

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TÚNEL DE
VIENTO PARA EVALUACIÓN DE PERFILES EN
APLICACIONES AERODINÁMICAS CON SISTEMA DE
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR:

JOSÉ ALEJANDRO GUZMÁN HERRERA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TÚNEL DE
VIENTO PARA EVALUACIÓN DE PERFILES EN
APLICACIONES AERODINÁMICAS CON SISTEMA DE
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICO**

Presentado por :

JOSÉ ALEJANDRO GUZMÁN HERRERA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

San Salvador, febrero de 2015

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

DEDICATORIA

A mi familia que siempre me apoyo en el desarrollo de toda mi carrera y en la realización de este trabajo de graduación.

A José Ángel Martínez quién ya no se encuentra entre nosotros

A mi Sarita que siempre me motivo y apoyo para salir adelante durante el desarrollo de mi carrera y trabajo de graduación.

A todos los amigos con los que compartí el tiempo de mi estadía en la universidad.

A mi asesor de trabajo de graduación Ing. Salomón Torres por acompañarme en el recorrido de este camino y brindarme su conocimiento, consejos y amistad.

Al Ing. Julio César Orantes ya que gracias a sus enseñanzas y conocimientos compartidos me motivo a querer superarme como estudiante y alcanzar el grado de Ingeniero.

A todos los maestros que me brindaron su conocimiento pero especialmente a los que en su momento me exigieron para que diera lo mejor de mí como estudiante.

A mis estudiantes de electrónica, sección 1B1 – 2014 por acompañarme y motivarme a ser un guía y ejemplo para cada uno de ellos.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Teresa de Jesús Herrera y mi padre José Efraín Guzmán por apoyarme siempre y darme el mejor regalo que puede existir, la educación, solo puedo decir gracias y no es suficiente para expresar cuanto valoro que hayan estado ahí siempre para brindarme su apoyo incondicional y sus consejos, ahora puedo decir que he logrado el mayor de mis logros académicos hasta el momento. A mi hermano Raúl y mis hermanas Jazmín, Gaby y Andrea por estar siempre y por ser los mejores hermanos que alguien puede tener, agradezco a mi abuela Nenita por todo lo que me ha enseñado, por sus consejos y apoyo, a Astrid de Guzmán por aceptarme y ayudarme siempre que lo he necesitado.

De manera muy especial a mi Sarita por acompañarme y apoyarme siempre, por motivarme en los momentos en que lo necesitaba, por toda la ayuda brindada hasta en los más pequeños detalles, de no ser sin su apoyo, cariño y amistad con mayor dificultad habría finalizado satisfactoriamente esta etapa de mi carrera.

Agradezco al Ing. Salomón Torres y al Ing. Julio César Orantes por ser dos maestros en diferentes etapas de mi vida académica que me enseñaron más de lo que esperaba a la vez que me han brindado su apoyo y amistad.

A mis amigos con los que compartí muchos momentos y que han estado ahí tanto en las buenas como en las malas.

Finalmente quiero agradecer al Instituto Emiliani por darme la oportunidad de desarrollar la construcción de mi trabajo de graduación y a mis estudiantes de la sección 1B1 – 2014 porque estuvieron conmigo en el desarrollo de mi trabajo, a la vez porque me motivaron a dar lo mejor de mí y ser un ejemplo para todos ellos.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se detalla el proceso de diseño y construcción de un prototipo de túnel de viento con sistema de instrumentación electrónico para la realización de ensayos en perfiles geométricos para aplicaciones aerodinámicas. El prototipo captura datos de velocidad del viento utilizando como elementos sensores diodos zener de baja potencia a través de un circuito de instrumentación basado en amplificadores operacionales, dicho circuito genera una variación de voltaje que es proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad del viento; los valores analógicos son recogidos por una placa electrónica Arduino Mega 2560 y convertidos a valores digitales para su transferencia a través de un puerto serie simulado a una computadora y presentados en una interfaz gráfica de usuario diseñada en el software Matlab que se encarga de convertir los valores de voltaje a velocidad del viento por medio de una ecuación deducida para tal fin, a su vez realiza el cálculo del valor de presión en el punto donde se está midiendo la velocidad del viento para conocer así el perfil de presiones. En cuanto al ángulo de incidencia del flujo de aire en el perfil geométrico, este se puede variar a diversos valores puntuales ya que se ha utilizado un motor paso a paso gobernado a través de la interfaz gráfica de usuario por la placa electrónica Arduino Mega 2560; la construcción del prototipo de túnel de viento se realizó con el fin de fortalecer las prácticas de laboratorio en materias afines impartidas por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, por lo que se ha propuesto una guía de laboratorio básica sobre el uso del prototipo y la realización de un ensayo. Dado que el prototipo es un sistema programable las posibilidades en la realización de diversos ensayos son extensas.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS..... | xvi |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 2 |
| 1.1. Fundamentos de la mecánica de fluidos..... | 2 |
| 1.1.1. Hipótesis del continuo | 2 |
| 1.1.2. Viscosidad dinámica..... | 3 |
| 1.1.3. Viscosidad cinemática | 5 |
| 1.1.4. Flujo Laminar | 6 |
| 1.1.5. Flujo Turbulento | 6 |
| 1.1.6. Teoría de Capa Límite..... | 7 |
| 1.1.7. Teorema de Bernoulli | 8 |
| 1.1.8. Ecuación de Continuidad | 9 |
| 1.1.9. Teoría de Darcy – Weisbach..... | 10 |
| 1.1.10. Número de Reynolds | 11 |
| 1.1.11. Número de Mach | 12 |
| 1.1.12. Números Adimensionales | 13 |
| 1.1.13. Similitud | 16 |
| 1.2. Túneles aerodinámicos..... | 18 |
| 1.2.1. Clasificación de túneles aerodinámicos. | 18 |
| 1.2.2. Partes de un túnel aerodinámico..... | 19 |
| 1.3. Instrumentación en un túnel aerodinámico | 20 |
| 1.4. Ventiladores..... | 23 |
| 1.4.1. Ventiladores axiales | 24 |
| 1.4.2. Ventiladores centrífugos..... | 25 |
| 1.5. Motores paso a paso | 26 |
| 1.5.1. Principio de Funcionamiento de los motores paso a paso | 26 |
| 1.5.2. Secuencias para manejar motores paso a paso Bipolares | 28 |
| 1.5.3. Secuencias para manejar motores paso a paso Unipolares | 28 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2. | DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO | 31 |
| 2.1. | Tipo de túnel de viento a diseñar y construir | 31 |
| 2.2. | Características del túnel de viento | 32 |
| 2.3. | Diseño del túnel de viento..... | 33 |
| 2.3.1. | Diseño del difusor..... | 35 |
| 2.4. | Cálculo de Pérdidas y Selección de Materiales | 40 |
| 2.6. | Diseño del banco de pruebas | 51 |
| 2.7. | Selección de Materiales..... | 52 |
| 2.7.1. | Metracrilato PMMA..... | 52 |
| 2.7.2. | Fibra de Vidrio..... | 55 |
| 2.8. | Simulación del túnel de viento | 57 |
| 2.8.1. | Simulación de la variación de velocidad..... | 58 |
| 2.8.2. | Simulación de la variación de presión | 60 |
| 2.8.3. | Simulación de la variación de densidad | 62 |
| 2.8.4. | Simulación de la variación de número de Mach..... | 64 |
| 2.9. | Construcción de Elementos del Túnel | 66 |
| 2.9.1. | Sección de Pruebas | 66 |
| 2.9.1.1. | Proceso de corte..... | 66 |
| 2.9.1.2. | Proceso de moldeo (termoformado) | 67 |
| 2.9.1.3. | Proceso de Pegado | 69 |
| 2.9.2. | Sección de Conexión y Difusor | 71 |
| 2.9.3. | Estructura del Banco de Pruebas..... | 71 |
| 2.10. | Base móvil para posicionamiento de perfiles geométricos..... | 76 |
| 2.10.1. | Características del motor seleccionado | 76 |
| 3. | SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICO PARA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO | 78 |
| 3.1. | Anemometría de Hilo Caliente | 78 |
| 3.2. | Puente de Wheatstone | 80 |
| 3.3. | Anemómetro a temperatura constante..... | 81 |
| 3.4. | El Amplificador Operacional..... | 82 |
| 3.4.1. | Amplificador Inversor..... | 83 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.4.2. | Amplificador No Inversor | 84 |
| 3.4.3. | Amplificador Diferencial..... | 85 |
| 3.4.4. | Amplificador de Instrumentación | 86 |
| 3.5. | Geometrías para ensayos y elementos sensores | 87 |
| 3.6. | Anemómetro basado en Diodo Zener | 89 |
| 3.7. | Diseño y Construcción de Placa de Circuito Impreso para circuitos sensores..... | 92 |
| 3.8. | Ecuación de Velocidad del Viento | 95 |
| 3.9. | Distribución de Presiones..... | 98 |
| 4. | SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL DEL PROTOTIPO DE TÚNEL DE VIENTO | 100 |
| 4.1. | Sistema eléctrico y de control general..... | 100 |
| 4.2. | Panel de Control del Prototipo | 101 |
| 4.3. | Placa electrónica Arduino Mega 2560 y Sistema de Instrumentación ... | 101 |
| 4.4. | Etapa de potencia para control de motor paso a paso | 103 |
| 4.4.1. | El transistor como interruptor | 104 |
| 4.4.2. | Cálculos relacionados con el transistor como interruptor..... | 106 |
| 4.4.3. | Diseño del circuito de potencia para control del motor paso a paso | 108 |
| 4.5. | Circuito de control del ventilador y fuente de alimentación DC..... | 111 |
| 4.6. | Interfaz gráfica de usuario a través de computadora..... | 113 |
| 4.7. | Simulación CFD de un ensayo en el prototipo de túnel de viento..... | 114 |
| | CONCLUSIONES | 117 |
| | RECOMENDACIONES..... | 119 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 120 |
| | ANEXOS | 121 |
| | Anexo 1: Código MATLAB para el cálculo de longitud y ángulo de cono en el difusor..... | 121 |
| | Anexo 2: Código MATLAB para el cálculo del diámetro hidráulico, área, velocidad y número de Reynolds por secciones para el difusor | 122 |
| | Anexo 3: Código MATLAB para el cálculo del factor de fricción, coeficiente k, pérdidas en función de alturas y caída de presión por secciones para el difusor | 123 |

| | |
|---|-----|
| Anexo 4: Código MATLAB de interfaz gráfica | 124 |
| Anexo 5: Guía de Laboratorio..... | 124 |
| Anexo 6: Prototipo de túnel de viento terminado | 147 |
| Anexo 7: Hojas de características de componentes electrónicos, planos eléctricos – electrónicos y planos constructivos. | 148 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.01. Deformación de un fluido | 3 |
| Figura 1.02. Variación de la viscosidad dinámica del aire con la temperatura en el rango de 0 a 600 Kelvin realizado con software Matlab..... | 5 |
| Figura 1.03. Representación del flujo laminar..... | 6 |
| Figura 1.04. Representación de flujo turbulento | 6 |
| Figura 1.05. Comportamiento de la velocidad en la capa límite. | 7 |
| Figura 1.06. Capa límite laminar y turbulenta | 8 |
| Figura 1.07. Representación de la conservación de caudal | 9 |
| Figura 1.08. Túneles de viento abierto y cerrado..... | 19 |
| Figura 1.09. Esquema de un túnel de viento y sus partes | 19 |
| Figura 1.10. Diferentes tipos de manómetros | 21 |
| Figura 1.11. Esquema de funcionamiento de un transductor piezoeléctrico..... | 22 |
| Figura 1.12. Diferentes tipos de células de carga | 22 |
| Figura 1.13. Tubos de Pitot..... | 22 |
| Figura 1.14. Anemómetro de hilo caliente. | 23 |
| Figura 1.15. Motor paso a paso | 26 |
| Figura 1.16. Rotor de motor paso a paso | 27 |
| Figura 1.17. Estator de motor paso a paso..... | 27 |
| Figura 1.18. Motor paso a paso Bipolar y Unipolar | 27 |
| Figura 1.19. Secuencia de motor paso a paso bipolar..... | 28 |
| Figura 1.20. Secuencia normal de un motor paso a paso Unipolar | 29 |
| Figura 1.21. Secuencia Wave Drive de motor paso a paso Unipolar..... | 29 |
| Figura 1.22. Secuencia de medio paso de un motor paso a paso Unipolar..... | 30 |
| | |
| Figura 2.01. Sección de Pruebas..... | 34 |
| Figura 2.02. Esquema del difusor | 38 |
| Figura 2.03. Difusor | 40 |
| Figura 2.04. Sección de conexión ventilador – sección de pruebas. | 48 |
| Figura 2.05. Modelo terminado del túnel de viento. | 48 |
| Figura 2.06. Banco del túnel de viento..... | 51 |
| Figura 2.07. Perfil de tubo estructural cuadrado | 57 |
| Figura 2.08. Variación de la velocidad..... | 59 |
| Figura 2.09. Simulación de la variación de velocidad | 59 |
| Figura 2.10. Variación de la presión | 61 |
| Figura 2.11. Simulación de la variación de presión..... | 61 |
| Figura 2.12. Variación de la densidad..... | 63 |
| Figura 2.13. Simulación de la variación de densidad..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.14. Variación del Número de Mach..... | 65 |
| Figura 2.15. Simulación de la variación del Número de Mach | 65 |
| Figura 2.16. Marco inferior (CAD). | 72 |
| Figura 2.17. Marco inferior con soportes (CAD)..... | 72 |
| Figura 2.18. Marco inferior con soportes | 73 |
| Figura 2.19. Estructura con soportes para elementos del túnel (CAD). | 73 |
| Figura 2.20. Estructura con piezas de lámina de acero (CAD). | 74 |
| Figura 2.21. Estructura con piezas de lámina de acero (Real) | 75 |
| Figura 2.22. Estructura con base para tablero de control y circuitos (CAD) | 75 |
| Figura 2.23. Estructura real finalizada | 76 |
| Figura 2.24. Motor paso a paso Unipolar con varilla roscada en el eje..... | 77 |
| | |
| Figura 3.01. Elemento Térmico frente a flujo de un fluido..... | 78 |
| Figura 3.02. Imagen comparativa del tamaño del hilo caliente | 79 |
| Figura 3.03. Esquema de un anemómetro de hilo caliente..... | 79 |
| Figura 3.04. Puente de Wheatstone..... | 80 |
| Figura 3.05. Circuito básico de un anemómetro de hilo caliente a temperatura constante..... | 82 |
| Figura 3.06. Diagrama esquemático de un amplificador operacional..... | 83 |
| Figura 3.07. Diagrama esquemático del amplificador operacional conectado como amplificador inversor | 84 |
| Figura 3.08. Diagrama esquemático del amplificador operacional conectado como amplificador no inversor..... | 85 |
| Figura 3.09. Diagrama esquemático del amplificador operacional conectado como amplificador diferencial | 85 |
| Figura 3.10. Diagrama esquemático del amplificador de instrumentación..... | 86 |
| Figura 3.11. Modelo de perfil geométrico para ensayos en el prototipo de túnel de viento..... | 88 |
| Figura 3.12. Diodo Zener | 89 |
| Figura 3.13. Esquema de diodos zener montados en perfil geométrico..... | 89 |
| Figura 3.14. Diagrama esquemático del circuito de instrumentación para medición de velocidad del viento con diodo zener..... | 90 |
| Figura 3.15. Diseño del circuito impreso y vista con componentes físicos..... | 93 |
| Figura 3.16. Diseño de placa de circuito impreso para cuatro sensores | 93 |
| Figura 3.17. Placa de circuito impreso conteniendo cuatro sensores | 94 |
| Figura 3.18. Placa de circuito impreso montada..... | 94 |
| Figura 3.19. Cilindro frente a un flujo de fluido..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.01. Esquema eléctrico y de control general | 100 |
| Figura 4.02. Placa Arduino Mega 2560 | 102 |
| Figura 4.03. Conexión entre placa Arduino Mega y placa de circuitos sensores . | 103 |
| Figura 4.04. Transistor conectado como interruptor..... | 104 |
| Figura 4.05. Curvas características de un transistor y zonas de trabajo | 105 |
| Figura 4.06. Diagrama Esquemático de la Etapa de Potencia | 110 |
| Figura 4.07. Placa de circuito impreso de etapa de potencia | 111 |
| Figura 4.08. Etapa de potencia para control de motor paso montada. | 111 |
| Figura 4.09. Circuito de control correspondiente al ventilador y fuente de alimentación DC..... | 112 |
| Figura 4.10. Interfaz Gráfica de Usuario | 114 |
| Figura 4.11. Ensayo con perfil geométrico y ángulo de incidencia igual a cero. ... | 115 |
| Figura 4.12. Ensayo con perfil geométrico y ángulo de incidencia aproximadamente igual a treinta grados. | 116 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1.01. Ejemplos de parámetros Pi en términos de sus dimensiones | 14 |
| Tabla 1.02. Algunos parámetros adimensionales importantes..... | 16 |
| Tabla 1.03. Clasificación de ventiladores centrífugos por la forma de su envolvente | 24 |
| Tabla 1.04. Clasificación de ventiladores centrífugos según la forma de los álabes del rotor..... | 25 |
| | |
| Tabla 2.01. Ángulo de cono del difusor para diferentes longitudes | 39 |
| Tabla 2.02. Área, Diámetro Hidráulico, Velocidad y número de Reynolds para cada una de las secciones del difusor..... | 45 |
| Tabla 2.03. Factor de fricción, Coeficiente de pérdidas, Pérdidas y Caída de presiones para cada una de las secciones del difusor | 46 |
| Tabla 2.04. Área, Diámetro Hidráulico, Velocidad y número de Reynolds para cada una de las secciones del elemento de conexión..... | 47 |
| Tabla 2.05. Factor de fricción de la sección de conexión..... | 47 |
| Tabla 2.06. Características generales del PMMA (Acrílico)..... | 53 |
| Tabla 2.07. Composición (% en peso) de los distintos tipos de vidrio | 55 |
| Tabla 2.08. Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio tipo E y S2..... | 56 |
| Tabla 2.09. Valores Mínimo, Promedio y Máximo de las velocidades Mínima, Promedio y Máxima a la salida del difusor. | 58 |
| Tabla 2.10. Valores Mínimo, Promedio y Máximo de las presiones Mínima, Promedio y Máxima a la salida del difusor | 60 |
| Tabla 2.11. Valores Mínimo, Promedio y Máximo de las densidades Mínima, Promedio y Máxima a la salida del difusor | 62 |
| Tabla 2.12. Valores Mínimo, Promedio y Máximo de Mach Mínimo, Promedio y Máximo a la salida del difusor..... | 64 |
| | |
| Tabla 3.01. Listado de componentes electrónicos por circuito, por placa de circuito impreso y total. | 92 |
| Tabla 3.02. Medición de velocidad de viento del ventilador con anemómetro digital y con sensor basado en diodo zener | 97 |
| Tabla 3.03. Cálculo de la constante k^2 para las mediciones de voltaje y velocidad del viento..... | 97 |
| | |
| Tabla 4.01. Listado de componentes electrónicos para circuito de potencia..... | 110 |
| Tabla 4.02. Listado de componentes eléctricos para circuito de control de ventilador y fuente de alimentación | 113 |

LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

| | | |
|---------------|---|--|
| Δh | : | Pérdidas expresadas como diferencia de alturas |
| f | : | Factor de fricción |
| L | : | Longitud de tubería |
| D | : | Diámetro de tubería |
| v | : | Velocidad del fluido |
| g | : | Aceleración de la gravedad |
| v_{prom} | : | Velocidad promedio del viento |
| v | : | Velocidad del viento |
| Ma | : | Número de Mach |
| ρ_{aire} | : | Densidad del aire |
| μ_{aire} | : | Viscosidad del aire |
| v_{sp} | : | Velocidad del viento en la sección de pruebas |
| A_{sp} | : | Área de la sección de pruebas |
| \dot{m} | : | Flujo másico |
| Q | : | Flujo volumétrico |
| l | : | Longitud de la sección de pruebas |
| A_1 | : | Área de entrada del difusor |
| A_2 | : | Área de salida del difusor |
| v_1 | : | Velocidad de entrada del difusor |
| v_2 | : | Velocidad de salida del difusor |
| D | : | Diámetro |

| | | |
|----------------|---|--|
| R_2 | : | Radio de salida |
| R_1 | : | Radio de entrada |
| L | : | Longitud de la sección |
| D_1 | : | Diámetro hidráulico de la sección inicial |
| A_R | : | Relación de áreas |
| θ | : | Ángulo de cono del difusor |
| L | : | Longitud del difusor |
| Re | : | Número de Reynolds |
| ε | : | Rugosidad absoluta |
| k | : | Coeficiente combinado de pérdidas por fricción y expansión |
| ΔP | : | Pérdidas expresadas como diferencia presión |
| f_{pro} | : | Factor de fricción promedio |
| z | : | Altura en ecuación de Bernoulli |
| H | : | Salto hidráulico |
| $H_{pérdidas}$ | : | Pérdidas expresadas como altura |
| Pot | : | Potencia del ventilador |
| V | : | Voltaje |
| I | : | Corriente |
| Pot_{real} | : | Potencia Real |
| η | : | Eficiencia |
| \dot{Q}_e | : | Potencia eléctrica entregada al hilo caliente |
| \dot{Q}_c | : | Tasa de transferencia de calor por convección térmica |
| R | : | Resistencia eléctrica |

| | | |
|--------------|---|-----------------------------------|
| V_Z | : | Tensión Zener |
| S_Z | : | Coeficiente de temperatura |
| T | : | Temperatura del diodo |
| V_{ref} | : | Voltaje de referencia |
| P | : | Potencia eléctrica |
| ΔP | : | Diferencia de potencia |
| ΔI | : | Diferencia de corriente |
| K | : | Constante de proporcionalidad |
| E | : | Voltaje de entrada |
| V_o | : | Voltaje diferencial de salida |
| p | : | Presión |
| I_{carga} | : | Corriente de la carga |
| I_C | : | Corriente de colector |
| I_B | : | Corriente de base |
| β_{DC} | : | Ganancia del transistor en DC |
| V_{in} | : | Voltaje de base |
| R_B | : | Resistencia de base |
| V_{B-E} | : | Voltaje de la unión base – emisor |
| NA | : | Normalmente abierto |
| NC | : | Normalmente cerrado |
| CFD | : | Dinámica de fluidos computacional |

INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de un túnel de viento requiere del conocimiento previo en áreas como la dinámica de fluidos y la aerodinámica para asegurar que el resultado final sea un diseño bueno y confiable, esto significa que permita ensayar de la mejor manera perfiles aerodinámicos simulando condiciones reales que puedan manipularse de manera segura y además recabar los datos necesarios para su posterior análisis.

El capítulo uno comprende el dimensionamiento de cada uno de los elementos que conformarán el túnel de viento así como también la selección del material del que se fabricarán

La evaluación es una parte fundamental dentro del proceso de diseño ya que representa la prueba final de un prototipo exitoso y por lo general implica una prueba de laboratorio por lo que se ha hecho uso del CFD para evaluar la respuesta del túnel ante condiciones de funcionamiento.

Se presentan también los planos constructivos correspondientes para definir de manera completa lo necesario para proceder a la construcción y así mismo comprende de manera resumida el proceso de construcción del túnel de viento.

El capítulo dos comprende lo referente al sistema de instrumentación electrónico, principio de funcionamiento de los sensores y la construcción de los mismos.

Por último el capítulo tres comprende el sistema eléctrico y de control general, las relaciones entre los diferentes sistemas, los circuitos de control y la interfaz gráfica de usuario que se ha elaborado así como también una evaluación del túnel de viento en el ensayo de un perfil geométrico.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Fundamentos de la mecánica de fluidos

Los fluidos son un medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas hay una fuerza de atracción débil, se caracterizan por cambiar de forma sin que existan fuerzas restitutivas que tiendan a recuperar la forma original del mismo, entre estos se encuentran los líquidos y los gases. Los líquidos toman la forma del recipiente que los aloja, manteniendo su propio volumen, mientras que los gases carecen tanto de volumen como de forma propios.

Las leyes aplicadas a los fluidos aplican tanto para gases como líquidos a excepción de los flujos donde se tiene una variación apreciable de la densidad, es entonces cuando se tiene la dinámica de gases estudiada en la sección anterior.

1.1.1. Hipótesis del continuo

Al analizar el flujo de un fluido con expresiones matemáticas y analíticas es necesario considerar que la estructura molecular del fluido es reemplazada por un medio hipotético continuo, esto es debido a que por ejemplo la velocidad en un punto del espacio es indefinida en un medio molecular, ya que siempre sería cero, excepto cuando una molécula ocupe ese punto exacto, en ese momento sería la velocidad de la molécula y no la velocidad media de la masa de las partículas que están a su alrededor.

Este dilema se evita si se considera que la velocidad en un punto es la velocidad promedio de todas las moléculas que rodean dicho punto.

Cuándo se establece la hipótesis del continuo se puede analizar en flujo de un fluido a partir de las propiedades macroscópicas de este.

1.1.2. Viscosidad dinámica

La viscosidad es una propiedad que tiende a retardar el flujo de un fluido. Si se tienen dos placas y entre ellas hay un fluido y luego se aplica una fuerza que hace que la placa superior se mueva se apreciara una deformación del fluido.

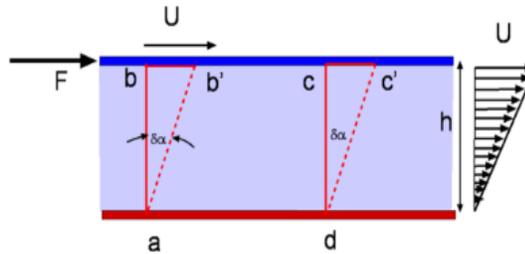


Figura 1.01. Deformación de un fluido

Como resultado del movimiento de la placa superior, el bloque original *abcdes* deformado quedando el bloque *ab'c'd* después de un tiempo *dt*. Esta es una importante propiedad del fluido ya que los puntos en contacto con la placa superior se mueven a la misma velocidad de esta, se puede entender entonces que la viscosidad de un fluido es la manifestación de la fricción entre la placa en movimiento y el fluido.

En la figura 1.1 se puede observar que la velocidad del fluido varía desde cero hasta el valor de la velocidad de la placa, se forma entonces un gradiente de velocidad causado por la viscosidad y en su forma más simple este gradiente presenta una variación lineal con la distancia de separación de las placas.

El gradiente de velocidad causa esfuerzos cortantes en el fluido que están relacionados por medio de una proporcionalidad directa dada por:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde,

| | | |
|-----------------|---|------------------------|
| τ | : | Esfuerzo Cortante |
| μ | : | Viscosidad Dinámica |
| $\frac{du}{dy}$ | : | Gradiente de Velocidad |

En la cual la constante de proporcionalidad μ es conocida como la viscosidad dinámica o absoluta, por medio de un análisis dimensional se determina que las unidades correspondientes a la viscosidad dinámica son $N s/m^2$.

La viscosidad dinámica varía con la temperatura, una fórmula conocida para calcular la viscosidad es la expresión de Sutherland:

$$\mu = \frac{bT^{3/2}}{T + S} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde,

| | | |
|-------|---|---|
| μ | : | Viscosidad Dinámica |
| b | : | Constante, para el aire posee un valor de $b = 1.458 \times 10^{-5} \text{ kg/msK}^{1/2}$ |
| S | : | Constante de Sutherland, para el aire posee un valor de $S = 110.4 \text{ K}$ |
| T | : | Temperatura del fluido |

(Carmona, 2000)

En la figura 1.2 se puede apreciar de manera gráfica el comportamiento de la ecuación 18 para el aire:

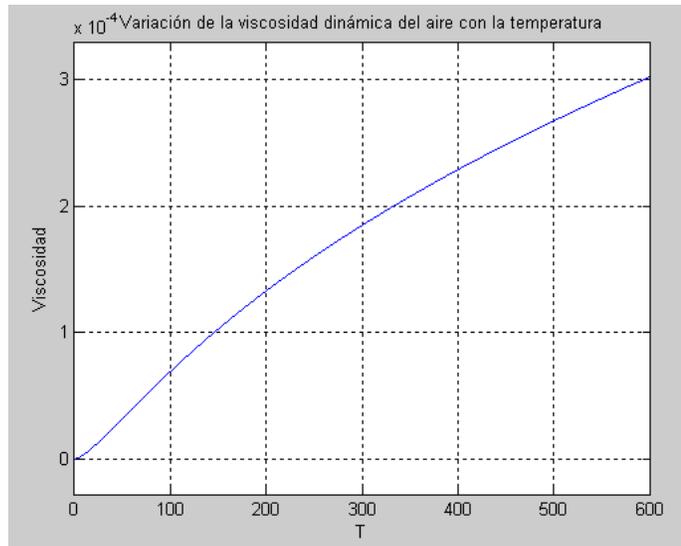


Figura 1.02. Variación de la viscosidad dinámica del aire con la temperatura en el rango de 0 a 600 Kelvin realizado con software Matlab.

Autor: José Alejandro Guzmán Herrera

1.1.3. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es simplemente una expresión que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido, es una propiedad muy importante que se presenta en el flujo de fluidos, la expresión que relaciona estas variables es:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde,

- v : Viscosidad Cinemática
- μ : Viscosidad Dinámica
- ρ : Densidad del Fluido

Las unidades de la viscosidad cinemática son: m^2/s en el sistema internacional.

1.1.4. Flujo Laminar

Se llama flujo laminar o corriente laminar, al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse. Se dice que este flujo es aerodinámico, es decir, cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente

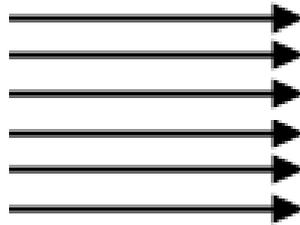


Figura 1.03. Representación del flujo laminar

Existe flujo laminar en fluidos con velocidades bajas o viscosidades altas, cuando se cumple que el número de Reynolds es inferior a 2300 (flujo interno). Más allá de este número, será un flujo turbulento

1.1.5. Flujo Turbulento

El flujo turbulento es más comúnmente desarrollado debido a que la naturaleza tiene tendencia hacia el desorden y esto en términos de flujos significa tendencia hacia la turbulencia. Este tipo de flujo se caracteriza por trayectorias circulares erráticas, semejantes a remolinos. El flujo turbulento ocurre cuando las velocidades de flujo son generalmente muy altas o en fluidos en los que las fuerzas viscosas son muy pequeñas.



Figura 1.04. Representación de flujo turbulento

La turbulencia puede originarse por la presencia de paredes en contacto con el fluido o por la existencia de capas que se muevan a diferentes velocidades. Además, un flujo turbulento puede desarrollarse bien sea en un conducto liso o en conducto rugoso.

Se define como flujo turbulento al fluido que presenta un número de Reynolds mayor a 4000 (flujo interno)

1.1.6. Teoría de Capa Límite

La capa molecular de aire en íntimo contacto con la superficie permanece adherida a esta, después existe un desplazamiento entre las diferentes capas, que conforme están a más distancia de la superficie, tienen una velocidad mayor hasta un punto en el que la velocidad de la capa de aire correspondiente es la de la corriente libre. La distancia que existe entre la superficie del perfil y el punto donde la velocidad es la de corriente libre, se denomina capa límite.

El espesor de la capa límite es la distancia del punto de velocidad cero, a otro donde la velocidad es el 99% de la corriente libre.

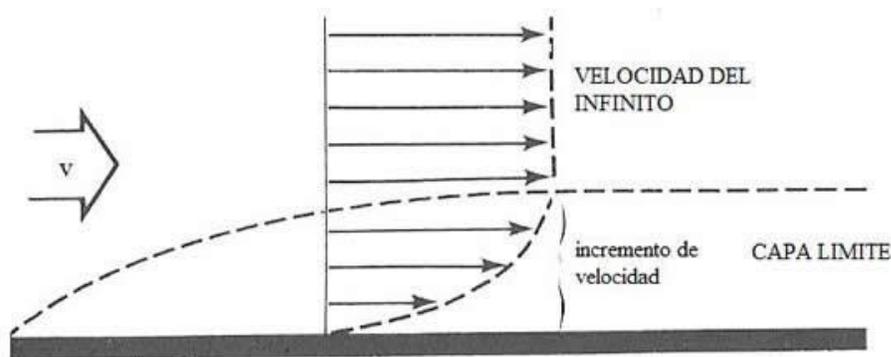


Figura 1.05. Comportamiento de la velocidad en la capa límite.

En los puntos próximos al borde de ataque, la capa límite es laminar, conforme el aire se va moviendo alejándose del borde de ataque, las fuerzas de rozamiento disipan cada vez más la energía de la corriente de aire como se observa en la figura 1.5, haciendo que el espesor de la capa límite aumente paulatinamente, hasta que a una cierta distancia del borde de ataque, la capa límite empieza a sufrir unas perturbaciones de tipo ondulatorio, que acarrearán un aumento de espesor de la capa límite, y una destrucción de la corriente laminar que existía, pasando a ser turbulenta.

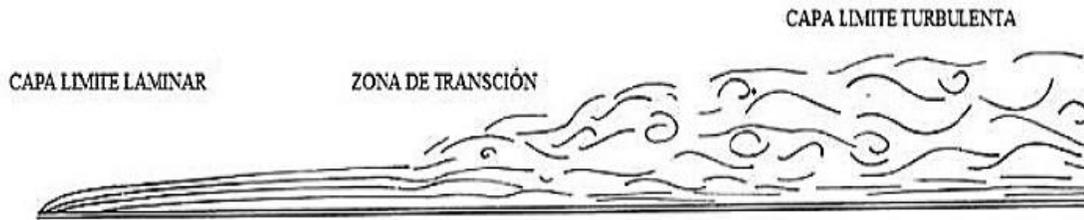


Figura 1.06.Capa límite laminar y turbulenta

La capa límite tiene una propiedad fundamental y muy útil, es que a través de ella se transmite la presión que existe en la corriente libre de aire hasta la pared, esto permite entre otras cosas la medida de la velocidad, ya que se puede medir la presión estática.

Dentro de la capa límite no se puede aplicar la ecuación de Bernoulli, porque debido a los rozamientos tiene lugar una pérdida de energía, que no se computa en dicho teorema.

La turbulencia se define como un movimiento en tres dimensiones dependiente del tiempo, en donde el vórtice de estiramiento genera fluctuaciones en la velocidad esparcidas por todas las longitudes de onda entre un mínimo determinado por las fuerzas viscosas y un máximo determinado por las condiciones de capa límite del flujo. Es el estado usual del movimiento de un fluido excepto a bajos números de Reynolds.

1.1.7. Teorema de Bernoulli

El teorema de Bernoulli afirma que energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria de flujo. En un fluido hay tres formas de energía presentes; la energía potencial, la energía cinética y la energía de flujo. Si se asumen dos puntos a lo largo de la trayectoria, distanciados uno del otro, la magnitud de las energías en un punto pueden variar con respecto al otro, pero la sumatoria total de las energías siempre será la misma.

La ecuación de Bernoulli se usa para determinar los valores de carga de presión, carga de elevación y cambio de la carga de velocidad, conforme el fluido circula a través del sistema.

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde,

| | | |
|----------|---|--|
| p | : | Presión del fluido en un punto |
| γ | : | Peso específico del fluido |
| v | : | Velocidad del fluido en un punto |
| g | : | Aceleración de la gravedad |
| z | : | Altura de un punto medida desde un nivel de referencia |

1.1.8. Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad no es más que un caso particular del principio de conservación de la masa. Se basa en que el caudal (Q) del fluido ha de permanecer constante a lo largo de toda la conducción.

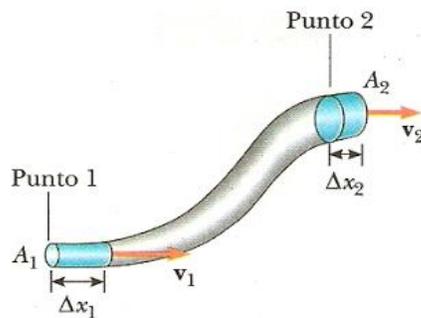


Figura 1.07. Representación de la conservación de caudal

$$Q_1 = Q_2$$
$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

Ecuación 1.5

Donde,

| | | |
|-----|---|--|
| Q | : | Caudal |
| v | : | Velocidad del fluido |
| A | : | Área de sección transversal del fluido |

1.1.9. Teoría de Darcy – Weisbach

El francés Henry Darcy y el alemán Julius Weisbach dedujeron experimentalmente una fórmula para calcular en un tubo las pérdidas por fricción.

$$\Delta h = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Donde,

| | | |
|------------|---|---|
| Δh | : | Pérdidas expresadas en forma de alturas |
| f | : | Factor de fricción |
| L | : | Longitud de tubería |
| D | : | Diámetro de tubería |
| v | : | Velocidad del fluido |
| g | : | Aceleración de la gravedad |

El factor de fricción de Darcy-Weisbach en flujo laminar es:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Donde,

| | | |
|------|---|--------------------|
| f | : | Factor de fricción |
| Re | : | Número de Reynolds |

La cual es válida para tubos lisos o rugosos.

Para el flujo turbulento, el factor de fricción de Darcy-Weisbach se deduce mediante la ecuación desarrollada por los físicos Colebrook y White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.869 \ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.523}{Re\sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Donde,

| | | |
|---------------|---|---------------------|
| f | : | Factor de fricción |
| ε | : | Rugosidad absoluta |
| D | : | Diámetro de tubería |
| Re | : | Número de Reynolds |

1.1.10. Número de Reynolds

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo, en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). Desde un punto de vista matemático, el número de Reynolds de un problema o situación concreta se define por medio de la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Donde,

| | | |
|--------|---|---|
| Re | : | Número de Reynolds |
| ρ | : | Densidad del fluido |
| v | : | Velocidad del fluido |
| D | : | Diámetro de tubería o longitud característica del sistema |
| μ | : | Viscosidad Dinámica |

1.1.11. Número de Mach

Uno de los parámetros más importantes de los flujos unidimensionales que se presentan en el análisis de flujo, es el número de Mach, el cual es la relación de la velocidad local del flujo a la velocidad local del sonido dentro del fluido:

$$Ma = \frac{v}{a} \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Donde,

| | | |
|------|---|----------------------|
| Ma | : | Número de Mach |
| v | : | Velocidad del fluido |
| a | : | Velocidad del sonido |

En el sentido de fuerzas, el número de Mach es la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas originadas por la compresibilidad del fluido.

1.1.12. Números Adimensionales

En la mecánica de fluidos se utilizan con frecuencia en la experimentación los números o parámetros adimensionales. Es importante darse cuenta que estos parámetros no son simples números sino que cada uno de ellos tiene un significado físico en específico, cada uno de estos números es la razón entre dos fuerzas y la magnitud de dicho número indica la importancia de la fuerza con la que se esté tratando.

1.1.12.1. El teorema π de Buckingham

El teorema Pi de Buckingham permite descubrir los parámetros adimensionales presentes en un determinado proceso y se enuncia de la siguiente manera:

“Si en un proceso físico hay n variables y a partir de estas hay k variables repetidas, entonces hay $n-k$ números adimensionales independientes que pueden describir el proceso”

1.1.12.2. Aplicación del teorema Pi de Buckingham

El teorema Pi de Buckingham es bastante general, sin embargo no está limitado a la mecánica de fluidos, para aplicarlo el procedimiento que se lista a continuación y de esta manera encontrar los parámetros adimensionales del proceso:

- Listar las variables que gobiernan el proceso. Estas variables deben ser independientes de cualquier otra.
- Marcar las variables repetidas.
- Encontrar el número de parámetros adimensionales existentes restando las variables repetidas de las variables totales involucradas.
- Definir los parámetros adimensionales como funciones de las variables involucradas en el proceso, cada variable estará elevada a un exponente a determinar para que el número resulte adimensional.

$$\pi_1 = A_1^{X_1} A_2^{Y_1} A_3^{Z_1} A_4$$

$$\pi_2 = A_1^{X_2} A_2^{Y_2} A_3^{Z_2} A_4$$

Y de esta manera para todos los parámetros Pi resultantes.

- Expresar cada parámetro en términos de sus dimensiones, de la siguiente manera:

Tabla 1.01. Ejemplos de parámetros Pi en términos de sus dimensiones

| Variable | Dimensión |
|-------------------------------------|-----------------------|
| F, Fuerza | ML/T^2 o MLT^{-2} |
| V, Velocidad | L/T |
| ρ, Densidad | M/L^3 |
| μ, Viscosidad | $ML^{-1}T^{-1}$ |
| D, Diámetro | L |

- Los exponentes de cada parámetro formaran ecuaciones lineales que al resolverse se obtendrán los exponentes para hacer que el número sea adimensional.
- Con los exponentes obtenidos reescribir el parámetro en función de las variables originales.

1.1.12.3. Parámetros adimensionales importantes

- **Número de Reynolds**

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

Es la razón entre la fuerza de inercia y la fuerza viscosa. Un número de Reynolds grande indica que la fuerza de inercia domina sobre la fuerza viscosa, también indicaría que la viscosidad tiene un efecto importante en una zona restringida alrededor de un cuerpo. Un número de Reynolds pequeño indicaría que la fuerza viscosa tiene un efecto considerable en una gran región alrededor de un cuerpo.

- **Número de Froude**

$$Fr = \left(\frac{V^2}{gL} \right)$$

Es la razón entre la fuerza de inercia y la fuerza gravitatoria. Este es un parámetro importante para flujos con una superficie libre como los flujos sobre los buques o barcos.

- **Número de Weber**

$$We = \left(\frac{\rho V^2 L}{\sigma} \right)$$

Es la razón entre la fuerza de inercia y la fuerza de tensión superficial. Si este número es pequeño implicaría que los efectos de tensión en la superficie son importantes.

- **Coefficiente de Presión**

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2}$$

Es un parámetro adimensional que representa la presión y es frecuentemente usado en estudios de aerodinámica. P es la presión y P_∞ es la presión de corriente libre, V_∞ es la velocidad de corriente libre.

- **Coefficientes de arrastre y sustentación**

Estos están definidos como:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad ; \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

Donde D y L son las fuerzas de arrastre y de sustentación respectivamente.

Algunos de los parámetros adimensionales más comunes se listan en la siguiente tabla:

Tabla 1.02. Algunos parámetros adimensionales importantes.

| Número Adimensional | Definición | Significado | Aplicación |
|---------------------------------|---|--|---|
| Número de Reynolds, Re | $Re = \frac{\rho VL}{\mu}$ | $\frac{\text{Fuerza de Inercia}}{\text{Fuerza Viscosa}}$ | Todas las ramas de la dinámica de fluidos |
| Número de Mach, Ma | $Ma = \frac{V}{a}$ | $\frac{\text{Velocidad del flujo}}{\text{Velocidad del sonido}}$ | Flujo compresible |
| Número de Froude, Fr | $Fr = \left(\frac{V^2}{gL}\right)$ | $\frac{\text{Fuerza de Inercia}}{\text{Fuerza Gravitatoria}}$ | Flujo de superficies libres |
| Número de Prandtl, Pr | $Pr = \frac{\mu C_p}{k}$ | $\frac{\text{Disipación Viscosa}}{\text{Conductividad Térmica}}$ | Transferencia de calor |
| Razón de calores específicos, k | $k = \frac{C_v}{C_p}$ | $\frac{\text{Entalpía}}{\text{Energía Interna}}$ | Flujo Compresible |
| Coefficiente de presión, Cp | $C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2}$ | $\frac{\text{Presión Estática}}{\text{Presión Dinámica}}$ | Aerodinámica, Hidrodinámica |
| Coefficiente de fuerza, Cx | $C_x = \frac{X}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$ | $\frac{\text{Fuerza}}{\text{Presión Dinámica} \times \text{Área}}$ | Aerodinámica, Hidrodinámica |
| Coefficiente de fricción, Cf | $C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$ | $\frac{\text{Tensión de Cizallamiento}}{\text{Presión Dinámica}}$ | Condiciones de frontera de flujo |
| Razón de rugosidad | $f = \frac{e}{L}$ | $\frac{\text{Rugosidad}}{\text{Longitud del Cuerpo}}$ | Flujo turbulento |

1.1.13. Similitud

La similitud es una importante aplicación de los parámetros adimensionales ya que establece una relación entre un modelo y un prototipo en prueba. Hay tres tipos de similitudes desde el punto de vista de la ingeniería, estos son: **Similitud Geométrica**, **Similitud Cinemática** y **Similitud Dinámica**.

- **Similitud Geométrica**

Impone que las correspondientes longitudes entre el modelo y el prototipo deben estar en una determinada proporción:

$$\left(\frac{L}{B}\right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{L}{B}\right)_{\text{prototipo}}$$

Donde L y B representan la misma longitud en el modelo y el prototipo.

- **Similitud Cinemática**

Esta similitud requiere que las escalas de longitud y tiempo sean similares entre el modelo y el prototipo, esto implica que la velocidad se corresponde en puntos determinados entre el modelo y el prototipo. Bajo esta similitud el flujo del modelo y el prototipo debe ser similar, la similitud cinemática incluye la similitud geométrica.

$$\left(\frac{v_a}{u_a}\right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{v_A}{u_A}\right)_{\text{prototipo}}$$

Donde las velocidades v y u son las componentes rectangulares de la velocidad en un punto determinado del modelo y del prototipo.

- **Similitud Dinámica**

La similitud dinámica entre el modelo y el prototipo existe cuando las fuerzas en puntos correspondientes son similares

$$\left(\frac{FA_v}{FA_h}\right)_{\text{modelo}} = \left(\frac{Fa_v}{Fa_h}\right)_{\text{prototipo}}$$

De las tres similitudes la dinámica es la más estricta.

1.2. Túneles aerodinámicos

Los túneles aerodinámicos, también llamados túneles de viento, son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la generación de una corriente fluida de propiedades conocidas para la medida de las acciones del viento sobre obstáculos de muy diversa naturaleza y más generalmente, el estudio de los fenómenos físicos en los que el aire en movimiento juega un papel dominante.

La finalidad de los ensayos en túnel aerodinámico es suministrar a los diseñadores información sobre las particularidades del viento en las proximidades del objeto en consideración, proveer información sobre la distribución de presiones y sobre las cargas globales producidas por el viento en el obstáculo objeto de interés y si la estructura es flexible y susceptible de experimentar fenómenos aeroelásticos, proporcionar los datos necesarios sobre las vibraciones inducidas por el viento, todo ello con una precisión mayor que la que se puede obtener con otros medios relativamente más económicos (Estudios analíticos, análisis numérico o, simplemente, la experiencia profesional).

A través de un túnel de viento también se pueden obtener datos de presiones, fuerzas, información de la capa límite, además de permitir visualizar las líneas de corriente para varios regímenes de flujo. Las mediciones que se hagan para obtener esa información dependerán del objeto que se esté ensayando y de los propósitos del mismo.

1.2.1. Clasificación de túneles aerodinámicos.

Existen varios tipos de túneles de viento, cada uno posee ventajas y desventajas y cada uno es más o menos adecuado según el tipo de aplicación que se requiera.

- Atendiendo al concepto de número de Mach, los túneles pueden ser de régimen subsónico, de régimen transónico, de régimen supersónico o de régimen hipersónico.
- Respecto a la cámara de ensayos, ésta puede ser de sección abierta, es decir, sin paredes laterales, o de sección cerrada.

- En relación con la geometría global del conducto, los túneles aerodinámicos pueden ser, según tengan o no conducto de retorno, de circuito fluido cerrado (con un circuito de retorno específico) o circuito fluido abierto donde el aire retorna a través del local donde está el túnel o bien se toma directamente de la atmósfera y se descarga posteriormente a ésta.

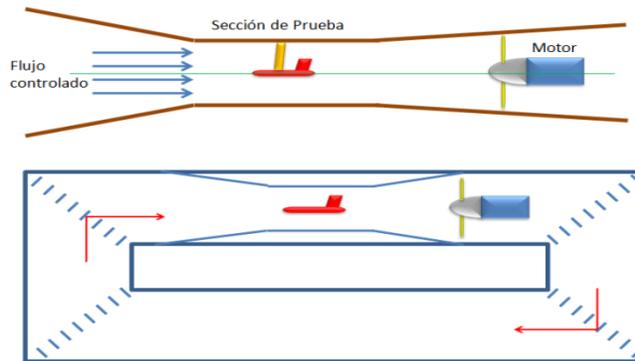


Figura 1.08. Túneles de viento abierto y cerrado

1.2.2. Partes de un túnel aerodinámico

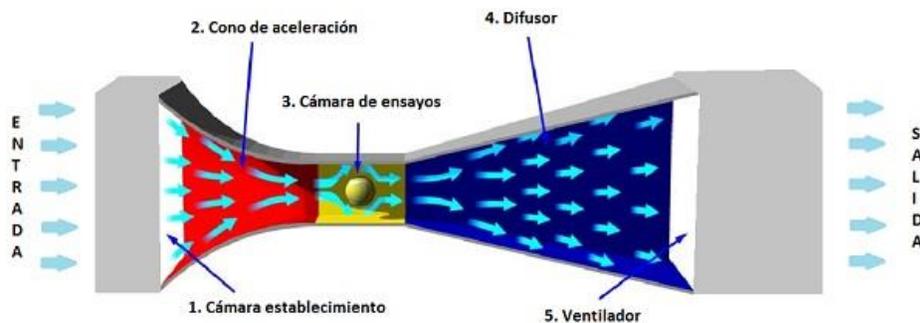


Figura 1.09. Esquema de un túnel de viento y sus partes

- **Cámara de establecimiento:** Endereza y uniformiza el flujo de aire.
- **Cono de aceleración:** Su función es acelerar la velocidad del flujo, es una tobera convergente también conocida como tubo de contracción.

