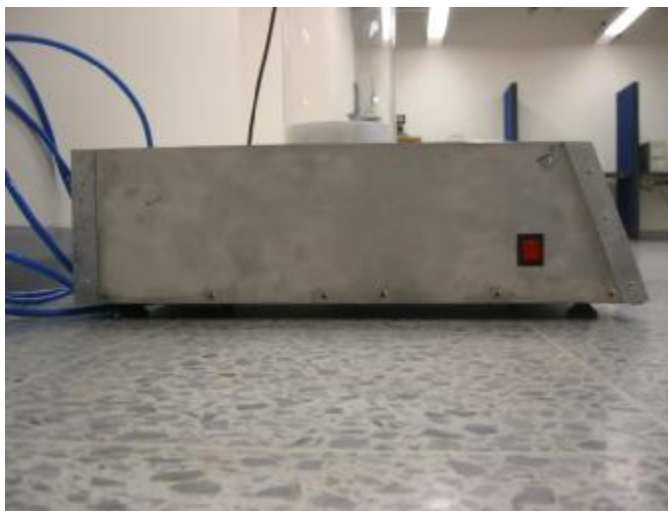


### **Identificación Y Manejo De Las Señales**

Después de haber identificado claramente como se conectan los dispositivos vamos a ver como es el manejo de las señales tanto de entrada como de salida del sistema de sustentación neumático.

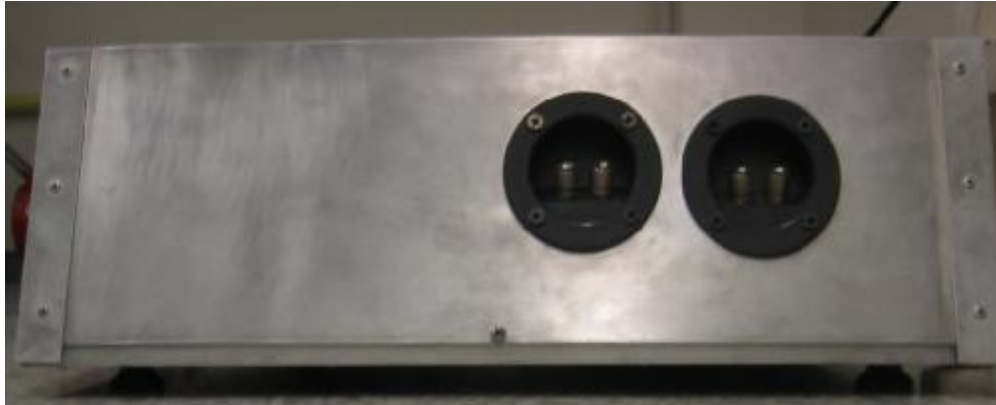
Ya teniendo conectados los dispositivos que harán parte de la interacción del proceso; se identifica un swiche en la parte izquierda de la base de la planta el cual se encargara de encender los dispositivos cuando así se requiera. Ver ilustración 87.

### **Ilustración 87. Swiche on/off**



Posee dos plug de conexión; los cuales se encargan de la interfaz con el exterior para sacar o enviar señal al sistema, el plug de conexión del lado izquierdo (Ver Ilustración 88) es el cual nos va a mostrar la señal de salida del sensor según lo que este esté capturando en el momento. El plug de conexión del lado dercheo el por donde se va a ingresar la señal de voltaje a la electroválvula en el rango establecido.

**Ilustración 88. Plugs de conexión**



Por la parte posterior del dispositivo es por donde esta el cable de conexión tanto de la fuente neumática, como de la fuente de corriente alterna. La fuente de corriente alterna es fija de 110 VAC, pero la fuente neumática puede variar su presión de entrada según lo deseemos entre (0-10) bar, recomendable para el dispositivo una presión entre 4 - 5 bar. Ver Ilustración 89.

**Ilustración 89. Parte Trasera del Sistema de sustentación**