La contracción tiene como finalidad que la corriente llegue a la cámara de ensayos con un perfil de velocidades uniforme, baja turbulencia y capa límite delgada. La contracción puede ser bidimensional (se contrae únicamente en la dirección de uno de los planos de simetría del túnel), lo que simplifica enormemente el proceso de construcción, o tridimensional (se contrae en las dos direcciones de los planos de simetría), lo que permite un control mayor sobre el crecimiento de la capa límite. Un valor razonable para el coeficiente de contracción o cociente entre el área de entrada a la contracción y el área de salida puede estar entre 3 y 10.

- **Cámara de ensayos:** Es la parte más importante del túnel, donde se colocan los objetos que se ensayan y también donde se efectúan las mediciones pertinentes.

La cámara de ensayos, si es cerrada, suele ser de área constante, de sección cuadrada o rectangular. En este último caso una de las dimensiones transversales suele ser alrededor de 1,4 veces la otra. La cámara de ensayos puede tener las esquinas biseladas, para minimizar interferencias entre capas límites, debiendo tener ventanas y puertas para permitir la instalación y el desmontaje de los modelos en su interior.

- **Difusor:** El difusor tiene como finalidad decelerar la corriente de modo que ésta descargue al ambiente con una velocidad lo más baja posible y de esta forma incrementar la presión y mejorar el rendimiento energético del túnel. Ante una situación de falta de espacio se puede suprimir el difusor a costa de penalizar el rendimiento del túnel (a costa de la velocidad en la cámara de ensayos o del consumo de energía eléctrica) y de aumentar el ruido aerodinámico durante su funcionamiento.
- **Ventilador:** Su función es crear un flujo de aire a una velocidad determinada. Normalmente llevan aparatos electrónicos para poder variar la velocidad y así realizar ensayos bajo las condiciones deseadas.

1.3. Instrumentación en un túnel aerodinámico

Un factor determinante en la definición de las prestaciones de un túnel aerodinámico es el de la instrumentación disponible, que puede ser muy variable dependiendo del tipo de ensayos que se desee o pueda realizar. Los elementos clásicos del equipamiento de un túnel aerodinámico son los transductores de presión y de cargas y los transductores de velocidad.

Un transductor es un dispositivo que al recibir una señal de entrada de un cierto sistema suministra una señal de salida a otro. Los transductores convencionales de presión funcionan gracias a algún elemento elástico que se

deforma debido a la señal de entrada del sistema de presiones, proporcionando una señal de desplazamiento al sistema mecánico de medida.

Muchos instrumentos llevan además una segunda unidad que transforma el desplazamiento en una señal eléctrica, lo que facilita la automatización del proceso de medida, debido a la facilidad con la que las señales eléctricas pueden ser amplificadas, transmitidas, controladas y leídas.

Los transductores que incorporan en su diseño esta segunda unidad eléctrica, son conocidos como transductores eléctricos y se pueden clasificar en activos o pasivos: un transductor eléctrico activo es aquel que genera directamente una señal eléctrica en función del desplazamiento del sistema mecánico, mientras que un transductor pasivo es, al contrario, el que requiere una entrada eléctrica auxiliar que es modificada en función del desplazamiento del sistema elástico.

Los manómetros de agua o de mercurio son transductores de presión mecánicos, que transforman una señal de presión en una determinada altura de la columna de líquido.



Figura 1.10. Diferentes tipos de manómetros

Hay transductores que utilizan exclusivamente elementos elásticos sólidos: como tubos en espiral cuya deformación depende de la presión en su interior, fuelles, diafragmas, etc., aunque este tipo de transductores suelen ser de poca aplicación en un laboratorio debido a la conveniencia de que una señal de salida sea eléctrica. Respecto a los transductores eléctricos, un ejemplo típico de transductores activos son los piezoeléctricos, mientras que en el grupo de los pasivos están incluidos los basados en el uso de células extensiométricas.

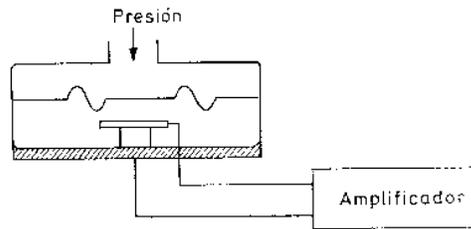


Figura 1.11. Esquema de funcionamiento de un transductor piezoeléctrico

También son transductores pasivos las células de carga. En esencia, una célula de carga es una barra metálica instrumentada con extensómetros. Al aplicar una carga axial, la deformación a tracción o compresión de la barra, medida con los extensómetros, proporciona una medición de la carga aplicada.



Figura 1.12. Diferentes tipos de células de carga

Respecto a los transductores de velocidad, sin duda el más conocido es el tubo de Pitot. La ecuación de Bernoulli establece la relación entre la presión estática y la dinámica a lo largo de una línea de corriente en un movimiento potencial, incompresible y estacionario. Esta ecuación expresa que la presión total de todas las partículas fluidas que discurren a lo largo de una misma línea de corriente es la misma.

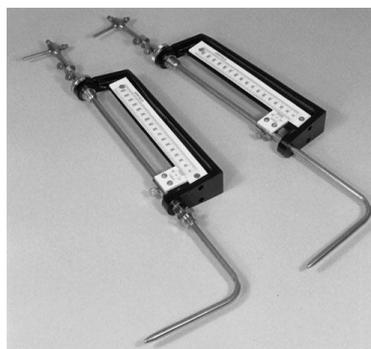


Figura 1.13. Tubos de Pitot

Otro modo, más sofisticado, de medir velocidades en fluidos es el que se conoce con el nombre de anemometría de hilo caliente, que se basa en el hecho de que un hilo conductor calentado eléctricamente sometido a una corriente incidente es enfriado por ésta. La resistencia eléctrica del hilo depende de la temperatura y este hecho proporciona un medio para medir la temperatura fácilmente o para mantenerla constante si esto es lo que se desea. El hilo suele ser de diámetro muy pequeño (menos de una décima de milímetro) y está integrado en un puente de Wheatstone para medir con precisión los cambios de resistencia eléctrica del hilo, modificándose la alimentación de forma que la temperatura del hilo permanezca constante. La potencia eléctrica requerida para mantener la temperatura constante proporciona una medida de la refrigeración producida por el movimiento del aire, y ésta, de la velocidad.



Figura 1.14.Anemómetro de hilo caliente.

1.4. Ventiladores

El ventilador es una maquina rotativa que transmite energía al fluido que circula por ella, bajo la forma de aumento de presión.

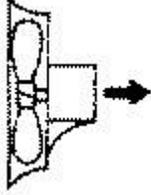
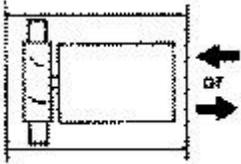
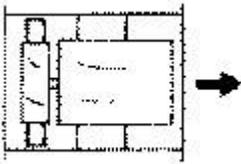
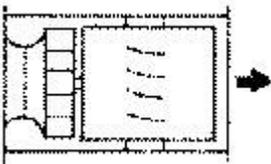
Los ventiladores se clasifican en dos grandes grupos:

- Ventiladores axiales
- Ventiladores centrífugos

1.4.1. Ventiladores axiales

Son aquellos en los cuales el flujo de aire sigue la dirección del eje del mismo. Se suelen llamar helicoidales, pues el flujo a la salida tiene una trayectoria con esa forma. En líneas generales son aptos para mover grandes caudales a bajas presiones. Con velocidades periféricas medianamente altas son en general ruidosos. Suelen sub-clasificarse, por la forma de su envolvente, de la siguiente manera:

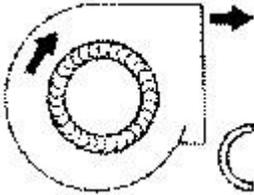
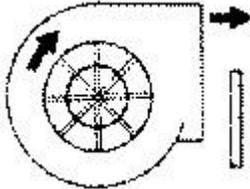
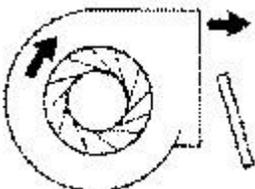
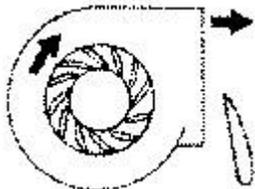
Tabla 1.03. Clasificación de ventiladores centrífugos por la forma de su envolvente

| VENTILADOR | DESCRIPCIÓN | APLICACIÓN |
|--|---|---|
|  HELICOIDAL | <p>Ventiladores aptos para mover grandes caudales de aire con bajas presiones. Son de bajo rendimiento. La transferencia de energía se produce mayoritariamente en forma de presión dinámica.</p> | <p>Se aplica en circulación y extracción de aire en naves industriales. Se instalan en pared sin ningún conducto. Utilizados con objetivo de renovación de aire.</p> |
|  TUBE AXIAL | <p>Tienen rendimiento algo superior al anterior y es capaz de desarrollar una presión estática mayor. Por su construcción es apto para intercalar en conductos.</p> | <p>Se utiliza en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado que requieran altos caudales con presión media a baja. También se utiliza en algunos sistemas industriales como cabinas de pintura y extracciones localizadas de humos.</p> |
|  VANE AXIAL | <p>Con diseños de palas AIRFOIL, permiten obtener presiones medias y altas con buenos rendimientos. Las palas pueden ser fijas o de ángulo ajustable</p> | <p>Tiene aplicaciones similares a los TUBEAXIAL, pero con la ventaja de tener un flujo más uniforme y la posibilidad de obtener presiones mayores. Para una determinada prestación es relativamente más pequeño que el ventilador centrífugo equiparable.</p> |
|  CENTRIFOIL | <p>Se trata de un ventilador con rotor centrífugo pero de flujo axial. Es decir reúne las ventajas del ventilador centrífugo y la facilidad de montaje de un axial con el consiguiente ahorro de espacio.</p> | <p>Las mismas aplicaciones que el ventilador VANEAXIAL.</p> |

1.4.2. Ventiladores centrífugos

Son aquellos en los cuales el flujo de aire cambia su dirección, en un ángulo de 90°, entre la entrada y salida. Se suelen sub-clasificar, según la forma de las palas o álabes del rotor, de la siguiente manera:

Tabla 1.04. Clasificación de ventiladores centrífugos según la forma de los álabes del rotor

| VENTILADOR | DESCRIPCION | APLICACION |
|--|---|---|
|  <p>CURVADAS HACIA ADELANTE</p> | <p>Rotor con palas curvadas hacia adelante, apto para caudales altos y bajas presiones. No es autolimitante de potencia. Para un mismo caudal y un mismo diámetro de rotor gira a menos vueltas con menor nivel sonoro.</p> | <p>Se utiliza en instalaciones de ventilación, calefacción y aire acondicionado de baja presión.</p> |
|  <p>PALAS RADIALES</p> | <p>Rotor de palas radiales. Es el diseño más sencillo y de menor rendimiento. Es muy resistente mecánicamente, y el rodete puede ser reparado con facilidad. El diseño le permite ser autolimpiante. La potencia aumenta de forma continua al aumentar el caudal.</p> | <p>Empleado básicamente para instalaciones industriales de manipulación de materiales. Se le puede aplicar recubrimientos especiales anti-desgaste. También se emplea en aplicaciones industriales de alta presión.</p> |
|  <p>INCLINADAS HACIA ATRAS</p> | <p>Rotor de palas planas o curvadas inclinadas hacia atrás. Es de alto rendimiento y autolimitador de potencia. Puede girar a velocidades altas.</p> | <p>Se emplea para ventilación, calefacción y aire acondicionado. También puede ser usado en aplicaciones industriales, con ambientes corrosivos y/o bajos contenidos de polvo.</p> |
|  <p>AIRFOIL</p> | <p>Similar al anterior pero con palas de perfil aerodinámico. Es el de mayor rendimiento dentro de los ventiladores centrífugos. Es autolimitante de potencia.</p> | <p>Es utilizado generalmente para aplicaciones en sistemas de HVAC y aplicaciones industriales con aire limpio. Con construcciones especiales puede ser utilizado en aplicaciones con aire sucio.</p> |

1.5. Motores paso a paso

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos.

La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 1.8° , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 200 para el segundo caso (1.8°), para completar un giro completo de 360° .

Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas está energizada, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

1.5.1. Principio de Funcionamiento de los motores paso a paso



Figura 1.15. Motor paso a paso

Estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator.

Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador.

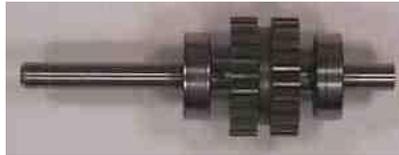


Figura 1.16. Rotor de motor paso a paso

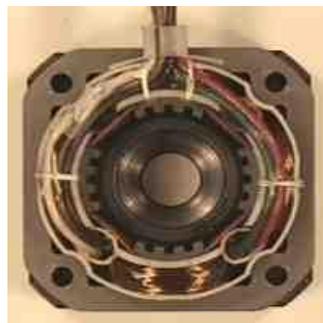


Figura 1.17. Estator de motor paso a paso

Existen dos tipos de motores paso a paso de imán permanente:

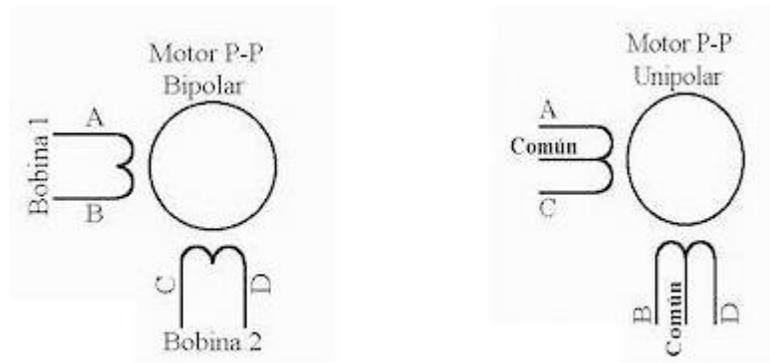


Figura 1.18. Motor paso a paso Bipolar y Unipolar

Bipolar: Estos tiene generalmente cuatro cables de salida (figura). Necesitan ciertas secuencias para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento.

Unipolar: Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexionado interno (figura). Este tipo se caracteriza por ser más simple de controlar.

1.5.2. Secuencias para manejar motores paso a paso Bipolares

Como se menciona anteriormente, estos motores necesitan la inversión de la corriente que circula en sus bobinas en una secuencia determinada. Cada inversión de la polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, cuyo sentido de giro está determinado por la secuencia seguida.

A continuación se puede ver la tabla con la secuencia necesaria para controlar motores paso a paso del tipo Bipolares:

| PASO | TERMINALES | | | |
|------|------------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| 1 | +V | -V | +V | -V |
| 2 | +V | -V | -V | +V |
| 3 | -V | +V | -V | +V |
| 4 | -V | +V | +V | -V |

Figura 1.19. Secuencia de motor paso a paso bipolar

1.5.3. Secuencias para manejar motores paso a paso Unipolares

Existen tres secuencias posibles para este tipo de motores, las cuales se detallan a continuación. Todas las secuencias comienzan nuevamente por el paso 1 una vez alcanzado el paso final (4 u 8). Para revertir el sentido de giro, simplemente se deben ejecutar las secuencias en modo inverso.

Secuencia Normal: Esta es la secuencia más usada y la que generalmente recomienda el fabricante. Con esta secuencia el motor avanza un paso por vez y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención.

| PASO | Bobina A | Bobina B | Bobina C | Bobina D | |
|------|----------|----------|----------|----------|--|
| 1 | ON | ON | OFF | OFF | |
| 2 | OFF | ON | ON | OFF | |
| 3 | OFF | OFF | ON | ON | |
| 4 | ON | OFF | OFF | ON | |

Figura 1.20. Secuencia normal de un motor paso a paso Unipolar

Secuencia del tipo wave drive: En esta secuencia se activa solo una bobina a la vez. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave. La contrapartida es que al estar solo una bobina activada, el torque de paso y retención es menor.

| PASO | Bobina A | Bobina B | Bobina C | Bobina D | |
|------|----------|----------|----------|----------|--|
| 1 | ON | OFF | OFF | OFF | |
| 2 | OFF | ON | OFF | OFF | |
| 3 | OFF | OFF | ON | OFF | |
| 4 | OFF | OFF | OFF | ON | |

Figura 1.21. Secuencia Wave Drive de motor paso a paso Unipolar

Secuencia del tipo medio paso: En esta secuencia se activan las bobinas de tal forma de brindar un movimiento igual a la mitad del paso real. Para ello se

activan primero 2 bobinas y luego solo 1 y así sucesivamente. Como se ve en la tabla la secuencia completa consta de 8 movimientos en lugar de 4.

| PASO | Bobina A | Bobina B | Bobina C | Bobina D | |
|------|----------|----------|----------|----------|--|
| 1 | ON | OFF | OFF | OFF | |
| 2 | ON | ON | OFF | OFF | |
| 3 | OFF | ON | OFF | OFF | |
| 4 | OFF | ON | ON | OFF | |
| 5 | OFF | OFF | ON | OFF | |
| 6 | OFF | OFF | ON | ON | |
| 7 | OFF | OFF | OFF | ON | |
| 8 | ON | OFF | OFF | ON | |

Figura 1.22.Secuencia de medio paso de un motor paso a paso Unipolar

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

2.1. Tipo de túnel de viento a diseñar y construir

Los túneles de viento se clasifican atendiendo al número de Mach, respecto a la cámara de ensayos y en relación a la geometría global del conducto, para el diseño del prototipo hay que considerar estas tres clasificaciones seleccionando para cada una de ellas el modelo que se ajuste de mejor manera según las necesidades y limitaciones.

- Atendiendo al número de Mach el túnel puede ser hipersónico, supersónico, transónico o subsónico. Para el prototipo se tendrá un túnel subsónico o de baja velocidad debido a que es el tipo de túnel que presenta un número reducido de limitantes técnicas en comparación con los otros tipos de túneles además de ajustarse al tipo de ensayo que se quiere efectuar.
- Respecto a la cámara de ensayos se optará por una cámara con paredes laterales debido a que se busca un túnel compacto, una cámara de ensayos sin paredes requeriría el uso de una habitación para tal fin.
- Con relación a la geometría global del ducto los túneles pueden ser de circuito abierto o de circuito cerrado, en este caso se optará por un diseño de circuito abierto debido a que presenta menos limitantes técnicas.

2.2. Características del túnel de viento

Las características del prototipo serán las siguientes:

- Túnel de viento subsónico de circuito abierto
- Uniformidad del flujo en la sección de pruebas
- Longitud total máxima del túnel no mayor a 1.5 m
- Velocidad máxima en la sección de pruebas alrededor de 15 m/s
- Sección de pruebas de acrílico transparente cuadrada
- Diámetro equivalente de sección transversal en la cámara de pruebas igual a 16 cm

Durante el paso del aire dentro del túnel de viento se tendrán pérdidas de presión debidas a la rugosidad de las paredes del material, estas pérdidas de presión se modelan con la ecuación de Darcy – Weisbach.

Parte de la caracterización del túnel de viento consiste en encontrar estas pérdidas de presión que se traducen en pérdidas de energía del fluido, en base a esto se selecciona el tipo de ventilador a utilizar o bien si ya se tiene uno, ajustar las dimensiones del túnel de manera que las pérdidas de energía sean pequeñas en comparación con la energía aportada por este.

Las variables de diseño son entonces:

- Velocidad promedio máxima del aire en la cámara de pruebas
- Caudal y flujo másico de aire
- Pérdidas de presión en las diferentes secciones del túnel
- Rugosidad de las paredes del túnel dadas por el coeficiente de rugosidad
- Potencia requerida para impulsar la masa de aire
- Sección transversal de cada elemento.

2.3. Diseño del túnel de viento

Para iniciar el diseño del túnel de viento se harán las siguientes aproximaciones:

- Régimen estacionario
- Velocidad promedio en la sección de pruebas: $v_{prom} = 15 \text{ m/s}$
- Se supone flujo incompresible (Si $v < 100 \text{ m/s}$ entonces $Ma < 0.3$, se considera flujo incompresible)
- Para el aire: $\rho_{aire} = 1.225 \text{ kg/m}^3$; $\mu_{aire} = 1.8794 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$

En base a las consideraciones anteriores se comprueba el flujo másico de aire de la siguiente manera:

$$\dot{m} = \rho_{aire} v_{sp} A_{sp} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde,

| | | |
|---------------|---|------------------------------------|
| \dot{m} | : | Flujo másico |
| ρ_{aire} | : | Densidad del aire |
| v_{sp} | : | Velocidad de la sección de pruebas |
| A_{sp} | : | Área de la sección de pruebas |

$$\dot{m} = \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(15 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \left(\frac{\pi}{4}\right) (0.16 \text{ m})^2$$

$$\dot{m} = 0.369 \text{ kg/s}$$

Con el flujo másico se procede a calcular el caudal de aire:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho_{aire}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$Q = \frac{0.369 \text{ kg/s}}{1.225 \text{ kg/m}^3}$$

$$Q = 0.301 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se establecerá la longitud total de la sección de pruebas en 35 cm.

Se calcula el área equivalente de una cámara de pruebas cuadrada con la misma sección transversal de un cilindro, con lo cual la longitud del lado de la cámara de pruebas resulta:

$$A_{sp} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0.16)^2 = 0.020 \text{ m}^2$$

$$A_{sp} = l^2 l = \sqrt{A_{sp}} = \sqrt{0.020 \text{ m}^2} = 0.141 \text{ m}$$

Con lo cual el lado de la sección queda definido con un valor de $l = 0.14 \text{ m}$

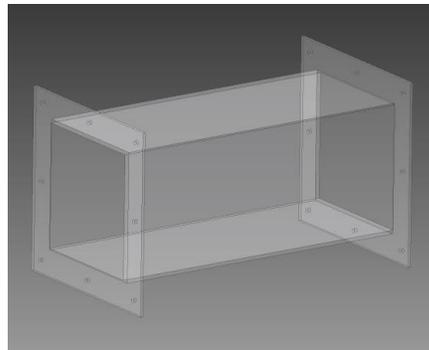


Figura 2.01. Sección de Pruebas

Autor: José Alejandro Guzmán

2.3.1. Diseño del difusor

El difusor es el elemento que permite que el fluido se expanda reduciendo suavemente su velocidad a la salida, manteniendo uniformes las líneas de corriente en la cámara de pruebas.

Los difusores se dimensionan con la relación de áreas entrada – salida, el área a la entrada del difusor se conoce y es la misma de la cámara de pruebas.

$$A_1 = 0.020 \text{ m}^2$$

Se establecen las siguientes condiciones:

- Temperatura promedio $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$
- Constante de los gases ideales $R = 0.286 \text{ kJ/kg.K}$
- Coeficiente adiabático $k = 1.4$
- Presión $p = 101.32 \text{ kPa}$ a la salida del difusor
- Densidad $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Se calcula la velocidad del sonido a partir de:

$$a = \sqrt{kRT} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

| | | |
|-----|---|--------------------------------|
| a | : | Velocidad del sonido |
| k | : | Coeficiente adiabático |
| R | : | Constante de los gases ideales |
| T | : | Temperatura del fluido |

$$a = \sqrt{(1.4)(0.283 \times 10^3 \text{ J/kg.K})(298)} = 337.5 \text{ m/s}$$

Calculando el número de Mach:

$$Ma = \frac{v}{a}$$

$$Ma = \frac{15 \text{ m/s}}{337.5 \text{ m/s}} = 0.044$$

Debido a que se obtiene un número de Mach inferior a 0.3 se considera un flujo incompresible y se puede obtener el área de la sección de salida del difusor de manera directa usando la ecuación de continuidad:

$$Q_1 = Q_2$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

Donde v_1 es la velocidad a la entrada del difusor que corresponde a la misma velocidad de la sección de pruebas (15 m/s) y A_1 que es el área a la entrada del difusor corresponde de igual manera al área de sección transversal de la cámara de pruebas.

La velocidad a la salida del difusor se establecerá en 3 m/s ya que una reducción hasta velocidades menores implica dimensiones más grandes para el difusor, con lo anterior el área de salida es:

$$A_2 = \frac{v_1}{v_2} A_1$$

$$A_2 = \frac{15 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \frac{\text{m}}{\text{s}}} (0.020 \text{ m}^2) = 0.1 \text{ m}^2$$

La relación de áreas es entonces:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{0.1}{0.020} = 5$$

Y el diámetro en la sección final del difusor es:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0.1 \text{ m}^2)}{\pi}} = 0.36 \text{ m}$$

Para una fabricación más sencilla el difusor tendrá ambas secciones cuadradas, quedando la primera definida de iguales dimensiones a la cámara de pruebas y la segunda de la siguiente manera:

$$A_2 = l_2^2 \quad ; \quad l_2 = \sqrt{A_2} = \sqrt{0.1 \text{ m}^2} = 0.32 \text{ m}$$

Para calcular la longitud del difusor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\tan \theta = \left(\frac{R_2 - R_1}{L} \right) = \left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R} - 1}{L/D_1} \right) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde,

| | | |
|-------|---|---|
| R_1 | : | Radio de salida |
| R_2 | : | Radio de entrada |
| L | : | Longitud de la sección |
| D_1 | : | Diámetro hidráulico de la sección inicial |
| A_R | : | Relación de áreas |

Los radios de entrada y salida se definen como la mitad del diámetro hidráulico, que a su vez está definido por:

$$R_1 = \frac{D}{2} = \frac{2}{2} \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.020 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.08 \text{ m}$$

$$R_2 = \frac{D}{2} = \frac{2}{2} \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.1 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.18 \text{ m}$$

La ecuación anterior se obtiene directamente de analizar la geometría de un difusor:

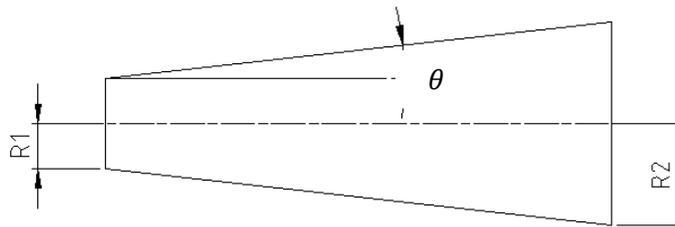


Figura 2.02.Esquema del difusor

En el diseño de difusores se recomienda un ángulo de cono menor o igual a 10° , para minimizar las pérdidas y aumentar la eficiencia del difusor, debido a que el ángulo de cono variará con la longitud, se resolverá la ecuación anterior con diversos valores de longitud para determinar las dimensiones que más se adapten a la longitud máxima del túnel, establecida en 1.5 m

(Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, 2010)

Resolviendo la ecuación anterior con MATLAB (Ver anexo 1) para valores de longitud desde cero hasta un metro se tienen los siguientes resultados:

Tabla 2.01.Ángulo de cono del difusor para diferentes longitudes

| Longitud (m) | Ángulo de Cono (θ) | Longitud (m) | Ángulo de Cono (θ) |
|---------------------|---|---------------------|---|
| 0.0 | 90° | 0.60 | 9.46° |
| 0.05 | 63.43° | 0.65 | 8.74° |
| 0.10 | 45.00° | 0.70 | 8.13° |
| 0.15 | 33.69° | 0.75 | 7.59° |
| 0.20 | 26.56° | 0.80 | 7.12° |
| 0.25 | 21.80° | 0.85 | 6.70° |
| 0.30 | 18.43° | 0.90 | 6.34° |
| 0.35 | 15.94° | 0.95 | 6.00° |
| 0.40 | 14.03° | 1.00 | 5.71° |
| 0.45 | 12.52° | | |
| 0.50 | 11.30° | | |
| 0.55 | 10.30° | | |

En base a los resultados obtenidos en la tabla anterior, los valores que se adaptan tanto a un valor adecuado de ángulo de cono como de longitud del difusor son:

$$L = 0.65 \text{ m} \quad ; \quad \theta = 8.74^\circ \cong 9.0^\circ$$

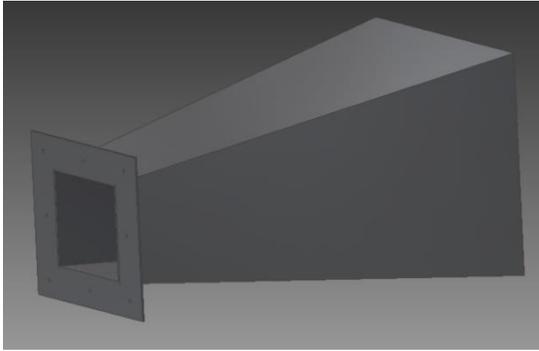


Figura 2.03.Difusor

Autor: José Alejandro Guzmán Herrera

2.4. Cálculo de Pérdidas y Selección de Materiales

Teniendo definidas las dimensiones de la sección de pruebas y del difusor se procede a calcular las pérdidas en forma de caídas de presión que estos elementos provocan.

- **Pérdidas en Cámara de Pruebas**

El cálculo de las pérdidas en la sección de pruebas se realiza por medio de la ecuación de Darcy – Weisbach la cuál involucra además de la velocidad y los parámetros geométricos del ducto el coeficiente de fricción.

Para el cálculo de las pérdidas se efectuará antes el cálculo del número de Reynolds ya que este indicará si se puede utilizar una ecuación simplificada para el factor de fricción o se debe acudir a ecuaciones iterativas:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{\left(15 \frac{m}{s}\right)(0.16 m)(1.225 kg/m^3)}{1.8794 \times 10^{-5} N \cdot s/m^2} = 156,432.90$$

El valor obtenido se encuentra dentro del rango valido para la ecuación de Karman - Prandtl:

$$f = \frac{1.325}{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + 5.74/Re^{0.9}\right) \right]^2} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

(Streeter, 2000)

Donde,

| | | |
|---------------|---|--|
| f | : | Factor de fricción |
| Re | : | Número de Reynolds |
| D | : | Diámetro hidráulico |
| ε | : | Rugosidad Absoluta, $\varepsilon = 0.001$ para superficies lisas |

$$f = \frac{1.325}{\left[\ln\left(\frac{0.001}{3.7(0.16)} + 5.74/(156,432.90)^{0.9}\right) \right]^2} = 0.033$$

Las pérdidas resultantes son entonces:

$$\Delta h = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = (0.033) \frac{(0.35)}{(0.16)} \frac{(15)^2}{2(9.81)} = 0.8278 \text{ m}$$

Expresada en términos de presión:

$$\Delta P = \rho g \Delta h = (1.225)(9.81)(0.8278) = 9.95 \text{ Pa}$$

- **Pérdidas en el Difusor**

En el difusor las pérdidas ocurren por fricción contra las paredes del mismo y por expansión del fluido, la combinación de las dos pérdidas viene dada por el coeficiente:

$$k = \left[\frac{f}{8 \tan \frac{\theta}{2}} + 0.6 \tan \frac{\theta}{2} \right] \quad \text{Ecuación 2.6}$$

(Universidad Nacional de Ingeniería - Perú, 2008)

Donde,

- k : Coeficiente combinado de pérdidas por fricción y expansión
- f : Factor de fricción
- θ : Ángulo de cono del difusor

Donde θ es el ángulo de cono y f es el factor de fricción, el cual se calcula con la fórmula de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.869 \ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.523}{Re\sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 2.7}$$

(Streeter, 2000)

Donde:

| | | |
|---------------|---|---------------------|
| f | : | Factor de fricción |
| ε | : | Rugosidad Absoluta |
| D | : | Diámetro Hidráulico |
| Re | : | Número de Reynolds |

Y finalmente las pérdidas se calculan por medio de la ecuación:

$$\Delta h = k \frac{\rho v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

(Universidad Nacional de Ingeniería - Perú, 2008)

Donde,

| | | |
|------------|---|---|
| Δh | : | Pérdidas expresadas en forma de alturas |
| k | : | Coficiente combinado de pérdidas por fricción y expansión |
| ρ | : | Densidad del fluido |
| v | : | Velocidad del fluido |
| g | : | Aceleración de la gravedad |

Para el cálculo de las pérdidas del difusor se debe establecer primero el factor de fricción con la fórmula de Colebrook, la cual se resuelve por medio de un procedimiento iterativo asignando un valor del coeficiente de fricción, así mismo y para el caso del difusor en el que el diámetro hidráulico cambia con la longitud, se debe efectuar el cálculo de f para diferentes valores del diámetro hidráulico.

Con los valores del coeficiente de fricción, se calcula entonces el coeficiente k para cada sección y por último la pérdida para cada sección.

Para obtener la pérdida total se suman las pérdidas de cada sección, en la realización de dichos cálculos se divide el difusor en secciones de 0.05 m de longitud y se encontrarán los parámetros mencionados anteriormente para cada uno de ellos.

El material del que se fabricará el difusor será una base de acrílico transparente y sobre esta una capa de fibra de vidrio, debido a que el flujo de aire estará en contacto con la base de acrílico, se utilizará la rugosidad absoluta para tuberías. Se calcula con MATLAB (Ver anexo 2) ahora el diámetro hidráulico de cada sección y el número de Reynolds correspondiente:

Tabla 2.02.Área, Diámetro Hidráulico, Velocidad y número de Reynolds para cada una de las secciones del difusor

| Longitud (m) | Área (m²) | Diámetro Hidráulico (m) | Velocidad (m/s) | Reynolds (Re) |
|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------|----------------------|
| 0.0 | 0.020 | 0.1580 | 15.3571 | 158,130 |
| 0.05 | 0.0246 | 0.1758 | 12.3942 | 142,060 |
| 0.10 | 0.0295 | 0.1937 | 10.2128 | 128,950 |
| 0.15 | 0.0352 | 0.2116 | 8.5604 | 118,060 |
| 0.20 | 0.0414 | 0.2295 | 7.2788 | 108,860 |
| 0.25 | 0.0480 | 0.2473 | 6.2649 | 101,000 |
| 0.30 | 0.0552 | 0.2652 | 5.4490 | 94,190 |
| 0.35 | 0.0629 | 0.2831 | 4.7827 | 88,250 |
| 0.40 | 0.0711 | 0.3009 | 4.2315 | 83,000 |
| 0.45 | 0.0798 | 0.3188 | 3.7704 | 78,350 |
| 0.50 | 0.0890 | 0.3367 | 3.3808 | 74,190 |
| 0.55 | 0.0987 | 0.3546 | 3.0485 | 70,450 |
| 0.60 | 0.1089 | 0.3724 | 2.7630 | 67,070 |
| 0.65 | 0.1196 | 0.3903 | 2.5157 | 64,000 |

En base a la tabla anterior se calculan con MATLAB los parámetros indicados (Ver anexo 3)

Tabla 2.03.Factor de fricción, Coeficiente de pérdidas, Pérdidas y Caída de presiones para cada una de las secciones del difusor

| Longitud (m) | f | Coeficiente k | Δh (m) | ΔP (Pa) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 0.0 | 0.0181 | 0.0760 | 1.1186 | 13.443 |
| 0.05 | 0.0183 | 0.0763 | 0.7317 | 8.7927 |
| 0.10 | 0.0184 | 0.0764 | 0.4978 | 5.9824 |
| 0.15 | 0.0186 | 0.0768 | 0.3512 | 4.2206 |
| 0.20 | 0.0187 | 0.0769 | 0.2545 | 3.0578 |
| 0.25 | 0.0189 | 0.0772 | 0.1893 | 2.2746 |
| 0.30 | 0.0190 | 0.0774 | 0.1435 | 1.7243 |
| 0.35 | 0.0192 | 0.0777 | 0.1110 | 1.3338 |
| 0.40 | 0.0194 | 0.0780 | 0.0872 | 1.0484 |
| 0.45 | 0.0196 | 0.0784 | 0.0695 | 0.8357 |
| 0.50 | 0.0198 | 0.0787 | 0.0561 | 0.6746 |
| 0.55 | 0.0199 | 0.0788 | 0.0457 | 0.5497 |
| 0.60 | 0.0201 | 0.0791 | 0.0377 | 0.4533 |
| 0.65 | 0.0202 | 0.0793 | 0.0313 | 0.3766 |
| Total | | | 3.7254 m | 43.43 Pa |

- **Sección de conexión ventilador – cámara de pruebas**

Además de las pérdidas que se dan en la cámara de pruebas y el difusor se tienen presentes en la sección de conexión entre el ventilador y la cámara de pruebas, este elemento es necesario debido a que el ventilador disponible posee una sección de salida circular y la cámara de pruebas posee una sección cuadrada.

Las pérdidas en esta sección se calculan a través de la ecuación de Darcy – Weisbach debido a que es una sección de longitud corta (5 cm) pero de igual área a pesar de que hay un cambio en la geometría, se calculara un factor de fricción promedio para la evaluación de las pérdidas:

Tabla 2.04. Área, Diámetro Hidráulico, Velocidad y número de Reynolds para cada una de las secciones del elemento de conexión

| Longitud (m) | Área (m ²) | Diámetro Hidráulico (m) | Velocidad (m/s) | Reynolds (Re) |
|--------------|------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|
| 0.0 | 0.020 | 0.16 | 15.3571 | 158,130 |
| 0.05 | 0.020 | 0.1580 | 15.00 | 154,477.5 |

Tabla 2.05. Factor de fricción de la sección de conexión

| Longitud (m) | <i>f</i> |
|--------------|----------|
| 0.0 | 0.0181 |
| 0.05 | 0.0183 |

$$f_{pro} = 0.0182$$

$$\Delta h = f \frac{L v^2}{D 2g} = (0.0182) \frac{(0.05) (15.18)^2}{(0.159) 2(9.81)} = 0.067 \text{ m}$$

Expresada en términos de presión:

$$\Delta P = \rho g \Delta h = (1.225)(9.81)(0.067) = 0.8077 Pa$$

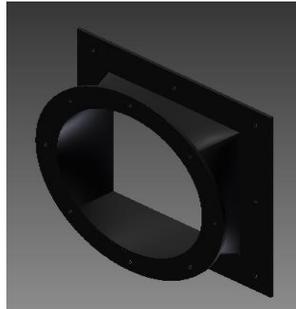


Figura 2.04.Sección de conexión ventilador – sección de pruebas.

Autor: José Alejandro Guzmán

Con los datos obtenidos anteriormente las pérdidas y la caída de presión total son:

$$\Delta h_{total} = 0.8278 m + 3.7254 m + 0.067 m = 4.62 m$$

$$\Delta P_{total} = 9.95 Pa + 43.43 Pa + 0.8077 Pa = 54.88 Pa$$

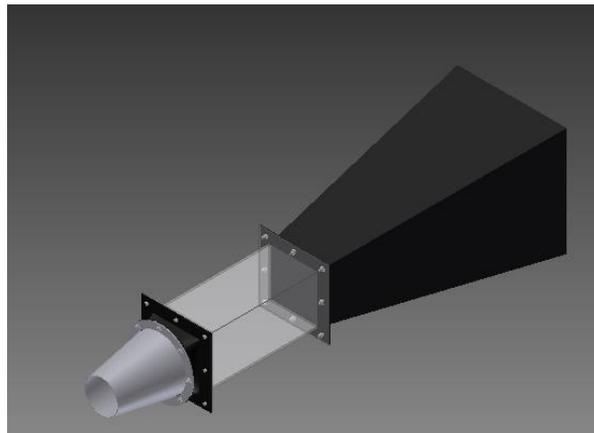


Figura 2.05.Modelo terminado del túnel de viento.

Autor: José Alejandro Guzmán

2.5. Dimensionado y selección del ventilador

Para la selección adecuada del ventilador se deben tomar en cuenta las pérdidas dentro del túnel las cuales fueron calculadas anteriormente, debido a que ya se cuenta con un ventilador de tipo axial con carcasa en forma de cono truncado que presenta la velocidad de salida óptima este se colocará directamente conectado a la cámara de pruebas por medio de la sección de conexión.

Lo que se hará en esta sección es una comprobación de que el ventilador con el que se cuenta cumple con los requerimientos necesarios, para esto se hace un Bernoulli entre la entrada y la salida del túnel de viento:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_{\text{ventilador}} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_{\text{pérdidas}} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

En la entrada y la salida del túnel se tiene presión atmosférica por lo que los términos de las presiones se simplifican, se asumirá también una velocidad a la entrada del túnel igual a cero, también las alturas se simplifican por estar al mismo nivel:

$$H_{\text{ventilador}} = \frac{v_2^2}{2g} + H_{\text{pérdidas}} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

La velocidad a la salida del túnel según los cálculos anteriores es $v = 2.5157 \text{ m/s}$ con lo que se obtiene:

$$H_{\text{ventilador}} = \frac{(2.5157)^2}{2(9.81)} + \frac{75.94}{(1.225)(9.81)} = 6.64 \text{ m}$$

La potencia requerida del ventilador viene dada por:

$$Pot = \rho g Q H_{ventilador} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde,

| | | |
|------------------|---|---------------------------------|
| Pot | : | Potencia del ventilador |
| ρ | : | Densidad del fluido |
| g | : | Aceleración de la gravedad |
| Q | : | Caudal |
| $H_{ventilador}$ | : | Salto hidráulico del ventilador |

$$Pot = (1.225 \text{ kg/m}^3) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(0.301 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) (6.64 \text{ m}) = 24.01 \text{ W}$$

Para comprobar que el ventilador que se usará tiene la potencia adecuada, se calculará la potencia aparente sabiendo que el voltaje de trabajo es 120 V de corriente alterna y la corriente de alimentación que se midió fue de 0.4 A:

$$Pot = VI = (120 \text{ V})(0.4 \text{ A}) = 48 \text{ W}$$

Asignando una eficiencia de 80% al ventilador se tiene una potencia en el eje:

$$Pot_{real} = Pot\eta = (48 \text{ W})(0.80) = 38.4 \text{ W}$$

De esta manera se comprueba que el ventilador posee la potencia necesaria para vencer las pérdidas que se generan dentro del túnel de viento.

2.6. Diseño del banco de pruebas

Teniendo definidas las geometrías correspondientes a cada elemento del túnel de viento, se debe ahora diseñar una base adecuada que soporte todos los elementos y que a su vez permita efectuar ensayos con los elementos de control de manera adecuada.

Debido a que en la estructura no se soportará más carga que la del peso del los elementos del túnel, no se considerará el hacer un análisis de carga estática para dimensionar la estructura ya que al no ser cargas considerables el tubo industrial cuadrado de 1 pulgada chapa 16 es una elección adecuada para la elaboración de la base, quedando el banco de la siguiente manera:

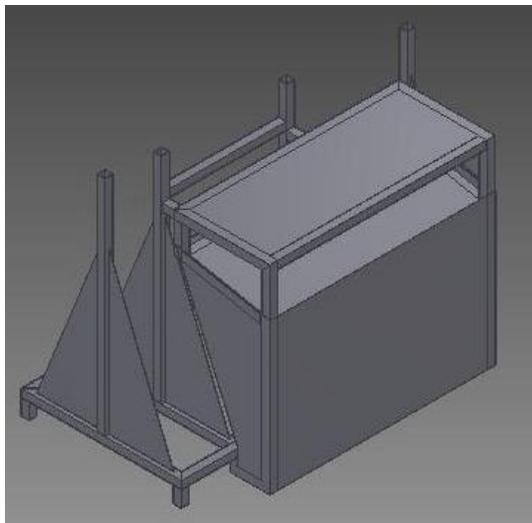


Figura 2.06. Banco del túnel de viento

El banco además de ser el soporte para el túnel de viento también es la base sobre la que se encuentra el panel de control, este panel incluirá las funciones necesarias para el control completo del banco desde el apagado y encendido del ventilador hasta el posicionamiento por medio de un control analógico de la pieza a ensayar.

Junto al panel de control se ha colocado una base de chapa metálica sobre la cual se colocará la computadora que estará mostrando los datos que se

recopilen a través del sistema de instrumentación además de permitir la realización del análisis en CAD y a su vez la búsqueda de la posición eficiente de las piezas que se estarán ensayando.

2.7. Selección de Materiales

- **Sección de Pruebas**

Para el caso de la sección de pruebas, se menciono anteriormente que se utilizará acrílico (Metracrilato PMMA) transparente para su fabricación, se provee ahora de información detallada sobre esta para justificar su selección:

2.7.1. Metracrilato PMMA

El polimetil metacrilato o metacrilato, también conocido por sus siglas PMMA, es un acrílico que se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo. Compite en cuanto a aplicaciones con otros plásticos como el policarbonato (PC) o el poliestireno (PS), pero el acrílico se destaca frente a otros plásticos transparentes en cuanto a resistencia a la intemperie y transparencia.

El metacrilato presenta gran resistencia al ataque de muchos compuestos pero es atacado por otros, entre ellos: Acetato de etilo, acetona, ácido acético glacial, ácido sulfúrico bicromático, alcohol amílico, benzol, butanol, diclorometano, triclorometano (cloroformo), tolueno.

Es de fácil combustión, no se apaga al ser retirado del fuego. Sus gases tienen olor afrutado y crepita al arder. No produce ningún gas tóxico al arder por lo que se puede considerar un producto muy seguro para elementos próximos a las personas al igual que la madera.

Es utilizado en la industria del automóvil, iluminación, cosméticos, espectáculos, construcción y óptica, entre muchas otras; y en aplicaciones múltiples, como señalización, cartelería o expositores.

Algunas ventajas del Acrílico PMMA son:

- Transparencia de alrededor del 92%. El más transparente de los plásticos.
- Alta resistencia al impacto, de unas 10 a 20 veces la del vidrio.
- Elevada rigidez.
- Resistente a la intemperie y a los rayos ultravioleta.
- De dureza similar a la del aluminio.
- Gran facilidad de mecanización y moldeo. Superficie apta para pulir.
- Apto para estar en contacto con alimentos.
- Resistente a los disolventes polares.
- Excelente aislante térmico y acústico.

(Bove - ag plásticos y elastómeros s.l., 2013)

Características Generales del PMMA

Tabla 2.06. Características generales del PMMA (Acrílico)

| Característica | Norma | Valor | Unidades |
|--------------------------|-----------|-------|-------------------|
| Densidad PMMA | ISO 1183 | 1,18 | g/cm ³ |
| Absorción de agua | DIN 53495 | 0,3 | % |
| Resistencia química | DIN 53476 | - | - |
| límite superior | - | 80 | °C |
| límite inferior | - | -40 | °C |
| Tensión de fluencia | ISO 527 | 70 | MPa |
| Alargamiento de fluencia | ISO 527 | - | % |

| | | | |
|---|------------|-----------------|-----------------------------------|
| Resistencia a la tracción | ISO 527 | 72 | MPa |
| Alargamiento de rotura | ISO 527 | 5 | % |
| Resistencia a golpes | ISO 179 | 15 | kJ/m ² |
| Resiliencia | ISO 179 | 1,5 | kJ/m ² |
| Dureza a la indentación de bola (Hk) /Rockwell | ISO 2039-1 | 185 | MPa |
| Resistencia a la flexión (sB 3,5%) | ISO 178 | 125 | MPa |
| Módulo de elasticidad | ISO 527 | 3300 | MPa |
| Temperatura de ablandamiento de Vicat VST/B/50 | ISO 306 | 100 | °C |
| Temperatura de deformabilidad por calor HDT/B | ISO 75 | 95 | °C |
| Coeficiente de dilatación térmica | DIN 53752 | 0,7 | K ⁻¹ *10 ⁻⁴ |
| Conductibilidad térmica a 20° | DIN 52612 | 0,19 | W/(m*K) |
| Resistencia volúmica esp. | VDE 0303 | $\geq 10^{-15}$ | Ohm*cm |
| Resistencia superficial | VDE 0303 | $\geq 10^{-15}$ | Ohm |
| Constante dieléctrica relativa con 1 MHz | DIN 53483 | 2,9 | -- |
| Factor de disipación del dieléctrico con 1 MHz | DIN 53483 | 0,03 | -- |
| Resistencia a descargas disruptivas | VDE 0303 | 30 | kV/mm |
| Resistencia a las corrientes de fuga | DIN 53480 | KC >600 | -- |

- **Sección de Conexión y Difusor**

Para la sección de conexión entre el conto del ventilador y la sección de pruebas el material que se utilizará es una base de acrílico sobre la cual se utilizará fibra de vidrio para obtener estructuras con factor de fricción mínimo y a la vez con paredes aproximadamente adiabáticas.

2.7.2. Fibra de Vidrio

Los tipos de fibra de vidrio más comúnmente utilizados son principalmente de vidrio E (vidrio de aluminio-borosilicato con menos del 1% p/p de óxidos alcalinos, principalmente para plástico reforzado con fibra de vidrio), pero también se utilizan: vidrio A (vidrio cálcico con poco o nada de óxido de boro), vidrio E-CR (con silicato aluminio-cálcico, con menos del 1% p/p de óxidos alcalinos, tiene alta resistencia a los ácidos), vidrio C (vidrio sódico-cálcico con alto contenido de óxido de boro), vidrio D (vidrio borosilicato con alta constante dieléctrica), vidrio R (vidrio aluminosilicato sin MgO y CaO para altos requerimientos mecánicos), y vidrio S (vidrio aluminosilicato sin CaO, con alto contenido de MgO para alta resistencia).

Tabla 2.07. Composición (% en peso) de los distintos tipos de vidrio

| Oxido | Vidrio E | Vidrio C | Vidrio S | Vidrio A | Vidrio D | Vidrio R | Vidrio ECR |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| SiO ₂ | 55,0 | 66,0 | 65,0 | 67,5 | 74,0 | 60,0 | 61,0 |
| Al ₂ O ₃ | 14,0 | 4,0 | 25,0 | 3,5 | - | 24,0 | 13,0 |
| CaO | 22,0 | 14,0 | - | 6,5 | - | 9,0 | 22,0 |
| MgO | 1,0 | 3,0 | 10,0 | 4,5 | - | 6,0 | 3,0 |
| Na ₂ O | 0,5 | 7,5 | - | 13,5 | 1,5 | 0,5 | - |
| K ₂ O | 0,3 | 5,0 | - | 3,0 | 2,0 | 0,1 | 0,5 |

PROPIEDADES

- **Térmica**

Las fibras de vidrio son útiles aislantes térmicos debido a su alta proporción de superficie respecto al peso. Sin embargo, la mayor superficie hace mucho más susceptible al ataque químico. Por el atrapamiento del aire dentro, los bloques de fibra de vidrio hacen un buen aislamiento térmico, con una conductividad térmica del orden de 0,05 W/ (m.K).

- **Mecánica**

La resistencia del vidrio suele ser testeada y notificada en las fibras vírgenes (aquellas que acaban de ser fabricadas). Las fibras más delgadas recién fabricadas son las más fuertes debido a que las fibras más delgadas son más dúctiles. Cuanto más rayada esté la superficie, menor será la tenacidad resultante. Debido a que el vidrio tiene una estructura amorfa, sus propiedades son las mismas a lo largo y a lo ancho de la fibra. La humedad es un factor importante en la resistencia a la tracción. La humedad es fácilmente absorbida, y puede empeorar las grietas microscópicas y los defectos superficiales, y disminuir la tenacidad.

Tabla 2.08.Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio tipo E y S2

| Tipo de fibra | Resistencia a la tracción (MPa) | Resistencia a la compresión (MPa) | Densidad (g/cm ³) | Expansión térmica $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$ | Temperatura de ablandamiento ($^\circ\text{C}$) | Precio (\$/Kg) |
|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|---|----------------|
| Vidrio E | 3445 | 1080 | 2,58 | 5,4 | 846 | ± 2 |
| Vidrio S2 | 4890 | 1600 | 2,46 | 2,9 | 1056 | ± 20 |

(Tecnología de los Plásticos, 2011)

- **Banco del túnel de viento**

Para la fabricación del banco se menciona el tubo estructural cuadrado de 1 pulgada chapa 16, el cual posee las siguientes ventajas:

- Por su forma cerrada y bajo peso presentan un mejor comportamiento a esfuerzos de torsión y resistencia al pandeo.
- Facilidad de montaje, permitiendo la realización de uniones simples por soldadura.
- Superficies exteriores reducidas, sin ángulos vivos ni rebabas, permitiendo un fácil mantenimiento y protección contra corrosión.
- Posibilidad de configuraciones de gran belleza.

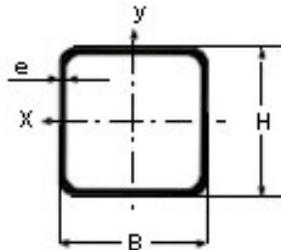


Figura 2.07. Perfil de tubo estructural cuadrado

2.8. Simulación del túnel de viento

Para la simulación se seleccionan en el software Solidworks a través del complemento FlowSimulation las siguientes condiciones:

- Flujo Interno
- Fluido de trabajo: aire
- Condición térmica de la pared: adiabática
- Rugosidad: 46 micrómetros
- Parámetros termodinámicos, presión atmosférica y temperatura ambiente: 101.325 kPa y 293.5 K

- Definición de tamaño de malla fino

Posteriormente se resuelve el modelo y se asignan condiciones de frontera, las cuáles se tomaron como:

- **Superficie de entrada:** Velocidad igual a 15 m/s
- **Superficie de salida:** Presión Atmosférica

2.8.1. Simulación de la variación de velocidad

Para la simulación de la variación de velocidad se definió una recopilación de los valores de velocidad a la salida del difusor para comprobar los parámetros de diseño, estos valores se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.09. Valores Mínimo, Promedio y Máximo de las velocidades Mínima, Promedio y Máxima a la salida del difusor.

| | Unidades | Valor Mínimo | Valor Promedio | Valor Máximo |
|--------------------|----------|--------------|----------------|--------------|
| V. Mínima | [m/s] | 0,485775788 | 0,313676036 | 0,838697341 |
| V. Promedio | [m/s] | 3,191202795 | 3,141721516 | 3,214002696 |
| V. Máxima | [m/s] | 7,684195645 | 7,422705974 | 7,809708859 |

La gráfica resultante de velocidad para las iteraciones realizadas es la siguiente:

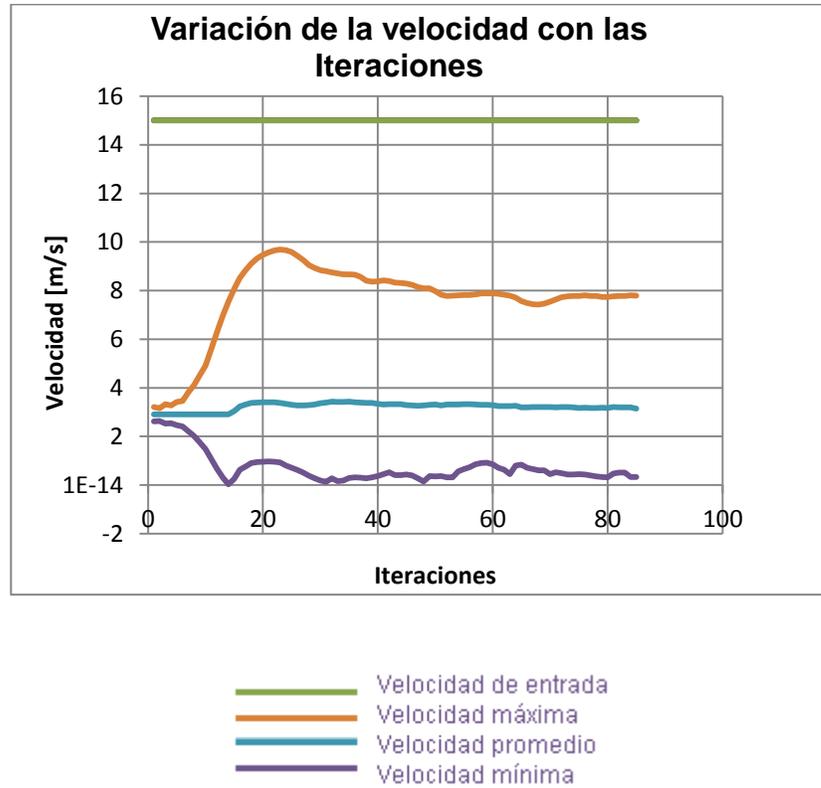


Figura 2.08. Variación de la velocidad

Se presenta ahora la simulación realizada con un patrón de esferas cuyos colores indican la magnitud de la velocidad:

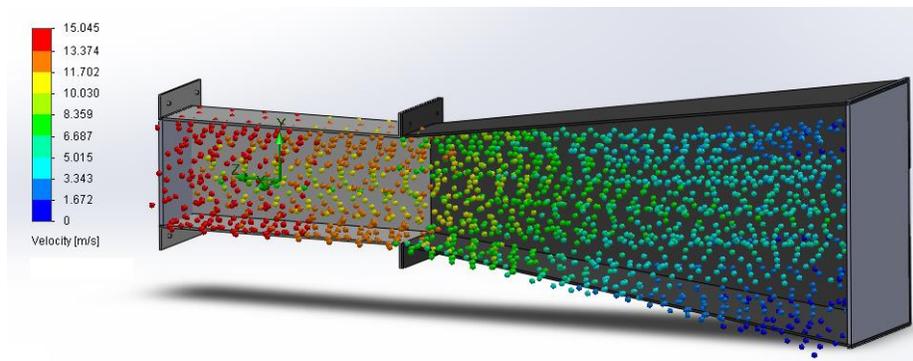


Figura 2.09. Simulación de la variación de velocidad

Realizando una interpretación de los resultados obtenidos, se puede notar que dentro de la cámara de pruebas la velocidad se encuentra mayoritariamente en el rango de 11 a 15 m/s y esta va disminuyendo en el difusor hasta valores de aproximadamente 3 m/s, la cual fue la velocidad establecida de salida del difusor en la etapa de diseño, con lo que se puede concluir que la simulación valida el diseño realizado.

2.8.2. Simulación de la variación de presión

Para la simulación de la variación de presión se definió una recopilación de los valores de presión a la salida del difusor para comprobar los parámetros de diseño, estos valores se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.10. Valores Mínimo, Promedio y Máximo de las presiones Mínima, Promedio y Máxima a la salida del difusor

| | Unidades | Valor Mínimo | Valor Promedio | Valor Máximo |
|-------------------------|----------|--------------|----------------|--------------|
| Presión Mínima | [Pa] | 101324,8919 | 101323,7745 | 101325 |
| Presión Promedio | [Pa] | 101334,4271 | 101334,2803 | 101334,6306 |
| Presión Máxima | [Pa] | 101360,5424 | 101358,1545 | 101361,7026 |

La gráfica resultante de velocidad para las iteraciones realizadas es la siguiente:



Figura 2.10. Variación de la presión

Se presenta ahora la simulación realizada con un patrón de esferas cuyos colores indican la magnitud de la presión:

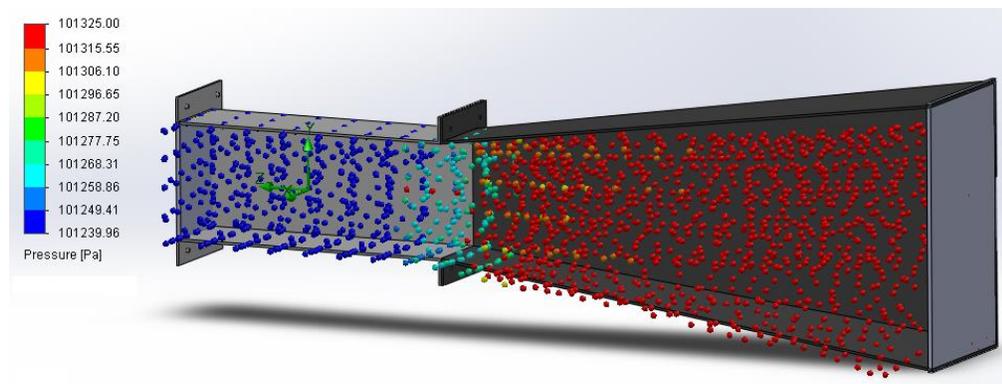


Figura 2.11. Simulación de la variación de presión

Realizando una interpretación de los resultados obtenidos, se puede notar que existe una variación de presión a lo largo del túnel bastante pequeña, a la misma vez se puede observar que a la salida del difusor se obtiene un valor de presión que es aproximadamente el valor de la presión atmosférica.

2.8.3. Simulación de la variación de densidad

Para la simulación de la variación de densidad se definió una recopilación de los valores de densidad a la salida del difusor para comprobar los parámetros de diseño, estos valores se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.11. Valores Mínimo, Promedio y Máximo de las densidades Mínima, Promedio y Máxima a la salida del difusor

| | Unidades | Valor Mínimo | Valor Promedio | Valor Máximo |
|--------------------------|----------------------|--------------|----------------|--------------|
| Densidad Mínima | [kg/m ³] | 1,203244569 | 1,203240604 | 1,203250694 |
| Densidad Promedio | [kg/m ³] | 1,203352794 | 1,203336305 | 1,203367228 |
| Densidad Máxima | [kg/m ³] | 1,203705624 | 1,203705624 | 1,203705624 |

La gráfica resultante de velocidad para las iteraciones realizadas es la siguiente:

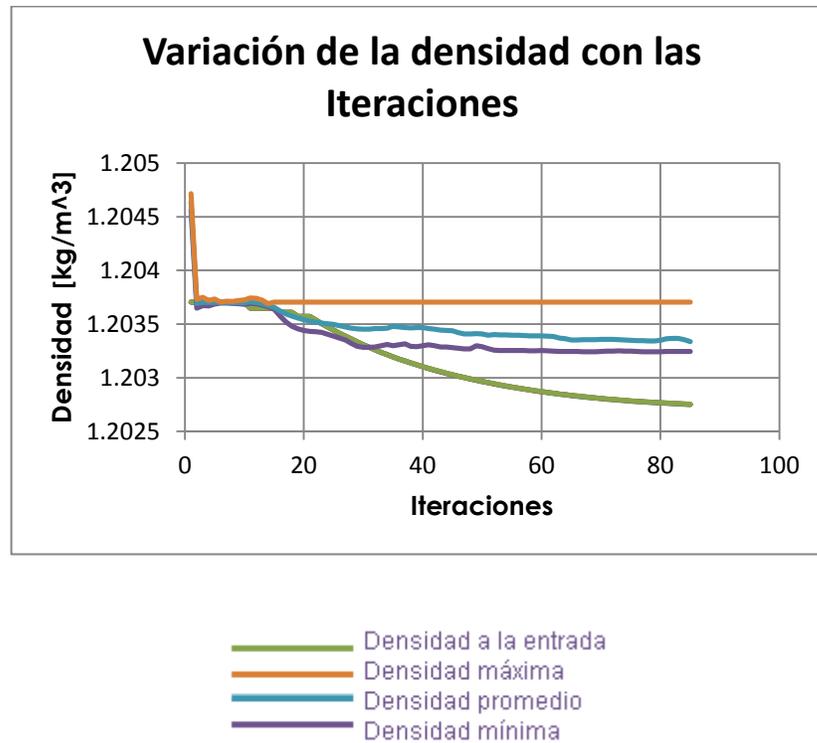


Figura 2.12. Variación de la densidad

Se presenta ahora la simulación realizada con un patrón de esferas cuyos colores indican la magnitud de la densidad:

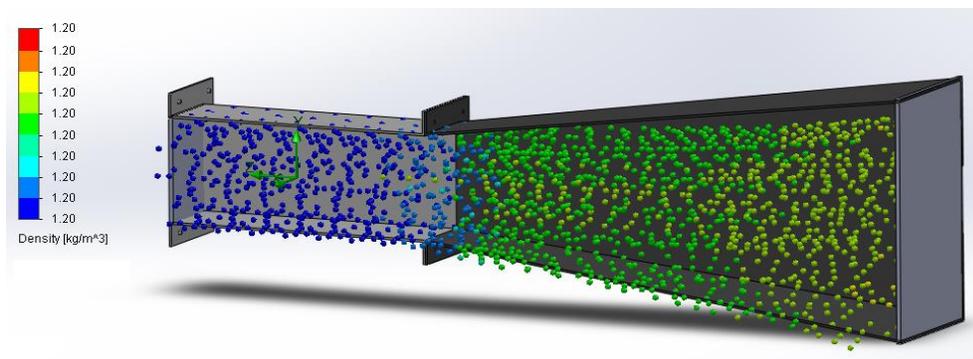


Figura 2.13. Simulación de la variación de densidad

Realizando una interpretación de los resultados obtenidos, se puede notar que existe una variación de densidad a lo largo del túnel bastante pequeña, tanto que en la escala no se diferencia entre los valores debido a la cantidad de decimales presentados, esto refuta la suposición que se hizo al considerar el fluido incompresible.

2.8.4. Simulación de la variación de número de Mach

Para la simulación de la variación del número de Mach se definió una recopilación de los valores de número de Mach a la salida del difusor para comprobar los parámetros de diseño, estos valores se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.12. Valores Mínimo, Promedio y Máximo de Mach Mínimo, Promedio y Máximo a la salida del difusor

| | Unidades | Valor Mínimo | Valor Promedio | Valor Máximo |
|----------------------|----------|--------------|----------------|--------------|
| Mach Mínimo | [] | 0,001415403 | 0,000913935 | 0,00244398 |
| Mach Promedio | [] | 0,009297875 | 0,009153684 | 0,009364318 |
| Mach Máximo | [] | 0,022388797 | 0,021626862 | 0,022754523 |

La gráfica resultante de velocidad para las iteraciones realizadas es la siguiente:

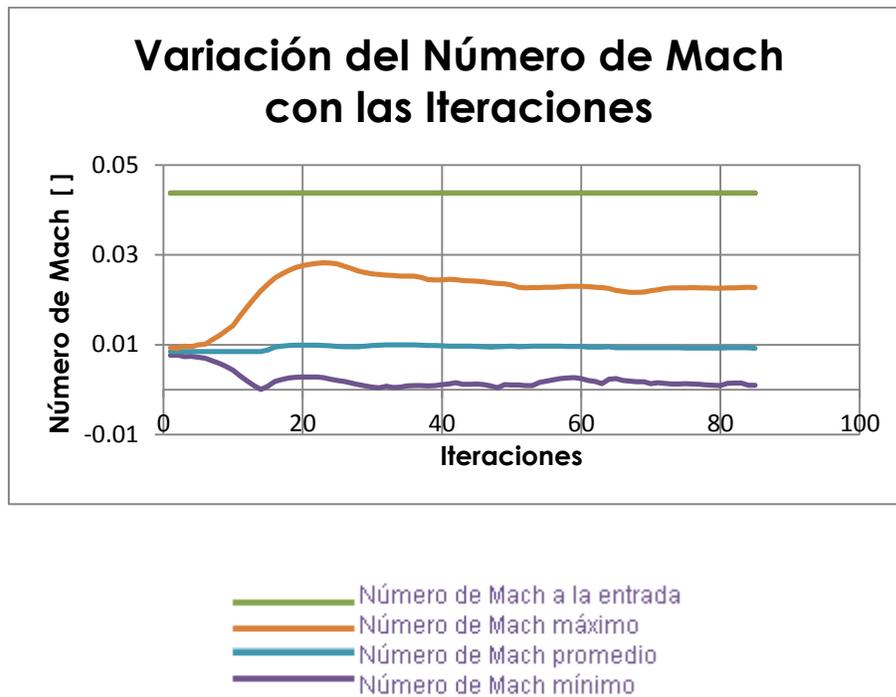


Figura 2.14. Variación del Número de Mach

Se presenta ahora la simulación realizada con un patrón de esferas cuyos colores indican la magnitud de la densidad:

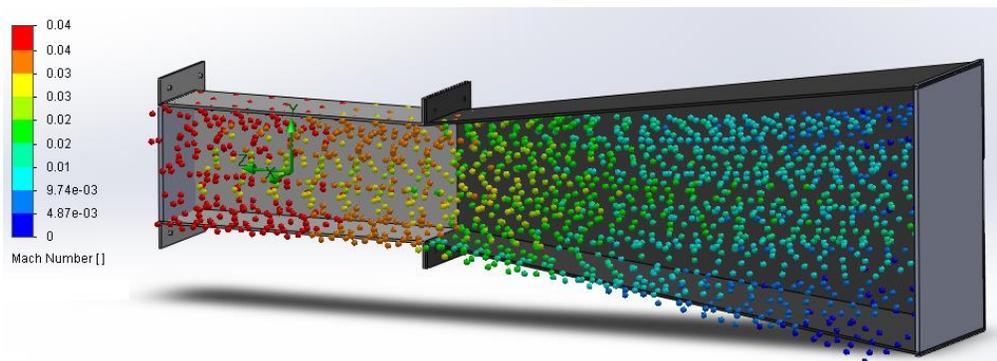


Figura 2.15. Simulación de la variación del Número de Mach

Realizando una interpretación de los resultados obtenidos, se puede notar que existe una variación del número de Mach a lo largo del túnel entre los valores de 0.01 y 0.04, lo cual confirma nuevamente que la suposición de considerar flujo incompresible fue correcta, debido a que se tienen números de Mach menores a 0.3.

2.9. Construcción de Elementos del Túnel

2.9.1. Sección de Pruebas

Para la sección de pruebas que se fabricará de acrílico transparente (metacrilato) se hará uso los procesos de corte, moldeado y pegado del material, estos procesos se describen a continuación:

2.9.1.1. Proceso de corte

La lámina acrílica puede ser cortada de diversos modos, utilizando herramientas manuales y eléctricas. La selección del equipo depende principalmente del tipo de pieza y volumen a producir. Es importante que al realizar esta operación se consideren las siguientes consideraciones para evitar, principalmente, el astillado y reblandecimiento de cantos o bordes:

1. El equipo seleccionado (sierras) deberá tener un mínimo de vibración para evitar estrellamientos.
2. El eje de la mesa y la guía de corte deberán estar perfectamente alineados (en escuadra) para evitar cortes comidos o no escuadrados.
3. El material deberá estar apoyado firmemente en la mesa de trabajo, con ello se obtendrán mejores resultados además de mayor seguridad para el operador.
4. La viruta o polvo que se produzca durante esta operación deberá retirarse de la superficie de la lámina acrílica preferiblemente con aire comprimido, para evitar que se provoquen marcas.

Los tipos de corte a emplearse en la fabricación de la cámara de pruebas son:

Corte con Sierra Circular: La sierra circular debe tener dientes rectos para favorecer el enfriamiento y no reblandecer el material de acrílico. Se recomiendan las sierras que tienen los dientes de carburo de tungsteno.

El empuje de la sierra, al cortar, debe ser lento para evitar el calentamiento y el posible estrellamiento del acrílico, la sierra deberá operarse a velocidades relativamente altas y antes de iniciar el corte se debe asegurar de que se haya desarrollado la máxima velocidad. Mientras mayor sea el espesor a cortar, mayor deberá ser el diámetro de la sierra y menor número de dientes por centímetro.

Corte con Sierra Cinta: La sierra cinta es lo indicado para hacer cortes curvos en hojas planas. Es recomendable el uso de esta sierra con velocidad variable hasta 5000 pies/min. Y con una profundidad de garganta mínimo de 10 pulgadas. Es conveniente utilizar una cinta para cortar metal o las especiales para plásticos, también es necesario ajustar la guía lo más cercano al material para evitar estrellamientos en la línea de corte y reducir al mínimo la vibración de la sierra.

Corte con Láser: Una de las varias ventajas que ofrece el sistema de corte con láser es la versatilidad de aplicación; ya que además de su empleo directo en el corte de láminas acrílicas ofrece la posibilidad de procesado en muchos otros tipos de materiales. Se obtienen también cortes finos con cantos precisos, lo cual es muy recomendable para piezas de acrílico con formas muy intrincadas, además se pueden efectuar barrenos desde 0.1mm de diámetro a una velocidad de hasta 150,000 perforaciones por hora. Con el dispositivo láser es posible cortar, soldar o desbastar superficies de hasta 30 mm de espesor, debido a que la energía láser se concentra en un sólo punto y la generación de calor se puede limitar a una zona mínima con lo cual se evitan deformaciones y además posibles cambios estructurales en el material.

2.9.1.2. Proceso de moldeado (termoformado)

El termoformado de la lámina de acrílico es uno de los procesos más simples y generalizados para su transformación. Es un material termoplástico que cuando se lo calienta a temperaturas y tiempos adecuados se ablanda y puede adoptar diferentes formas. Al enfriarse recobra su rigidez y conserva la forma que

se le ha dado. Los costos de equipos y moldes son relativamente bajos y se pueden obtener formas bidimensionales y tridimensionales.

Temperatura del Termoformado: La temperatura de moldeo está dentro de un rango entre los 150 y 170° C. A temperaturas menores se producen tensiones internas que producen cuarteamiento y fisura, y a temperaturas por encima de lo recomendado se producen burbujas y marcas de los moldes utilizados.

Existen varios tipos de moldes que se pueden clasificar en:

a) Libres por gravedad: Este método es el más sencillo pues no se requiere la utilización de equipo especial para el termoformado. Solamente se debe colocar la plancha de acrílico a temperatura de moldeo sobre el molde, ésta por su propio peso adopta la forma del molde. Es aconsejable tomar los extremos de las planchas con pinzas, para evitar posibles ondulaciones durante el enfriamiento. Es el método aconsejado para productos simples de 2 dimensiones.

b) Libres por presión ó vacío: La forma de la pieza terminada, será dada por la forma y tamaño del aro de sujeción de la plancha y la altura por la presión de aire ejercida sobre la pieza. Está limitado a contornos esféricos y burbujas libremente formadas.

c) Formado mecánico

- Las planchas de acrílico pueden ser moldeadas como si fueran de metal con molde macho y hembra, para producir piezas de dimensiones muy precisas, con tolerancias muy acotadas. Es importante para el acabado final de la pieza la perfección del molde, se recomiendan para este proceso que sean realizados en metal.
- Formado mecánico con anillo de sujeción: este método reduce el espesor de la plancha cuando se estira el material, si el molde tiene alguna imperfección, ésta se muestra de ambas caras de la plancha. Se utiliza para trabajos muy especiales

- Formado mecánico con anillos: Este método se utiliza cuando la pieza puede ser obtenida con partes de moldes, minimizando así los posibles defectos del contacto de la plancha con el molde.

d) Combinaciones de los mismos

2.9.1.3. Proceso de Pegado

La lámina acrílica puede ser pegada con solventes y adhesivos, formando uniones fuertes y durables. La fuerza y apariencia de la unión dependerá en gran parte del cuidado y la destreza con que se realice la operación. Para lograr una mejor adherencia y mayor fuerza de unión, es importante que las piezas a unir no se fuercen ya que esto provocaría debilidad en la unión. Para realizar cualquier tipo de unión no es necesario ningún tipo de preparación previa de las áreas a unir, siendo muy importante inspeccionar los cortes de sierra los cuales deberán mostrar en el material una huella de maquinado poco profunda y uniforme, con lo que se logrará que los cantos asienten correctamente. En los casos de que las áreas a unir tengan imperfecciones (huella profunda o viruta adherida), es necesario lijar o darle algún otro tipo de acabado hasta dejarlas perfectamente asentadas en escuadra y lisas. No se deben pulir las áreas a unir pues se redondeará la superficie, disminuirá el área de contacto y se craqueará la unión. Antes de realizar la operación, se debe remover siempre la protección (película estática) del área que va a unir. la selección del adhesivo dependerá del tipo de unión, forma de la pieza, volumen a producir y resistencia a esfuerzos.

Métodos de Pegado

Existen tres métodos para el pegado siendo el método de capilaridad el más común, debido a su facilidad de operación y a su rápido pegado.

- a) Capilaridad:** Este método consiste en la acción de un solvente o adhesivo de baja viscosidad que fluye entre las superficies a pegar; se puede aplicar con jeringa, gotero o recipientes de boquilla estrecha. La mejor forma de evaluar si se está aplicando correctamente esta técnica, consiste en asegurarse que al aplicar el adhesivo o solvente en un extremo de las piezas a unir, éste corra

con facilidad por toda el área a pegar y parezca que se está iluminando el canto. Durante los primeros minutos es muy importante no mover las piezas unidas a fin de evitar que la unión resulte débil. La mayoría de los solventes siguen reaccionando sobre la lámina después de los primeros minutos de su aplicación. La alta resistencia de las uniones se alcanza entre las 24 y 48 horas posteriores e inclusive sigue fortaleciéndose durante las semanas subsecuentes, por lo que se recomienda durante las primeras horas manejar con cuidado las piezas unidas ya que la unión, aunque aparentemente se perciba resistente, todavía no alcanza internamente su grado máximo de resistencia. Aplicando el solvente o adhesivo de baja Viscosidad (de canto), fluirá por acción capilar

- b) **Inmersión o Remojo.** Otro de los métodos de unión, es el de inmersión o remojo. Este consiste en sumergir en el solvente el canto de las piezas a unir, durante un lapso de 2 a 3 minutos, posteriormente se deben fijar las piezas en la posición que se requiera. El tiempo de evaporación varía para los diferentes tipos de solventes, así como las condiciones de temperatura y humedad de cada zona. En caso de que las piezas unidas presenten manchas blancas en alguna de sus caras, éstas ya no podrán ser removidas, ya que este problema se presenta cuando las condiciones de humedad son muy altas y al evaporarse el solvente se integra con moléculas de agua del material. En estos casos se recomienda contar con deshumidificadores cerca de las áreas de trabajo.

- c) **Adhesivo Polimerizable** El último método para pegado es el de adhesivo polimerizable. Se utiliza cuando no se pueden emplear los otros dos métodos debido a que las partes a unir no asientan correctamente o el área a pegar es difícil. Estos adhesivos son espesos por lo que se recomienda se apliquen directamente con un recipiente de boquilla estrecha, haciendo en la punta un corte a 45 grados. Este tipo de adhesivos actúa en un mínimo de 45 minutos.

2.9.2. Sección de Conexión y Difusor

Estas piezas en su etapa inicial se fabrican de igual manera que la sección de pruebas debido a que poseen una estructura base hecha de acrílico transparente, tras la aplicación de los procesos descritos anteriormente para el conformado del acrílico los resultados obtenidos son los siguientes:

Estos elementos poseen además un recubrimiento de fibra de vidrio, el trabajo con la fibra de vidrio comprende los siguientes pasos:

1. Se prepara la fibra de vidrio en capas cortadas en tamaños apropiados para cubrir la forma.
2. Se mide una proporción adecuada de resina en un contenedor metálico.
3. Se agrega el catalizador en la proporción adecuada de acuerdo a la cantidad de resina utilizada y se mezclan ambos elementos.
4. Se colocan las capas de fibra de vidrio sobre los elementos a recubrir y se les aplica con una brocha o pincel la mezcla anterior.
5. Se repiten los pasos anteriores hasta obtener el espesor requerido de la fibra de vidrio.

En el caso de la sección de conexión y el difusor el recubrimiento de fibra de vidrio será de 3 milímetros.

2.9.3. Estructura del Banco de Pruebas

Como se mencionó anteriormente para la estructura del banco de pruebas se selecciono el tubo estructural metálico de 1 pulgada chapa 16, y la lámina metálica de acero de 1.6 mm de espesor.

Para la unión de las piezas se selecciona la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido debido a la disponibilidad del equipo y se utilizan electrodos E – 6013 recomendado para la soldadura de láminas metálicas delgadas y estructuras livianas.

Los electrodos poseen un diámetro de 1/8 de pulgada por lo que en base a tablas de soldadura se determina que la corriente adecuada de soldadura se encuentra entre un rango de 60 a 80 amperios.

El procedimiento para la construcción de esta base es primero el corte de los elementos a soldar y posteriormente su soldadura siguiendo el siguiente orden:

1. Soldadura del marco rectangular inferior y los soportes transversales.

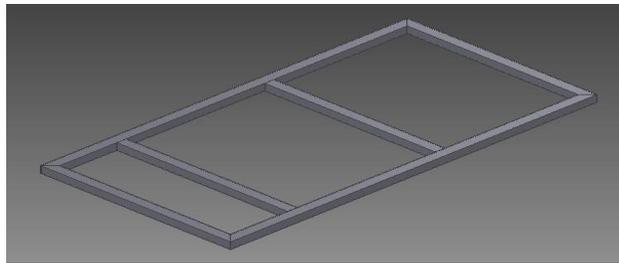


Figura 2.16.Marco inferior (CAD).

Autor: José Alejandro Guzmán

2. Soldadura de tubos en cada esquina para levantar el marco inferior.

Dibujo CAD de la estructura:

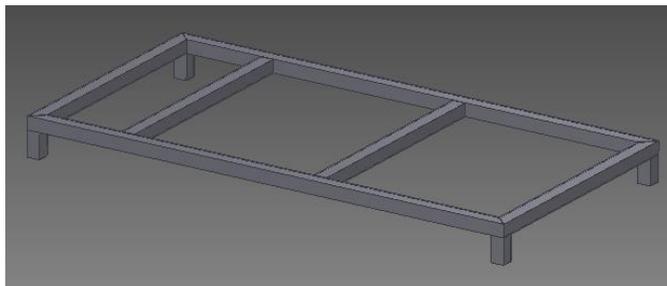


Figura 2.17.Marco inferior con soportes (CAD).

Autor: José Alejandro Guzmán

Estructura real:



Figura 2.18.Marco inferior con soportes

3. Soldadura de los tubos base para los elementos del túnel

Dibujo CAD de la estructura:

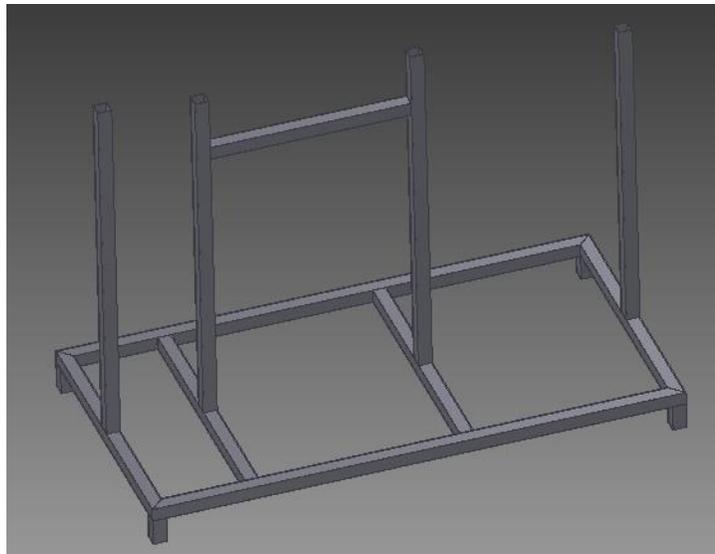


Figura 2.19.Estructura con soportes para elementos del túnel (CAD).

Autor: José Alejandro Guzmán

Estructura real:



Figura 2.20. Estructura con soportes para elementos del túnel

4. Soldadura de piezas de lamina de acero

Dibujo CAD de la estructura:

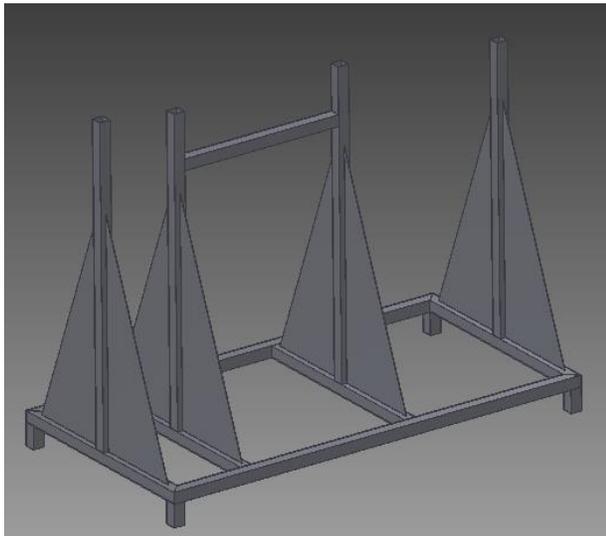


Figura 2.20. Estructura con piezas de lámina de acero (CAD).

Autor: José Alejandro Guzmán

Estructura real:



Figura 2.21.Estructura con piezas de lámina de acero (Real)

5. Construcción de base para tablero y circuitos

Dibujo CAD de la estructura:

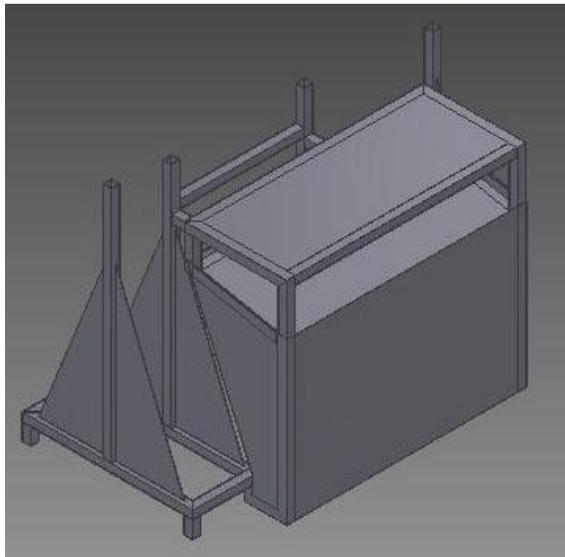


Figura 2.22.Estructura con base para tablero de control y circuitos (CAD)

Autor: José Alejandro Guzmán

Estructura real finalizada:



Figura 2.23.Estructura real finalizada

2.10. Base móvil para posicionamiento de perfiles geométricos

En un inicio se pretendía que la base para posicionamiento de los perfiles a ensayar tuviera dos grados de libertad, esto es que pudiera mover los perfiles en dos diferentes direcciones pero debido a dificultades de índole económica y de tiempo se decidió que la base tuviera un solo grado de libertad y el posicionamiento de los perfiles fuera mediante la rotación de un motor.

En cuanto al motor se optó por un motor paso a paso ya que este tipo de motor permite el posicionamiento del mismo en valores de ángulos puntuales, como se detalla en la sección 1.5 del capítulo 1.

2.10.1. Características del motor seleccionado

- Motor unipolar
- Voltaje de alimentación: 5V
- Consumo de corriente: 2A
- Paso: $1.8^\circ/paso$
- Secuencia a utilizar: Wave Drive

Se utilizará la secuencia Wave Drive en la cual una sola bobina a la vez es activada debido a la facilidad que presenta, así mismo la disminución en el torque no es un factor preponderante dado que la carga a la que estará sometido el motor no es elevada.

Como mecanismo de sujeción el motor sobre su eje cuenta con una varilla roscada, con lo que los perfiles se sujetan a este por medio de una prensa tipo C.



Figura 2.24. Motor paso a paso Unipolar con varilla roscada en el eje

3. SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICO PARA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

3.1. Anemometría de Hilo Caliente

La anemometría de hilo caliente es una técnica para la medición de la velocidad de un fluido en la cual se utiliza un elemento térmico (hilo caliente) que sirve como resistencia variable al enfrentarlo a un fluido.



Figura 3.01. Elemento Térmico frente a flujo de un fluido

El hilo de un anemómetro de hilo caliente debe tener dos características:

- El coeficiente térmico de la resistencia debe ser alto (la conductividad varía rápidamente con la temperatura)
- Debe tener una baja resistencia de modo que pueda ser calentado fácilmente con un nivel bajo de corriente

Cuando se hace circular una corriente por el hilo en presencia de un flujo estacionario, el hilo tendrá una determinada temperatura y por lo tanto una determinada resistencia. Ante una variación de la corriente eléctrica o velocidad del fluido, el hilo experimentará un cambio de temperatura y por lo tanto de su resistencia, por lo que este es el factor principal para la medición de la velocidad del fluido.

Se construyen montando un hilo fino de Platino o Tungsteno sobre dos soportes conductores. Los hilos son típicamente de $4\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ de diámetro y alrededor de 1mm de largo.



Figura 3.02.Imagen comparativa del tamaño del hilo caliente

A través del cilindro (hilo caliente) circula una corriente I que produce su calentamiento por efecto Joule. El hilo verifica la siguiente condición:

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_c \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde \dot{Q}_e es la potencia eléctrica entregada al hilo y \dot{Q}_c es la tasa de transferencia de calor por convección térmica.

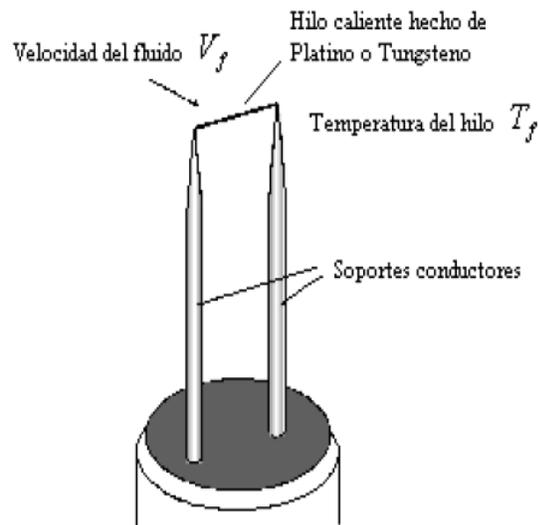


Figura 3.03.Esquema de un anemómetro de hilo caliente

Existen dos tipos de anemómetro de hilo caliente:

- **Anemómetro a corriente constante:** Mediante una fuente de corriente constante se alimenta el hilo, el cuál al estar sometido ante una corriente de fluido su resistencia decaerá por la disminución de temperatura y en consecuencia la caída de tensión en sus bornes.
- **Anemómetro a temperatura constante:** Se calienta el hilo por medio de la circulación de corriente y cuando se encuentra frente a una corriente de fluido experimenta una disminución en su resistencia y por lo tanto en su temperatura, un circuito en particular al detectar esta disminución de temperatura hace circular una corriente adicional al hilo el cuál restablece su temperatura.

3.2. Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un circuito diseñado para la medición de resistencias, su configuración es la mostrada en la siguiente figura:

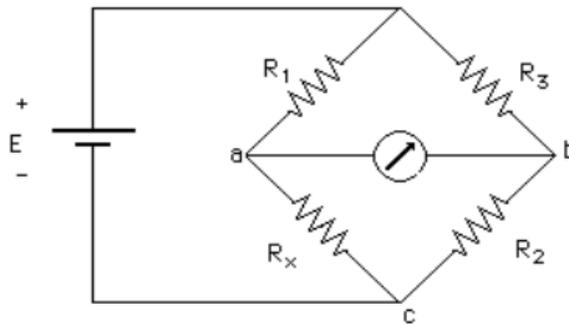


Figura 3.04. Puente de Wheatstone

La condición de equilibrio del puente se da cuando el voltaje entre los puntos A y B es igual a cero y viene dada por la configuración de resistencias siguiente, proveniente de un análisis del circuito ya sea por los métodos de análisis de mallas o nodos:

$$R_1 R_2 = R_3 R_x$$

Ecuación 3.2

Si una de las resistencias cambia su valor la condición de equilibrio deja de cumplirse y se manifiesta una diferencia de potencial entre los puntos A y B, este hecho en particular es aprovechado en los anemómetros a temperatura constante.

3.3. Anemómetro a temperatura constante

Entre los diversos métodos de medida de la velocidad del viento cabe destacar, por su simplicidad, los que basan su funcionamiento en la relación que existe en la potencia calorífica transferida entre un hilo (filamento) calentado y su entorno. El flujo calorífico que se establece entre el hilo y la corriente de aire que lo envuelve sigue aproximadamente una ley cuadrática de modo que la potencia disipada es proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad del viento. (Anemómetro mediante diodo zener)

Los anemómetros construidos bajo este principio son dispositivos muy sensibles, pequeños y de elevada velocidad de respuesta. Los diseños más comunes de anemómetros térmicos son los de hilo caliente a temperatura constante.

En los anemómetros a temperatura constante se utiliza un puente autoequilibrado para mantener a una determinada temperatura el filamento de hilo conductor con elevado coeficiente de temperatura positivo.

El hilo se sitúa en uno de los brazos del puente de Wheatstone polarizado con la salida del amplificador de potencia.

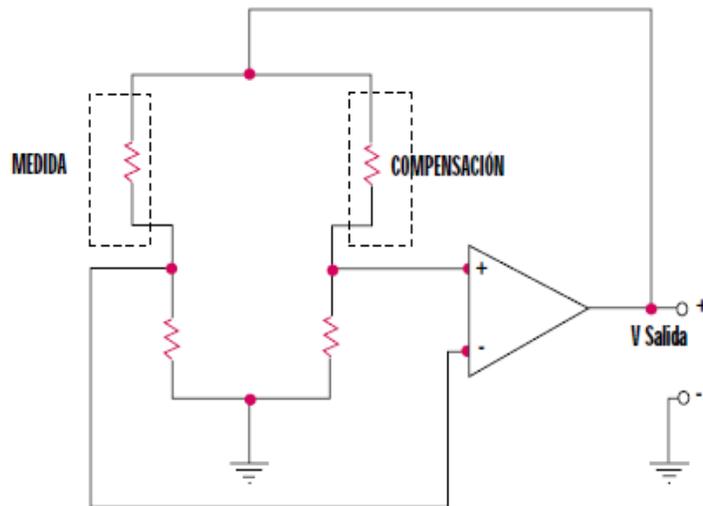


Figura 3.05. Circuito básico de un anemómetro de hilo caliente a temperatura constante.

El puente se mantiene en equilibrio a una determinada temperatura del hilo. Si varía la disipación en el hilo, como consecuencia de una variación de la velocidad del viento que lo circunda, éste modificará su resistencia, lo que provocará una variación en la salida del amplificador que tratará de compensar esta modificación hasta restaurar nuevamente el equilibrio del puente. El incremento de tensión de salida se relaciona de manera no lineal con el incremento de velocidad del viento.

3.4. El Amplificador Operacional

Un amplificador operacional se puede considerar básicamente como un sistema que cuenta con una entrada y una salida, la ganancia de voltaje del amplificador operacional es la razón de voltajes de salida y entrada cuando cada uno se mide con respecto a tierra.

El amplificador operacional cuenta con dos entradas, conocidas como la entrada inversora (-) y la entrada no inversora (+)

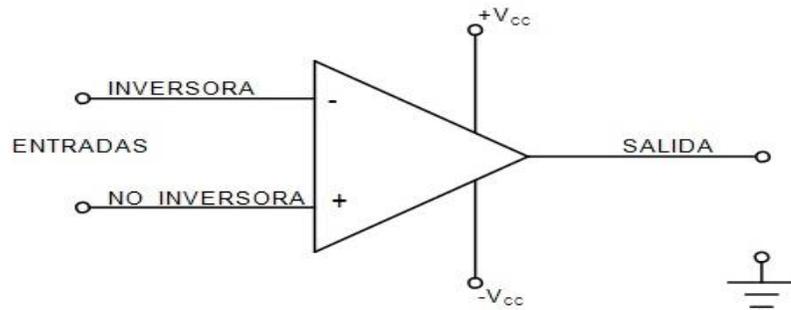


Figura 3.06.Diagrama esquemático de un amplificador operacional

Se utilizan en diversas aplicaciones algunas y poseen características particulares que los hacen versátiles, entre ellas se pueden mencionar:

- Capacidad de alta corriente, alto voltaje o ambos
- Módulos para sonar de emisión y recepción
- Amplificadores múltiples
- Amplificadores de ganancia programable
- Instrumentación
- Control automotriz
- Circuitos integrados para comunicaciones
- Circuitos integrados de radio/audio/video

A continuación se mencionan tres circuitos básicos utilizando el amplificador operacional que conformarán el circuito final de instrumentación que se utilizará en la medición de la velocidad del viento.

3.4.1. Amplificador Inversor

En un amplificador inversor la entrada del circuito se lleva a la entrada inversora a través del resistor R_1 , mientras que la entrada no inversora se conecta a tierra. Se establece una trayectoria de retroalimentación que inicia en la salida, pasa por el resistor R_2 y llega a la entrada inversora.

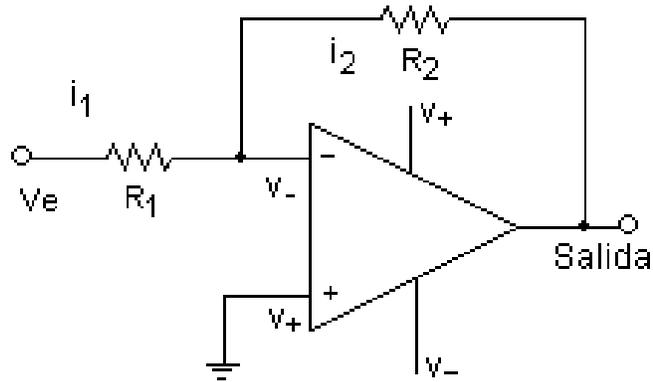


Figura 3.07.Diagrama esquemático del amplificador operacional conectado como amplificador inversor

Al efectuar un análisis del circuito anterior es posible deducir una expresión para la ganancia del amplificador inversor en función de los voltajes de entrada y salida y las resistencias R_1 y R_2 :

$$\text{ganancia de voltaje} = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

3.4.2. Amplificador No Inversor

La conexión de un amplificador no inversor consiste en conectar la salida del circuito a través de una diferencia de potencial entre R_1 y R_2 esto permite deducir la siguiente expresión para la ganancia de voltaje:

$$\text{ganancia de voltaje} = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

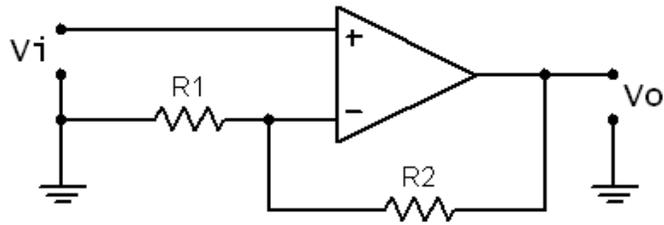


Figura 3.08.Diagrama esquemático del amplificador operacional conectado como amplificador no inversor

3.4.3. Amplificador Diferencial

El amplificador diferencial amplifica la diferencia entre dos voltajes de entrada, el circuito correspondiente y la ecuación que lo modela son:

$$V_{salida} = \frac{R_3}{R_4} (V_2 - V_1) \quad \text{Ecuación 3.5}$$

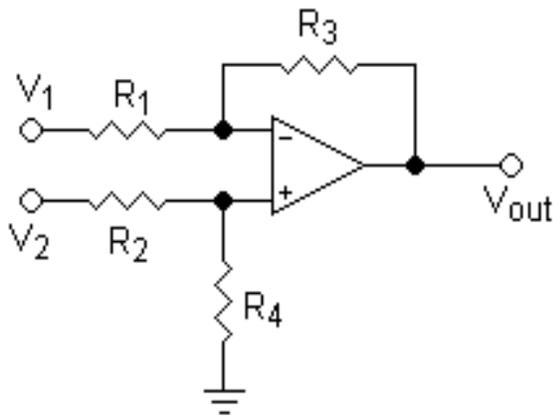


Figura 3.09.Diagrama esquemático del amplificador operacional conectado como amplificador diferencial

3.4.4. Amplificador de Instrumentación

El amplificador de instrumentación es de los circuitos más precisos, versátiles y útiles disponibles en la actualidad. Esta hecho de 3 amplificadores operacionales y 7 resistencias. Este amplificador se logra conectando dos amplificadores individuales a un amplificador diferencial básico.

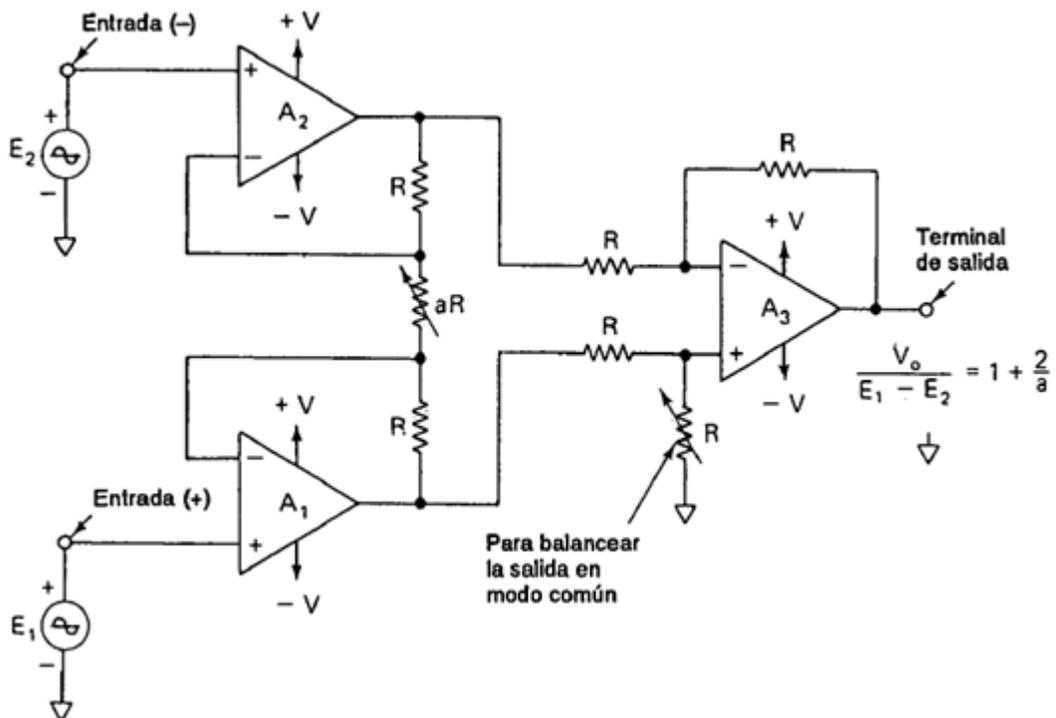


Figura 3.10. Diagrama esquemático del amplificador de instrumentación

Este amplificador se logra conectando un amplificador aislado formado por los amplificadores A1 y A2 a un amplificador diferencial básico. El amplificador A3 y sus cuatro resistencias iguales forman un amplificador diferencial con ganancia unitaria.

La resistencia conectada entre la entrada no inversora del amplificador A3 y tierra puede hacerse variar para balancear el circuito. Solamente la resistencia aR se utiliza para establecer la ganancia de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{V_o}{E_1 - E_2} = 1 + \frac{2}{a} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Dónde,

| | | |
|--------------------|---|-----------------------------------|
| V_o | : | Voltaje de salida |
| $E_1 - E_2$ | : | Diferencia de voltajes de entrada |
| $a = \frac{aR}{R}$ | : | Parámetro a |

Las características del amplificador de instrumentación se resumen de la siguiente manera:

- La ganancia de voltaje, desde la entrada diferencial ($E_1 - E_2$) a la salida de extremo único, se establece con una sola resistencia.
- La resistencia de entrada de ambas entradas es muy alta y no cambia al variar la ganancia.
- V_o no depende del voltaje común a E_1 y E_2 , solo de su diferencia.

3.5. Geometrías para ensayos y elementos sensores

Los elementos a ensayar con el prototipo son perfiles geométricos con una forma similar al sector de un ala de avión como el que se muestra en la siguiente figura:

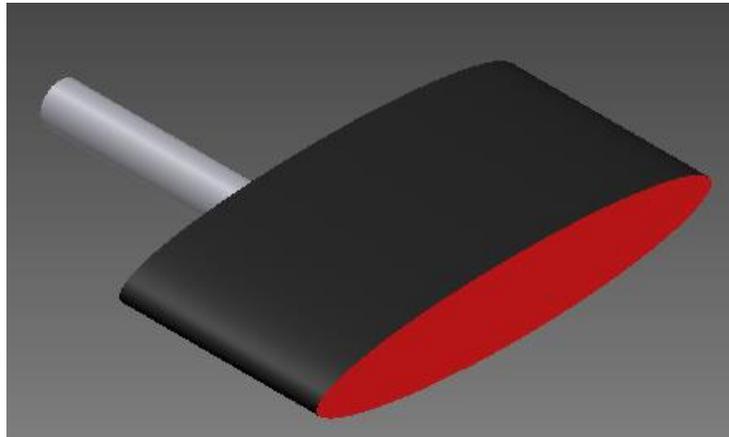


Figura 3.11. Modelo de perfil geométrico para ensayos en el prototipo de túnel de viento.

Los perfiles geométricos poseen un brazo en un extremo para efectos de acoplar el perfil al motor que modificará su posición, teniendo en cuenta la forma y la característica de que los elementos son desmontables el uso de filamentos de platino o tungsteno no es adecuado debido a su fragilidad, motivo por el cual se ha optado por el uso de diodos zener como elementos sensores los cuáles poseen las siguientes ventajas en comparación con los filamentos de platino o tungsteno:

- Presenta un elevado coeficiente de temperatura en su tensión zener.
- Pequeño tamaño que permite su calentamiento a una temperatura elevada con una potencia reducida <1 W. Además debido a su pequeña masa su tiempo de respuesta es pequeño (<1 s).
- Robusto, tanto a nivel mecánico como eléctrico. El zener es capaz de absorber picos altos de corriente sin deterioro y puede trabajar de manera continua con una disipación elevada.
- Bajo coste y fácil reemplazo.



Figura 3.12.Diodo Zener

Cada perfil poseerá 8 sensores (diodos zener) distribuidos en las partes superior e inferior del perfil:

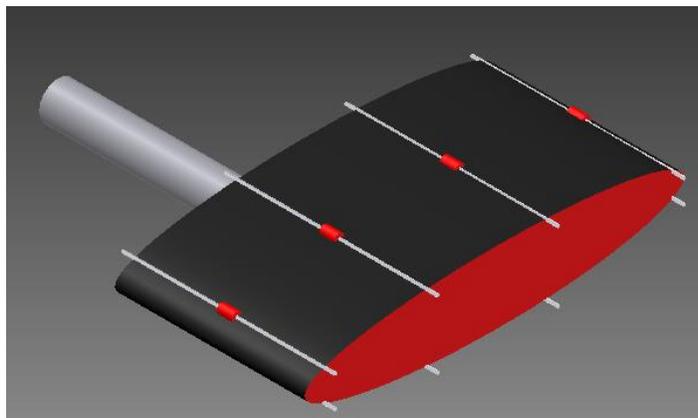


Figura 3.13.Esquema de diodos zener montados en perfil geométrico

3.6. Anemómetro basado en Diodo Zener

Teniendo en cuenta que se utilizarán como elementos sensores diodos zener, se reúne la información proporcionada anteriormente sobre elementos electrónicos y de instrumentación en un circuito que utilice diodos zener para medir la variación de la velocidad del viento.

El circuito a construir es el siguiente:

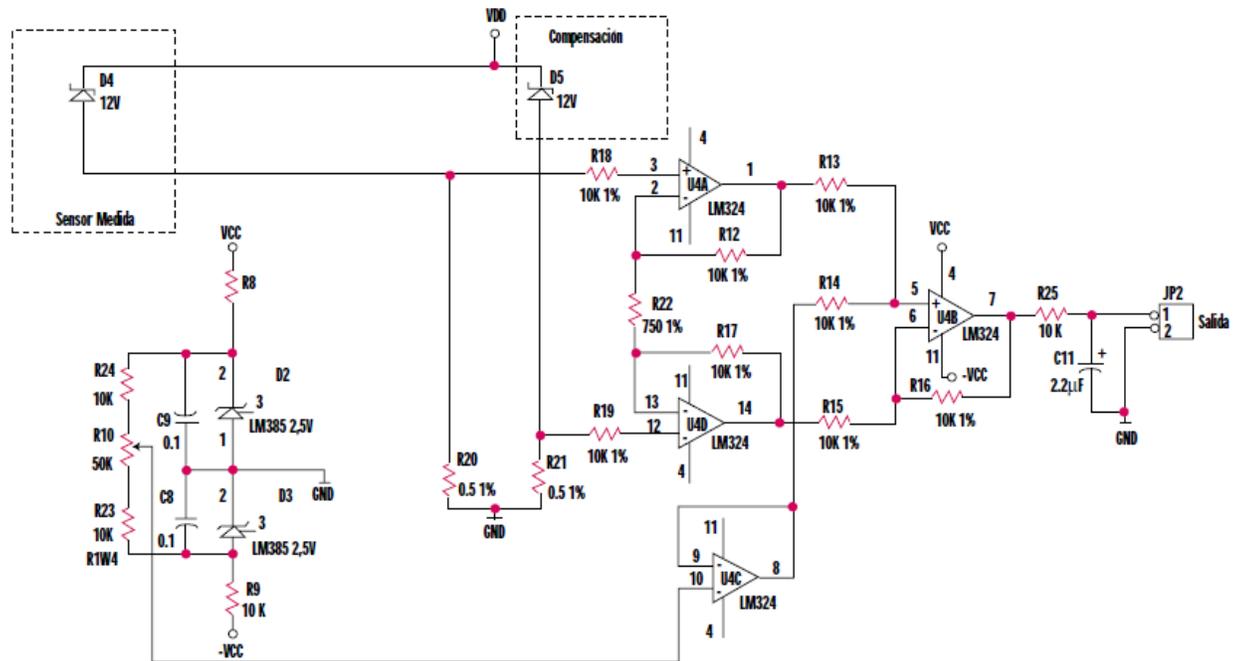


Figura 3.14.Diagrama esquemático del circuito de instrumentación para medición de velocidad del viento con diodo zener.

El circuito está conformado por los siguientes elementos:

- Puente Wheatstone formado por dos diodos zener 1N4742A de baja potencia ($<1W$) y dos resistencias de $1\ \Omega$ que se alimenta a una tensión constante de $12\ V$, esta tensión de referencia V_{ref} obliga a circular por los diodos corrientes similares que hace que establezcan su temperatura a valores comprendidos entre 70° y 90° , las variaciones de temperatura ambiente y de disipación en los diodos se auto cancelan gracias a la característica diferencial de puente.
- Amplificador de Instrumentación conformado por tres amplificadores operacionales incluidos en un solo circuito integrado LM324.
- Etapa de corrección de desviación (positiva o negativa) de los diodos zener (de compensación y medida) conformada por dos reguladores de voltaje LM385 de $2.5\ V$ y un potenciómetro.

Funcionamiento del circuito:

Cuándo el diodo sensor se sitúa frente a una corriente de aire, aumenta su disipación y por tanto tiende a disminuir su temperatura. Esta disminución de temperatura T provoca una disminución de su tensión zener expresada por la siguiente fórmula:

$$V_Z = S_Z T \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde,

| | | |
|-------|---|---|
| V_Z | : | Tensión Zener |
| S_Z | : | Coeficiente de temperatura igual a $S_Z = 0.065 \text{ V}/^\circ\text{C}$ para el diodo 1N4742A |
| T | : | Temperatura del diodo |

La disminución de tensión zener a su vez provoca un aumento de la corriente que circula por dicha rama. Este incremento de la corriente hace que la potencia disipada por el zener aumente y se restablezca su temperatura, a la vez, esta corriente adicional proporcional a la nueva disipación de potencia provoca un desequilibrio en el puente que genera una pequeña diferencia de potencial a la entrada del amplificador de instrumentación el cuál se encarga de amplificar dicha diferencia de voltaje.

El incremento de potencia disipada esta dado por:

$$P = V_{ref} I \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Dicho incremento de potencia es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad del viento, con lo cual se puede obtener una relación entre la velocidad del viento y la diferencia de potencial proporcionada a la salida del amplificador de instrumentación.

3.7. Diseño y Construcción de Placa de Circuito Impreso para circuitos sensores

El circuito para el sensor de velocidad del viento de la sección anterior corresponde a un solo diodo zener, dado que los perfiles que se ensayaran en el prototipo tendrán montados ocho diodos zener, se debe montar el circuito un total de ocho veces.

Para efectos de facilidad en el montaje se realizarán dos placas de circuito impreso, cada una conteniendo cuatro circuitos independientes cuyas alimentaciones serán cableadas externamente a la placa.

Se detalla a continuación el listado de componentes electrónicos a utilizar por circuito sensor, por placa de circuito y en total:

Tabla 3.01. Listado de componentes electrónicos por circuito, por placa de circuito impreso y total.

| Componente Electrónico | Cantidad por Circuito | Cantidad por Placa de Circuito Impreso | Total |
|---------------------------------------|-----------------------|--|-------|
| Diodo Zener 1N4742A | 2 | 8 | 16 |
| Resistencia $1\Omega, \frac{1}{4}W$ | 2 | 8 | 16 |
| Capacitor 2.2 μF electrolítico | 1 | 4 | 8 |
| Resistencia $750\Omega, \frac{1}{4}W$ | 1 | 4 | 8 |
| Resistencia $10k\Omega, \frac{1}{4}W$ | 13 | 52 | 104 |
| Capacitor 0.1 μF cerámico | 2 | 8 | 16 |
| Regulador LM336, 2.5V | 2 | 8 | 16 |
| Base para CI de 14 pines | 1 | 4 | 8 |
| Amplificador Operacional LM324 | 1 | 4 | 8 |
| Terminal Block Dobles | 3 | 12 | 24 |
| Terminal Block Triples | 2 | 8 | 16 |
| Potenciómetros de $50k\Omega$ | 1 | 4 | 8 |

El diseño del circuito impreso se detalla a continuación:

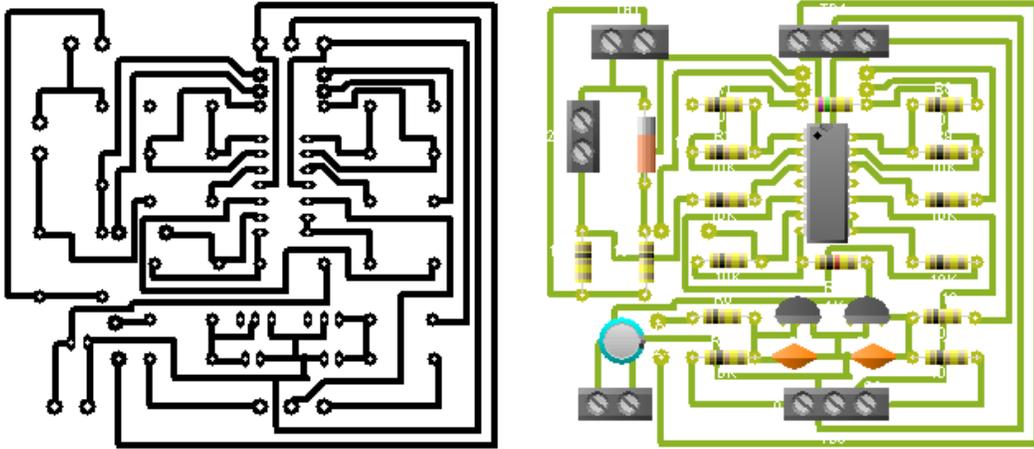


Figura 3.15. Diseño del circuito impreso y vista con componentes físicos

El diseño anterior se implantará cuatro veces en una sola placa de circuito impreso:

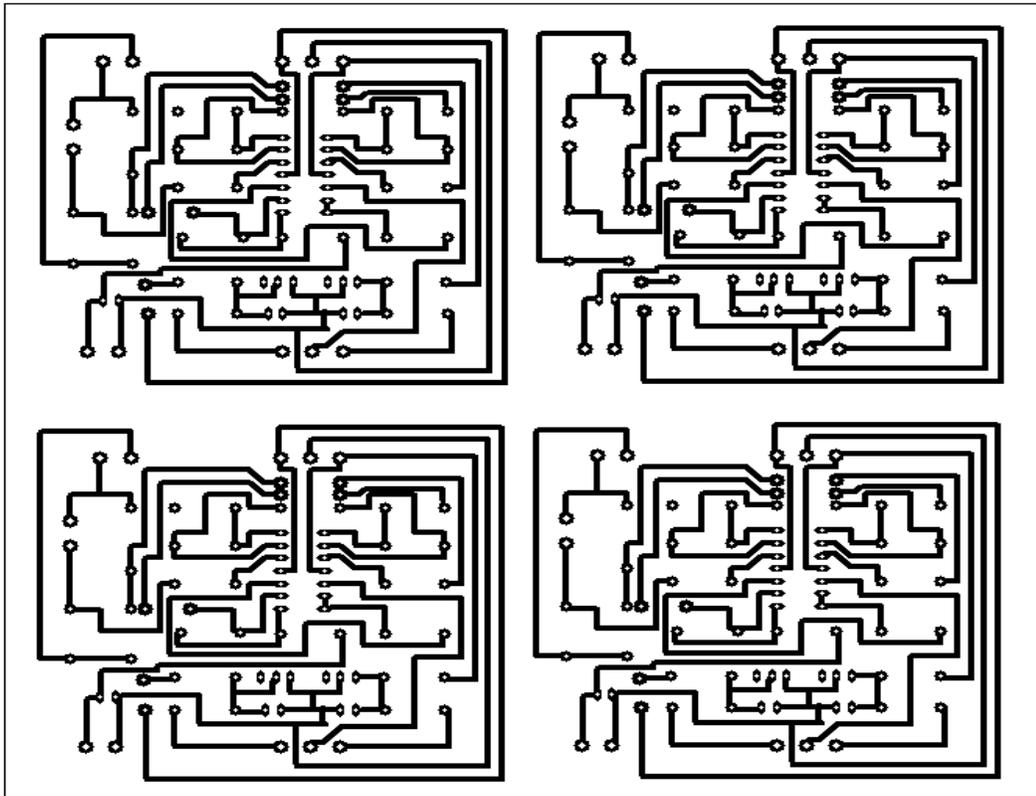


Figura 3.16. Diseño de placa de circuito impreso para cuatro sensores

Comparativa del montaje de la placa conteniendo cuatro circuitos, modelo digital y modelo real:

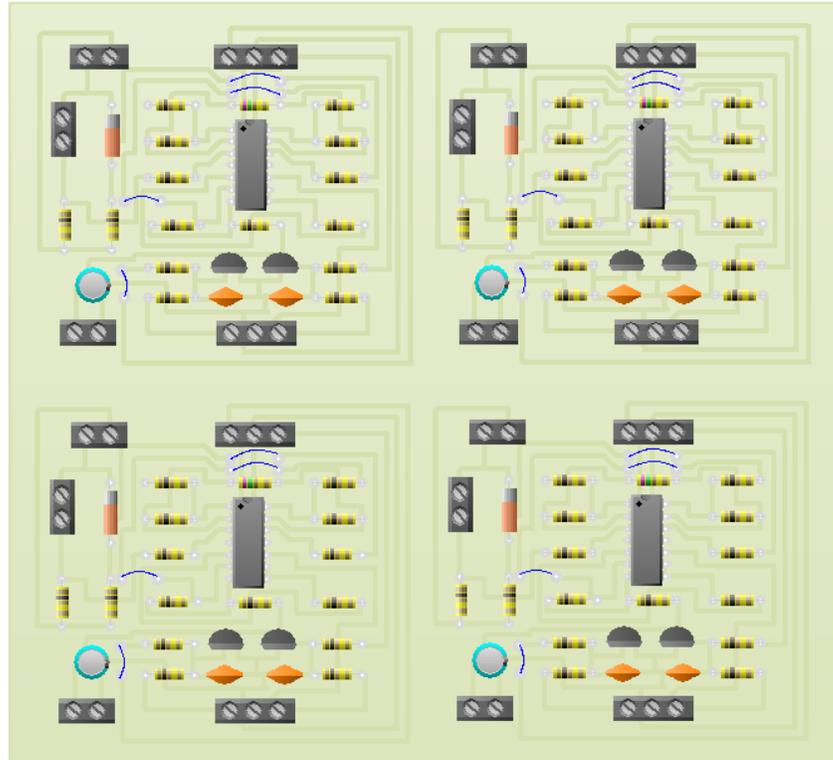


Figura 3.17.Placa de circuito impreso conteniendo cuatro sensores

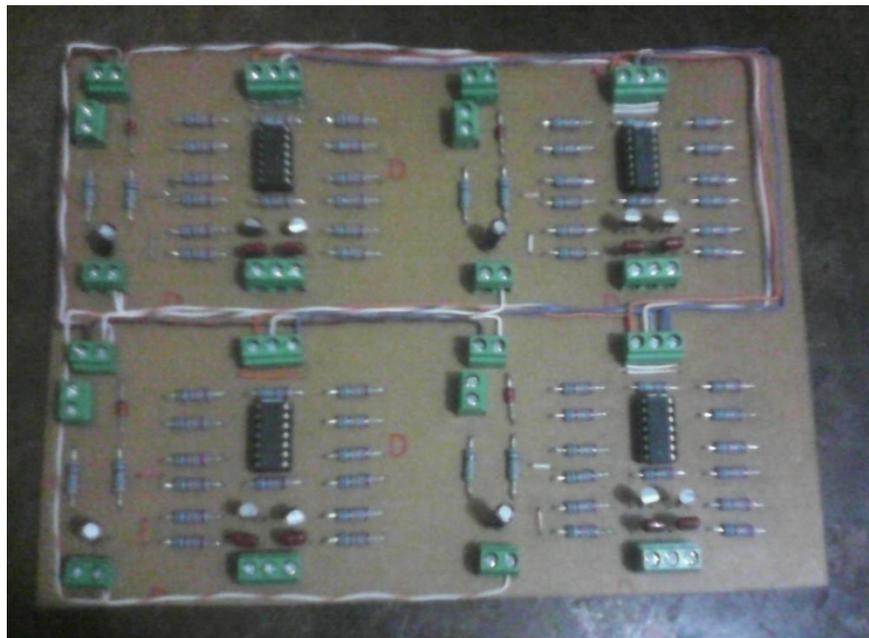


Figura 3.18.Placa de circuito impreso montada

3.8. Ecuación de Velocidad del Viento

Para deducir la ecuación de velocidad del viento en función de la diferencia de voltaje a la salida del amplificador diferencial se parte de que el flujo calorífico y la corriente de aire siguen aproximadamente una ley cuadrática de modo que la potencia disipada es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad del viento, como se muestra a continuación:

$$\Delta P = V_{ref} \Delta I \quad \text{Ecuación 3.10}$$

$$V_{ref} \Delta I \propto \sqrt{v}$$

Eliminando el símbolo de proporcionalidad:

$$V_{ref} \Delta I = k \sqrt{v} \quad \text{Ecuación 3.111}$$

Expresando la diferencia de corrientes y sustituyendo por su equivalente dado por la ley de Ohm:

$$V_{ref}(I_1 - I_2) = k \sqrt{v}$$

$$E_1 = R_1 I_1 \quad E_2 = R_2 I_2$$

$$V_{ref} \left(\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} \right) = k \sqrt{v} \quad \text{Ecuación 3.112}$$

Sustituyendo valores:

$$V_{ref} = 12V \quad R_1 = R_2 = 1\Omega$$

$$12(E_1 - E_2) = k \sqrt{v}$$

Utilizando ecuación del amplificador de instrumentación y encontrando el valor numérico del parámetro a :

$$aR = 750 \Omega R = 10 k\Omega a = \frac{aR}{R}$$

$$a = \frac{750 \Omega}{10 k\Omega} = 0.075$$

$$\frac{V_o}{E_1 - E_2} = 1 + \frac{2}{a}$$

Sustituyendo el parámetro a :

$$V_o = \left(1 + \frac{2}{0.075}\right) (E_1 - E_2) = 27.67(E_1 - E_2)$$

Despejando diferencia de voltajes de entrada:

$$E_1 - E_2 = \frac{V_o}{27.67} \quad \text{Ecuación 13.13}$$

Sustituyendo diferencia de voltajes en ecuación de velocidad:

$$12 \frac{V_o}{27.67} = k\sqrt{v}$$

$$0.43368V_o = k\sqrt{v}$$

Despejando velocidad:

$$(0.43368V_o)^2 = k^2v$$

$$v = \frac{(0.43368V_o)^2}{k^2} \quad \text{Ecuación 3.114}$$

Efectuando la medición de la velocidad del viento del ventilador que conforma el túnel aerodinámico con un anemómetro digital y con el circuito sensor utilizando diodos zener a diferentes calibrado para presentar 0 V a una velocidad del viento de 0 m/s, se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 3.02. Medición de velocidad de viento del ventilador con anemómetro digital y con sensor basado en diodo zener

| Distancia (cm) | v - Anemómetro Digital (m/s) | V_o - Voltaje de Salida del Circuito (V) |
|----------------|--------------------------------|--|
| 0 | 15 | 0.12 |
| 10 | 1.72 | 0.046 |
| 20 | 1.38 | 0.038 |
| 30 | 0.27 | 0.17 |

De la ecuación 2.14 se despeja k^2 y se calcula para los datos de la tabla 1:

$$k^2 = \frac{(0.43368V_o)^2}{v}$$

Tabla 3.03. Cálculo de la constante k^2 para las mediciones de voltaje y velocidad del viento

| v - Anemómetro Digital (m/s) | V_o - Voltaje de Salida del Circuito (V) | Constante k^2 (V^2A^2s/m) |
|--------------------------------|--|---------------------------------|
| 15 | 0.12 | 0.0001805 |
| 1.72 | 0.044 | 0.0002116 |
| 1.38 | 0.038 | 0.0001968 |
| 0.27 | 0.017 | 0.0002013 |

Tomando un valor promedio del valor de la constante:

$$k_{prom}^2 = \frac{0.0001805 + 0.0002116 + 0.0001968 + 0.0002013}{4}$$

$$k_{prom}^2 = 0.00019755 \text{ } V^2A^2s/m$$

Sustituyendo el valor promedio de la constante se obtiene la ecuación general para cálculo de la velocidad del viento en función del voltaje de salida del amplificador de instrumentación:

$$v = \frac{(0.43368V_o)^2}{0.00019755}$$

$$v = 952.05V_o^2 \quad \text{Ecuación 3.115}$$

Se tiene entonces que la ecuación 3.15 es la ecuación de instrumentación que proporciona la relación directa entre voltaje y velocidad del viento.

3.9. Distribución de Presiones

Para calcular la presión en los puntos en donde se efectúa la medición de velocidad del viento se aplicará la ecuación de Bernoulli para fluido incompresible debido al bajo número de Mach presente dentro del túnel de viento.

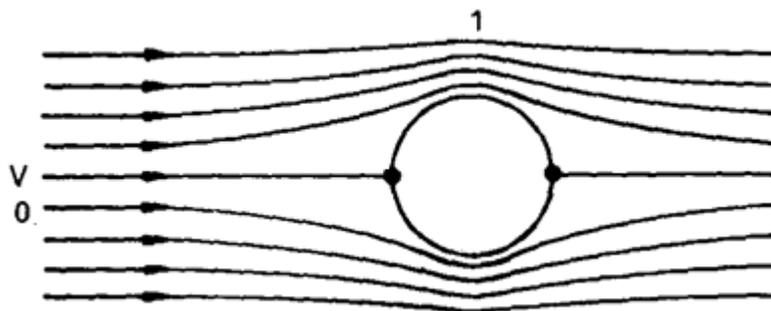


Figura 3.19. Cilindro frente a un flujo de fluido

Escribiendo la ecuación de Bernoulli entre el punto cero en el cuál se tiene flujo laminar y el punto 1:

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

Despejando p_1 :

$$p_1 = p_0 - \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_0^2) \quad \text{Ecuación 3.116}$$

Para poder calcular la presión en el punto de medición se requiere conocer la presión en la entrada de la cámara de pruebas en donde la velocidad es $v_0 = 15 \text{ m/s}$

Efectuando un Bernoulli entre el exterior del túnel de viento y la entrada de la cámara de pruebas se tiene:

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Dónde se tiene: $p_2 = 0$; $v_2 = 0$

Por lo que:

$$p_0 = -\frac{1}{2}\rho v_0^2 = -\frac{1}{2}(1.225)(15)^2 = -137.81 \text{ Pa}$$

Sustituyendo $p_0 = -137.81 \text{ Pa}$; $v_0 = 15 \text{ m/s}$ en ecuación 3.16:

$$p_1 = -137.81 - \frac{1}{2}(1.225)(v_1^2 - (15)^2)$$

$$p_1 = -137.81 - 0.6125(v_1^2 - 225)$$

$$p_1 = -137.81 - 0.6125v_1^2 + 137.81$$

$$p_1 = -0.6125v_1^2 \quad \text{Ecuación 3.117}$$

La ecuación 3.17 permite calcular la presión en un punto en particular del perfil geométrico en el cuál se conozca la velocidad.

4. SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL DEL PROTOTIPO DE TÚNEL DE VIENTO

4.1. Sistema eléctrico y de control general

El sistema eléctrico y de control general del prototipo de túnel de viento está conformado por los subsistemas siguientes:

- Panel de Control del Prototipo
- Placa electrónica Arduino Mega 2560
- Sistema de Instrumentación Electrónico
- Etapa de potencia para control de motor paso a paso
- Circuito de control del ventilador
- Fuente de alimentación DC
- Interfaz gráfica de usuario a través de computadora

Todos los subsistemas anteriores se interrelacionan de acuerdo al siguiente esquema de bloques:

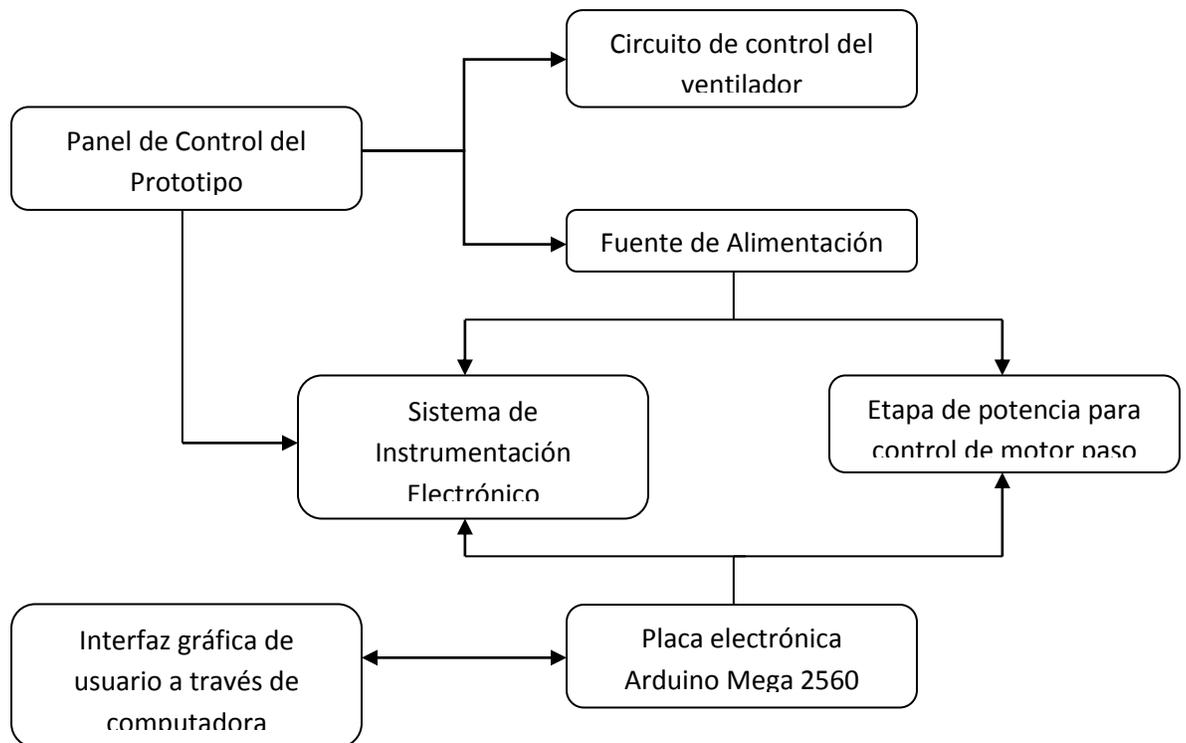


Figura 4.01. Esquema eléctrico y de control general

4.2. Panel de Control del Prototipo

El panel de control tendrá las siguientes funciones en el sistema eléctrico general:

- Energizar el sistema completo a través de un interruptor con su correspondiente protección.
- Encender y apagar el ventilador del túnel por medio de dos pulsadores con su respectiva indicación luminaria.
- Encender y apagar la fuente de voltaje DC que alimenta los circuitos tanto de instrumentación como de control de motor paso.
- Ajuste del voltaje de salida de los circuitos de instrumentación por medio de ocho potenciómetros correspondientes a cada circuito sensor.

4.3. Placa electrónica Arduino Mega 2560 y Sistema de Instrumentación

Arduino es una plataforma de computación física de código abierto basada en una placa electrónica simple y un entorno de desarrollo que permite escribir software en la placa.

La placa puede ser utilizada de manera individual o en conjunto con una computadora a través de un software compatible, es por esta razón que se optó por la utilización de arduino en el desarrollo del sistema de instrumentación y control del túnel de viento.

Las placas arduino poseen dos tipos de entradas y salidas diferentes:

- **Entradas y salidas digitales:** son terminales que funcionan solamente en dos estados posibles: estado en alto (5V) o estado en bajo (0V).
- **Entradas y salidas analógicas:** son terminales que trabajan en un rango de voltaje de 0 a 5V, por medio de un convertidor analógico – digital de 10 bits de resolución, el cuál divide el voltaje de entrada en un voltaje digital con valores que pueden ir desde 0 hasta 1023.

Teniendo en cuenta que el circuito sensor de velocidad del viento a su salida entrega valores de voltaje variables, se deben utilizar para su interpretación en una computadora los terminales analógicos de la placa arduino y

posteriormente a través de un código de programación calcular la velocidad respectiva del viento.

Para utilizarse como tarjeta de adquisición de datos se elige la placa Arduino Mega 2560 la cual posee las siguientes características:

- Micro controlador: ATmega1280
- Tensión de funcionamiento: 5V
- Voltaje de entrada (recomendado): 7-12V
- Voltaje de entrada (límites): 6-20V
- Digital pines I / O: 54 (15 proporcionan salida PWM)
- Pines de entrada analógica: 16
- Corriente DC por Pin I / O : 40 mA
- Corriente DC de 3.3V Pin: 50 mA
- Memoria Flash: 128 KB, 4 KB utilizado para arranque
- SRAM: 8 KB
- EEPROM: 4 KB
- Velocidad del reloj : 16 MHz



Figura 4.02.Placa Arduino Mega 2560

La conexión entre la placa Arduino Mega 2560 y los circuitos sensores es la siguiente:

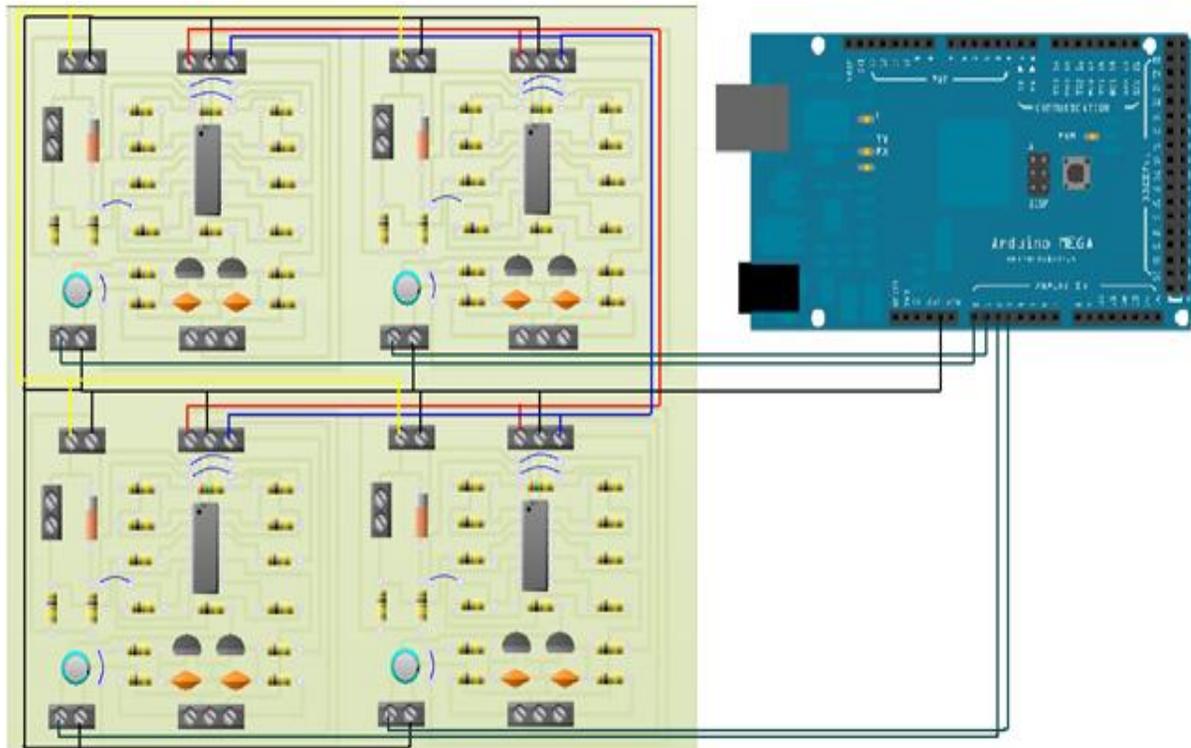


Figura 4.03. Conexión entre placa Arduino Mega y placa de circuitos sensores

4.4. Etapa de potencia para control de motor paso a paso

Como se detalló anteriormente un motor paso es un tipo de motor conformado por cuatro bobinas en el estator las cuáles deben energizarse en una secuencia determinada para producir el movimiento de rotación, el aumento en complejidad del control de este tipo de motores se ve recompensado por el aumento en precisión para posicionarlo ya que por pulso de bobina el motor gira una cierta cantidad de grados en particular.

Las características del motor a utilizar son las siguientes:

- Voltaje de trabajo: 5 V
- Consumo de corriente: 2 A
- Tipo de motor paso: unipolar
- Grados por paso: $1.8^\circ/\text{paso}$

El posicionamiento de los perfiles se efectuará por medio de la interfaz gráfica de usuario, la cual se comunica con el motor a través de la placa Arduino Mega 2560 utilizando sus terminales digitales, dado que el consumo de corriente del motor es de dos amperios se debe efectuar una etapa de potencia por bobina para satisfacer dicho consumo de corriente y a la vez poder gobernar el encendido/apagado de cada bobina a través de la placa Arduino.

Para poder lograr lo mencionado anteriormente se utilizó una etapa de potencia a transistores en su función como interruptor.

4.4.1. El transistor como interruptor

El transistor es un dispositivo semiconductor de tres terminales conocidas como:

- Emisor
- Colector
- Base

En su función como interruptor el transistor funciona aproximadamente de la misma manera que un interruptor de contacto mecánico con la ventaja de que no se produce desgaste y presenta a la vez un tiempo de respuesta reducido a la vez que puede manejar corrientes grandes dependiendo de la aplicación y del tipo de transistor que se utilice.

La conexión de un transistor como interruptor es la siguiente:

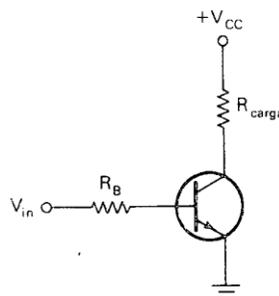


Figura 4.04. Transistor conectado como interruptor

En la conexión como interruptor la carga a controlar se conecta entre el colector y la fuente de alimentación, el emisor se conecta a tierra y en la base se conecta una resistencia para limitar la corriente en dicho terminal y poder gobernar con un voltaje adicional el transistor.

Cuando un transistor funciona como interruptor la corriente que circula en la base debe ser de un valor tal que este pueda variar entre las zonas de trabajo conocidas como zona de corte y zona de saturación representadas en el siguiente gráfico:

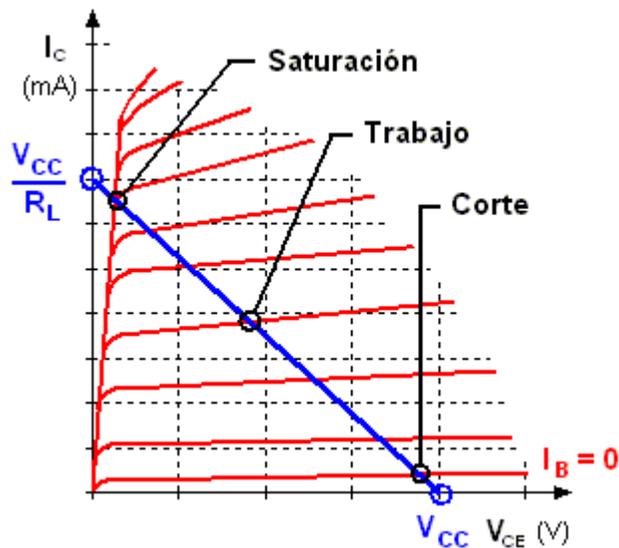


Figura 4.05. Curvas características de un transistor y zonas de trabajo

Zona de Corte: En la zona de corte como puede verse en la figura 4 la corriente en la base posee un valor aproximadamente igual a cero, la corriente en el colector es también aproximadamente cero y el voltaje entre colector y emisor posee un valor máximo, es en este estado cuando se dice que el transistor funciona como un interruptor abierto.

Zona de Saturación: En la zona de saturación como puede verse en la figura 4, la corriente de base posee un valor diferente de cero, la corriente en el colector posee un valor máximo e igual a la corriente de la carga y el voltaje entre colector y emisor es aproximadamente igual a cero, es en este estado cuando se dice que el transistor funciona como un interruptor cerrado.

Para que el transistor alterne entre las zonas de corte y saturación la corriente en la base debe ser de un valor en particular que depende de la ganancia del dispositivo, la corriente y el voltaje de la carga que va a controlarse y el voltaje del circuito de control.

El control de la corriente de base se logra utilizando un valor de resistencia que depende del voltaje de entrada en la base V_{in} , de tal manera que V_{in} determina cuando el transistor como interruptor se encuentra abierto, impidiendo el flujo de corriente por la carga, o cerrado permitiendo el flujo de corriente. Cuando V_{in} es un voltaje bajo, no hay flujo de corriente por la unión base – emisor. Con una corriente de base nula, no hay corriente de colector, y por tanto, no habrá corriente circulando por la carga y el transistor funciona como un interruptor abierto en serie con la carga (zona de corte), por el contrario cuando V_{in} es un voltaje alto, hay una determinada corriente de base, por lo que se establece una circulación de corriente de colector a emisor, lo que equivale a decir que el transistor funciona como un interruptor cerrado en serie con la carga (zona de saturación).

4.4.2. Cálculos relacionados con el transistor como interruptor.

Para diseñar una etapa de potencia utilizando el transistor como interruptor se debe conocer en primera instancia la corriente de la carga, la cual será igual a la corriente del colector:

$$I_{carga} = I_C \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Con la corriente de colector conocida se determina la corriente necesaria en la base para conseguir que el transistor funcione en la zona de saturación, las corrientes de base y colector se relacionan por medio de la siguiente expresión:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{DC}} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde,

| | | |
|--------------|---|--|
| I_B | : | Corriente de la base |
| I_C | : | Corriente del colector |
| β_{DC} | : | Ganancia del transistor en corriente directa |

La ganancia del transistor en corriente directa es un parámetro propio de cada dispositivo y puede conocerse a través de las hojas de características proporcionadas por el fabricante.

Una vez determinada la corriente de base se efectúa en el circuito de base una sumatoria de voltajes la cual da como resultado la siguiente expresión:

$$-V_{in} + I_B R_B + V_{B-E} = 0 \quad \text{Ecuación 4.20}$$

Donde,

| | | |
|-----------|---|-----------------------------------|
| V_{in} | : | Voltaje de base |
| I_B | : | Corriente de base |
| R_B | : | Resistencia de base |
| V_{B-E} | : | Voltaje de la unión base - emisor |

El voltaje de la unión base – emisor V_{B-E} es un valor que depende del material con el que se ha fabricado el dispositivo, para transistores de silicio $V_{B-E} = 0.7 V$, dado que en la actualidad la mayoría de dispositivos se fabrica de silicio se asumirá este valor en la ecuación 3.3 y se procederá a despejar la resistencia de base necesaria para limitar la corriente de base y así obtener la corriente de colector necesaria para encender la carga:

$$R_B = \frac{V_{in} - 0.7V}{I_B} \quad \text{Ecuación 4.21}$$

4.4.3. Diseño del circuito de potencia para control del motor paso a paso

El motor paso a paso a utilizar posee un consumo de corriente igual a dos amperios por lo que de la ecuación 4.1 se tiene:

$$I_{carga} = I_C = 2A$$

El siguiente paso en el procedimiento de diseño es el cálculo de la corriente de base con la ganancia en DC del transistor, para conocer este parámetro se ha seleccionado como dispositivo de control el transistor TIP3055 cuyas características eléctricas son:

- Voltaje colector – emisor máximo: 60 V
- Corriente continua en el colector máxima: 15 A
- Corriente de base máxima: 7 A
- Ganancia en DC: 20 – 100 a $I_C = 4 A$

(Para ver hoja de características completa consultar anexo 7)

Tomando un valor promedio de la ganancia en DC:

$$\beta_{prom} = \frac{20 + 100}{2} = 60$$

Calculando el valor de la corriente de base con la ecuación 4.2:

$$I_B = \frac{2}{60} = 0.033 A$$

Con la corriente de base se calcula entonces la resistencia de base necesaria con un voltaje de trabajo de 5 V utilizando la ecuación 4.4:

$$R_B = \frac{5 - 0.7V}{0.033}$$

$$R_B = 129 \Omega$$

La resistencia de base se selecciona entonces de un valor comercial ligeramente menor para garantizar así la corriente de base y por consiguiente la corriente de colector.

$$R_B = 100 \Omega$$

La corriente necesaria en la base es de 33 mA y teniendo en cuenta que la placa Arduino por salida digital puede proporcionar 40 mA la etapa de potencia podría finalizarse en este punto, pero dado que la diferencia es bastante cercana y estarán cuatro salidas digitales en continuo funcionamiento mientras se posiciona el motor, se opta por añadir una etapa de potencia posterior a la placa Arduino y anterior a la etapa con transistores TIP3055 para limitar la corriente por salida digital, para ello se escoge el transistor 2N2222 cuyas características son:

- Voltaje colector – emisor máximo: 30 V
- Corriente continua en el colector máxima: 800 mA
- Corriente de base máxima: 200 mA
- Ganancia en DC: $100 - 300$ a $I_C = 150\text{ mA}$

(Para ver hoja de características completa consultar anexo 7)

Tomando un valor de 100 de la ganancia en DC se calcula el valor de la corriente de base con la ecuación 4.2:

$$I_B = \frac{0.033}{100} = 0.33\text{ mA}$$

Con la corriente de base se calcula entonces la resistencia de base necesaria con un voltaje de trabajo de 5 V utilizando la ecuación 4.4:

$$R_B = \frac{5 - 0.7\text{V}}{0.33\text{ mA}}$$

$$R_B = 13.03\text{ k}\Omega$$

La resistencia de base se selecciona entonces de un valor comercial ligeramente menor para garantizar así la corriente de base y por consiguiente la corriente de colector.

$$R_B = 10\text{ k}\Omega$$

El diagrama esquemático del circuito queda de la siguiente manera:

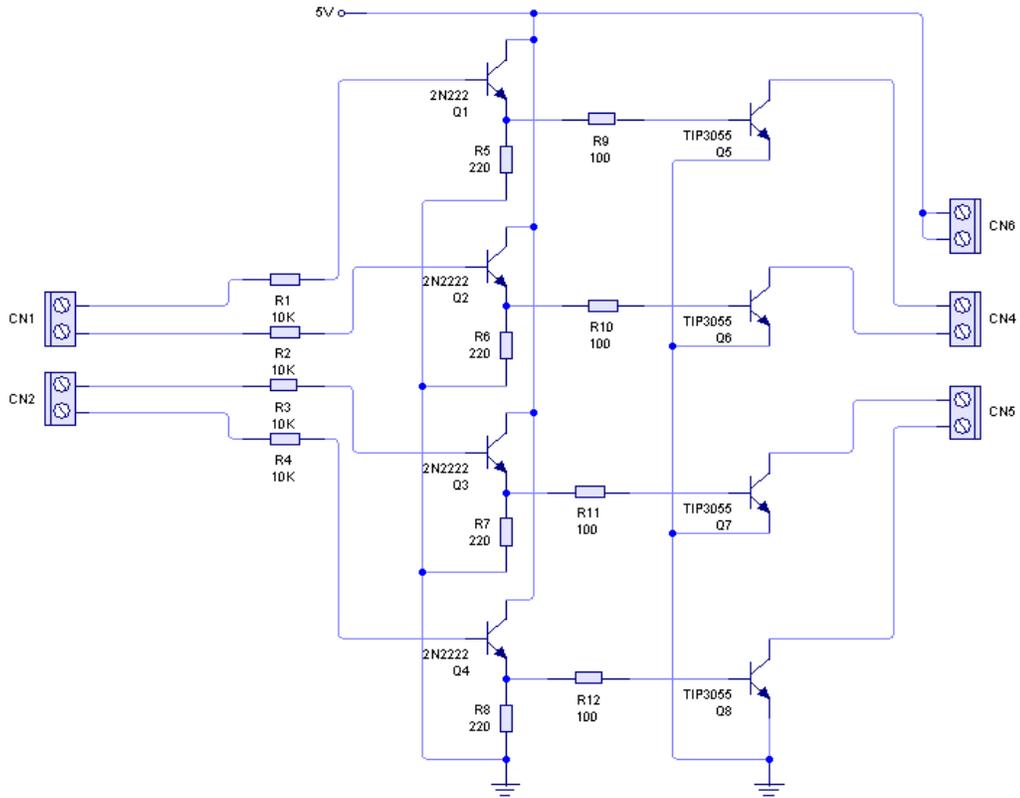


Figura 4.06. Diagrama Esquemático de la Etapa de Potencia

Se detalla a continuación el listado de componentes electrónicos a utilizar en el circuito de potencia del motor paso:

Tabla 4.01. Listado de componentes electrónicos para circuito de potencia

| Componente Electrónico | Cantidad por Circuito |
|--|-----------------------|
| Resistencia $10\text{ k}\Omega, \frac{1}{4}\text{ W}$ | 4 |
| Resistencia $100\ \Omega, \frac{1}{4}\text{ W}$ | 4 |
| Resistencia $220\ \Omega, \frac{1}{4}\text{ W}$ | 4 |
| Transistor 2N2222 | 4 |
| Transistor TIP3055 | 4 |
| Terminal Block Dobles | 6 |

El montaje del circuito de potencia queda de la siguiente manera:

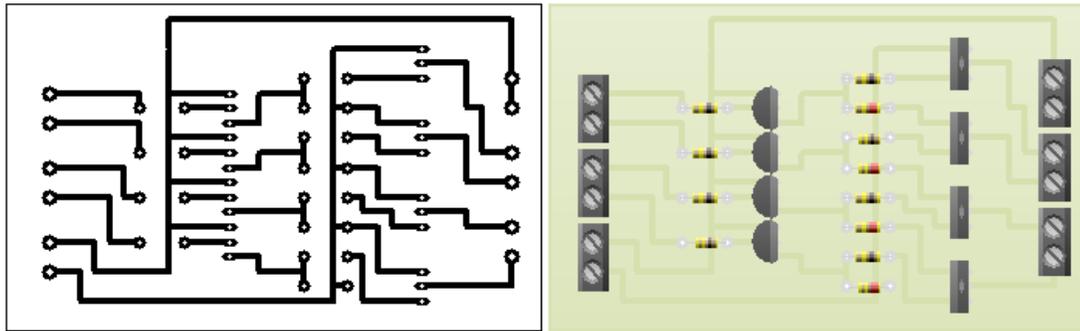


Figura 4.07. Placa de circuito impreso de etapa de potencia

Montaje real del circuito:

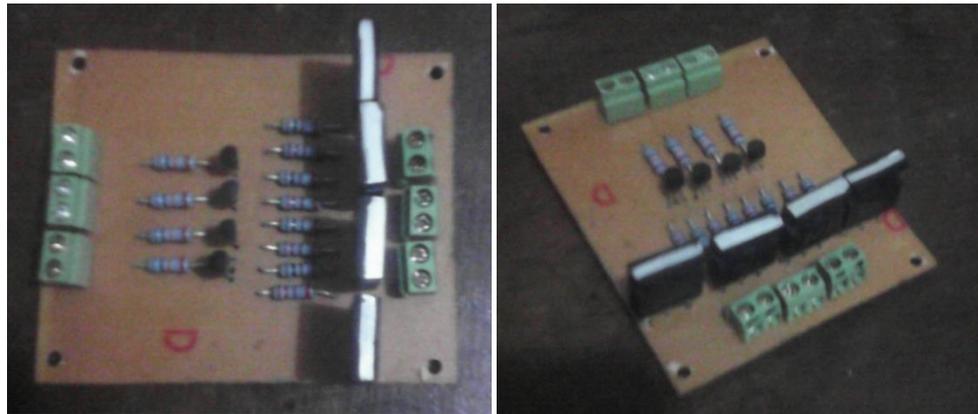


Figura 4.08. Etapa de potencia para control de motor paso montada.

4.5. Circuito de control del ventilador y fuente de alimentación DC

Para el control del ventilador y la fuente de alimentación se tiene la ventaja de que ambos elementos funcionan con una conexión a 110 voltios por lo que se representarán ambos controles independientes en un mismo circuito.

Características eléctricas del ventilador:

- Voltaje de alimentación: 110 V
- Consumo de corriente: 0.4 A

Características eléctricas de entrada de la fuente de alimentación (AC):

- Voltaje de alimentación: 110/220 V
- Consumo de corriente: 4 A

Características eléctricas de salida de la fuente de alimentación (DC):

- $V = 3.3 V ; I = 20.0 A$
- $V = 5.0 V ; I = 30.0 A$
- $V = 12.0 V ; I = 15.0 A$
- $V = -5.0 V ; I = 0.5 A$
- $V = -12.0 V ; I = 0.5 A$
- Potencia máxima de salida: $300 W, (3.3V, 5.0V, 12.0V)$

El circuito de control para el ventilador y la fuente de alimentación es el siguiente:

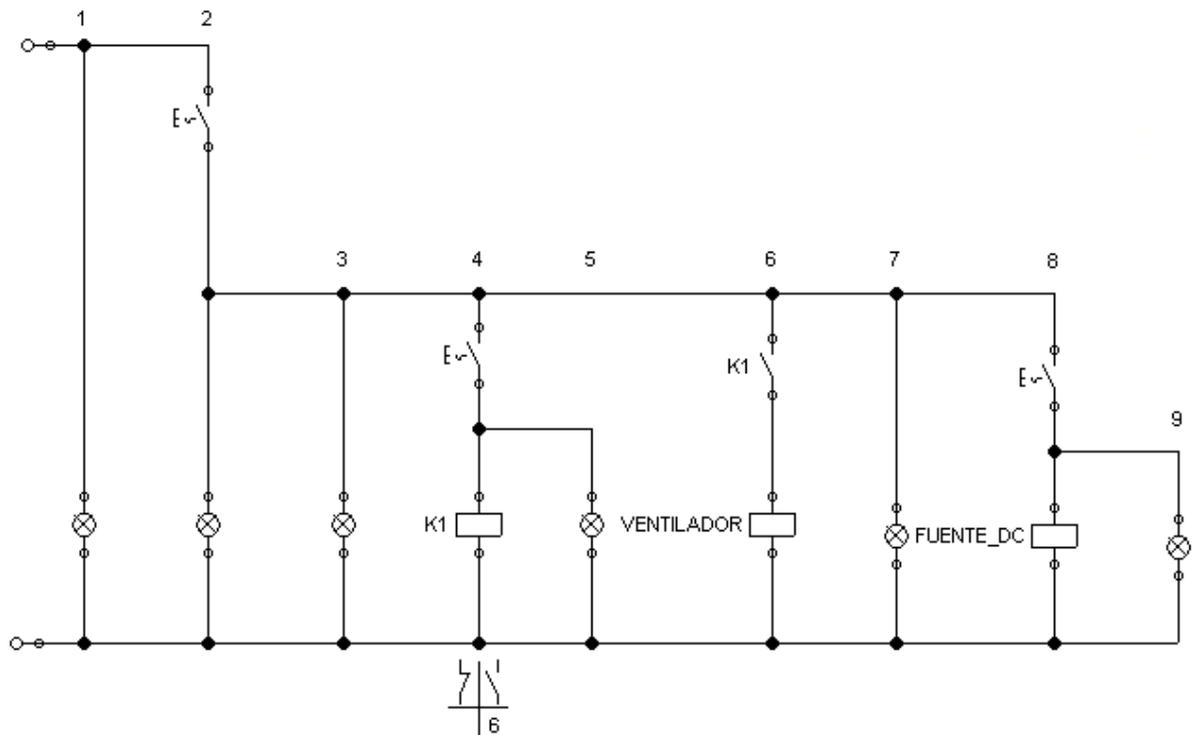


Figura 4.09. Circuito de control correspondiente al ventilador y fuente de alimentación DC

Se detalla a continuación el listado de componentes a utilizar para el montaje del circuito:

Tabla 4.02.Listado de componentes eléctricos para circuito de control de ventilador y fuente de alimentación

| Componente Eléctrico | Cantidad por Circuito |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Interruptor de 2 posiciones | 3 |
| Relé 110V 2 - NC; 2 - NA | 2 |
| Luces Piloto 110V | 5 |

El circuito se energiza mediante el interruptor principal, el cual está conectado a una luz piloto que indicará cuando haya energía presente, luego el ventilador posee un circuito conformado por un interruptor, dos luces piloto para indicar el estado de encendido y apagado y un relé de 110V para controlar el ventilador, el circuito de la fuente posee un interruptor y dos luminarias, con estos elementos se controlan de manera independiente tanto el ventilador como la fuente de voltaje.

4.6. Interfaz gráfica de usuario a través de computadora

El último elemento que forma parte del sistema de control del prototipo de túnel de viento es la interfaz gráfica de usuario a través de computadora, dicha interfaz gráfica posee las siguientes funciones:

- Posicionar el perfil geométrico según ángulo de incidencia seleccionado el cuál contiene diez posiciones posibles.
- Retornar el perfil geométrico a su posición inicial antes de poder seleccionar un ángulo de incidencia diferente
- Captura de datos de voltaje producidos por la salida de los circuitos sensores
- Conversión de datos de voltaje a velocidad de viento según ecuación 2.15
- Calculo de presiones a partir de valores de velocidad del viento en los diferentes puntos del perfil geométrico
- Presentación de los datos tanto de velocidad del viento como de presión en formato de valores puntuales y gráficos

- Guardar datos de velocidad del viento y presión de manera puntual cuando el usuario lo indique
- Creación de archivos Excel con datos de velocidad del viento y presión guardados por el usuario

Todas las funciones anteriores se han combinado en una sola ventana creada con el software Matlab:

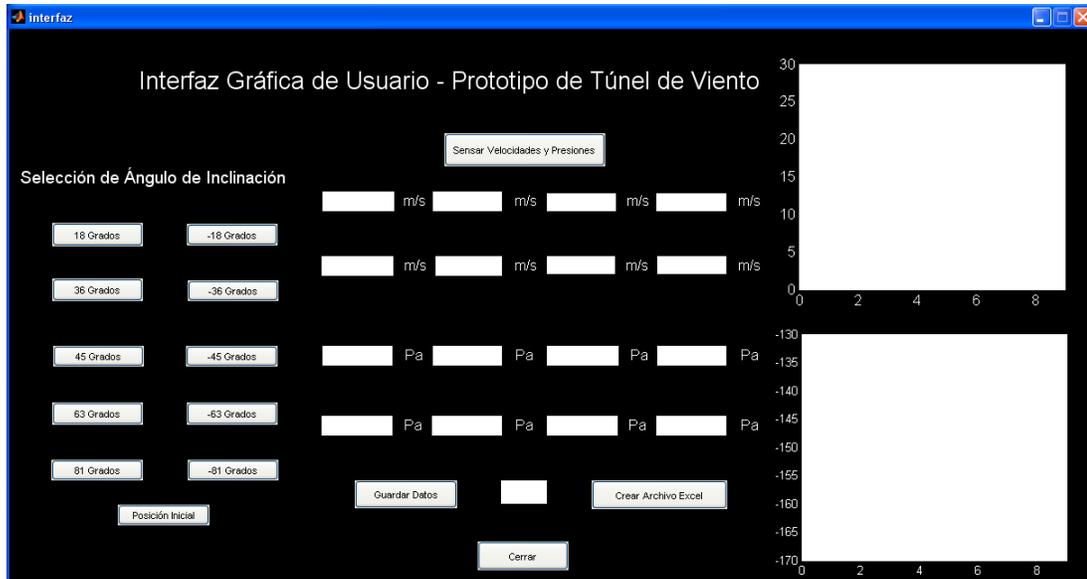


Figura 4.10. Interfaz Gráfica de Usuario

En los gráficos las escalas se han ajustado al rango de valores en que estarían los datos tanto de velocidad del viento como de presión, para revisar código fuente ver anexo 4.

4.7. Simulación CFD de un ensayo en el prototipo de túnel de viento.

Para efectos de comparación entre un ensayo real y verificar los datos reflejados en la interfaz gráfica de usuario, se realizó una simulación CFD de un ensayo con un perfil indicando como parámetros de entrada y salida:

- Velocidad a la entrada: $v = 15 \text{ m/s}$
- Flujo másico: $\dot{m} = 0.369 \text{ kg/s}$
- Paredes Adiabáticas
- Presión de salida: $P = P_{atm} = 101.31 \text{ kPa}$
- Temperatura: $T = 293.20 \text{ K}$
- Ángulo de incidencia: $\theta = 0^\circ$

Los resultados obtenidos para un ángulo de incidencia igual a cero son:

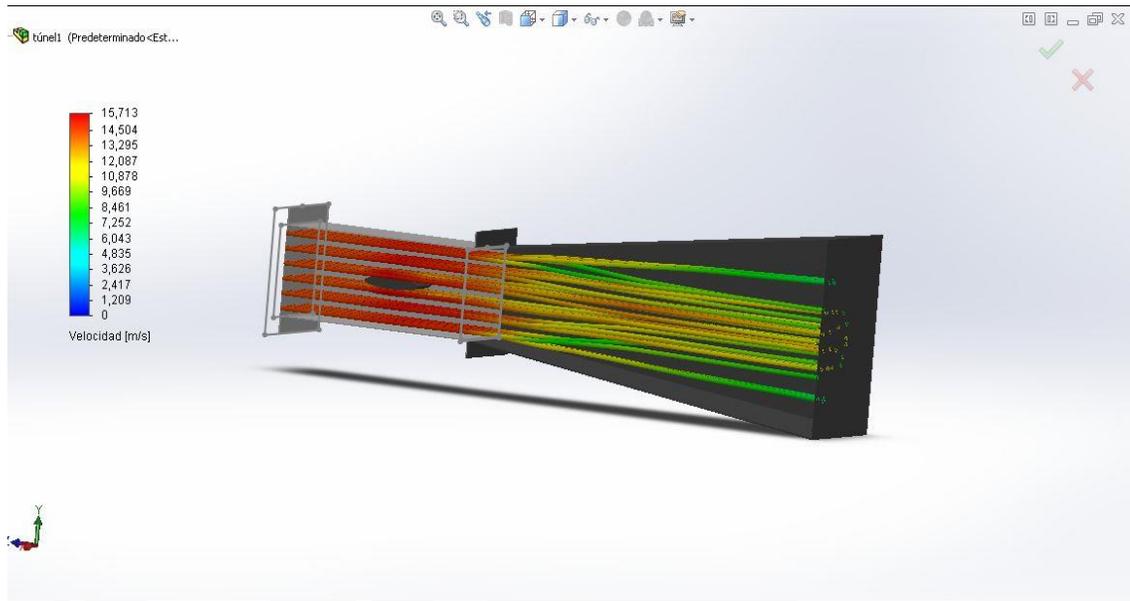


Figura 4.11.Ensayo con perfil geométrico y ángulo de incidencia igual a cero.

En el modelo resultante se puede observar un flujo laminar dentro de la cámara de pruebas y una velocidad aproximadamente constante, en los alrededores del perfil geométrico se puede observar una leve disminución según la escala de velocidad con colores y posteriormente en el difusor se observa una disminución de la velocidad hasta valores de entre 3 m/s a 5 m/s .

Efectuando un segundo ensayo, modificando solamente el ángulo de incidencia, se tienen los siguientes datos:

- Velocidad a la entrada: $v = 15 \text{ m/s}$
- Flujo másico: $\dot{m} = 0.369 \text{ kg/s}$
- Paredes Adiabáticas
- Presión de salida: $P = P_{atm} = 101.31 \text{ kPa}$
- Temperatura: $T = 293.20 \text{ K}$
- Ángulo de incidencia: $\theta \cong 30^\circ$

Los resultados de este segundo ensayo se muestran en la siguiente figura:

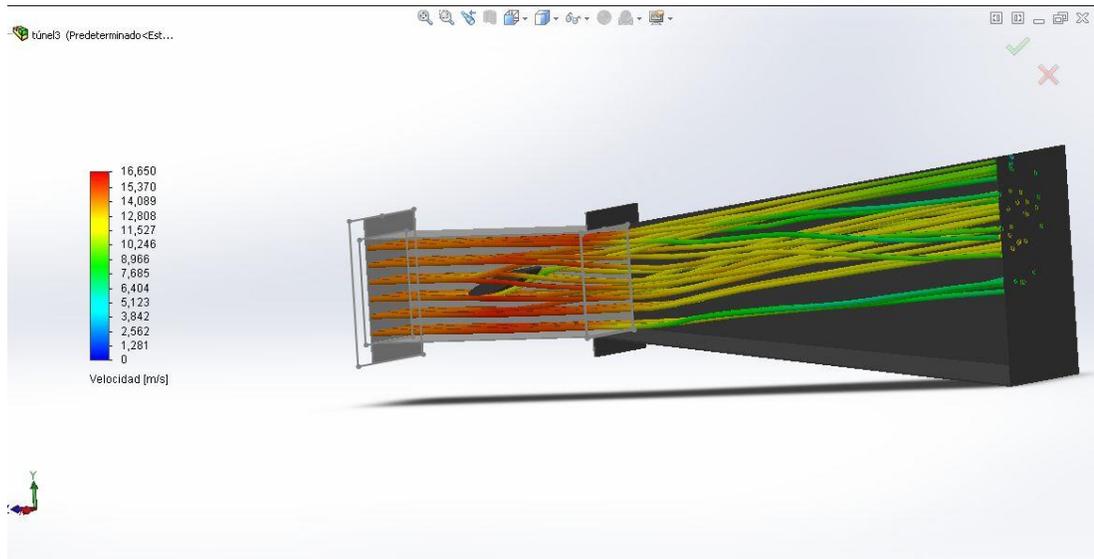


Figura 4.12.Ensayo con perfil geométrico y ángulo de incidencia aproximadamente igual a treinta grados.

Se puede observar que se tiene un flujo de aire laminar en la sección de la cámara de pruebas anterior al perfil geométrico con un valor aproxima de $v = 15 \text{ m/s}$, luego en las inmediaciones del perfil geométrico la velocidad se ve afectada de tal manera que en la parte superior su valor aumenta a un valor aproximado de $v = 16.5 \text{ m/s}$ y en la parte inferior del perfil la velocidad disminuye a un valor aproximado entre 10 m/s y 11 m/s , lo cuál indicaría un aumento de la presión en la parte inferior y una disminución en la parte superior lo cual se vería reflejado en los datos de la interfaz gráfica de usuario al efectuar el mismo ensayo.

CONCLUSIONES

- El diseño de un túnel aerodinámico involucra varias áreas de la ingeniería mecánica, por lo que el diseño y construcción es de gran provecho para la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador en la parte de investigación dado que la aerodinámica es un área no muy explotada en nuestro país.
- La parte de instrumentación del túnel debe estar orientada a la determinación de campos de velocidades y presiones por ser variables de gran importancia en el proceso de diseño de álabes para turbinas o de perfiles aerodinámicos en particular.
- El proceso de diseño no puede ser concluido sin la evaluación en condiciones aproximadas a las de trabajo para verificar el comportamiento de los elementos diseñados.
- El proceso de diseño se facilita con el uso de herramientas computacionales de gran capacidad tales como MATLAB en especial cuando se presentan cálculos iterativos o surgen ecuaciones en extremo complejas.
- Si se realiza un proceso de diseño sistemático, fundamentado y ordenado, se obtendrán los resultados esperados y no se requerirán modificaciones posteriores en exceso.
- La simulación realizada para cada una de las variables presentadas demuestra como primera aproximación que el diseño del túnel se adapta al comportamiento esperado.
- El CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) es una herramienta de gran ayuda y alcance que ayuda en la validación de un diseño en una primera aproximación ya que una simulación no sustituye nunca la validación de un prototipo construido y probado en laboratorio.
- Utilizando la electrónica y la placa Arduino se ha logrado un sistema de instrumentación confiable y preciso con el cuál el análisis de datos después de un ensayo se facilita en gran medida.

- Aparte de ser una herramienta para cálculos matemáticos Matlab también es una herramienta de gran capacidad para la implementación de acciones de control.
- La implementación del prototipo de túnel de viento en la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador en prácticas de laboratorio presenta un punto de partida en el uso de nuevas herramientas que permiten realizar ensayos más confiables y precisos.
- La programación es una herramienta que no puede ignorarse hoy en día ya que gracias a ella ha sido posible la realización del prototipo en cuanto al sistema de instrumentación y control.

RECOMENDACIONES

- Desarrollar la parte investigativa en el área de la aerodinámica incorporando prácticas de laboratorio concernientes al tema en las materias afines impartidas por la Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Desarrollar procedimientos de diseño de elementos involucrados en aerodinámica en base al conocimiento de variables de presión y velocidad determinadas de manera experimental bajo condiciones conocidas.
- Impulsar el uso de herramientas computacionales en procedimientos de análisis y diseño de elementos aerodinámicos tales como Matlab y simulaciones CFD.
- Profundizar en el uso de la electrónica y los microcontroladores orientación a la Ingeniería Mecánica para poder así desarrollar sistemas de instrumentación y control en conjunto con herramientas de programación.
- Desarrollar guías de laboratorio adicionales para trabajo con el prototipo de túnel de viento para explotar al máximo las posibilidades que ofrece al ser un sistema programable.

BIBLIOGRAFÍA

Tecnología de los Plásticos. (Diciembre de 2011). Recuperado el Noviembre de 2013, Tecnología de los Plásticos: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>

Bove - ag plásticos y elastómeros s.l. (2013). *Plásticos Mecanizables*. Recuperado el Noviembre de 2013, de Plásticos Mecanizables: http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_metacrilato.html

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia. (2010). El Difusor y la Tobera en un túnel de Viento. En G. P. R. Martínez, *Revista Colombiana de Física*. Bogotá.

Driscoll, E. R. (s.f.). *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales*.

Maloney, T. J. (s.f.). *Electronica Industrial-Dispositivos y Sistemas*.

Sistemas, E. I.-D. (s.f.). *Anemómetro mediante diodo zener*. Jaén, España: DPTO. ELECTRÓNICA, ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR, UNIVERSIDAD DE JAÉN.

Streeter. (2000). Mecánica de Fluidos. En V. L. Streeter, *Mecánica de Fluidos*.

Universidad Nacional de Ingeniería - Perú. (2008). Diseño de un túnel de viento para pruebas de aerogeneradores. En W. U. Salomé Gonzáles Chávez, *Diseño, construcción e instalación de un túnel de viento para pruebas de pequeños aerogeneradores*.

ANEXOS

Anexo 1: Código MATLAB para el cálculo de longitud y ángulo de cono en el difusor

```
1 %Universidad de El Salvador
2 %Facultad de Ingeniería y Arquitectura
3 %Escuela de Ingeniería Mecánica
4 %Programador: José Alejandro Guzmán
5 %Calculo de ángulo de cono y longitud del difusor
6
7 - syms L theta theta1 R1 R2 %Definición de variables
8 - L = 0: 0.05: 1; %Definiendo matriz con valores de longitud
9 %desde cero hasta un metro espaciados 5 cm
10 - R1 = 0.08; %Valor del radio hidráulico de entrada
11 - R2 = 0.18; %Valor del radio hidráulico de salida
12 - theta = atan((R2 - R1) ./ L); %Ecuación que relaciona las variables
13 - theta1 = theta.*(180/pi); %Convirtiendo valores de ángulos a grados
14 - tabla = [L ; theta1]; %Agrupando datos en una tabla
15 - fprintf('%7.2f %7.2f \n',tabla) %Mostrando resultados
```

Resultados:

| Command Window | |
|----------------|-------|
| 0.00 | 90.00 |
| 0.05 | 63.43 |
| 0.10 | 45.00 |
| 0.15 | 33.69 |
| 0.20 | 26.57 |
| 0.25 | 21.80 |
| 0.30 | 18.43 |
| 0.35 | 15.95 |
| 0.40 | 14.04 |
| 0.45 | 12.53 |
| 0.50 | 11.31 |
| 0.55 | 10.30 |
| 0.60 | 9.46 |
| 0.65 | 8.75 |
| 0.70 | 8.13 |
| 0.75 | 7.59 |
| 0.80 | 7.13 |
| 0.85 | 6.71 |
| 0.90 | 6.34 |
| 0.95 | 6.01 |
| 1.00 | 5.71 |

Anexo 2: Código MATLAB para el cálculo del diámetro hidráulico, área, velocidad y número de Reynolds por secciones para el difusor

```

1      %Universidad de El Salvador
2      %Facultad de Ingeniería y Arquitectura
3      %Escuela de Ingeniería Mecánica
4      %Programador: José Alejandro Guzmán
5      %Calculo de parámetros en el difusor
6
7      syms L h ln A Dh v Re ro u           %Definición de variables
8      L = 0: 0.05: 0.65;                 %Definiendo matriz con valores de longitud
9                                          %desde cero hasta 0.65 metros espaciados 5 cm
10     h = L.*tan(9*(pi/180));              %Calculo de longitud h de cada sección con ángulo
11                                          %cono de 9 grados
12     ln= 0.14 + 2.*h;                    %Calculo de lado equivalente para cada sección
13     A = (ln).^2;                         %Calculo del área de cada sección
14     Dh = 2*sqrt(A./pi);                  %Diámetro hidráulico de cada sección
15     v = 0.301./A;                        %Velocidad a lo largo del difusor
16     ro = 1.225;                          %Densidad del aire
17     u = 1.8794e-5;                       %Viscosidad dinámica del aire
18     Re = (ro.*v.*Dh)./u;                 %Calculo del número de Reynolds
19     tabla = [L ; A ; Dh ; v ; Re];       %Agrupando datos en una tabla
20     fprintf('%7.4f %7.4f %7.4f %7.4f %7.4f\n',tabla) %Mostrando resultados

```

Resultados:

| Command Window | | | | |
|----------------|--------|--------|---------|-------------|
| 0.0000 | 0.0196 | 0.1580 | 15.3571 | 158128.5853 |
| 0.0500 | 0.0243 | 0.1758 | 12.3942 | 142057.3856 |
| 0.1000 | 0.0295 | 0.1937 | 10.2128 | 128951.5565 |
| 0.1500 | 0.0352 | 0.2116 | 8.5604 | 118059.6898 |
| 0.2000 | 0.0414 | 0.2295 | 7.2788 | 108864.4743 |
| 0.2500 | 0.0480 | 0.2473 | 6.2649 | 100998.1190 |
| 0.3000 | 0.0552 | 0.2652 | 5.4490 | 94191.9728 |
| 0.3500 | 0.0629 | 0.2831 | 4.7827 | 88245.2291 |
| 0.4000 | 0.0711 | 0.3009 | 4.2315 | 83004.7809 |
| 0.4500 | 0.0798 | 0.3188 | 3.7704 | 78351.8515 |
| 0.5000 | 0.0890 | 0.3367 | 3.3808 | 74192.8832 |
| 0.5500 | 0.0987 | 0.3546 | 3.0485 | 70453.1816 |
| 0.6000 | 0.1089 | 0.3724 | 2.7630 | 67072.3894 |
| 0.6500 | 0.1196 | 0.3903 | 2.5157 | 64001.2041 |

Anexo 3: Código MATLAB para el cálculo del factor de fricción, coeficiente k, pérdidas en función de alturas y caída de presión por secciones para el difusor

```

22 %Universidad de El Salvador
23 %Facultad de Ingeniería y Arquitectura
24 %Escuela de Ingeniería Mecánica
25 %Programador: José Alejandro Guzmán
26 %Cálculo de parámetros en el difusor
27 |
28 syms f k delta_h delta_p theta g
29 f=[];
30 f(1)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.1580) + 2.523/(158128*sqrt(f))) ');
31 f(2)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.1758) + 2.523/(142060*sqrt(f))) ');
32 f(3)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.1937) + 2.523/(128950*sqrt(f))) ');
33 f(4)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.2116) + 2.523/(118060*sqrt(f))) ');
34 f(5)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.2295) + 2.523/(108860*sqrt(f))) ');
35 f(6)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.2473) + 2.523/(101000*sqrt(f))) ');
36 f(7)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.2652) + 2.523/(94190*sqrt(f))) ');
37 f(8)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.2831) + 2.523/(88250*sqrt(f))) ');
38 f(9)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.3009) + 2.523/(83000*sqrt(f))) ');
39 f(10)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.3188) + 2.523/(78350*sqrt(f))) ');
40 f(11)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.3367) + 2.523/(74190*sqrt(f))) ');
41 f(12)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.3546) + 2.523/(70450*sqrt(f))) ');
42 f(13)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.3724) + 2.523/(67070*sqrt(f))) ');
43 f(14)=solve(' (1/sqrt(f)) = -0.869*log(0.000046/(3.7*0.3903) + 2.523/(64000*sqrt(f))) ');
44
45 theta = 9*(pi/180);
46 g=9.81;
47 k = ((f./(8*tan(theta/2)))+0.6*tan(theta/2));
48 delta_h=k.*(ro.*(v).^2)./(2*g);
49 delta_p=(ro*g).*delta_h;
50 tabla1 = [L ; f ; k ; delta_h ; delta_p];
51 fprintf('\n\n');
52 fprintf('%7.4f %7.4f %7.4f %7.4f %7.4f\n',tabla1)
53
%Definiendo variables
%Definiendo matriz vacia
%Calculando f para los valores de la tabla anterior
%Theta igual a 9 grados
%Aceleración de la gravedad
%Calculando coeficiente k
%Pérdidas en forma de alturas
%Caídas de presión
%Agrupando datos en una tabla
%Mostrando resultados

```

Resultados:

| Command Window | | | | |
|----------------|--------|--------|--------|---------|
| 0.0000 | 0.0182 | 0.0761 | 1.1207 | 13.4682 |
| 0.0500 | 0.0183 | 0.0763 | 0.7316 | 8.7923 |
| 0.1000 | 0.0184 | 0.0765 | 0.4981 | 5.9862 |
| 0.1500 | 0.0186 | 0.0767 | 0.3511 | 4.2189 |
| 0.2000 | 0.0187 | 0.0770 | 0.2547 | 3.0603 |
| 0.2500 | 0.0189 | 0.0772 | 0.1893 | 2.2750 |
| 0.3000 | 0.0191 | 0.0775 | 0.1437 | 1.7270 |
| 0.3500 | 0.0192 | 0.0778 | 0.1111 | 1.3352 |
| 0.4000 | 0.0194 | 0.0781 | 0.0873 | 1.0489 |
| 0.4500 | 0.0196 | 0.0783 | 0.0695 | 0.8356 |
| 0.5000 | 0.0198 | 0.0786 | 0.0561 | 0.6742 |
| 0.5500 | 0.0199 | 0.0789 | 0.0458 | 0.5501 |
| 0.6000 | 0.0201 | 0.0792 | 0.0377 | 0.4534 |
| 0.6500 | 0.0203 | 0.0794 | 0.0314 | 0.3771 |

Anexo 4: Código MATLAB de interfaz gráfica

```
function varargout = interfaz(varargin)
% INTERFAZ MATLAB code for interfaz.fig
%   INTERFAZ, by itself, creates a new INTERFAZ or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = INTERFAZ returns the handle to a new INTERFAZ or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   INTERFAZ('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in INTERFAZ.M with the given input
arguments.
%
%   INTERFAZ('Property','Value',...) creates a new INTERFAZ or raises
the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%   applied to the GUI before interfaz_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
application
%   stop. All inputs are passed to interfaz_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help interfaz

% Last Modified by GUIDE v2.5 02-Feb-2015 04:41:17

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn', @interfaz_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn',  @interfaz_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn',  [] ,...
'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before interfaz is made visible.
```

```

function interfaz_OpeningFcn(hObject, ~, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to interfaz (see VARARGIN)

%Código fuente de interfaz gráfica de usuario para control de prototipo
%de túnel de viento con sistema de instrumentación electrónico
%Programador: José Alejandro Guzmán Herrera
delete(instrfind({'Port'}, {'COM3'}))           %Limpiando puerto serial
a = arduino('COM3');%Creando variable arduino a.pinMode(2, 'output');
%Definiendo salidas
a.pinMode(3, 'output');
a.pinMode(4, 'output');
a.pinMode(5, 'output');
handles.a=a;           %Incorporando Arduino en estructura Handles
global count m m1     %Definiendo variables globales
count=0;              %Inicializando variable count
m=[];                 %Creando matrices vacías
m1=[];

% Choose default command line output for interfaz
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes interfaz wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = interfaz_OutputFcn(hObject, ~, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
close

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(~, ~, handles)

```

```

% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
syms bobina x % Creación de variables locales
global Y      % Variable global Y
bobina=2;     % Inicializando variable bobina
x=1;         % Inicializando contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off') %Deshabilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=10   % Posicionamiento a 18 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina+1;
    x=x+1;
if bobina>5
bobina=2;
end
end
Y=1;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on') %Habilitando retorno
% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(~, ~, handles)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
syms bobina x % Creación de variables locales
global Y      % Variable global Y
bobina=2;     % Inicializando variable bobina
x=1;         % Inicializando contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off') %Deshabilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=20   % Posicionamiento a 36 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)

```

```

bobina=bobina+1;
    x=x+1;
if bobina>5
bobina=2;
end
end
Y=2;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on')    %Habilitando retorno

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
symsbobinax%Creación de variables locales
global Y    %Variable global Y
bobina=2;    %Inicialización de variable bobina
x=1;    %Inicialización contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off')%Deshabilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=25    %Posicionamiento a 45 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina+1;
    x=x+1;
if bobina>5
bobina=2;
end
end
Y=3;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on')    %Habilitando retorno

% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
symsbobinax%Creación de variables locales
global Y    %Variable global
bobina=2;    %Inicialización de variable bobina
x=1;    %Inicialización contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off')    %Deshabilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')

```

```

set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=35 %Posicionamiento a 63 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina+1;
    x=x+1;
if bobina>5
bobina=2;
end
end
Y=4;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on') %Habilitando retorno

% --- Executes on button press in pushbutton7.
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton7 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
symsbobinax%Creación de variables locales
global Y %Creación de variable global
bobina=2; %Inicialización de variable bobina
x=1; %Inicialización contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off') %Deshabilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=45 %Posicionamiento a 81 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina+1;
    x=x+1;
if bobina>5
bobina=2;
end
end
Y=5;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on') %Habilitando retorno

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton8.
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
symsbobinax%Creación de variables locales
global Y %Creación de variable global
bobina=5; %Inicialización de variable bobina
x=1; %Inicialización de contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off') %Deshabilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=10
%Posicionamiento a -18 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
    x=x+1;
if bobina<2
bobina=5;
end
end
Y=6;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on') %Habilitando retorno

% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
symsbobinax%Creación de variables locales
global Y %Creación de variable global
bobina=5; %Inicialización de variable bobina
x=1; %Inicialización de contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off') %Deshabilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')

```

```

set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=20           %Posicionamiento a -36 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
    x=x+1;
if bobina<2
bobina=5;
end
end
Y=7;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on')           %Habilitando retorno

% --- Executes on button press in pushbutton10.
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
symsbobinax%Creación de variables locales
global Y           %Creación de variable global
bobina=5;          %Inicialización de variable bobina
x=1;               %Inicialización de contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off')
%Deshabilitando botones de acción
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=25           %Posicionamiento a -45 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
    x=x+1;
if bobina<2
bobina=5;
end
end
Y=8;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on')           %Habilitando retorno
% --- Executes on button press in pushbutton11.
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
symsbobinax%Creación de variables locales

```

```

global Y                                %Creación de variable global
bobina=5;                                %Inicialización de variable bobina
x=1;                                     %Inicialización de contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off') %Deshabilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=35                               %Posicionamiento a -63 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
    x=x+1;
if bobina<2
bobina=5;
end
end
Y=9;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on') %Habilitando retorno

% --- Executes on button press in pushbutton12.
function pushbutton12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
symsbobinax%Creación de variables locales
global Y                                %Creación de variable global
bobina=5;                                %Inicialización de variable bobina
x=1;                                     %Inicialización de contador
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'off') %Deshabilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'off')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'off')
while x<=45                               %Posicionamiento a -81 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
    x=x+1;

```

```

if bobina<2
bobina=5;
end
end
Y=10;
set(handles.pushbutton4, 'Enable', 'on')           %Habilitando retorno
% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
symsxbobina%Creación de variables locales
global Y      %Variable global Y
x=1;          %Inicializando variable contador
switch Y      %Estructura selectiva para retorno a posición original
case 1
bobina=3;
while x<=10   %Retorno a posición original partiendo de 18 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
        x=x+1;
if bobina<2
bobina=5;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on')           %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
Y=0;
case 2
bobina=5;
while x<=20   %Retorno a posición original partiendo de 36 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
        x=x+1;
if bobina<2
bobina=5;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on')           %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')

```

```

set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
Y=0;
case 3
bobina=2;
while x<=25           %Retorno a posición original partiendo de 45 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
        x=x+1;
if bobina<2
bobina=5;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on')           %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
Y=0;
case 4
bobina=4;
while x<=35           %Retorno a posición original partiendo de 63 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
        x=x+1;
if bobina<2
bobina=5;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on')           %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
Y=0;
case 5

```

```

bobina=2;
while x<=45      %Retorno a posición original partiendo de 81 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina-1;
        x=x+1;
if bobina<2
bobina=5;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on') %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
Y=0;
case 6
bobina=4;
while x<=10     %Retorno a posición original partiendo de -18 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina+1;
        x=x+1;
if bobina>5
bobina=2;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on') %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
Y=0;
case 7
bobina=2;
while x<=20     %Retorno a posición original partiendo de -36 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina+1;
        x=x+1;

```

```

if bobina>5
bobina=2;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on')           %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
Y=0;
case 8
bobina=5;
while x<=25      %Retorno a posición original partiendo de -45 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina+1;
        x=x+1;
if bobina>5
bobina=2;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on')           %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
Y=0;
case 9
bobina=3;
while x<=35      %Retorno a posición original partiendo de -63 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina+1;
        x=x+1;
if bobina>5
bobina=2;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on')           %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')

```

```

set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
Y=0;
case 10
bobina=5;
while x<=45      %Retorno a posición original partiendo de -81 grados
handles.a.digitalWrite(bobina,1);
pause(0.2)
handles.a.digitalWrite(bobina,0);
pause(0.2)
bobina=bobina+1;
        x=x+1;
if bobina>5
bobina=2;
end
end
set(handles.pushbutton2, 'Enable', 'on')      %Habilitando botones
set(handles.pushbutton3, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton5, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton6, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton7, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton8, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton9, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton10, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton11, 'Enable', 'on')
set(handles.pushbutton12, 'Enable', 'on')
        Y=0;
end

% --- Executes on button press in togglebutton2.
function togglebutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to togglebutton2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton2

%Creación de variables para registro de datos
symsdato1dato2dato3dato4dato5dato6dato7dato8b_ev1v2v3v4v5v6v7v8
symsV1V2V3V4V5V6V7V8p1p2p3p4p5p6p7p8velxpres
vel=[];          %Creando matriz vacia para velocidades
pres=[];        %Creando matriz vacia para presiones
x=1:8;          %Definiendo rango de x para gráficos
b_e=get(handles.togglebutton2,'value'); %Tomando valor de botón
while b_e==1
%set(handles.togglebutton5, 'Enable', 'off')
dato1=handles.a.analogRead(0); %Realizando lectura de A0
        v1=((dato1*5)/1023); %Convirtiendo a valor de voltaje
        V1=(952.05)*(v1^2); %Convirtiendo voltaje a velocidad del viento
vel(1,1)=V1; %Asignando posición en matriz de velocidad
        p1=0.6125*(V1)^2; %Calculando presión

```

```

pres(1,1)=p1;           %Asignando posición en matriz de presión
set(handles.sensor1,'String',V1); %Mostrando velocidad en tiempo real
set(handles.presion1,'String',p1); %Mostrando presión en tiempo real
    dato2=handles.a.analogRead(1);
    v2=(dato2*5)/1023;      %Para los sensores restantes se utiliza
    V2=(952.05)*(v2^2);    %el mismo código solamente variando
vel(2,1)=V2;           %el número de sensor y la posición
    p2=-0.6125*(V2)^2;    %en la matriz
pres(2,1)=p2;
set(handles.sensor2,'String',V2);
set(handles.presion2,'String',p2);
    dato3=handles.a.analogRead(2);
    v3=(dato3*5)/1023;
    V3=(952.05)*(v3^2);
vel(3,1)=V3;
    p3=-0.6125*(V3)^2;
pres(3,1)=p3;
set(handles.sensor3,'String',V3);
set(handles.presion3,'String',p3);
    dato4=handles.a.analogRead(3);
    v4=(dato4*5)/1023;
    V4=(952.05)*(v4^2);
vel(4,1)=V4;
    p4=-0.6125*(V4)^2;
pres(4,1)=p4;
set(handles.sensor4,'String',V4);
set(handles.presion4,'String',p4);
    dato5=handles.a.analogRead(4);
    v5=(dato5*5)/1023;
    V5=(952.05)*(v5^2);
vel(5,1)=V5;
    p5=-0.6125*(V5)^2;
pres(5,1)=p5;
set(handles.sensor5,'String',V5);
set(handles.presion5,'String',p5);
    dato6=handles.a.analogRead(5);
    v6=(dato6*5)/1023;
    V6=(952.05)*(v6^2);
vel(6,1)=V6;
    p6=-0.6125*(V6)^2;
pres(6,1)=p6;
set(handles.sensor6,'String',V6);
set(handles.presion6,'String',p6);
    dato7=handles.a.analogRead(6);
    v7=(dato7*5)/1023;
    V7=(952.05)*(v7^2);
vel(7,1)=V7;
    p7=-0.6125*(V7)^2;
pres(7,1)=p7;
set(handles.sensor7,'String',V7);
set(handles.presion7,'String',p7);
    dato8=handles.a.analogRead(7);
    v8=(dato8*5)/1023;
    V8=(952.05)*(v8^2);
vel(8,1)=V8;
    p8=-0.6125*(V8)^2;

```

```

pres(8,1)=p8;
set(handles.sensor8,'String',V8);
set(handles.presion8,'String',p8);
plot(handles.axes1,x,vel,'o');           %Graficando velocidades
plot(handles.axes2,x,pres,'o');         %Graficando presiones
pause(0.1)
    b_e=get(handles.togglebutton2,'value');
end
%set(handles.togglebutton5,'Enable','on')

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sensor1_CreateFcn(hObject,~,handles)
% hObject    handle to sensor1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sensor2_CreateFcn(hObject,eventdata,handles)
% hObject    handle to sensor2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sensor3_CreateFcn(~,eventdata,~)
% hObject    handle to sensor3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sensor4_CreateFcn(hObject,eventdata,handles)
% hObject    handle to sensor4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sensor5_CreateFcn(hObject,~,~)
% hObject    handle to sensor5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sensor6_CreateFcn(hObject,eventdata,handles)

```

```

% hObject      handle to sensor6 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sensor7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to sensor7 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sensor8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to sensor8 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes on button press in pushbutton14.
function pushbutton14_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton14 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global count m ml
count=count+1;           %Aumentando contador en 1
dato1=handles.a.analogRead(0); %Procedimiento de lectura y conversión
v1=(dato1*5)/1023;      %de voltaje a velocidad del viento,
V1=(1041.67)*(v1^2);   %cálculo de presión para cada sensor
p1=-145-0.6125*(V1)^2;
dato2=handles.a.analogRead(1);
v2=(dato2*5)/1023;
V2=(1041.67)*(v2^2);
p2=-145-0.6125*(V2)^2;
dato3=handles.a.analogRead(2);
v3=(dato3*5)/1023;
V3=(1041.67)*(v3^2);
p3=-145-0.6125*(V3)^2;
dato4=handles.a.analogRead(3);
v4=(dato4*5)/1023;
V4=(1041.67)*(v4^2);
p4=-145-0.6125*(V4)^2;
dato5=handles.a.analogRead(4);
v5=(dato5*5)/1023;
V5=(1041.67)*(v5^2);
p5=-145-0.6125*(V5)^2;
dato6=handles.a.analogRead(5);
v6=(dato6*5)/1023;
V6=(1041.67)*(v6^2);
p6=-145-0.6125*(V6)^2;
dato7=handles.a.analogRead(6);
v7=(dato7*5)/1023;
V7=(1041.67)*(v7^2);

```

```

p7=-145-0.6125*(V7)^2;
dato8=handles.a.analogRead(7);
v8=(dato8*5)/1023;
V8=(1041.67)*(v8^2);
p8=-145-0.6125*(V8)^2;
m(count,1)=V1;           %Se llenan las matrices creadas como
m(count,2)=V2;           %variables globales y vacías con los
m(count,3)=V3;           %Datos de presión y velocidad para
m(count,4)=V4;%Guardarlos en libro Excel
m(count,5)=V5;
m(count,6)=V6;
m(count,7)=V7;
m(count,8)=V8;
m1(count,1)=p1;
m1(count,2)=p2;
m1(count,3)=p3;
m1(count,4)=p4;
m1(count,5)=p5;
m1(count,6)=p6;
m1(count,7)=p7;
m1(count,8)=p8;
set(handles.dato,'String',count);

% --- Executes on button press in pushbutton15.
function pushbutton15_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton15 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global count m m1
xlswrite('velocidades.xls',m,'matlab'); %Libro Excel de velocidades
xlswrite('presiones.xls',m1,'matlab'); %Libro Excel para presiones
count=0; %Llevando conteo a cero
set(handles.dato,'String',count);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function dato_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to dato (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function presion1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to presion1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function presion2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to presion2 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function presion3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to presion3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function presion4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to presion4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function presion5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to presion5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function presion6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to presion6 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function presion7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to presion7 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function presion8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to presion8 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

```

Anexo 5: Guía de Laboratorio

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



“DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDADES Y PRESIONES EN GEOMETRÍAS A DIFERENTES ÁNGULOS DE INCIDENCIA DEL AIRE”

ASIGNATURA: _____.

CICLO: _____, AÑO: _____.

Alumnos: _____.

_____.

Objetivo:

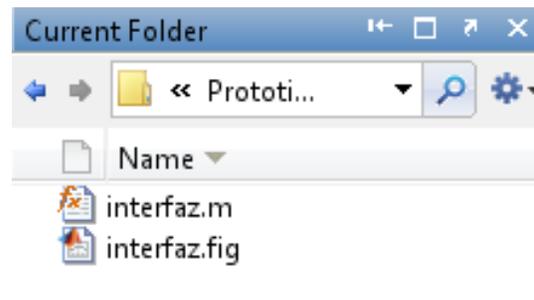
Identificar la relación entre el ángulo de incidencia de una corriente de aire, la velocidad y presión en diferentes puntos de un perfil geométrico con el fin de poder efectuar cálculos de las fuerzas generadas por la corriente de aire.

Equipo a utilizar:

- Computadora con software Matlab
- Prototipo de túnel de viento con sistema de instrumentación electrónico

PROCEDIMIENTO:

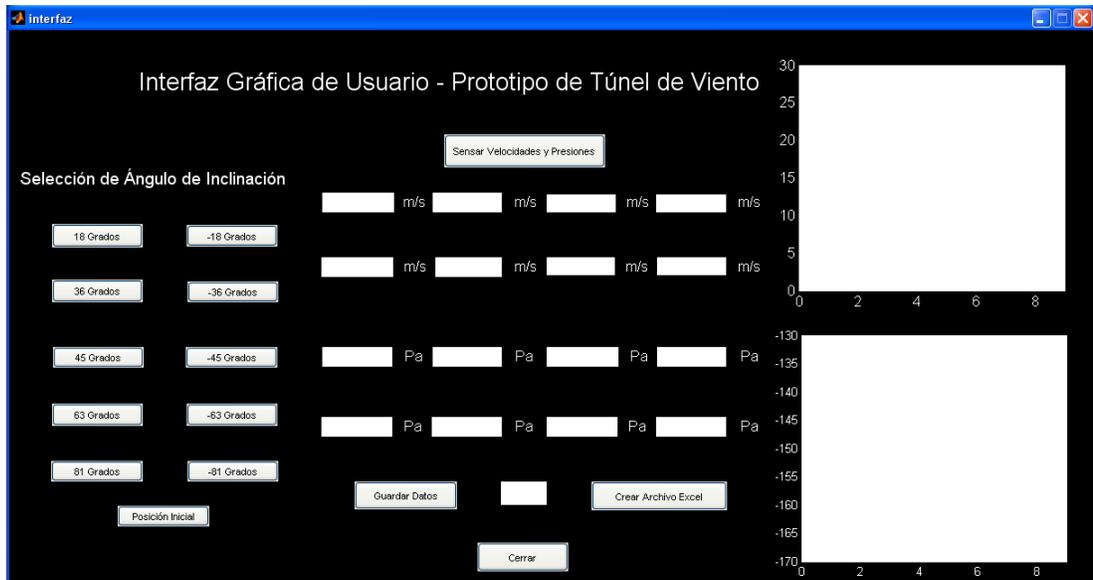
1. Ubicar el icono del programa y ejecutar.  MATLAB
2. Conectar la placa Arduino Mega 2560 a la computadora por medio del cable USB
3. Asegurarse de que los archivos `interfaz.m` e `interfaz.figure` se encuentren en el current folder de Matlab.



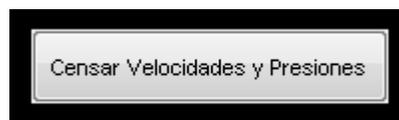
4. Ejecutar el siguiente comando en el Command Window de Matlab



- Una vez que se haya establecido la conexión entre la placa electrónica Arduino y Matlab aparecerá la siguiente ventana:



- Energizar el prototipo de túnel de viento por medio del interruptor principal.
- Encender la fuente de voltaje DC para energizar el sistema de instrumentación.
- En la ventana de la interfaz gráfica de usuario, presionar el botón “Censar Velocidades y Presiones” para comenzar a captar datos del sistema de instrumentación.

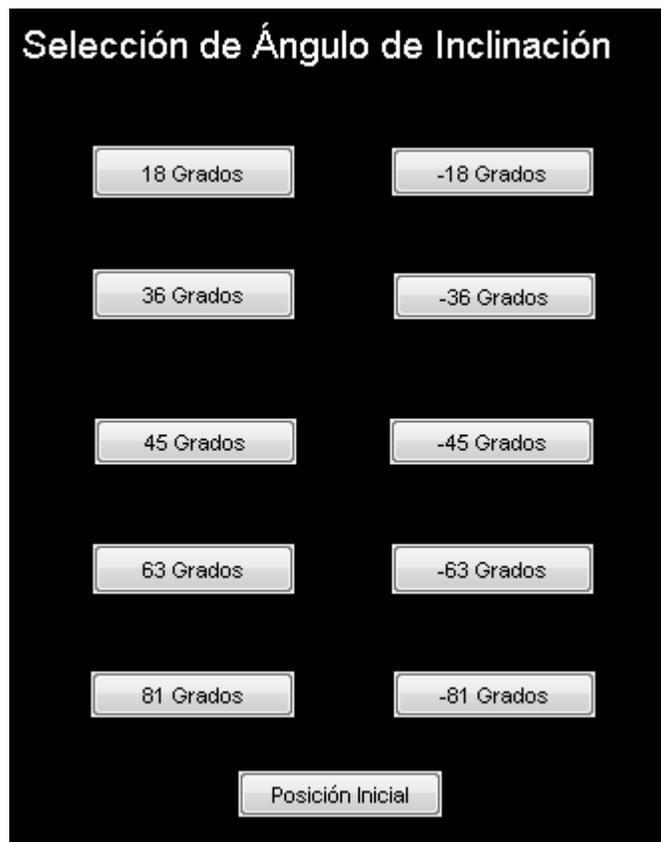


- Cuando se comiencen a visualizar los datos se debe ajustar todos los valores lo más cercano posible a cero con los potenciómetros ubicados en el panel de control.

10. Con los sensores calibrados, proceda a encender el ventilador para captar datos de velocidad del viento y presión a un ángulo de cero grados.
11. Cuando los sensores hayan estabilizado su valor, guardar los valores con el botón "Guardar Datos", al lado derecho de este botón se indican la cantidad de datos guardados.



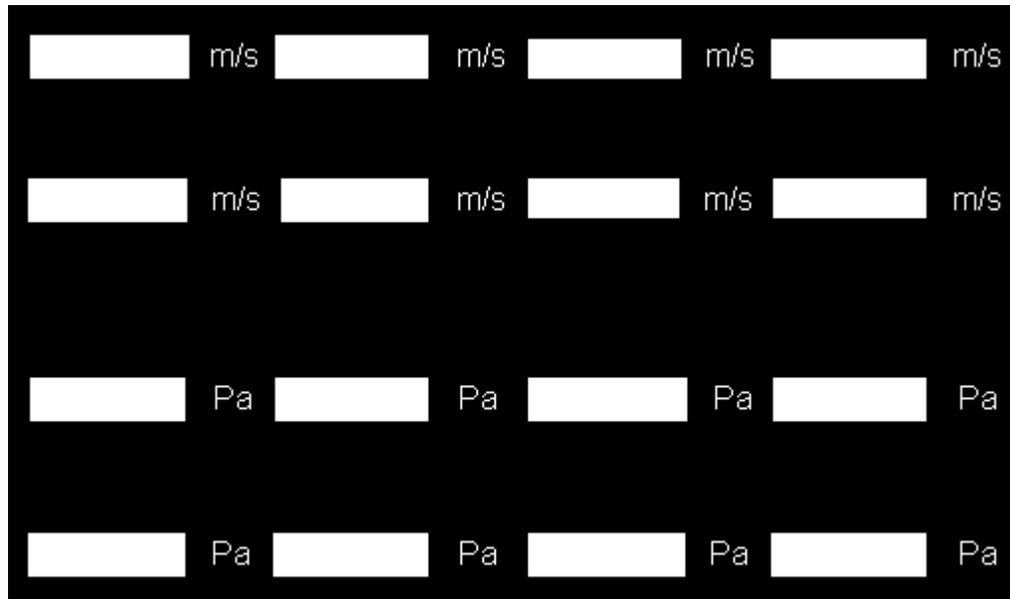
12. Modificar el ángulo de inclinación del perfil geométrico por medio de los botones de Selección del Ángulo de Inclinación:



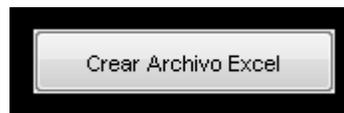
El ensayo se puede realizar ya sea con el ventilador encendido mientras se da el cambio en el ángulo de inclinación o bien apagando el ventilador, posicionando el perfil geométrico y encendiéndolo nuevamente.

Se pueden guardar datos mientras se esta posicionando el perfil geométrico o bien hasta que el perfil este completamente posicionado.

Los valores tanto de velocidad del viento como de presión se visualizan en tiempo real en el formato de valor numérico y en el formato de gráficos.



13. Una vez se hayan guardado todos los datos de interés se puede crear un archivo Excel para las velocidades y para las presiones para efectos de análisis de datos.



14. Los archivos Excel con los datos de velocidad y presión se crean en la ubicación que indica el Current Folder de Matlab.

15. Al finalizar cierre la interfaz gráfica de usuario por medio del botón cerrar, apague el ventilador, la fuente de voltaje y apagar el interruptor principal del prototipo de túnel de viento.



Anexo 6: Prototipo de túnel de viento terminado



Anexo 7: Hojas de características de componentes electrónicos, planos eléctricos – electrónicos y planos constructivos.

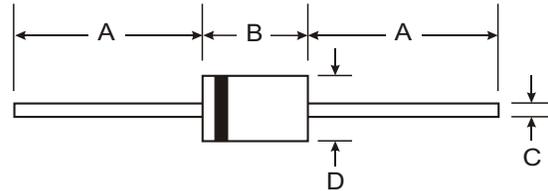
- Se incluyen las hojas de características de los siguientes componentes electrónicos:
 - Diodo Zener 1N4742A
 - Amplificador Operaciones LM324
 - Regulador de voltaje 2.5V LM385
 - Transistor TIP3055
 - Transistor 2N2222

- Planos eléctricos – electrónicos
 - Circuito de control general
 - Esquema de circuito por sensor
 - Esquema de circuito de potencia del motor paso a paso
 - Esquema placa Arduino Mega 2560
 - Esquema de conexión entre placa Arduino Mega 2560, circuitos sensores y circuito de potencia de motor paso a paso

- Planos constructivos
 - Plano de conjunto del prototipo de túnel de viento
 - Plano de estructura del prototipo de túnel de viento
 - Plano de cámara de pruebas
 - Plano de difusor
 - Plano de sección de conexión ventilador – cámara de pruebas

Features

- 1.0 Watt Power Dissipation
- 3.3V - 75V Nominal Zener Voltage
- Standard V_Z Tolerance is 5%
- Lead Free Finish, RoHS Compliant (Note 2)



Mechanical Data

- Case: DO-41
- Case Material: Glass. UL Flammability Classification Rating 94V-0
- Moisture Sensitivity: Level 1 per J-STD-020C
- Terminals: Finish Sn96.5Ag3.5. Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Marking: Type Number
- Weight: 0.35 grams (approximate)

| DO-41 Glass | | |
|----------------------|------|------|
| Dim | Min | Max |
| A | 26.0 | — |
| B | — | 4.10 |
| C | — | 0.86 |
| D | — | 2.60 |
| All Dimensions in mm | | |

Maximum Ratings @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

| Characteristic | Symbol | Value | Unit |
|---|----------------|--------------|---------------------------|
| Zener Current (see Table page 2) | I_Z | P_d / V_Z | mA |
| Power Dissipation Derate Above 50°C (Note 1) | P_d | 1.0 6.67 | W mW/ $^\circ\text{C}$ |
| Thermal Resistance - Junction to Ambient Air | R_{JA} | 175 | $^\circ\text{C}/\text{W}$ |
| Forward Voltage @ $I_F = 200\text{ mA}$ | V_F | 1.2 | V |
| Operating and Storage Temperature Range | T_j, T_{STG} | -65 to + 175 | $^\circ\text{C}$ |

- Note: 1. Valid provided that leads are kept at $T_L @ 50\text{ C}$ with lead length = 9.5mm (3/8") from case.
 2. EC Directive 2002/95/EC (RoHS) revision 13.2.2003. Glass and High Temperature Solder Exemptions Applied where applicable, see EU Directive Annex Notes 5 and 7.

Electrical Characteristics @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

| Type Number | Nominal Zener Voltage (Note 3) | Test Current | Maximum Zener Impedance (Note 4) | | | Maximum Reverse Leakage Current | | Max Surge Current 8.3ms | Temperature Coefficient @ I_{ZT} |
|-------------|--------------------------------|--------------|----------------------------------|-------------------|----------|---------------------------------|---------|-------------------------|------------------------------------|
| | $V_Z @ I_{ZT}$ | I_{ZT} | $Z_{ZT} @ I_{ZT}$ | $Z_{ZK} @ I_{ZK}$ | I_{ZK} | I_R | @ V_R | I_{ZS} | |
| | (V) | (mA) | (Ω) | (Ω) | (mA) | (μA) | (V) | (mA) | %/ $^\circ\text{C}$ |
| 1N4728A | 3.3 | 76 | 10 | 400 | 1.0 | 100 | 1.0 | 1380 | -0.08 to -0.05 |
| 1N4729A | 3.6 | 69 | 10 | 400 | 1.0 | 100 | 1.0 | 1260 | -0.08 to -0.05 |
| 1N4730A | 3.9 | 64 | 9.0 | 400 | 1.0 | 50 | 1.0 | 1190 | -0.07 to -0.02 |
| 1N4731A | 4.3 | 58 | 9.0 | 400 | 1.0 | 10 | 1.0 | 1070 | -0.07 to -0.01 |
| 1N4732A | 4.7 | 53 | 8.0 | 500 | 1.0 | 10 | 1.0 | 970 | -0.03 to +0.04 |
| 1N4733A | 5.1 | 49 | 7.0 | 550 | 1.0 | 10 | 1.0 | 890 | -0.01 to +0.04 |
| 1N4734A | 5.6 | 45 | 5.0 | 600 | 1.0 | 10 | 2.0 | 810 | 0 to +0.045 |
| 1N4735A | 6.2 | 41 | 2.0 | 700 | 1.0 | 10 | 3.0 | 730 | +0.01 to +0.055 |
| 1N4736A | 6.8 | 37 | 3.5 | 700 | 1.0 | 10 | 4.0 | 660 | +0.015 to +0.06 |
| 1N4737A | 7.5 | 34 | 4.0 | 700 | 0.5 | 10 | 5.0 | 605 | +0.02 to +0.065 |
| 1N4738A | 8.2 | 31 | 4.5 | 700 | 0.5 | 10 | 6.0 | 550 | 0.03 to 0.07 |
| 1N4739A | 9.1 | 28 | 5.0 | 700 | 0.5 | 10 | 7.0 | 500 | 0.035 to 0.075 |
| 1N4740A | 10 | 25 | 7.0 | 700 | 0.25 | 10 | 7.6 | 454 | 0.04 to 0.08 |
| 1N4741A | 11 | 23 | 8.0 | 700 | 0.25 | 5.0 | 8.4 | 414 | 0.045 to 0.08 |
| 1N4742A | 12 | 21 | 9.0 | 700 | 0.25 | 5.0 | 9.1 | 380 | 0.045 to 0.085 |
| 1N4743A | 13 | 19 | 10 | 700 | 0.25 | 5.0 | 9.9 | 344 | 0.05 to 0.085 |
| 1N4744A | 15 | 17 | 14 | 700 | 0.25 | 5.0 | 11.4 | 304 | 0.055 to 0.09 |
| 1N4745A | 16 | 15.5 | 16 | 700 | 0.25 | 5.0 | 12.2 | 285 | 0.055 to 0.09 |
| 1N4746A | 18 | 14 | 20 | 750 | 0.25 | 5.0 | 13.7 | 250 | 0.06 to 0.09 |
| 1N4747A | 20 | 12.5 | 22 | 750 | 0.25 | 5.0 | 15.2 | 225 | 0.06 to 0.09 |
| 1N4748A | 22 | 11.5 | 23 | 750 | 0.25 | 5.0 | 16.7 | 205 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4749A | 24 | 10.5 | 25 | 750 | 0.25 | 5.0 | 18.2 | 190 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4750A | 27 | 9.5 | 35 | 750 | 0.25 | 5.0 | 20.6 | 170 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4751A | 30 | 8.5 | 40 | 1000 | 0.25 | 5.0 | 22.8 | 150 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4752A | 33 | 7.5 | 45 | 1000 | 0.25 | 5.0 | 25.1 | 135 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4753A | 36 | 7.0 | 50 | 1000 | 0.25 | 5.0 | 27.4 | 125 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4754A | 39 | 6.5 | 60 | 1000 | 0.25 | 5.0 | 29.7 | 115 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4755A | 43 | 6.0 | 70 | 1500 | 0.25 | 5.0 | 32.7 | 110 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4756A | 47 | 5.5 | 80 | 1500 | 0.25 | 5.0 | 35.8 | 95 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4757A | 51 | 5.0 | 95 | 1500 | 0.25 | 5.0 | 38.8 | 90 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4758A | 56 | 4.5 | 110 | 2000 | 0.25 | 5.0 | 42.6 | 80 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4759A | 62 | 4.0 | 125 | 2000 | 0.25 | 5.0 | 47.1 | 70 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4760A | 68 | 3.7 | 150 | 2000 | 0.25 | 5.0 | 51.7 | 65 | 0.06 to 0.095 |
| 1N4761A | 75 | 3.3 | 175 | 2000 | 0.25 | 5.0 | 56.0 | 60 | 0.06 to 0.095 |

Notes: 3. Measured under thermal equilibrium and dc (I_{ZT}) test conditions.

4. The Zener impedance is derived from the 60 Hz ac voltage which results when an ac current having an rms value equal to 10% of the Zener current (I_{ZT} or I_{ZK}) is superimposed on I_{ZT} or I_{ZK} . Zener impedance is measured at two points to insure a sharp knee on the breakdown curve and to eliminate unstable units.

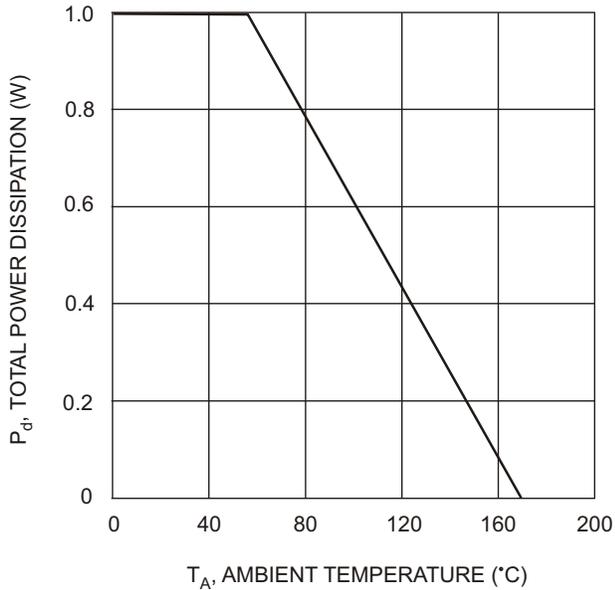


Fig. 1 Power Dissipation vs Ambient Temperature

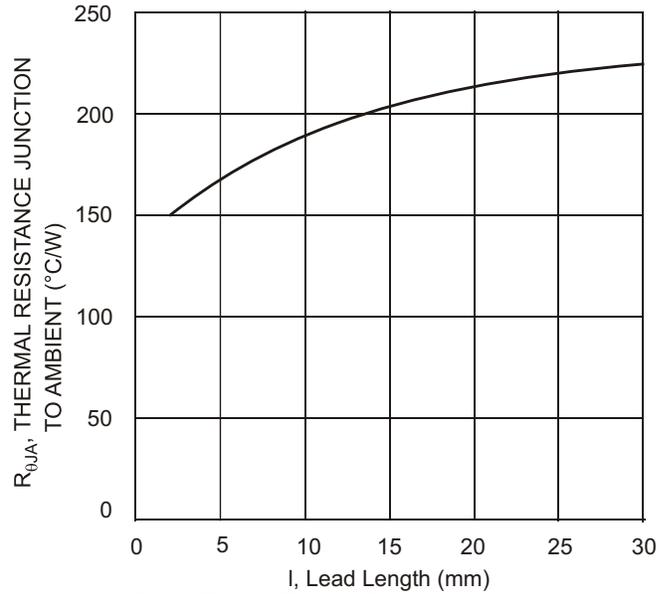


Fig. 2 Typical Thermal Resistance vs. Lead Length

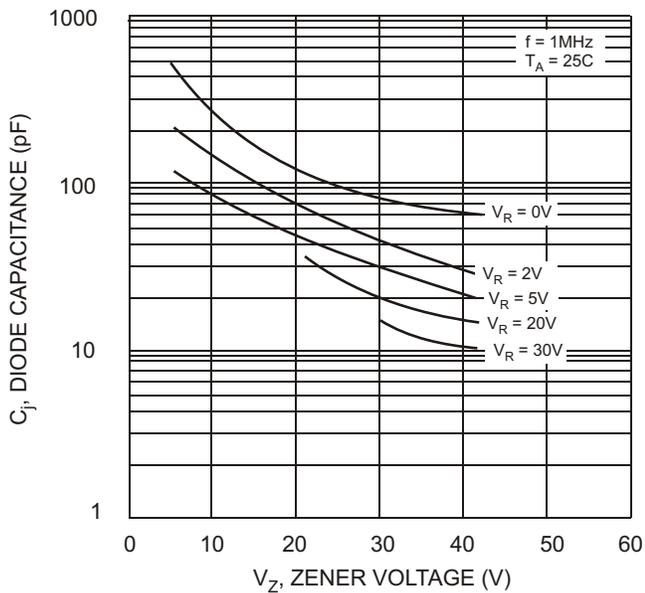


Fig. 3, Junction Capacitance vs Zener Voltage

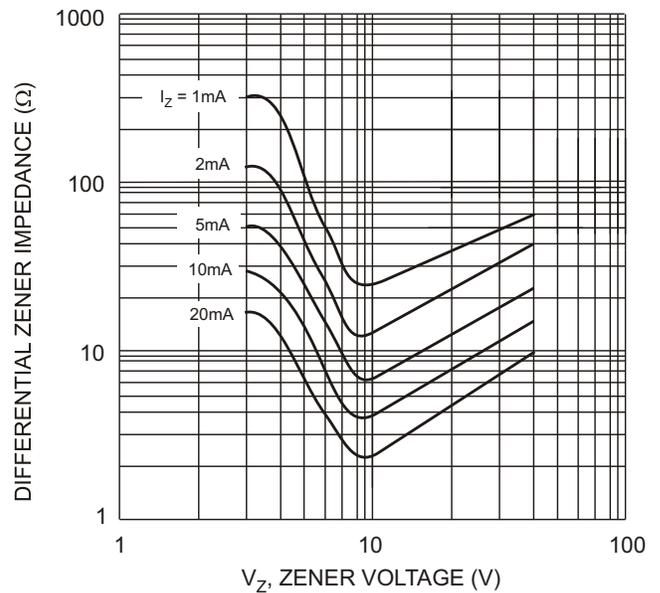


Fig. 4 Typical Zener Impedance vs. Zener Voltage

Ordering Information (Note 6)

| Device | Packaging | Shipping |
|------------------|-----------|----------------|
| (Type Number)-A* | DO-41 | 5K/Ammo Pack |
| (Type Number)-T* | DO-41 | 5K/Tape & Reel |

Notes: 5. *Add "-A" or "-T" to the appropriate type number in Table 1. Example: 6.2V Zener = 1N4735A-A for ammo pack.
6. For packaging details, visit our website at <http://www.diodes.com/datasheets/ap02008.pdf>

LM2902, LM324/LM324A, LM224/ LM224A

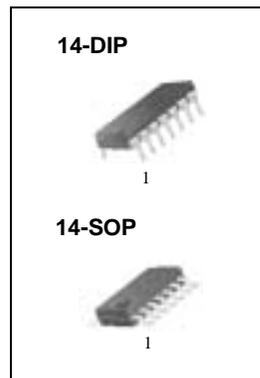
Quad Operational Amplifier

Features

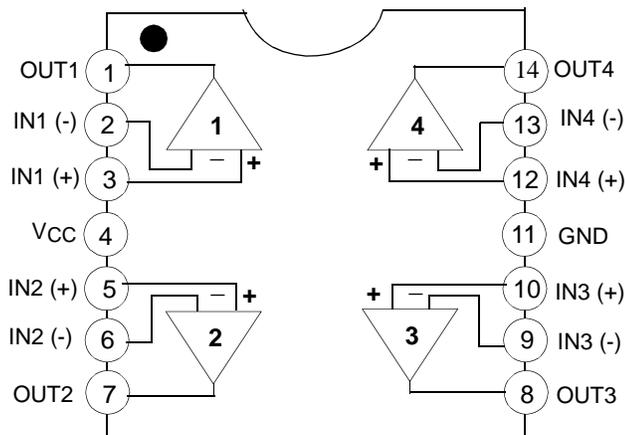
- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain: 100dB
- Wide Power Supply Range:
LM224/LM224A, LM324/LM324A : 3V~32V (or $\pm 1.5 \sim 16V$)
LM2902: 3V~26V (or $\pm 1.5V \sim 13V$)
- Input Common Mode Voltage Range Includes Ground
- Large Output Voltage Swing: 0V to $V_{CC} - 1.5V$
- Power Drain Suitable for Battery Operation

Description

The LM324/LM324A, LM2902, LM224/LM224A consist of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide voltage range. operation from split power supplies is also possible so long as the difference between the two supplies is 3 volts to 32 volts. Application areas include transducer amplifier, DC gain blocks and all the conventional OP Amp circuits which now can be easily implemented in single power supply systems.

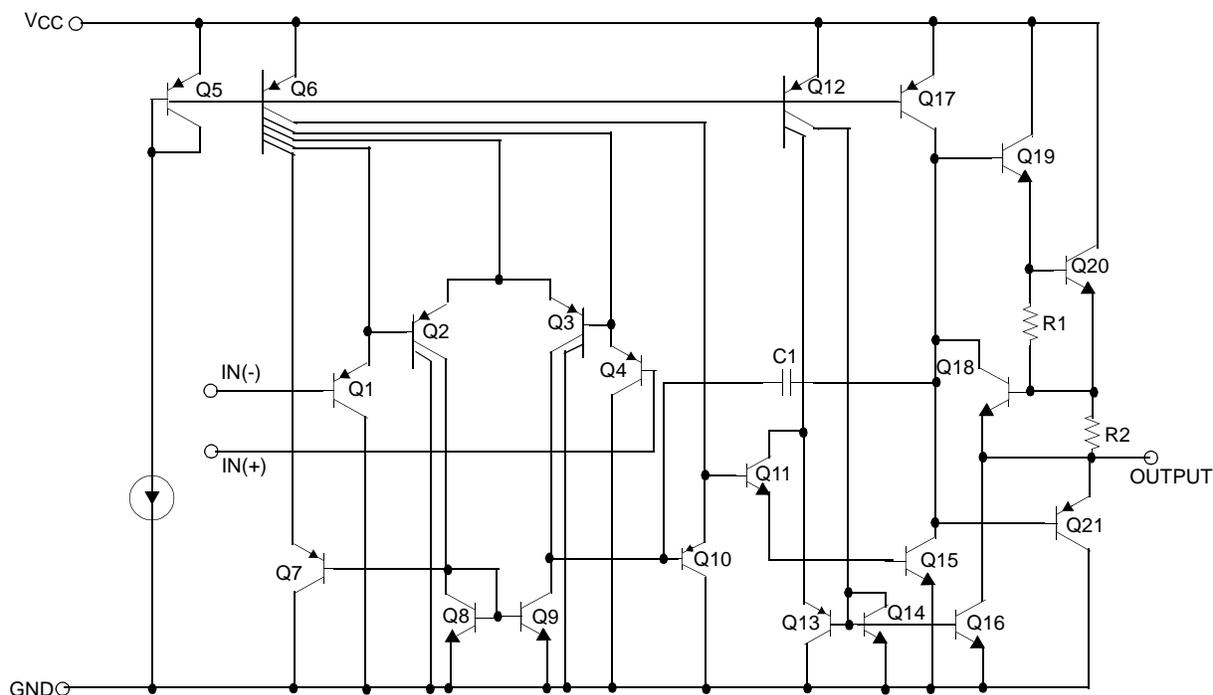


Internal Block Diagram



Schematic Diagram

(One Section Only)



Absolute Maximum Ratings

| Parameter | Symbol | LM224/LM224A | LM324/LM324A | LM2902 | Unit |
|---|----------------------|--------------|--------------|-------------|------|
| Power Supply Voltage | VCC | ±16 or 32 | ±16 or 32 | ±13 or 26 | V |
| Differential Input Voltage | V _{I(DIFF)} | 32 | 32 | 26 | V |
| Input Voltage | V _I | -0.3 to +32 | -0.3 to +32 | -0.3 to +26 | V |
| Output Short Circuit to GND V _{CC} ≤ 15V, T _A = 25°C (one Amp) | - | Continuous | Continuous | Continuous | - |
| Power Dissipation, T _A = 25°C 14-DIP 14-SOP | P _D | 1310 640 | 1310 640 | 1310 640 | mW |
| Operating Temperature Range | T _{OPR} | -25 ~ +85 | 0 ~ +70 | -40 ~ +85 | °C |
| Storage Temperature Range | T _{STG} | -65 ~ +150 | -65 ~ +150 | -65 ~ +150 | °C |

Thermal Data

| Parameter | Symbol | Value | Unit |
|--|------------------|-----------|------|
| Thermal Resistance Junction-Ambient Max. 14-DIP 14-SOP | R _{θja} | 95 195 | °C/W |

Electrical Characteristics

($V_{CC} = 5.0V$, $V_{EE} = GND$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise specified)

| Parameter | Symbol | Conditions | LM224 | | | LM324 | | | LM2902 | | | Unit | |
|---------------------------------|---------------|---|-------------------|----------|----------------|-------|----------------|------|--------|----------|----------------|----------|---|
| | | | Min. | Typ. | Max. | Min. | Typ. | Max. | Min. | Typ. | Max. | | |
| Input Offset Voltage | V_{IO} | $V_{CM} = 0V$ to $V_{CC} - 1.5V$ $V_{O(P)} = 1.4V$, $R_S = 0\Omega$ (Note1) | - | 1.5 | 5.0 | - | 1.5 | 7.0 | - | 1.5 | 7.0 | mV | |
| Input Offset Current | I_{IO} | $V_{CM} = 0V$ | - | 2.0 | 30 | - | 3.0 | 50 | - | 3.0 | 50 | nA | |
| Input Bias Current | I_{BIAS} | $V_{CM} = 0V$ | - | 40 | 150 | - | 40 | 250 | - | 40 | 250 | nA | |
| Input Common-Mode Voltage Range | $V_{I(R)}$ | Note1 | 0 | - | $V_{CC} - 1.5$ | 0 | $V_{CC} - 1.5$ | - | 0 | - | $V_{CC} - 1.5$ | V | |
| Supply Current | I_{CC} | $R_L = \infty$, $V_{CC} = 30V$ (LM2902, $V_{CC} = 26V$) | - | 1.0 | 3 | - | 1.0 | 3 | - | 1.0 | 3 | mA | |
| | | $R_L = \infty$, $V_{CC} = 5V$ | - | 0.7 | 1.2 | - | 0.7 | 1.2 | - | 0.7 | 1.2 | mA | |
| Large Signal Voltage Gain | G_V | $V_{CC} = 15V$, $R_L = 2k\Omega$ $V_{O(P)} = 1V$ to $11V$ | 50 | 100 | - | 25 | 100 | - | 25 | 100 | - | V/ mV | |
| Output Voltage Swing | $V_{O(H)}$ | Note1 | $R_L = 2k\Omega$ | 26 | - | - | 26 | - | - | 22 | - | - | V |
| | | | $R_L = 10k\Omega$ | 27 | 28 | - | 27 | 28 | - | 23 | 24 | - | V |
| | $V_{O(L)}$ | $V_{CC} = 5V$, $R_L = 10k\Omega$ | - | 5 | 20 | - | 5 | 20 | - | 5 | 100 | mV | |
| Common-Mode Rejection Ratio | CMRR | - | 70 | 85 | - | 65 | 75 | - | 50 | 75 | - | dB | |
| Power Supply Rejection Ratio | PSRR | - | 65 | 100 | - | 65 | 100 | - | 50 | 100 | - | dB | |
| Channel Separation | CS | $f = 1kHz$ to $20kHz$ (Note2) | - | 120 | - | - | 120 | - | - | 120 | - | dB | |
| Short Circuit to GND | I_{SC} | $V_{CC} = 15V$ | - | 40 | 60 | - | 40 | 60 | - | 40 | 60 | mA | |
| Output Current | I_{SOURCE} | $V_{I(+)} = 1V$, $V_{I(-)} = 0V$ $V_{CC} = 15V$ $V_{O(P)} = 2V$ | 20 | 40 | - | 20 | 40 | - | 20 | 40 | - | mA | |
| | | $V_{I(+)} = 0V$, $V_{I(-)} = 1V$ $V_{CC} = 15V$ $V_{O(P)} = 2V$ | 10 | 13 | - | 10 | 13 | - | 10 | 13 | - | mA | |
| | I_{SINK} | $V_{I(+)} = 0V$, $V_{I(-)} = 1V$ $V_{CC} = 5V$, $V_{O(R)} = 200mV$ | 12 | 45 | - | 12 | 45 | - | - | - | - | μA | |
| Differential Input Voltage | $V_{I(DIFF)}$ | - | - | V_{CC} | - | - | V_{CC} | - | - | V_{CC} | - | V | |

Note :

- $V_{CC} = 30V$ for LM224 and LM324, $V_{CC} = 26V$ for LM2902
- This parameter, although guaranteed, is not 100% tested in production.

Electrical Characteristics (Continued)

(VCC = 5.0V, VEE = GND, unless otherwise specified)

The following specifications apply over the range of $-25^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +85^{\circ}\text{C}$ for the LM224; and the $0^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +70^{\circ}\text{C}$ for the LM324; and the $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +85^{\circ}\text{C}$ for the LM2902

| Parameter | Symbol | Conditions | LM224 | | | LM324 | | | LM2902 | | | Unit | |
|---------------------------------|----------------------|--|-----------------------|------|----------------------|-------|------|----------------------|--------|------|----------------------|-------|---|
| | | | Min. | Typ. | Max. | Min. | Typ. | Max. | Min. | Typ. | Max. | | |
| Input Offset Voltage | V _{IO} | V _{ICM} = 0V to V _{CC} -1.5V V _{O(P)} = 1.4V, R _S = 0Ω (Note1) | - | - | 7.0 | - | - | 9.0 | - | - | 10.0 | mV | |
| Input Offset Voltage Drift | ΔV _{IO} /ΔT | R _S = 0Ω (Note2) | - | 7.0 | - | - | 7.0 | - | - | 7.0 | - | μV/°C | |
| Input Offset Current | I _{IO} | V _{CM} = 0V | - | - | 100 | - | - | 150 | - | - | 200 | nA | |
| Input Offset Current Drift | ΔI _{IO} /ΔT | R _S = 0Ω (Note2) | - | 10 | - | - | 10 | - | - | 10 | - | pA/°C | |
| Input Bias Current | I _{BIAS} | V _{CM} = 0V | - | - | 300 | - | - | 500 | - | - | 500 | nA | |
| Input Common-Mode Voltage Range | V _{I(R)} | Note1 | 0 | - | V _{CC} -2.0 | 0 | - | V _{CC} -2.0 | 0 | - | V _{CC} -2.0 | V | |
| Large Signal Voltage Gain | G _V | V _{CC} = 15V, R _L = 2.0kΩ V _{O(P)} = 1V to 11V | 25 | - | - | 15 | - | - | 15 | - | - | V/mV | |
| Output Voltage Swing | V _{O(H)} | Note1 | R _L = 2kΩ | 26 | - | - | 26 | - | - | 22 | - | - | V |
| | | | R _L = 10kΩ | 27 | 28 | - | 27 | 28 | - | 23 | 24 | - | V |
| | V _{O(L)} | V _{CC} = 5V, R _L = 10kΩ | - | 5 | 20 | - | 5 | 20 | - | 5 | 100 | mV | |
| Output Current | I _{SOURCE} | V _{I(+)} = 1V, V _{I(-)} = 0V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V | 10 | 20 | - | 10 | 20 | - | 10 | 20 | - | mA | |
| | I _{SINK} | V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V | 10 | 13 | - | 5 | 8 | - | 5 | 8 | - | mA | |
| Differential Input Voltage | V _{I(DIFF)} | - | - | - | V _{CC} | - | - | V _{CC} | - | - | V _{CC} | V | |

Note:

- V_{CC} = 30V for LM224 and LM324, V_{CC} = 26V for LM2902
- These parameters, although guaranteed, are not 100% tested in production.

Electrical Characteristics (Continued)

(VCC = 5.0V, VEE = GND, TA = 25°C, unless otherwise specified)

| Parameter | Symbol | Conditions | LM224A | | | LM324A | | | Unit | |
|---------------------------------|----------------------|--|-----------------------|------|-------------------------|--------|------|-------------------------|------|---|
| | | | Min. | Typ. | Max. | Min. | Typ. | Max. | | |
| Input Offset Voltage | V _{IO} | V _{CM} = 0V to V _{CC} -1.5V V _{O(P)} = 1.4V, R _S = 0Ω (Note1) | - | 1.0 | 3.0 | - | 1.5 | 3.0 | mV | |
| Input Offset Current | I _{IO} | V _{CM} = 0V | - | 2 | 15 | - | 3.0 | 30 | nA | |
| Input Bias Current | I _{BIAS} | V _{CM} = 0V | - | 40 | 80 | - | 40 | 100 | nA | |
| Input Common-Mode Voltage Range | V _{I(R)} | V _{CC} = 30V | 0 | - | V _{CC} -1.5 | 0 | - | V _{CC} -1.5 | V | |
| Supply Current | I _{CC} | V _{CC} = 30V, R _L = ∞ | - | 1.5 | 3 | - | 1.5 | 3 | mA | |
| | | V _{CC} = 5V, R _L = ∞ | - | 0.7 | 1.2 | - | 0.7 | 1.2 | mA | |
| Large Signal Voltage Gain | G _V | V _{CC} = 15V, R _L = 2kΩ V _{O(P)} = 1V to 11V | 50 | 100 | - | 25 | 100 | - | V/mV | |
| Output Voltage Swing | V _{O(H)} | Note1 | R _L = 2kΩ | 26 | - | - | 26 | - | - | V |
| | | | R _L = 10kΩ | 27 | 28 | - | 27 | 28 | - | V |
| | V _{O(L)} | V _{CC} = 5V, R _L = 10kΩ | - | 5 | 20 | - | 5 | 20 | mV | |
| Common-Mode Rejection Ratio | CMRR | - | 70 | 85 | - | 65 | 85 | - | dB | |
| Power Supply Rejection Ratio | PSRR | - | 65 | 100 | - | 65 | 100 | - | dB | |
| Channel Separation | CS | f = 1kHz to 20kHz (Note2) | - | 120 | - | - | 120 | - | dB | |
| Short Circuit to GND | I _{SC} | V _{CC} = 15V | - | 40 | 60 | - | 40 | 60 | mA | |
| Output Current | I _{SOURCE} | V _{I(+)} = 1V, V _{I(-)} = 0V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V | 20 | 40 | - | 20 | 40 | - | mA | |
| | | V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V | 10 | 20 | - | 10 | 20 | - | mA | |
| | I _{SINK} | V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 5V V _{O(P)} = 200mV | 12 | 50 | - | 12 | 50 | - | μA | |
| Differential Input Voltage | V _{I(DIFF)} | - | - | - | V _{CC} | - | - | V _{CC} | V | |

Note:

- V_{CC} = 30V for LM224A, LM324A
- This parameter, although guaranteed, is not 100% tested in production.

Electrical Characteristics (Continued)

(VCC = 5.0V, VEE = GND, unless otherwise specified)

The following specification apply over the range of $-25^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +85^{\circ}\text{C}$ for the LM224A; and the $0^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +70^{\circ}\text{C}$ for the LM324A

| Parameter | Symbol | Conditions | LM224A | | | LM324A | | | Unit | |
|---------------------------------|----------------------|---|-----------------------|------|-------------------------|--------|------|-------------------------|-------|---|
| | | | Min. | Typ. | Max. | Min. | Typ. | Max. | | |
| Input Offset Voltage | V _{IO} | V _{CM} = 0V to V _{CC} -1.5V V _{O(P)} = 1.4V, R _S = 0Ω (Note1) | - | - | 4.0 | - | - | 5.0 | mV | |
| Input Offset Voltage Drift | ΔV _{IO} /ΔT | R _S = 0Ω (Note2) | - | 7.0 | 20 | - | 7.0 | 30 | μV/°C | |
| Input Offset Current | I _{IO} | V _{CM} = 0V | - | - | 30 | - | - | 75 | nA | |
| Input Offset Current Drift | ΔI _{IO} /ΔT | R _S = 0Ω (Note2) | - | 10 | 200 | - | 10 | 300 | pA/°C | |
| Input Bias Current | I _{BIAS} | - | - | 40 | 100 | - | 40 | 200 | nA | |
| Input Common-Mode Voltage Range | V _{I(R)} | Note1 | 0 | - | V _{CC} -2.0 | 0 | - | V _{CC} -2.0 | V | |
| Large Signal Voltage Gain | G _V | V _{CC} = 15V, R _L = 2.0kΩ | 25 | - | - | 15 | - | - | V/mV | |
| Output Voltage Swing | V _{O(H)} | Note1 | R _L = 2kΩ | 26 | - | - | 26 | - | - | V |
| | | | R _L = 10kΩ | 27 | 28 | - | 27 | 28 | - | V |
| | V _{O(L)} | V _{CC} = 5V, R _L = 10kΩ | - | 5 | 20 | - | 5 | 20 | mV | |
| Output Current | I _{SOURCE} | V _{I(+)} = 1V, V _{I(-)} = 0V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V | 10 | 20 | - | 10 | 20 | - | mA | |
| | I _{SINK} | V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V | 5 | 8 | - | 5 | 8 | - | mA | |
| Differential Input Voltage | V _{I(DIFF)} | - | - | - | V _{CC} | - | - | V _{CC} | V | |

Note:

1. V_{CC} = 30V for LM224A and LM324A.
2. These parameters, although guaranteed, are not 100% tested in production.

Typical Performance Characteristics

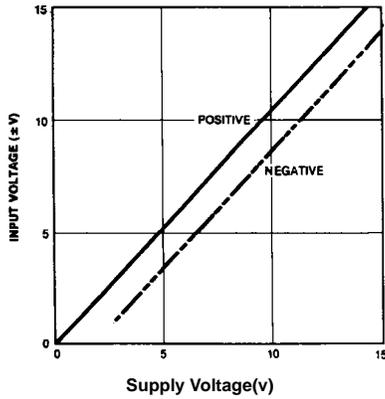


Figure 1. Input Voltage Range vs Supply Voltage

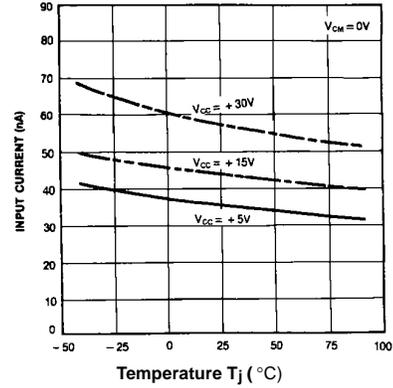


Figure 2. Input Current vs Temperature

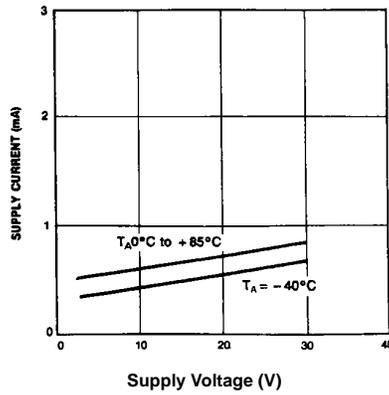


Figure 3. Supply Current vs Supply Voltage

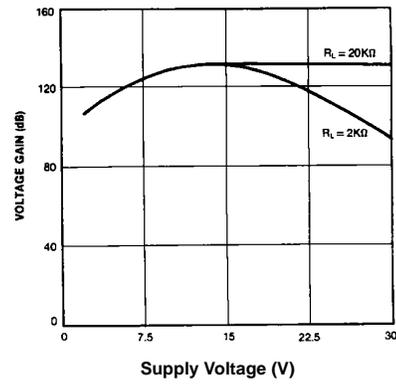


Figure 4. Voltage Gain vs Supply Voltage

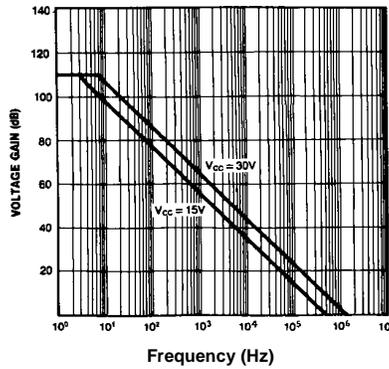


Figure 5. Open Loop Frequency Response

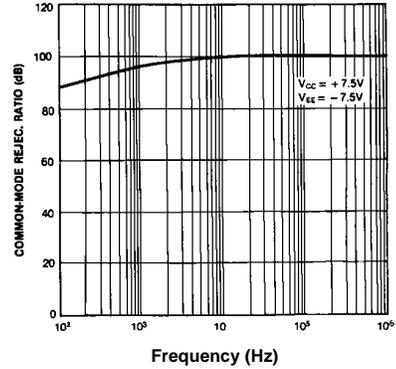


Figure 6. Common mode Rejection Ratio

Typical Performance Characteristics (Continued)

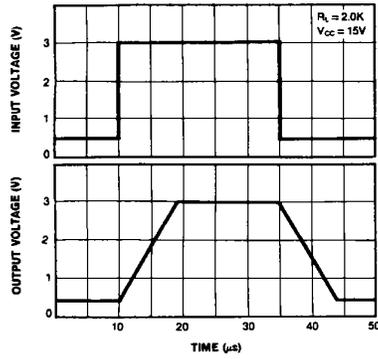


Figure 7. Voltage Follower Pulse Response

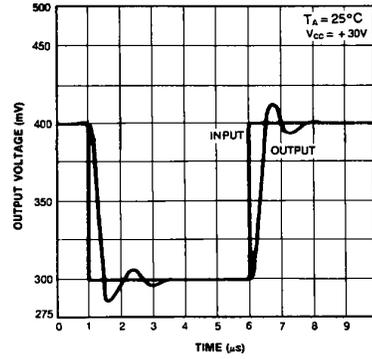


Figure 8. Voltage Follower Pulse Response (Small Signal)

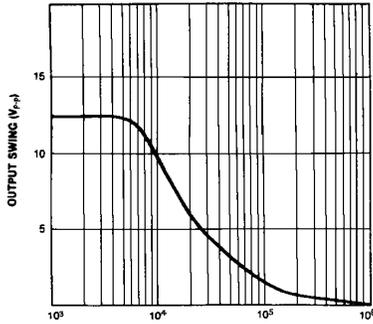


Figure 8. Large Signal Frequency Response

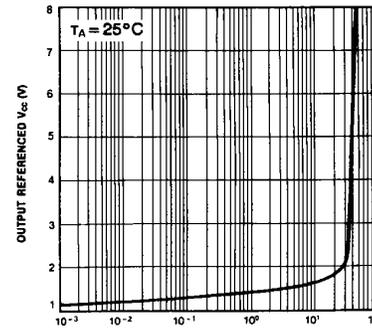


Figure 9. Output Characteristics vs Current Sourcing

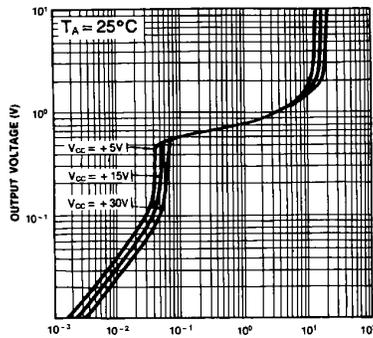


Figure 10. Output Characteristics vs Current Sinking

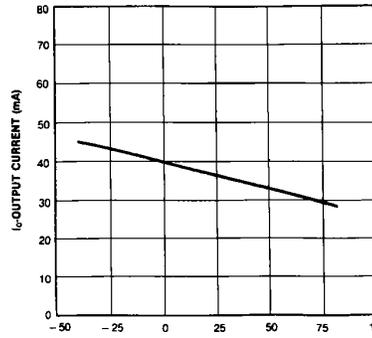


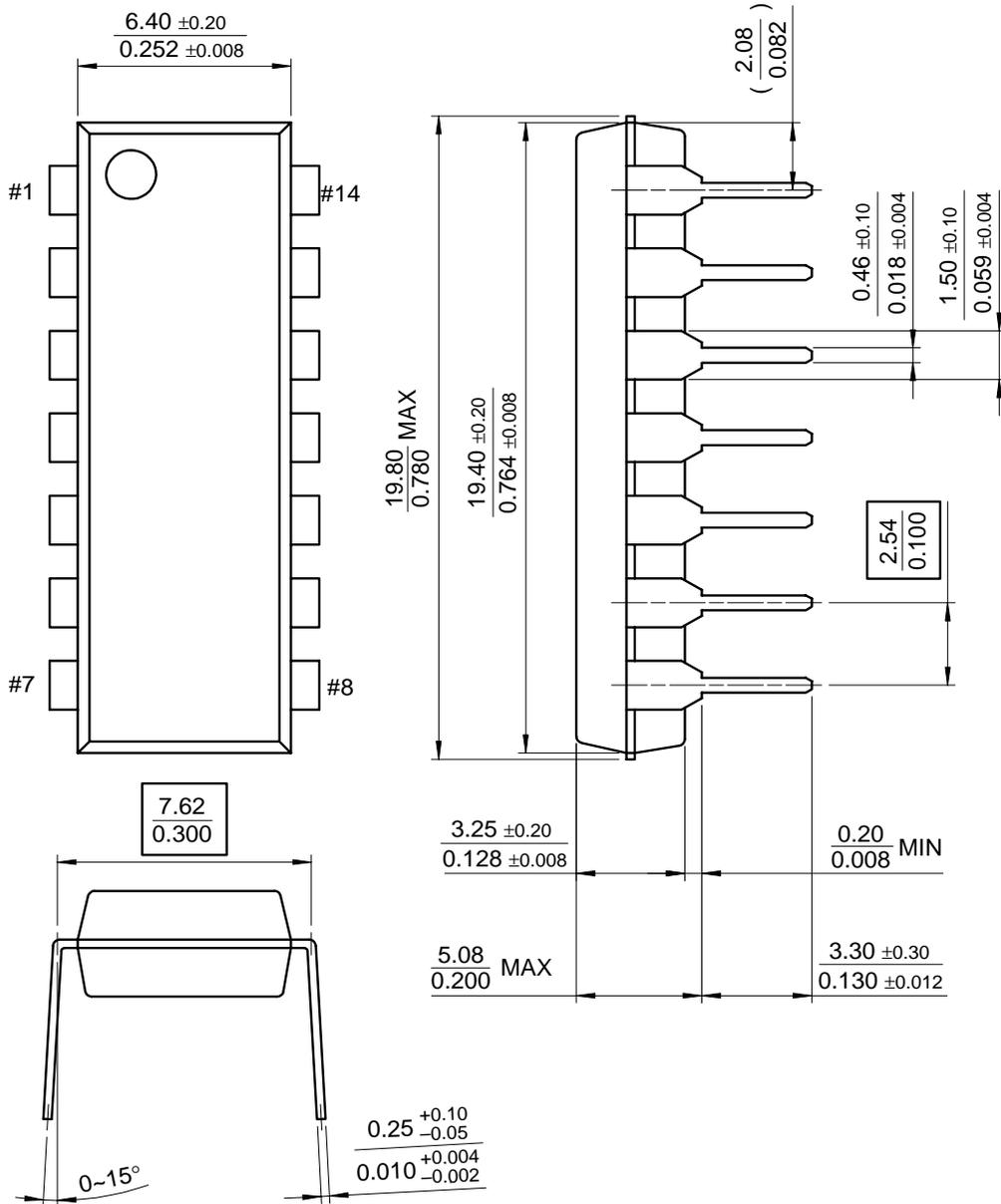
Figure 11. Current Limiting vs Temperature

Mechanical Dimensions

Package

Dimensions in millimeters

14-DIP

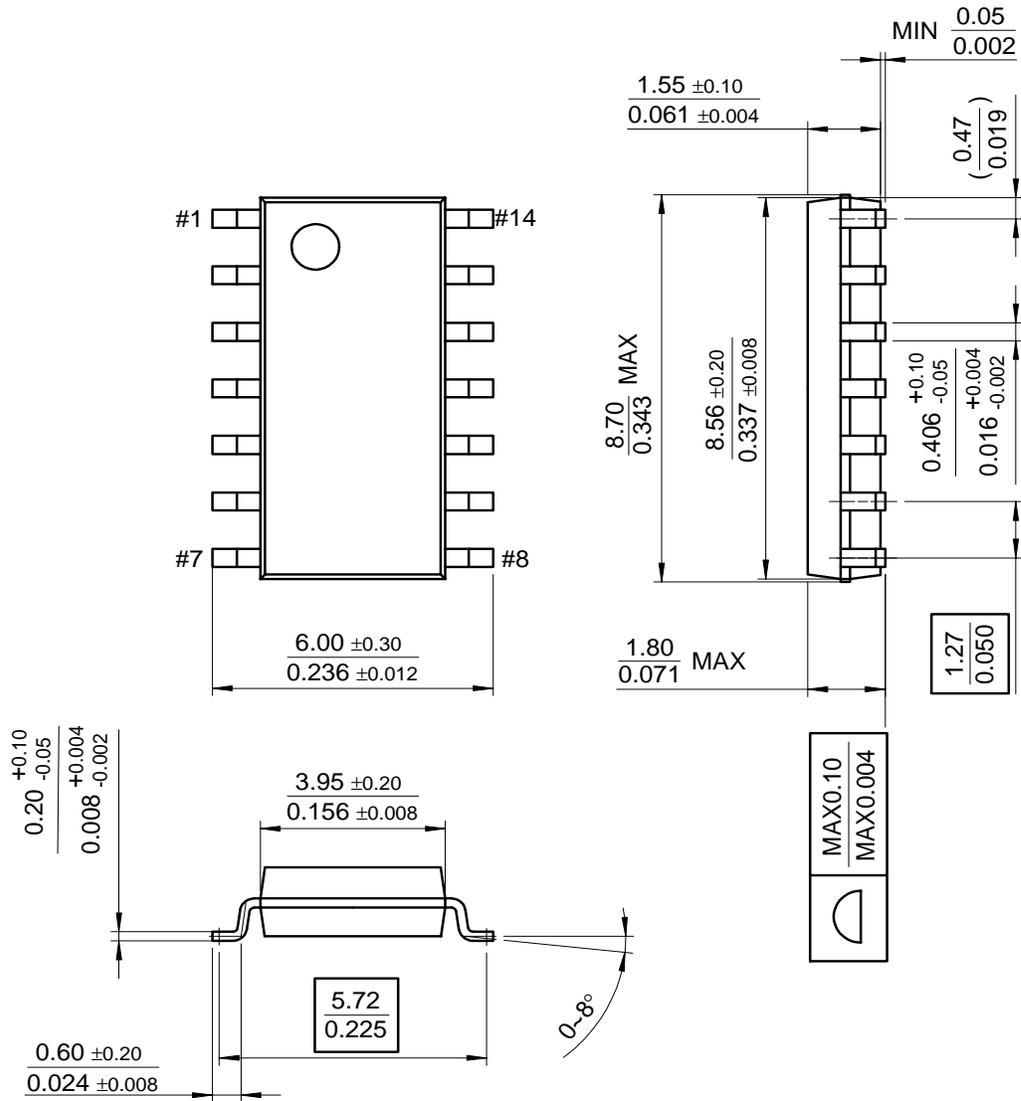


Mechanical Dimensions (Continued)

Package

Dimensions in millimeters

14-SOP



Ordering Information

| Product Number | Package | Operating Temperature |
|----------------|---------|-----------------------|
| LM324N | 14-DIP | 0 ~ +70°C |
| LM324AN | | |
| LM324M | 14-SOP | |
| LM324AM | | |
| LM2902N | 14-DIP | -40 ~ +85°C |
| LM2902M | 14-SOP | |
| LM224N | 14-DIP | -25 ~ +85°C |
| LM224AN | | |
| LM224M | 14-SOP | |
| LM224AM | | |

LM136-2.5-N, LM236-2.5-N, LM336-2.5-NV Reference Diode

Check for Samples: [LM136-2.5-N](#)

FEATURES

- **Low Temperature Coefficient**
- **Wide Operating Current of 400 μ A to 10 mA**
- **0.2 Ω Dynamic Impedance**
- **\pm 1% Initial Tolerance Available**
- **Specified Temperature Stability**
- **Easily Trimmed for Minimum Temperature Drift**
- **Fast Turn-On**

DESCRIPTION

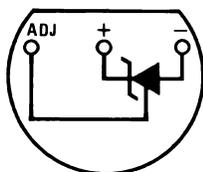
The LM136-2.5-N/LM236-2.5-N and LM336-2.5-N integrated circuits are precision 2.5V shunt regulator diodes. These monolithic IC voltage references operate as a low-temperature-coefficient 2.5V zener with 0.2 Ω dynamic impedance. A third terminal on the LM136-2.5-N allows the reference voltage and temperature coefficient to be trimmed easily.

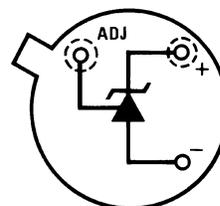
The LM136-2.5-N series is useful as a precision 2.5V low voltage reference for digital voltmeters, power supplies or op amp circuitry. The 2.5V make it convenient to obtain a stable reference from 5V logic supplies. Further, since the LM136-2.5-N operates as a shunt regulator, it can be used as either a positive or negative voltage reference.

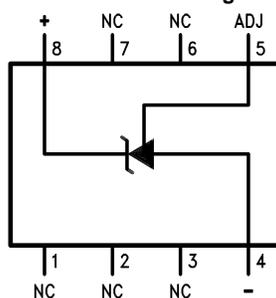
The LM136-2.5-N is rated for operation over -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ while the LM236-2.5-N is rated over a -25°C to $+85^{\circ}\text{C}$ temperature range.

The LM336-2.5-N is rated for operation over a 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$ temperature range. See the connection diagrams for available packages.

Connection Diagram

TO-92 Plastic Package

Figure 1. Bottom View
See Package Number LP

TO Metal Can Package

Figure 2. Bottom View
See Package Number NDV

SOIC Package

Figure 3. Top View
See Package Number D


Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

Typical Applications

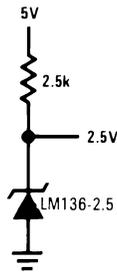
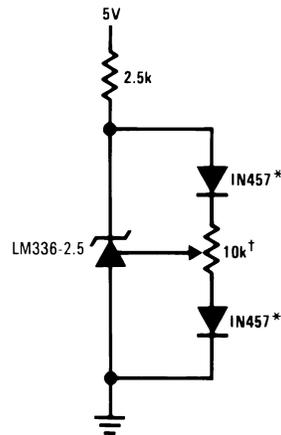


Figure 4. 2.5V Reference



†Adjust to 2.490V

*Any silicon signal diode

Figure 5. 2.5V Reference with Minimum Temperature Coefficient

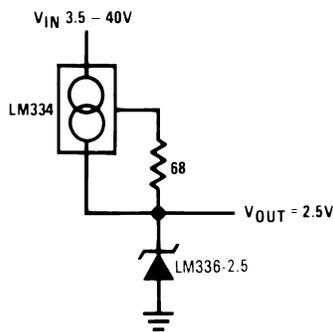


Figure 6. Wide Input Range Reference



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

Absolute Maximum Ratings⁽¹⁾⁽²⁾

| | | | |
|--|-------------------------|-----------------------|-------|
| Reverse Current | | 15 mA | |
| Forward Current | | 10 mA | |
| Storage Temperature | | -60°C to +150°C | |
| Operating Temperature Range ⁽³⁾ | LM136 | -55°C to +150°C | |
| | LM236 | -25°C to +85°C | |
| | LM336 | 0°C to +70°C | |
| Soldering Information | TO-92 Package (10 sec.) | | 260°C |
| | TO Package (10 sec.) | | 300°C |
| | SOIC Package | Vapor Phase (60 sec.) | 215°C |
| | | Infrared (15 sec.) | 220°C |

- (1) Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Electrical specifications do not apply when operating the device beyond its specified operating conditions.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/Distributors for availability and specifications.
- (3) For elevated temperature operation, T_j max is:

| | |
|-------|-------|
| LM136 | 150°C |
| LM236 | 125°C |
| LM336 | 100°C |

| Thermal Resistance | TO-92 | TO | SOIC |
|-------------------------------------|-----------------------|---------|---------|
| θ_{ja} (Junction to Ambient) | 180°C/W (0.4" leads) | 440°C/W | 165°C/W |
| | 170°C/W (0.125" lead) | | |
| θ_{jc} (Junction to Case) | n/a | 80°C/W | n/a |

Electrical Characteristics ⁽¹⁾

| Parameter | Conditions | | LM136A-2.5-N/ LM236A-2.5-N LM136-2.5-N/ LM236-2.5-N | | | LM336B-2.5-N LM336-2.5-N | | | Units |
|---------------------------------------|--|---|--|-------|-------|-----------------------------|-------|----------|----------|
| | | | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |
| Reverse Breakdown Voltage | $T_A=25^\circ\text{C}$, $I_R=1\text{ mA}$ | LM136, LM236, LM336 | 2.440 | 2.490 | 2.540 | 2.390 | 2.490 | 2.590 | V |
| | | LM136A, LM236A, LM336B | 2.465 | 2.490 | 2.515 | 2.440 | 2.490 | 2.540 | V |
| Reverse Breakdown Change With Current | $T_A=25^\circ\text{C}$, $400\ \mu\text{A}\leq I_R\leq 10\text{ mA}$ | | | 2.6 | 6 | | 2.6 | 10 | mV |
| Reverse Dynamic Impedance | $T_A=25^\circ\text{C}$, $I_R=1\text{ mA}$, $f = 100\text{ Hz}$ | | | 0.2 | 0.6 | | 0.2 | 1 | Ω |
| Temperature Stability ⁽²⁾ | V_R Adjusted to 2.490V $I_R=1\text{ mA}$ Figure 15 | $0^\circ\text{C}\leq T_A\leq 70^\circ\text{C}$ (LM336) | | | | | 1.8 | 6 | mV |
| | | $-25^\circ\text{C}\leq T_A\leq +85^\circ\text{C}$ (LM236H, LM236Z) | | 3.5 | 9 | | | | mV |
| | | $-25^\circ\text{C}\leq T_A\leq +85^\circ\text{C}$ (LM236M) | | 7.5 | 18 | | | | mV |
| | | $-55^\circ\text{C}\leq T_A\leq +125^\circ\text{C}$ (LM136) | | 12 | 18 | | | | mV |
| Reverse Breakdown Change With Current | $400\ \mu\text{A}\leq I_R\leq 10\text{ mA}$ | | 3 | 10 | | 3 | 12 | mV | |
| Reverse Dynamic Impedance | $I_R=1\text{ mA}$ | | 0.4 | 1 | | 0.4 | 1.4 | Ω | |
| Long Term Stability | $T_A=25^\circ\text{C}\pm 0.1^\circ\text{C}$, $I_R=1\text{ mA}$, $t = 1000\text{ hrs}$ | | 20 | | | 20 | | ppm | |

- (1) Unless otherwise specified, the LM136-2.5-N is specified from $-55^\circ\text{C}\leq T_A\leq +125^\circ\text{C}$, the LM236-2.5-N from $-25^\circ\text{C}\leq T_A\leq +85^\circ\text{C}$ and the LM336-2.5-N from $0^\circ\text{C}\leq T_A\leq +70^\circ\text{C}$.
- (2) Temperature stability for the LM336 and LM236 family is specified by design. Design limits are ensured (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels. Stability is defined as the maximum change in V_{ref} from 25°C to T_A (min) or T_A (max).

Typical Performance Characteristics

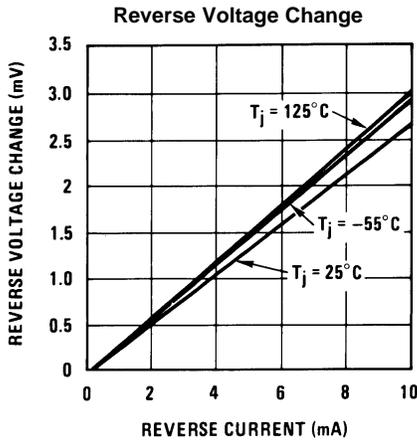


Figure 7.

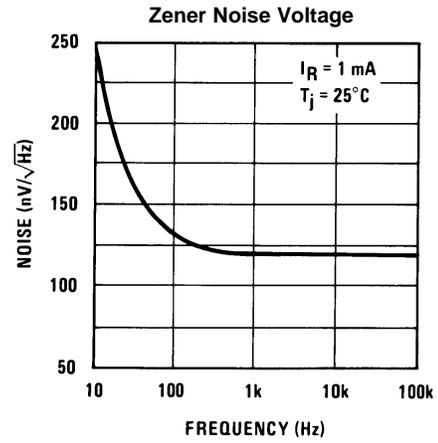


Figure 8.

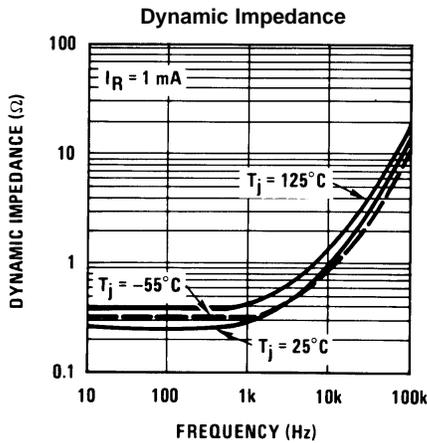


Figure 9.

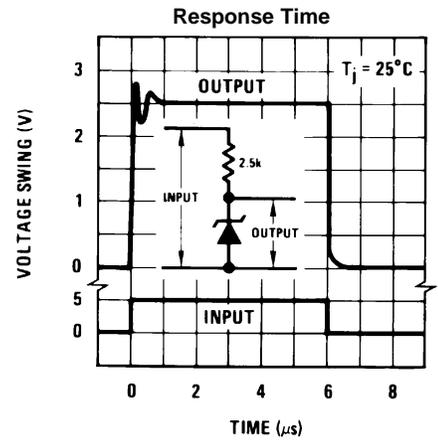


Figure 10.

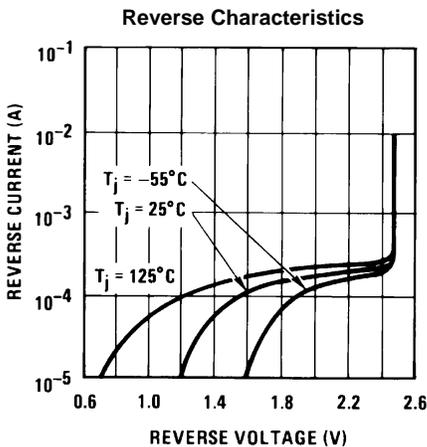


Figure 11.

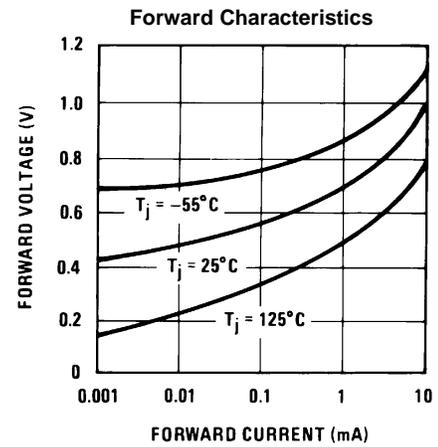
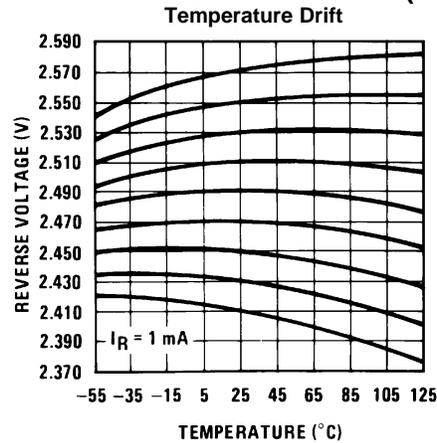


Figure 12.

Typical Performance Characteristics (continued)



APPLICATION HINTS

The LM136 series voltage references are much easier to use than ordinary zener diodes. Their low impedance and wide operating current range simplify biasing in almost any circuit. Further, either the breakdown voltage or the temperature coefficient can be adjusted to optimize circuit performance.

Figure 14 shows an LM136 with a 10k potentiometer for adjusting the reverse breakdown voltage. With the addition of R1 the breakdown voltage can be adjusted without affecting the temperature coefficient of the device. The adjustment range is usually sufficient to adjust for both the initial device tolerance and inaccuracies in buffer circuitry.

If minimum temperature coefficient is desired, two diodes can be added in series with the adjustment potentiometer as shown in Figure 15. When the device is adjusted to 2.490V the temperature coefficient is minimized. Almost any silicon signal diode can be used for this purpose such as a 1N914, 1N4148 or a 1N457. For proper temperature compensation the diodes should be in the same thermal environment as the LM136. It is usually sufficient to mount the diodes near the LM136 on the printed circuit board. The absolute resistance of R1 is not critical and any value from 2k to 20k will work.

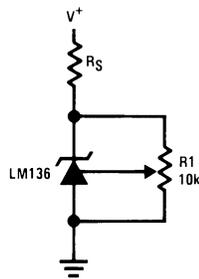


Figure 14. LM136 With Pot for Adjustment of Breakdown Voltage
(Trim Range = ± 120 mV typical)

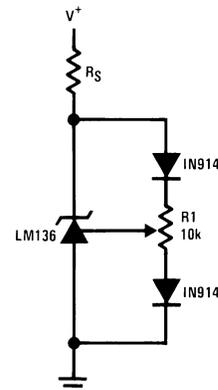
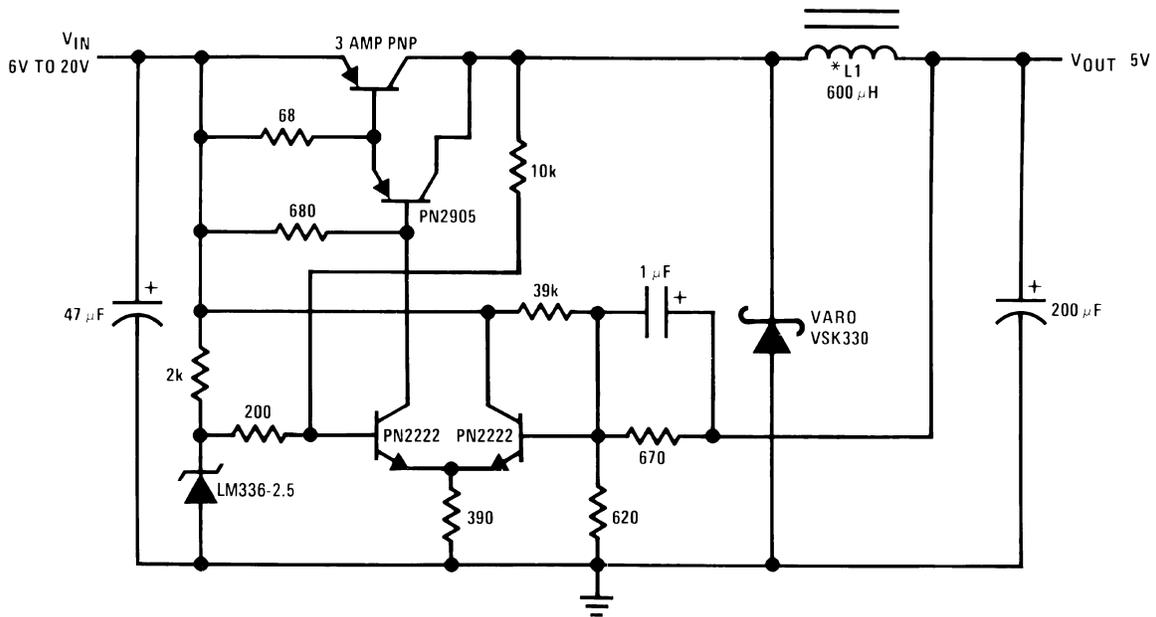
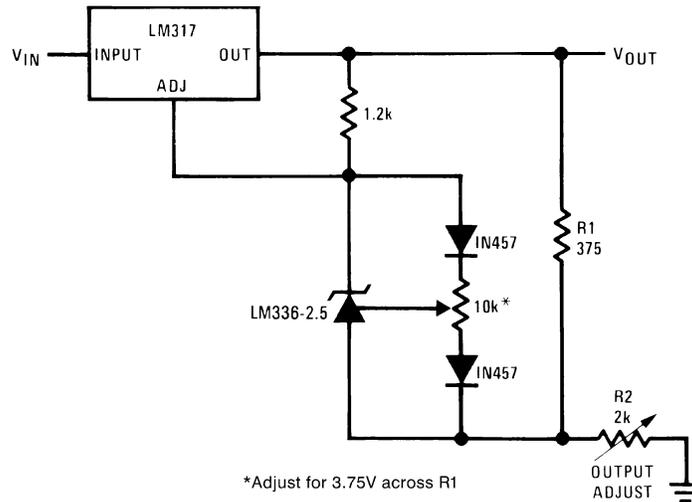


Figure 15. Temperature Coefficient Adjustment
(Trim Range = ± 70 mV typical)



[†]L1 60 turns #16 wire on Arnold Core A-254168-2
[†]Efficiency ≈ 80%

Figure 16. Low Cost 2 Amp Switching Regulator[†]



*Adjust for 3.75V across R1

Figure 17. Precision Power Regulator with Low Temperature Coefficient

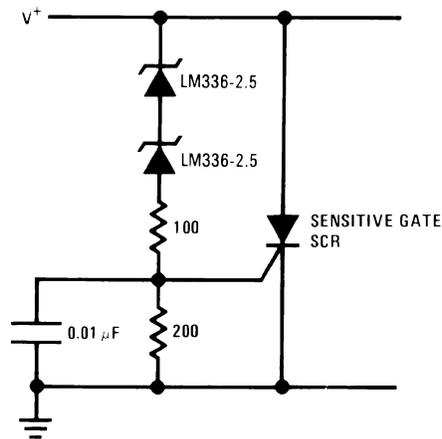
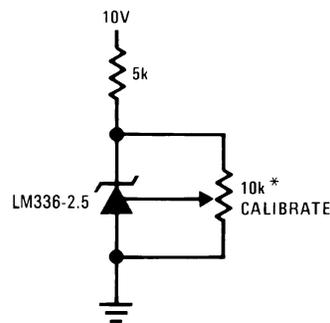


Figure 18. 5V Crowbar



*Does not affect temperature coefficient

Figure 19. Trimmed 2.5V Reference with Temperature Coefficient Independent of Breakdown Voltage

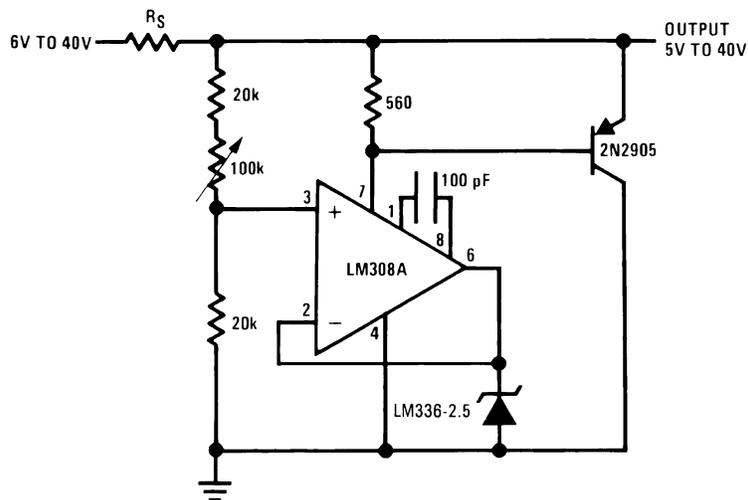


Figure 20. Adjustable Shunt Regulator

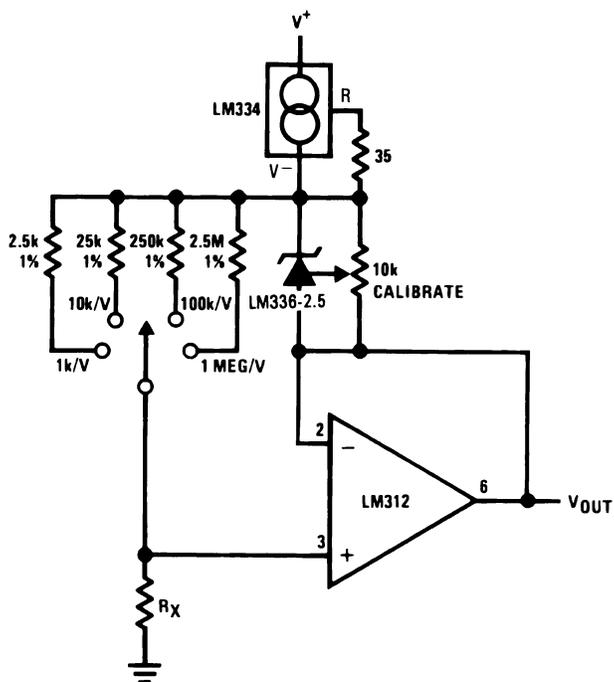


Figure 21. Linear Ohmmeter

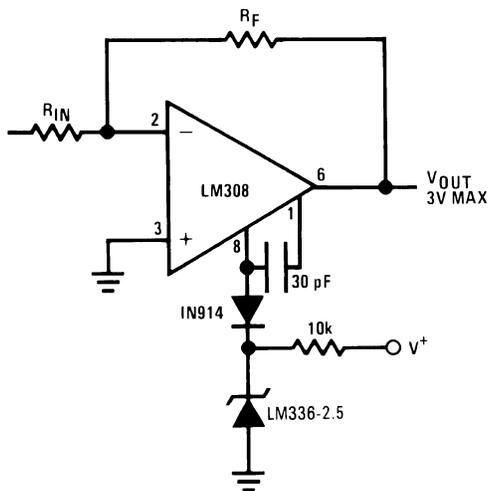


Figure 22. Op Amp with Output Clamped

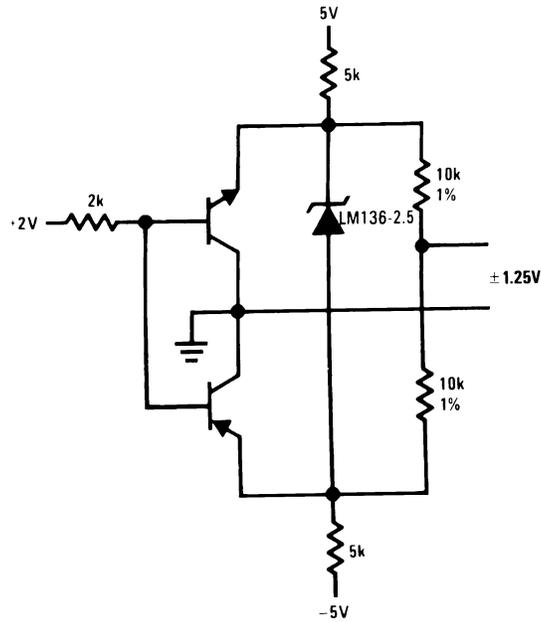


Figure 23. Bipolar Output Reference

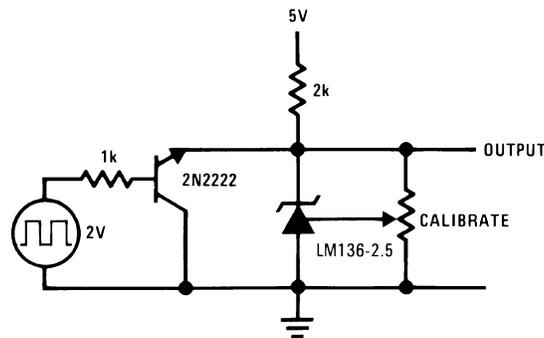


Figure 24. 2.5V Square Wave Calibrator

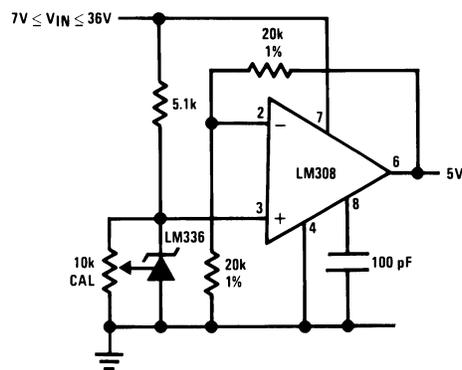


Figure 25. 5V Buffered Reference

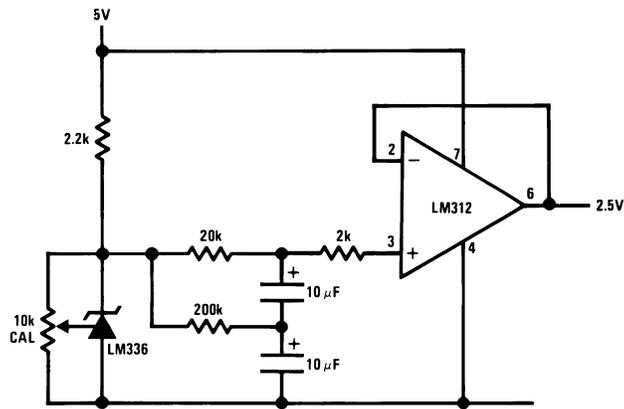
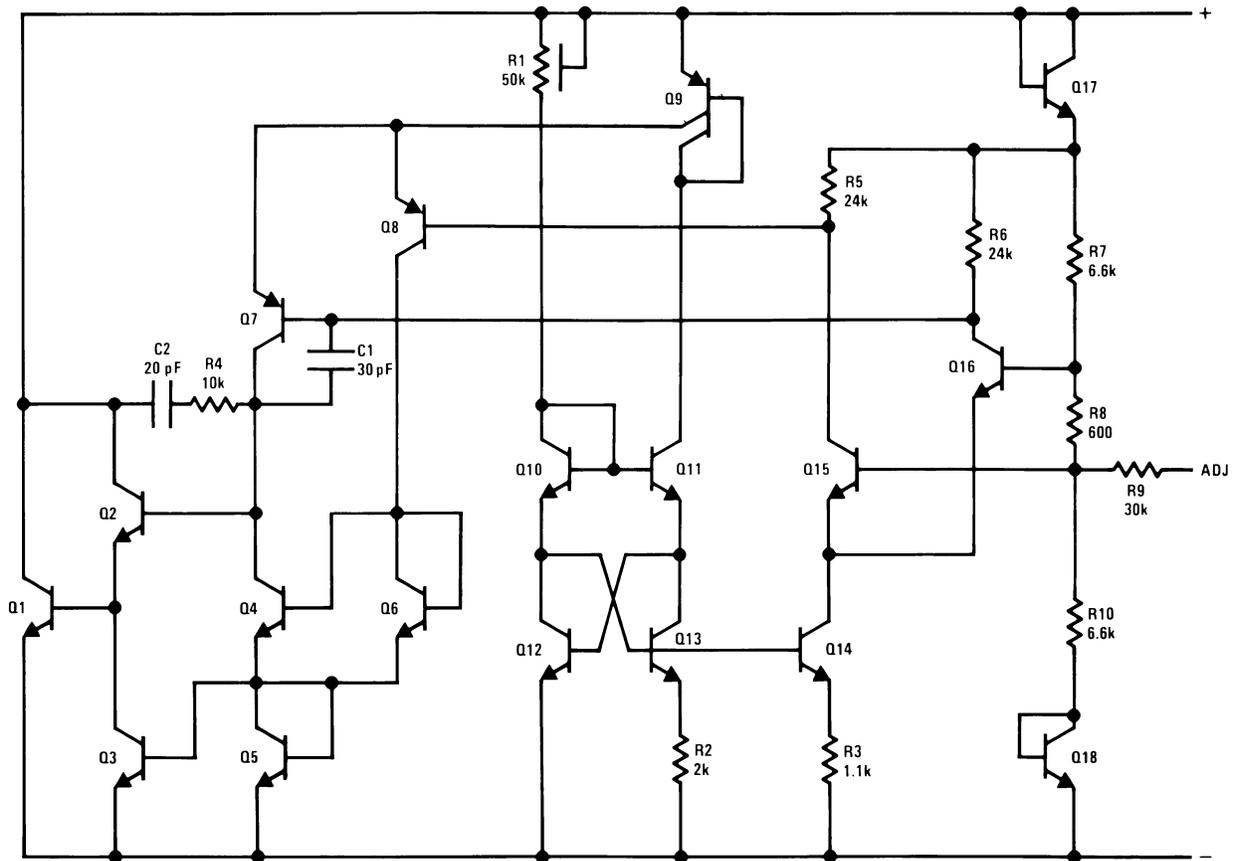
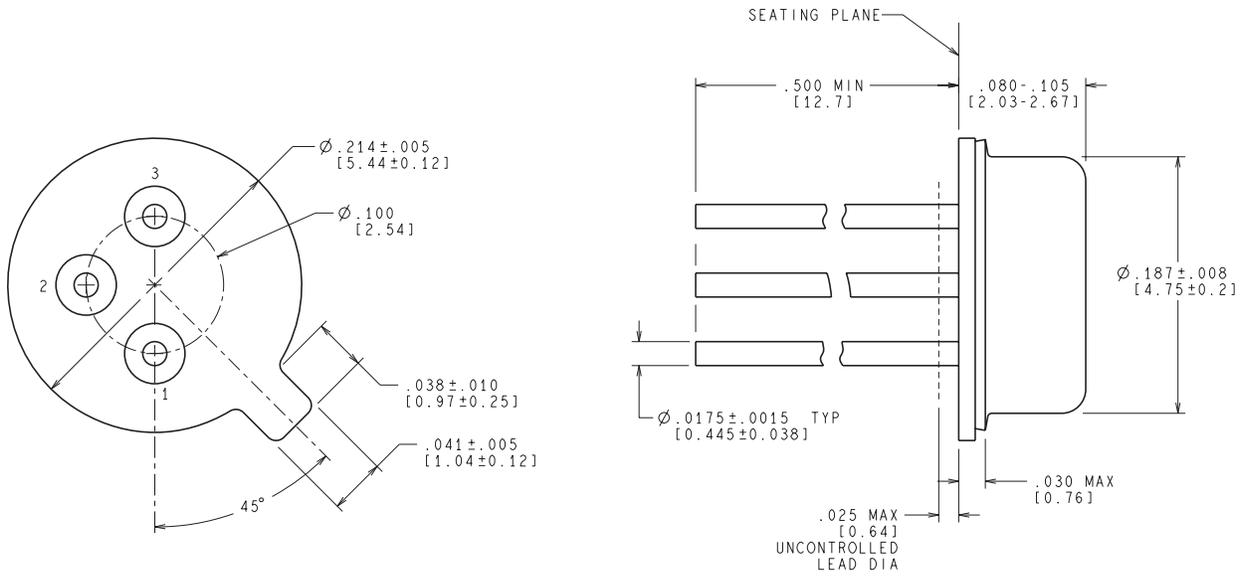


Figure 26. Low Noise Buffered Reference

Schematic Diagram



NDV0003H



CONTROLLING DIMENSION IS INCH
VALUES IN [] ARE IN MILLIMETERS

H03H (Rev F)

COMPLEMENTARY SILICON POWER TRANSISTORS

...designed for use in general-purpose amplifier and switching applications

FEATURES:

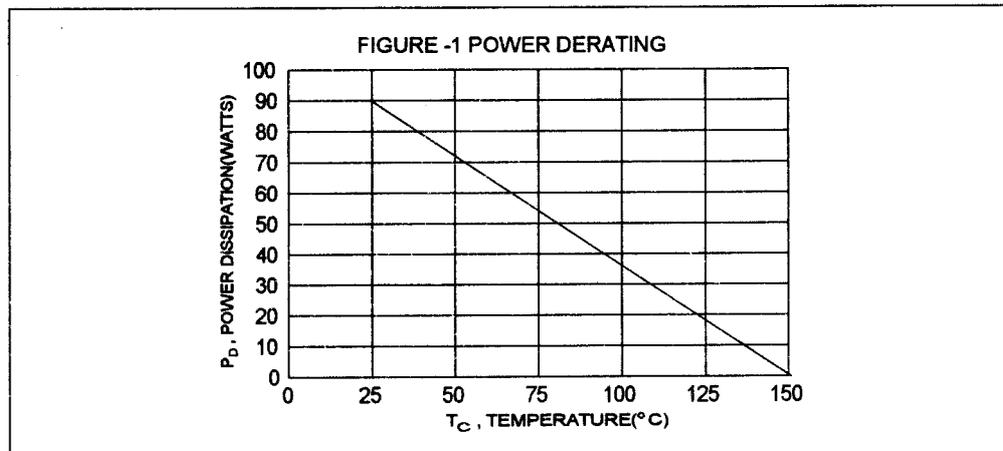
- * Power Dissipation - $P_D = 90W @ T_C = 25^\circ C$
- * DC Current Gain $hFE = 20 \sim 100 @ I_C = 4.0 A$
- * $V_{CE(sat)} = 1.1 V (Max.) @ I_C = 4.0 A, I_B = 400 mA$

MAXIMUM RATINGS

| Characteristic | Symbol | Rating | Unit |
|---|----------------|--------------|--------------------|
| Collector-Emitter Voltage | V_{CEO} | 60 | V |
| Collector-Emitter Voltage | V_{CER} | 70 | V |
| Collector-Base Voltage | V_{CBO} | 100 | V |
| Emitter-Base Voltage | V_{EBO} | 7.0 | V |
| Collector Current-Continuous | I_C | 15 | A |
| Base Current | I_B | 7.0 | A |
| Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ C$ Derate above $25^\circ C$ | P_D | 90 0.72 | W W/ $^\circ C$ |
| Operating and Storage Junction Temperature Range | T_J, T_{STG} | - 65 to +150 | $^\circ C$ |

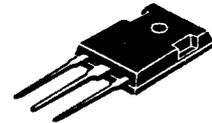
THERMAL CHARACTERISTICS

| Characteristic | Symbol | Max | Unit |
|-------------------------------------|-----------------|------|--------------|
| Thermal Resistance Junction to Case | $R_{\theta jc}$ | 1.39 | $^\circ C/W$ |

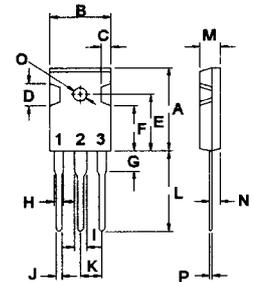


NPN **PNP**
TIP3055 **TIP2955**

15 AMPERE
COMPLEMENTARY SILICON
POWER TRANSISTORS
60 VOLTS
90 WATTS



TO-247(3P)



PIN 1.BASE
2.COLLECTOR
3.EMITTER

| DIM | MILLIMETERS | |
|-----|-------------|-------|
| | MIN | MAX |
| A | 20.63 | 22.38 |
| B | 15.38 | 16.20 |
| C | 1.90 | 2.70 |
| D | 5.10 | 6.10 |
| E | 14.81 | 15.22 |
| F | 11.72 | 12.84 |
| G | 4.20 | 4.50 |
| H | 1.82 | 2.46 |
| I | 2.92 | 3.23 |
| J | 0.89 | 1.53 |
| K | 5.26 | 5.66 |
| L | 18.50 | 21.50 |
| M | 4.68 | 5.36 |
| N | 2.40 | 2.80 |
| O | 3.25 | 3.65 |
| P | 0.55 | 0.70 |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_c = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

| Characteristic | Symbol | Min | Max | Unit |
|----------------|--------|-----|-----|------|
|----------------|--------|-----|-----|------|

OFF CHARACTERISTICS

| | | | | |
|--|---------------|----|-----|----|
| Collector - Emitter Sustaining Voltage (1) ($I_c = 30\text{ mA}$, $I_B = 0$) | $V_{CE(sus)}$ | 60 | | V |
| Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 70\text{ V}$, $R_{BE} = 100\text{ ohm}$) | I_{CER} | | 1.0 | mA |
| Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 30\text{ V}$, $I_B = 0$) | I_{CEO} | | 0.7 | mA |
| Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 100\text{ V}$, $V_{BE(off)} = 1.5\text{ V}$) | I_{CEV} | | 5.0 | mA |
| Emitter Cutoff Current ($V_{EB} = 7.0\text{ V}$, $I_C = 0$) | I_{EBO} | | 5.0 | mA |

ON CHARACTERISTICS (1)

| | | | | |
|---|---------------|-----------|------------|---|
| DC Current Gain ($I_c = 4.0\text{ A}$, $V_{CE} = 4.0\text{ V}$) ($I_c = 10\text{ A}$, $V_{CE} = 4.0\text{ V}$) | hFE | 20 5.0 | 100 | |
| Collector - Emitter Saturation Voltage ($I_c = 4.0\text{ A}$, $I_B = 0.4\text{ A}$) ($I_c = 10\text{ A}$, $I_B = 3.3\text{ A}$) | $V_{CE(sat)}$ | | 1.1 3.0 | V |
| Base - Emitter On Voltage ($I_c = 4.0\text{ A}$, $V_{CE} = 4.0\text{ V}$) | $V_{BE(on)}$ | | 1.8 | V |

DYNAMIC CHARACTERISTICS

| | | | | |
|---|----------|-----|--|-----|
| Current Gain - Bandwidth Product ($I_c = 500\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$, $f = 1.0\text{ MHz}$) | f_T | 2.5 | | MHz |
| Small-Signal Current Gain ($I_c = 1.0\text{ A}$, $V_{CE} = 4.0\text{ V}$, $f = 1\text{ KHz}$) | h_{FE} | 15 | | |

(1) Pulse Test: Pulse width = $300\text{ }\mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2.0\%$

(2) $f_T = |h_{fe}| \cdot f_{test}$

FIG-2 DC CURRENT GAIN

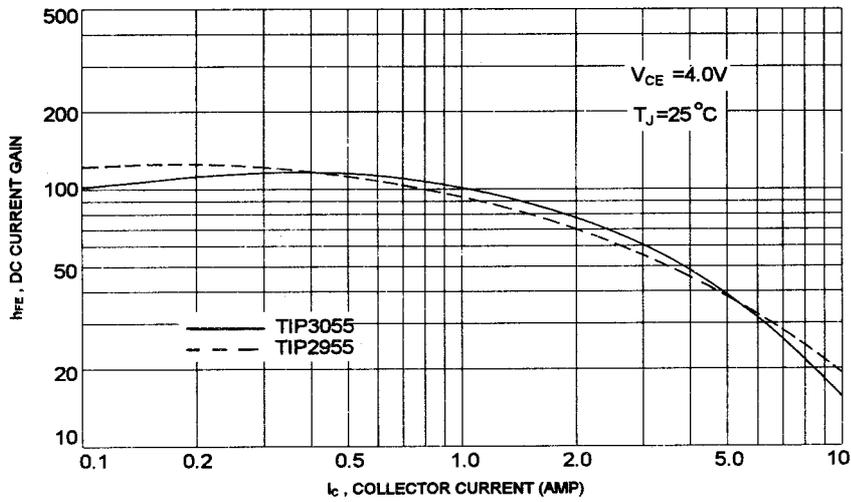
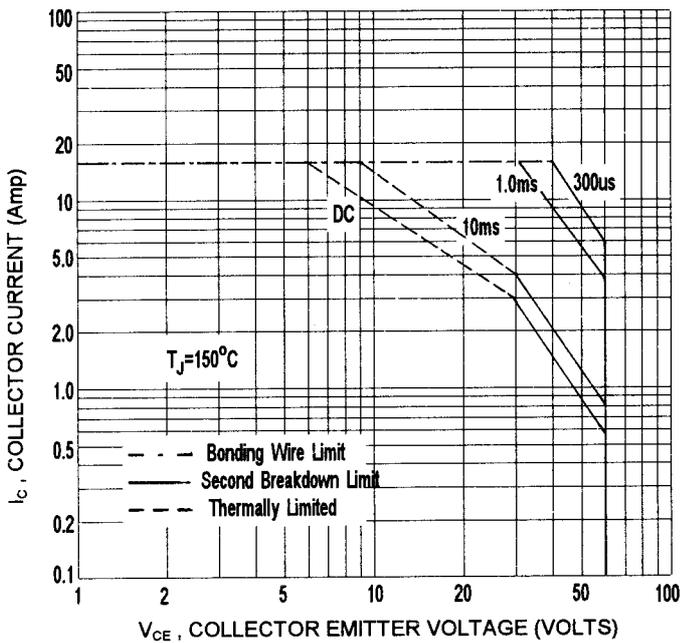


FIG-3 ACTIVE-REGION SAFE OPERATING AREA



There are two limitation on the power handling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown safe operating area curves indicate I_C - V_{CE} limits of the transistor that must be observed for reliable operation i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than curves indicate.

The data of FIG-3 is base on $T_C = 150^\circ C$; $T_{J(PK)}$ is variable depending on power level. second breakdown pulse limits are valid for duty cycles to 10% but must be derated for temperature.

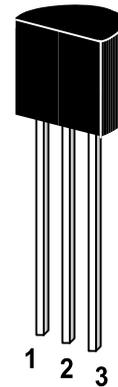
2N2222 / 2N2222A

NPN Silicon Epitaxial Planar Transistor

for switching and AF amplifier applications.

The transistor is subdivided into one group according to its DC current gain. As complementary type the PNP transistor ST 2N2907 and ST 2N2907A are recommended.

On special request, these transistors can be manufactured in different pin configurations.



1. Emitter 2. Base 3. Collector

TO-92 Plastic Package
Weight approx. 0.19g

Absolute Maximum Ratings ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

| | Symbol | Value | | Unit |
|---------------------------|------------------|-------------|------------|------------------|
| | | ST 2N2222 | ST 2N2222A | |
| Collector Base Voltage | V_{CBO} | 60 | 75 | V |
| Collector Emitter Voltage | V_{CEO} | 30 | 40 | V |
| Emitter Base Voltage | V_{EBO} | 5 | 6 | V |
| Collector Current | I_{C} | 600 | | mA |
| Power Dissipation | P_{tot} | 625 | | mW |
| Junction Temperature | T_{j} | 150 | | $^\circ\text{C}$ |
| Storage Temperature Range | T_{s} | -55 to +150 | | $^\circ\text{C}$ |

G S P FORM A IS AVAILABLE

2N2222 / 2N2222A

Characteristics at $T_{amb}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

| | | Symbol | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|-------------------------------------|--|---------------|------|------|------|---------------|
| DC Current Gain | at $I_C=0.1\text{mA}$, $V_{CE}=10\text{V}$ | h_{FE} | 35 | - | - | - |
| | at $I_C=1\text{mA}$, $V_{CE}=10\text{V}$ | h_{FE} | 50 | - | - | - |
| | at $I_C=10\text{mA}$, $V_{CE}=10\text{V}$ | h_{FE} | 75 | - | - | - |
| | at $I_C=150\text{mA}$, $V_{CE}=10\text{V}$ ST 2N2222 | h_{FE} | 100 | - | 300 | - |
| | at $I_C=500\text{mA}$, $V_{CE}=10\text{V}$ ST 2N2222A | h_{FE} | 30 | - | - | - |
| | | h_{FE} | 40 | - | - | - |
| Collector Cutoff Current | ST 2N2222 at $V_{CB}=50\text{V}$ | I_{CBO} | - | - | 0.01 | μA |
| | 2N2222A $V_{CB}=60\text{V}$ | I_{CBO} | - | - | 0.01 | μA |
| Collector Base Breakdown Voltage | ST 2N2222 at $I_C=10\mu\text{A}$ | $V_{(BR)CBO}$ | 60 | - | - | V |
| | ST | $V_{(BR)CBO}$ | 75 | - | - | V |
| Collector Emitter Breakdown Voltage | ST 2N2222 at $I_C=10\text{mA}$ | $V_{(BR)CEO}$ | 30 | - | - | V |
| | ST | $V_{(BR)CEO}$ | 40 | - | - | V |
| Emitter Base Breakdown Voltage | ST 2N2222 at $I_E=10\mu\text{A}$ | $V_{(BR)EBO}$ | 5 | - | - | V |
| | ST | $V_{(BR)EBO}$ | 6 | - | - | V |
| Collector Saturation Voltage | ST 2N2222 at $I_C=150\text{mA}$, $I_B=15\text{mA}$ | $V_{CE(sat)}$ | - | - | 0.4 | V |
| | ST | $V_{CE(sat)}$ | - | - | 0.3 | V |
| | 2N2222A at $I_C=500\text{mA}$, $I_B=50\text{mA}$ | $V_{CE(sat)}$ | - | - | 1.6 | V |
| | ST 2N2222 | $V_{CE(sat)}$ | - | - | 1 | V |
| Base Saturation Voltage | ST 2N2222 at $I_C=150\text{mA}$, $I_B=15\text{mA}$ | $V_{BE(sat)}$ | - | - | 1.3 | V |
| | ST | $V_{BE(sat)}$ | 0.6 | - | 1.2 | V |
| | 2N2222A at $I_C=500\text{mA}$, $I_B=50\text{mA}$ | $V_{BE(sat)}$ | - | - | 2.6 | V |
| | ST 2N2222 | $V_{BE(sat)}$ | - | - | 2.0 | v |
| Gain Bandwidth Product | at $I_C=20\text{mA}$, $V_{CE}=20\text{V}$, $f=100\text{MHz}$ | f_T | 250 | - | - | MHz |
| Collector Output Capacitance | at $V_{CB}=10\text{V}$, $f=1\text{MHz}$ | C_{ob} | - | - | 8 | pF |
| Input Capacitance | at $V_{CB}=0.5\text{V}$, $f=1\text{MHz}$ | C_{ib} | - | - | 30 | pF |

G S P FORM A IS AVAILABLE

Figure 1. DC Current Gain

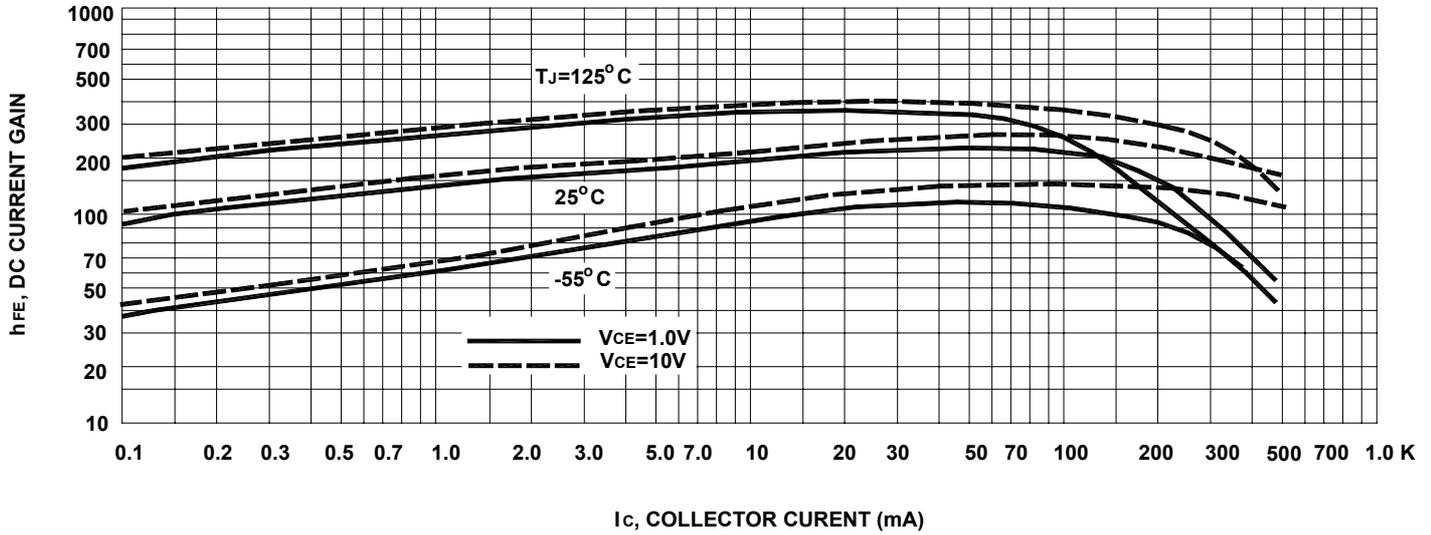
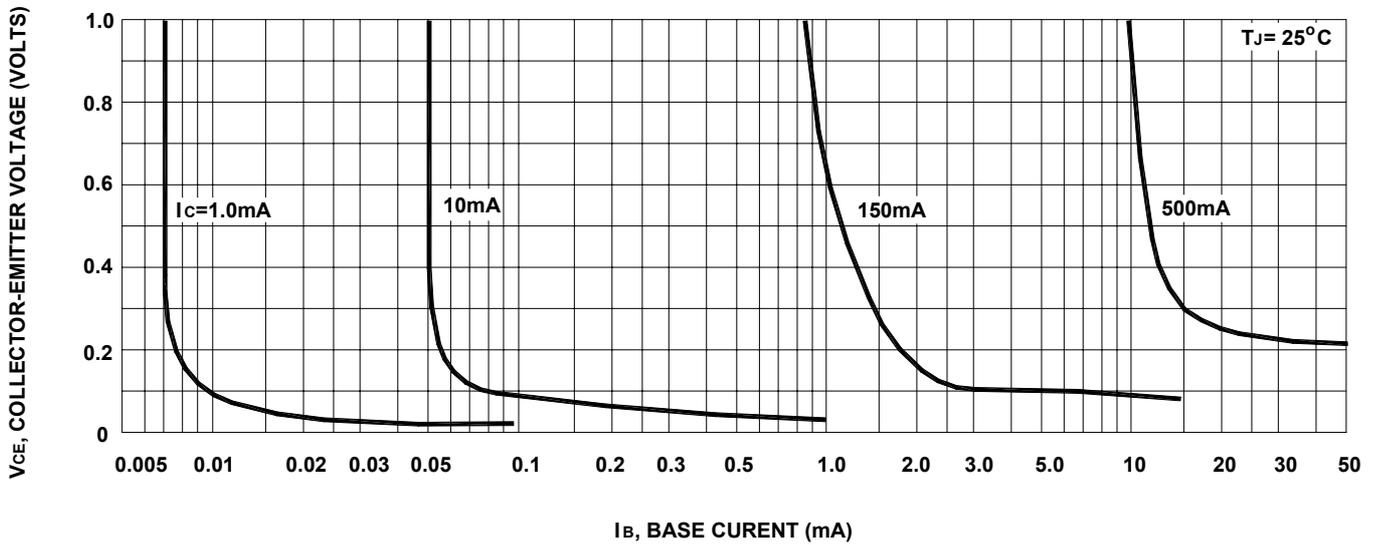


Figure 2. Collector Saturation Region



2N2222 / 2N2222A

Figure 3. Capacitances

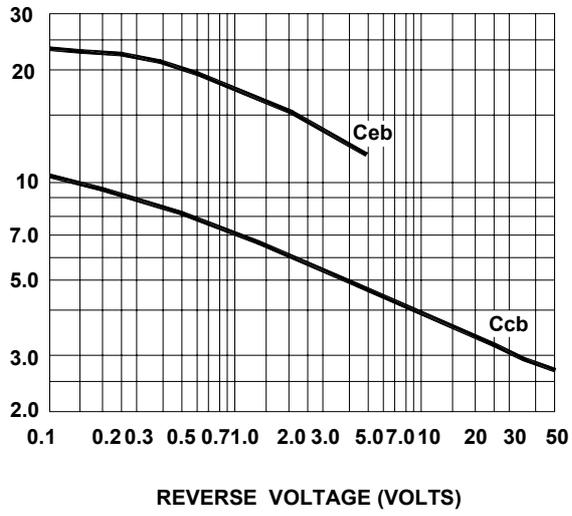
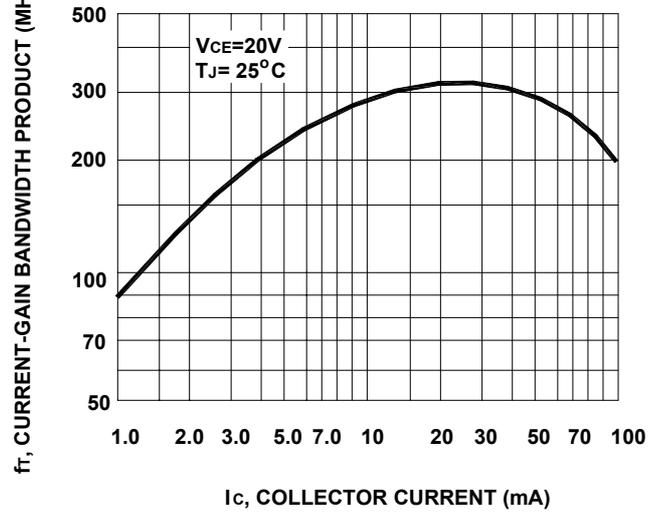
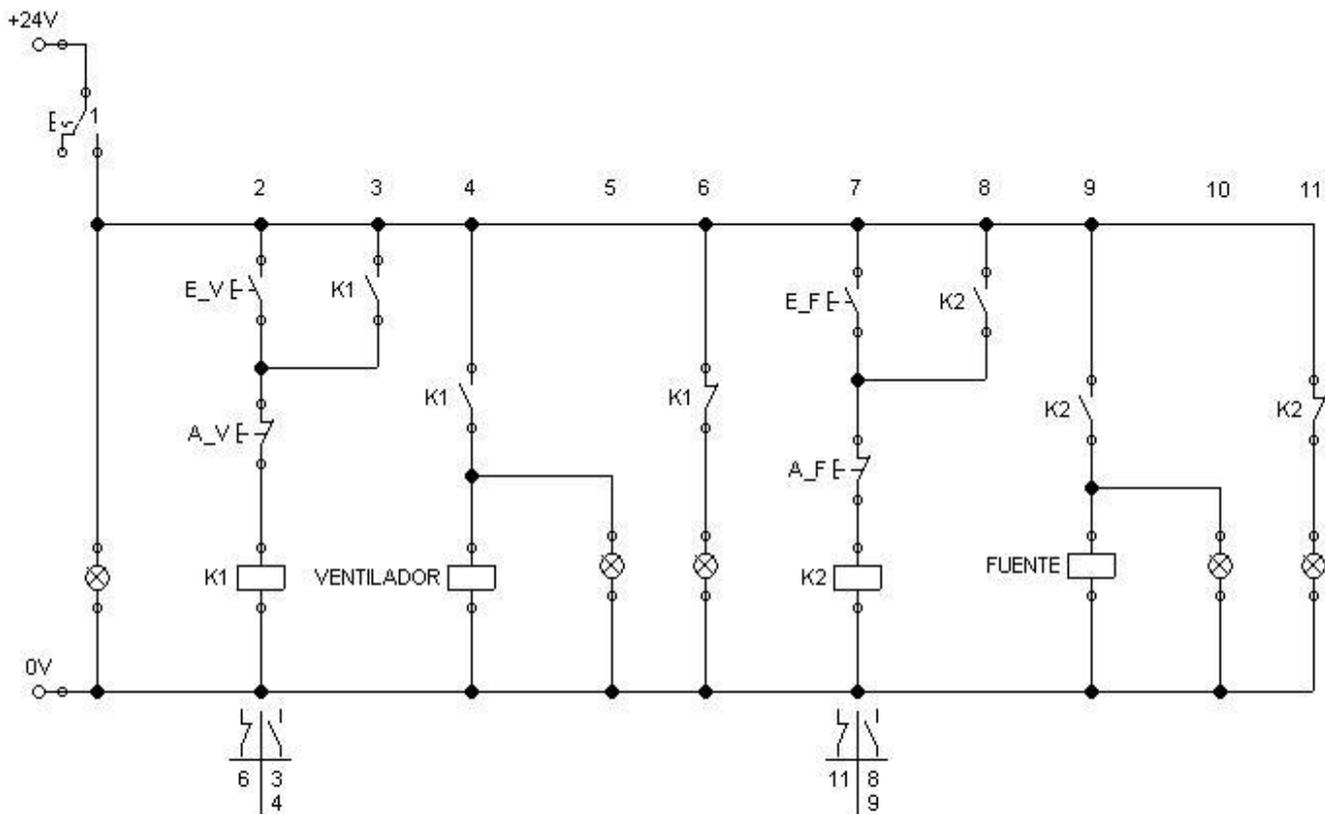
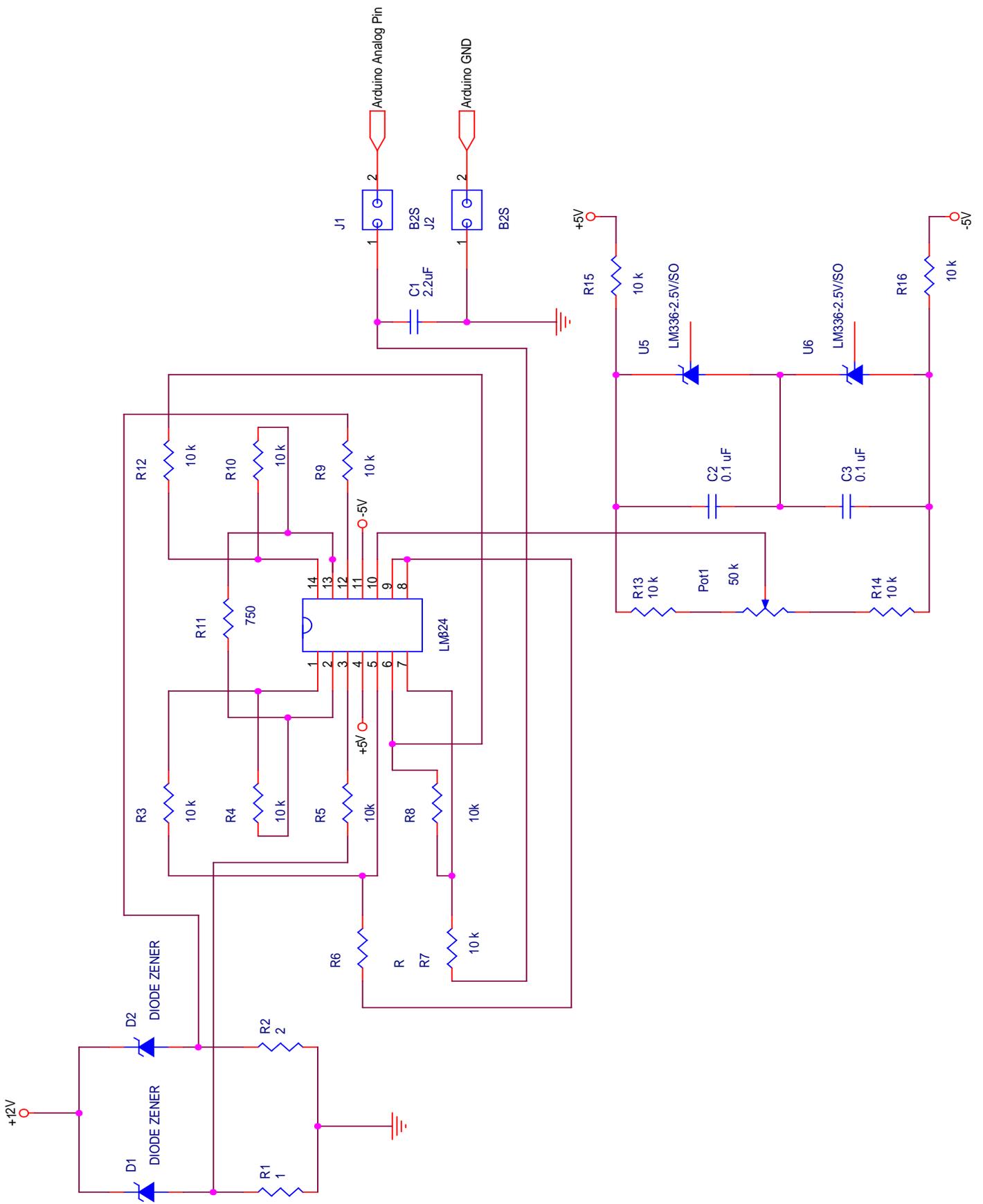


Figure 4. Current-Gain Bandwidth Product

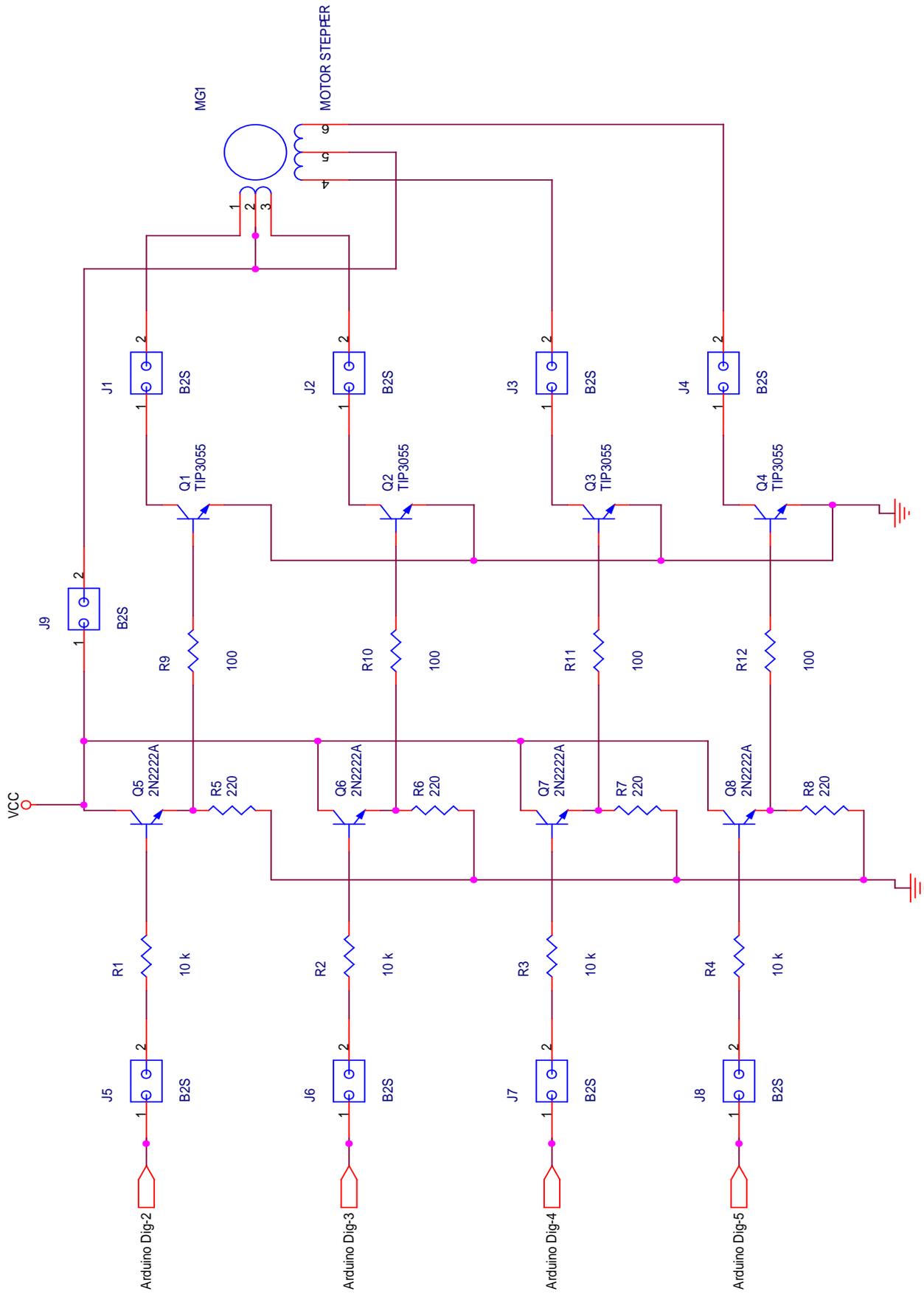




| | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Diseño de José Alejandro Guzmán | Revisado por Ing. Salomón Torres | Aprobado por Ing. Salomón Torres | FECHA 23/02/2015 |
| Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica | | Circuito de control general | |
| | | Planos Eléctricos | Hoja 1 / 5 |



| | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Diseño de José Alejandro Guzmán | Revisado por Ing. Salomón Torres | Aprobado por Ing. Salomón Torres | FECHA 23/02/2015 |
| Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica | | Circuito por Sensor | |
| | | Planos Electrónicos | Hoja 2 / 5 |

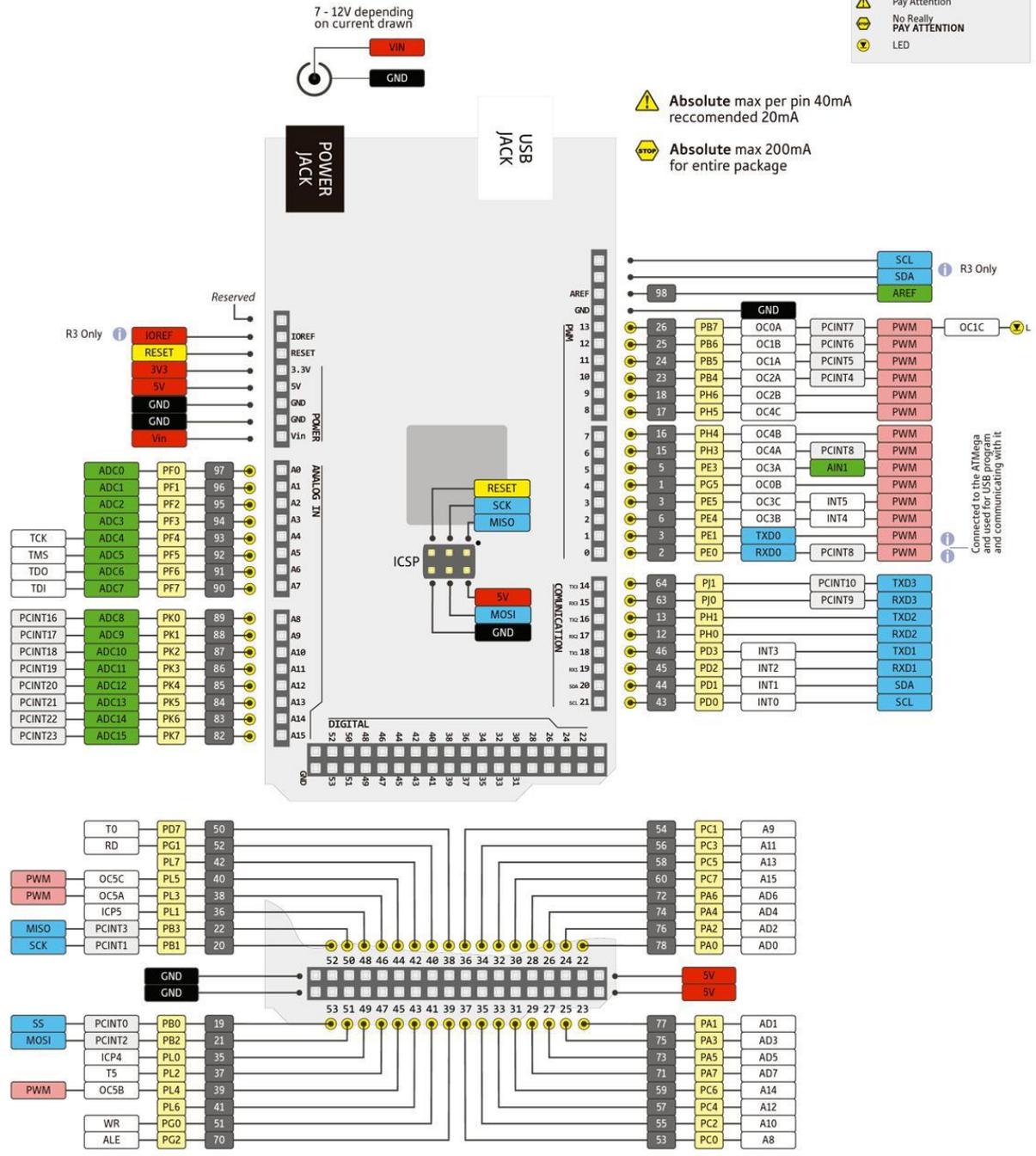


| | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Diseño de José Alejandro Guzmán | Revisado por Ing. Salomón Torres | Aprobado por Ing. Salomón Torres | FECHA 23/02/2015 |
| Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica | | Circuito de Potencia Motor PP | |
| | | Planos Electrónicos | Hoja 3 / 5 |

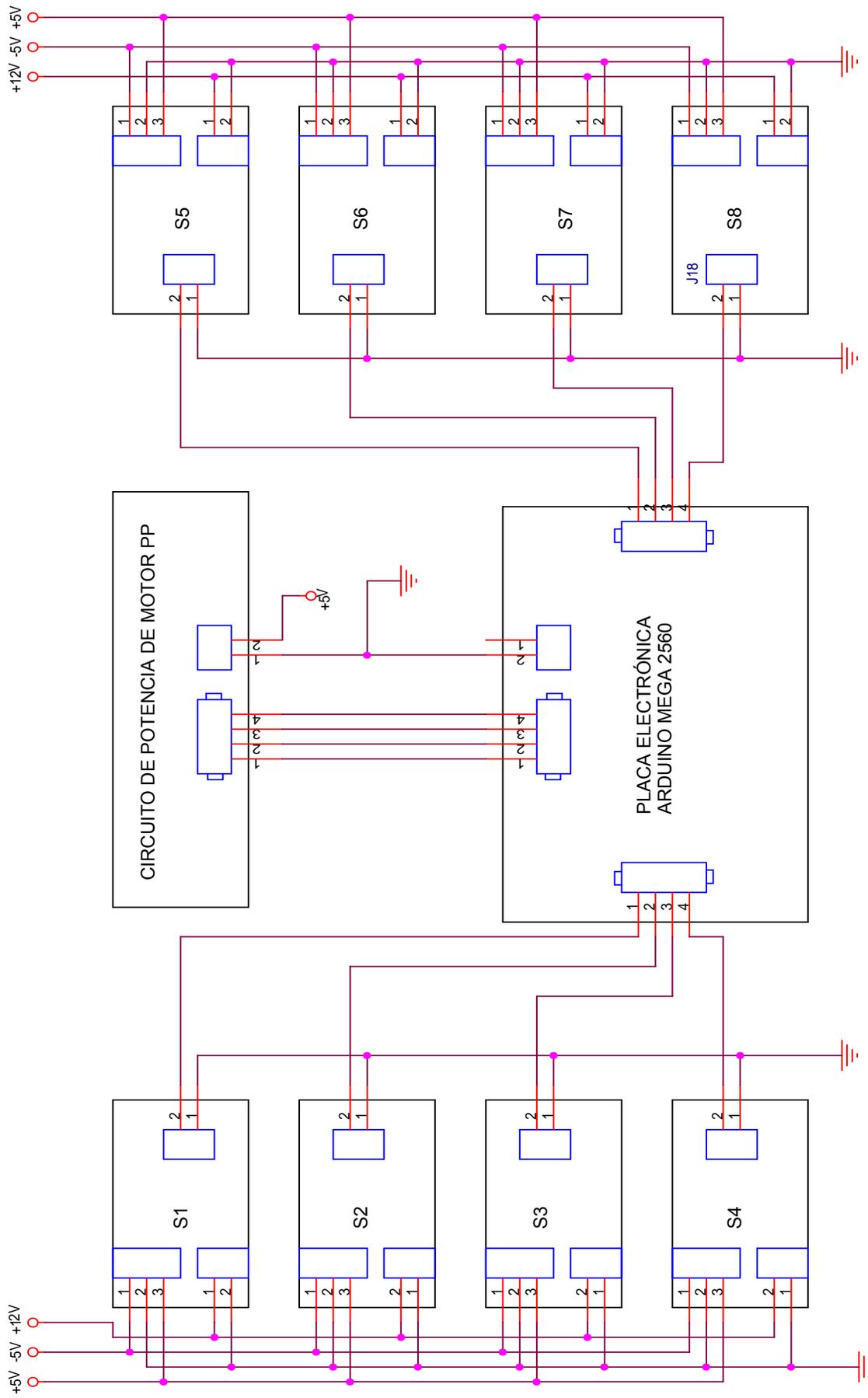
LEGEND

- GND
- POWER
- CONTROL
- PHYSICAL PIN
- PORT PIN
- ATMEGA PIN FUNC
- DIGITAL PIN
- ANALOG-RELATED PIN
- PWM PIN
- SERIAL PIN

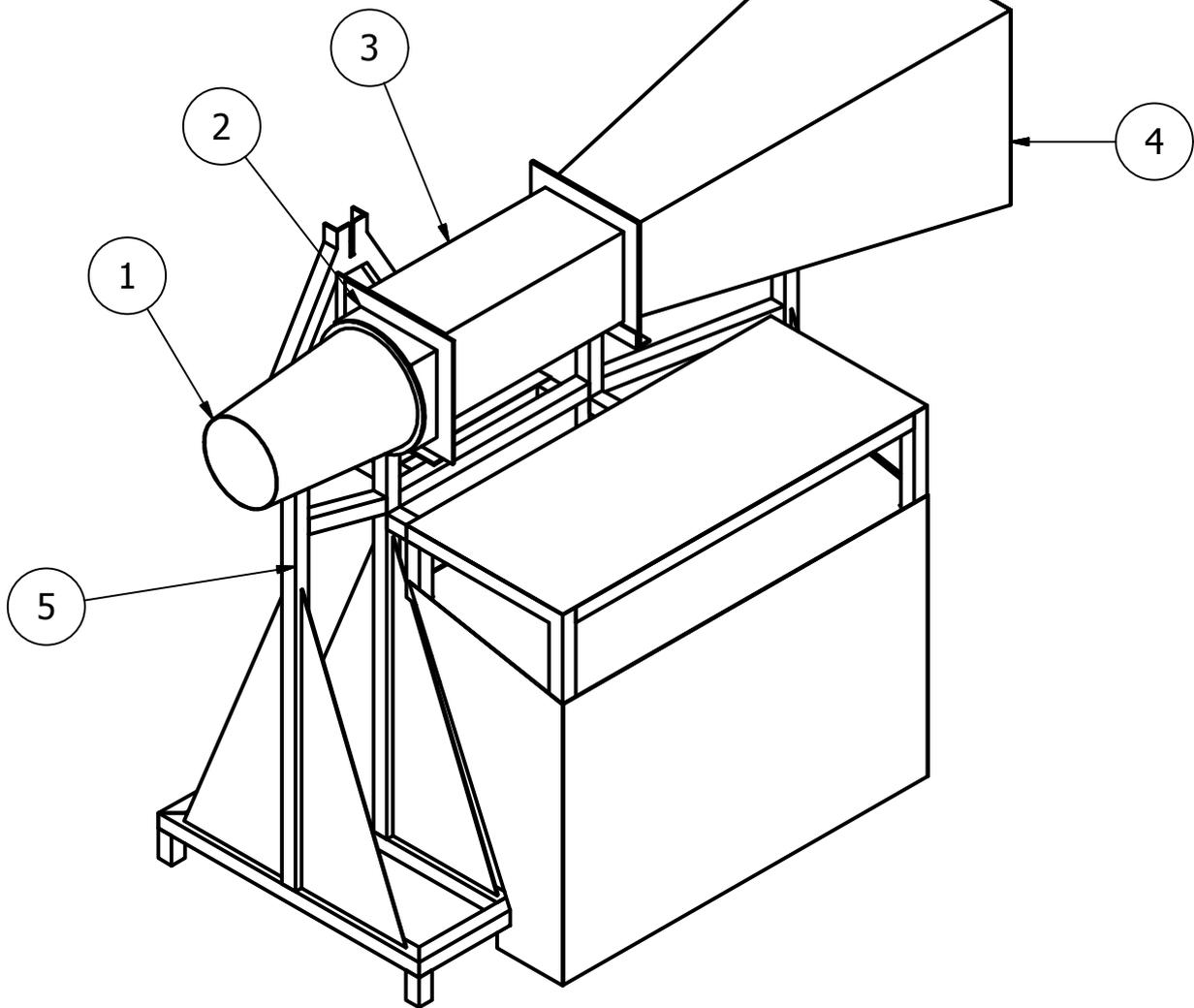
i General Information
⚠ Pay Attention
⚠ No Really PAY ATTENTION
⚠ LED



| | | | |
|---|-------------------------------------|--|---------------------|
| Diseño de Arduino | Revisado por Ing. Salomón Torres | Aprobado por Ing. Salomón Torres | FECHA 23/02/2015 |
| Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica | | Placa Arduino Mega 2560 Planos Electrónicos | |
| | | Hoja 4 / 5 | |



| | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Diseño de José Alejandro Guzmán | Revisado por Ing. Salomón Torres | Aprobado por Ing. Salomón Torres | FECHA 23/02/2015 |
| Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica | | Esquema de conexión general | |
| | | Planos Electrónicos | Hoja 5 / 5 |



LISTA DE PIEZAS

| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA | DESCRIPCIÓN |
|----------|-------|---------------------|---|
| 1 | 1 | Ventilador | Ventilador 110V |
| 2 | 1 | Sección de Conexión | Fabricada con acrílico y recubierta con fibra de vidrio |
| 3 | 1 | Cámara de Pruebas | Fabricada con Acrílico |
| 4 | 1 | Difusor | Fabricado con acrílico y recubierto con fibra de vidrio |
| 5 | 1 | Estructura | Tubo de acero estructura 1 pulgada, chapa metálica 1.5 mm |

Diseño de
José Alejandro Guzmán

Revisado por
Ing. Salomón Torres

Aprobado por
Ing. Salomón Torres

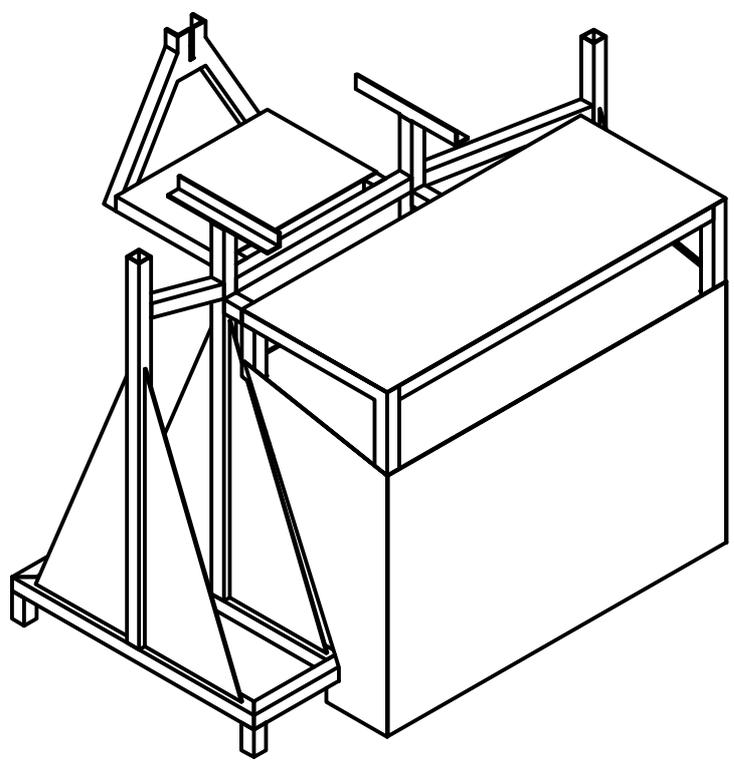
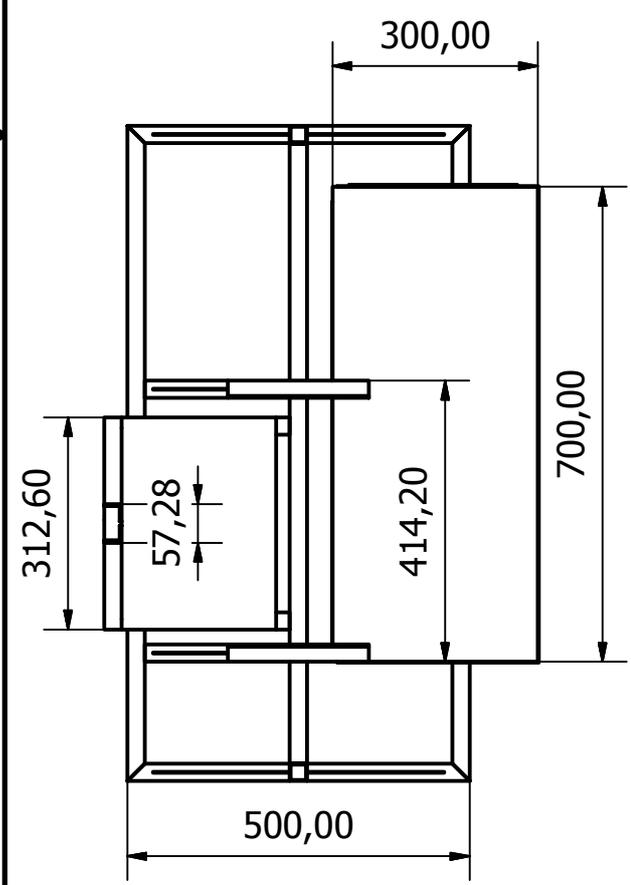
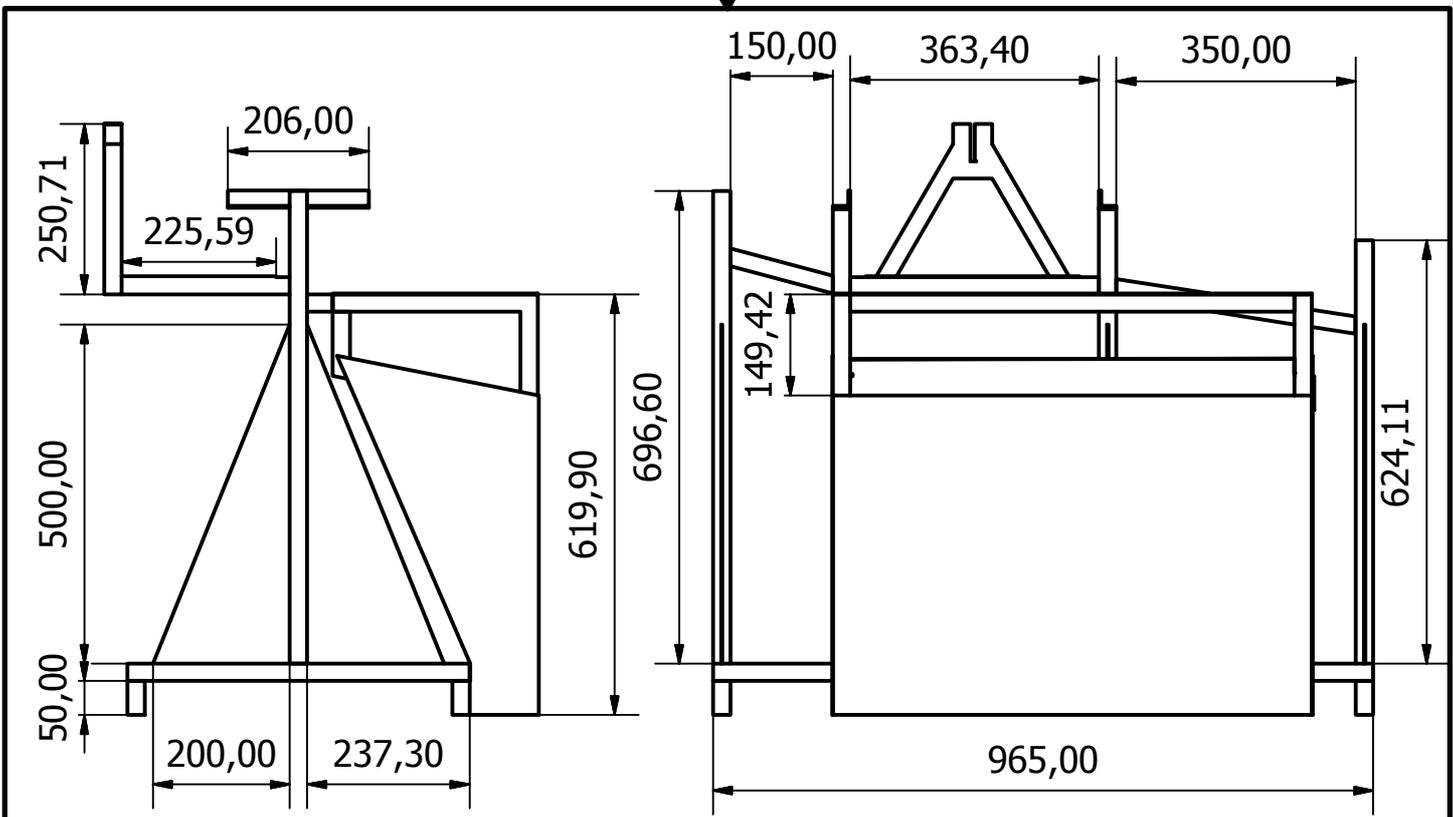
FECHA
23/02/2015

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Escuela de Ingeniería Mecánica

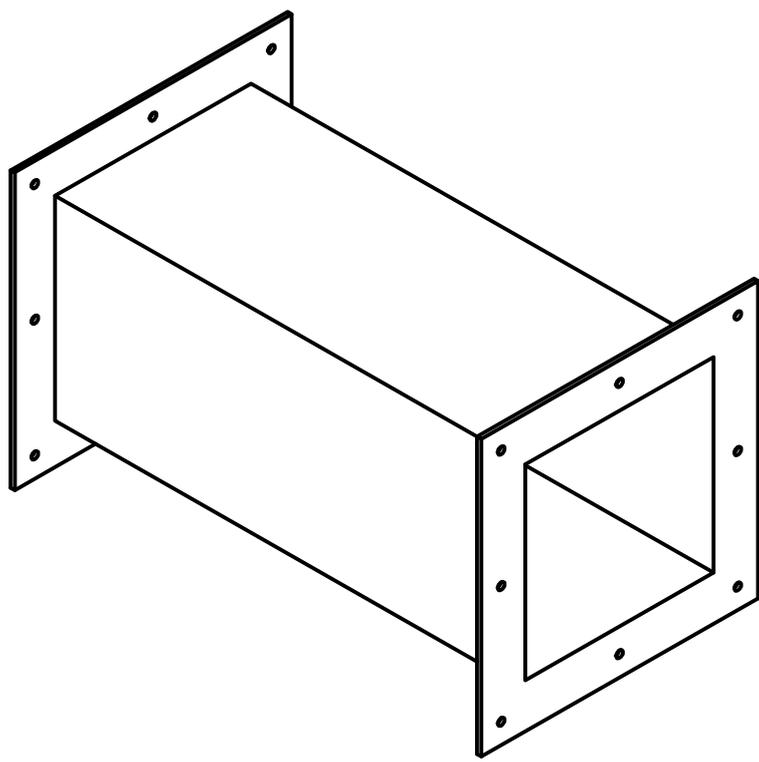
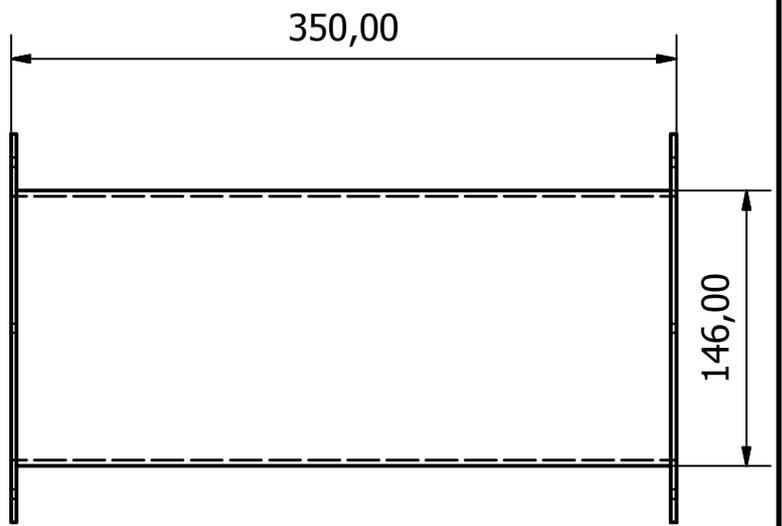
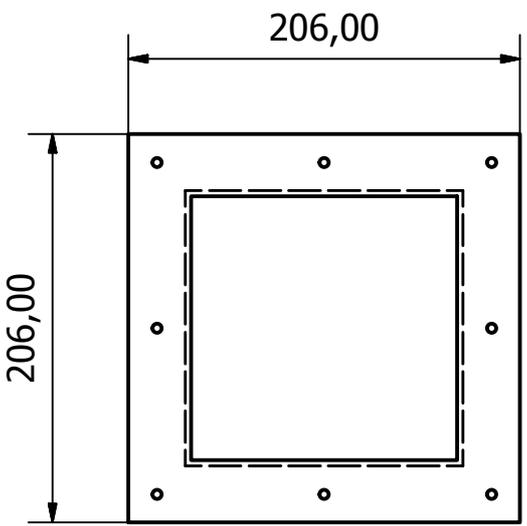
Dibujo de Conjunto

Planos Constructivos

Hoja
1 / 5

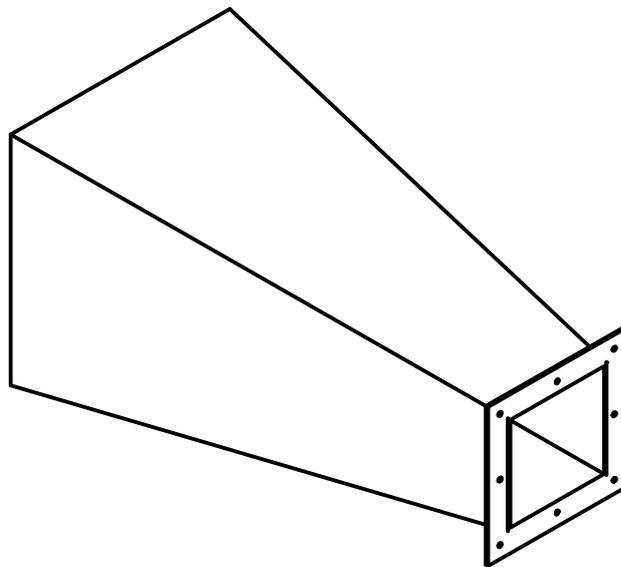
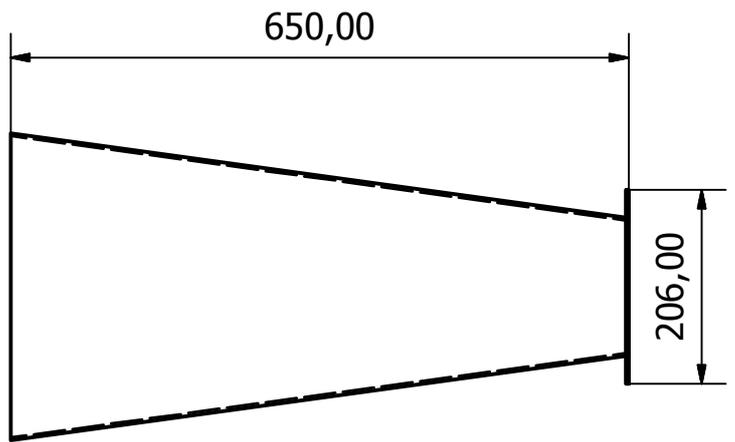
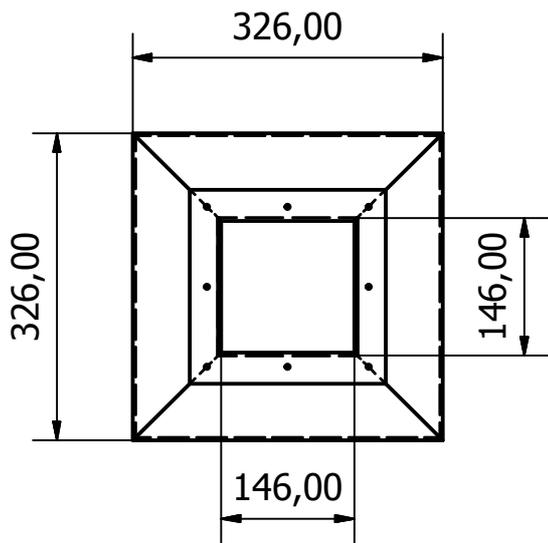


| | | | |
|---|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Diseño de José Alejandro Guzmán | Revisado por Ing. Salmón Torres | Aprobado por Ing. Salomón Torres | FECHA 23/02/2015 |
| Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica | | Estructura Base | |
| | | Planos Constructivos | Hoja 2 / 5 |

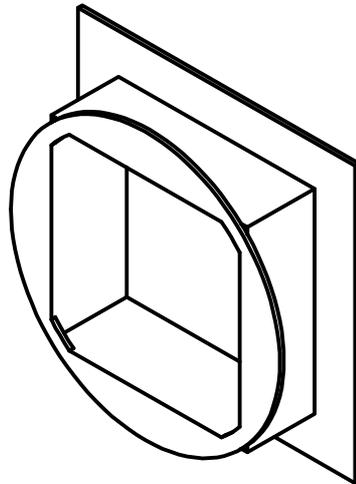
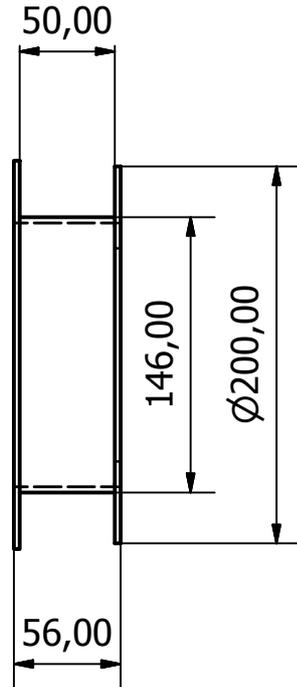
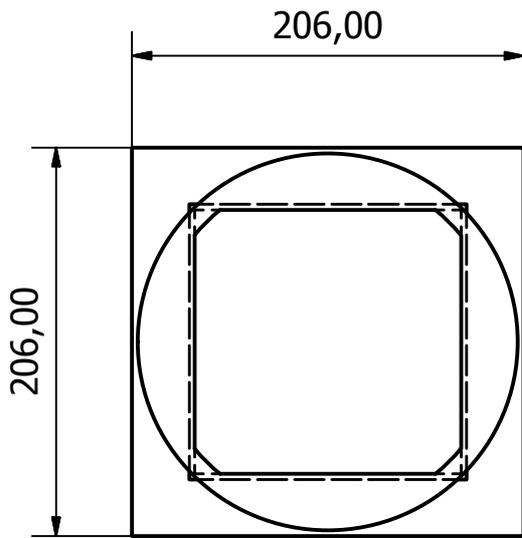


| | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Diseño de José Alejandro Guzmán | Revisado por Ing. Salomón Torres | Aprobado por Ing. Salomón Torres | FECHA 23/02/2015 |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|

| | | |
|---|----------------------|---------------|
| Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica | Cámara de Pruebas | |
| | Planos Constructivos | Hoja 3 / 5 |



| | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Diseño de José Alejandro Guzmán | Revisado por Ing. Salomón Torres | Aprobado por Ing. Salomón Torres | FECHA 23/02/2015 |
| Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica | | Difusor | |
| | | Planos Constructivos | Hoja 4 / 5 |



| | | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Diseño de José Alejandro Guzmán | Revisado por Ing. Salomón Torres | Aprobado por Ing. Salomón Torres | FECHA 23/02/2015 | FECHA 23/02/2015 |
| Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica | | Sección de Conexión | | |
| | | Planos Constructivos | Hoja 5 / 5 | |