



Estación Meteorológica Anemómetro y Pluviómetro

Agustín H. Almada
Proyecto Final de Grado
Diciembre 2020



Director: Sergio A. González
Co-Director: Guillermo Murcia



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una estación meteorológica de bajo costo compuesta por un anemómetro y un pluviómetro para evaluaciones climáticas previas a la instalación de aerogeneradores; en particular, en los ambientes urbanos donde la presencia de ráfagas y cambios súbitos de dirección caracterizan el recurso. Se estudian los instrumentos de medición existentes, identificando fortalezas y debilidades de cada uno. Basándose en ello, se seleccionan las clases de anemómetro y pluviómetro a implementar para ser utilizados en zonas urbanas: ultrasónico de dos ejes de medición y de cubeta basculante, respectivamente.

Luego, se identifican las variables involucradas en el desempeño de cada uno de los instrumentos y se utiliza esta información como base de diseño y fabricación de un prototipo. En particular, se trabaja sobre las cualidades aerodinámicas y las fuentes de error, haciendo uso de la literatura disponible y valiéndose de herramientas de simulación por computadora. Además, para el anemómetro, se dispone de un novedoso método de procesamiento de señal que propone aumentar la precisión del instrumento. Una vez construidos, se calibran los prototipos según los lineamientos o recomendaciones que la Organización Meteorológica Mundial (o WMO, por *World Meteorological Organization*, en inglés) expone.

Por otro lado, se construye un equipo electrónico basado en la Raspberry Pi capaz de interpretar, almacenar y reportar las mediciones de la Estación Meteorológica en una interfaz accesible desde cualquier computadora conectada al sistema. Se incorpora el uso de la base de datos InfluxDB, el entorno de programación por JavaScript Node-RED y la interfaz de reporte Grafana.

Finalmente, se especifica el costo asociado a la fabricación e implementación de la Estación Meteorológica y es comparado con los instrumentos disponibles comercialmente en la actualidad.

Dedicatoria

A mis abuelos, Egidio y Lydia.

Agradecimientos

Un trabajo como este no puede realizarse con los esfuerzos de un único individuo. Es, en cambio, el resultado de la colaboración, directa e indirecta, de múltiples personas a las cuales debo mucho.

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores: Sergio y Guillermo. Dedicados y siempre dispuestos a aportar, hicieron posible el desarrollo del proyecto, saliéndose de su camino en cada tarea. A pesar del contexto, desinteresadamente se esforzaron para que hoy esté escribiendo esto.

Asimismo, quiero agradecer a todos aquellos integrantes de la Universidad que, de una forma u otra, fueron partícipes de la compleción de este proyecto. Destaco profesores, ayudantes, directivos y secretarios.

Por otro lado, agradezco a los amigos que hice en la carrera. En más de 5 años, son incontables las horas dedicadas dentro y fuera de la Universidad. Fueron su ánimo y amistad que hicieron memorable cada día. Quiero hacer una mención especial para Maxi, quien me ayudó y guió en el mecanizado de varias piezas para el proyecto.

Quiero agradecer a los Berracos, mis amigos, por ser los mejores.

Agradezco a mi familia: mis primos, tíos y abuelos. En particular, quiero agradecer a mi primo Ignacio por sus consejos y aporte en la fabricación de las piezas que componen ambos instrumentos del proyecto.

Por último, gracias a mis padres y mi hermano. A ellos, todo.

Agustín Almada
8 de febrero de 2021

Índice general

Introducción	1
1. Anemómetro	9
1.1. Introducción	9
1.1.1. Objetivos	9
1.1.2. Estructura del capítulo	9
1.1.3. Antecedentes	10
1.2. Medición	13
1.2.1. Principio de medición	13
1.2.2. Disposición de sensores	14
1.2.3. Efecto de viento vertical	16
1.3. Electrónica	18
1.3.1. Modelo de transductor ultrasónico	18
1.3.2. Desarrollo de circuitos y PCB	19
1.3.3. Procesamiento de señal	21
1.4. Diseño	27
1.4.1. Diseño aerodinámico	27
1.4.2. Evaluación por CFD	29
1.4.3. Geometría de reflector	32
1.4.4. Presentación de diseño	34
1.4.5. Materiales y fabricación	37
1.5. Ensayos e implementación	40
1.5.1. Calibración	40
1.5.2. Resultados experimentales	42
1.6. Conclusiones del capítulo	50
2. Pluviómetro	53
2.1. Introducción	53
2.1.1. Objetivos	53
2.1.2. Estructura del capítulo	53
2.1.3. Antecedentes	54
2.2. Medición	57
2.2.1. Principio de medición	57
2.2.2. Fuentes de error y correcciones	58
2.3. Diseño	61
2.3.1. Regulación de caudal	61
2.3.2. Presentación de diseño	61
2.3.3. Materiales y fabricación	65

2.4.	Ensayos e implementación	66
2.4.1.	Calibración	66
2.4.2.	Resultados experimentales	71
2.5.	Conclusiones del capítulo	80
3.	Reporte de datos	83
3.1.	Introducción	83
3.1.1.	Objetivos del capítulo	83
3.1.2.	Estructura del capítulo	83
3.2.	Desarrollo	83
3.2.1.	Hardware	83
3.2.2.	Software	85
3.2.3.	Implementación y despliegue	88
3.3.	Conclusiones del capítulo	94
4.	Análisis económico	97
4.1.	Introducción	97
4.1.1.	Objetivos	97
4.1.2.	Estructura del capítulo	97
4.2.	Desarrollo	97
4.2.1.	Mercado actual	97
4.2.2.	Costo de Estación Meteorológica	98
4.3.	Conclusiones del capítulo	100
5.	Conclusión	101
A.	Ultrasonido y transductores ultrasónicos	103
A.1.	Introducción	103
A.2.	Ultrasonido	103
A.3.	Ondas acústicas y propagación en el medio	104
A.4.	Transductores ultrasónicos	106
B.	Reflexión y transmisión en interfases	109
B.1.	Introducción	109
B.2.	Impedancia acústica	109
B.3.	Incidencia normal	110
B.4.	Incidencia oblicua	112
C.	Código fuente	115
C.1.	Introducción	115
C.2.	Node-RED (Node.js)	115
D.	Dibujos técnicos	117
D.1.	Introducción	117
D.2.	Codificación	117
E.	Documentación	135
E.1.	Introducción	135
E.2.	Hoja de datos	135

Índice de figuras

1.	Evolución de la potencia eólica instalada mundialmente [3]	1
2.	Instalación de aerogeneradores de eje vertical en el Reino Unido . . .	2
3.	VAWTs del tipo helicoidal en terraza de edificio	3
4.	Dos clases de VAWT	4
5.	Diagrama de Estación Meteorológica	4
1.1.	Anemómetros mecánicos a copas	10
1.2.	Otros anemómetros	11
1.3.	Anemómetros ultrasónicos	11
1.4.	Viaje de onda acústica en viento calmo	13
1.5.	Viaje de onda acústica con viento en dirección de la propagación . . .	13
1.6.	Disposición de sensores en anemómetro	14
1.7.	Composición vectorial para obtener magnitud y dirección del viento .	16
1.8.	Situación de viento con componente vertical	16
1.9.	Error relativo para $\psi = 5^\circ$ según velocidad de viento real	17
1.10.	Circuito equivalente BVD y sensor ultrasónico utilizado	18
1.11.	Circuito de alimentación por sensor	19
1.12.	Pulsos de alimentación de sensores	20
1.13.	Circuito de recepción de sensores	20
1.14.	NXP i.MX RT1010	21
1.15.	PCB en procesador NXP	21
1.16.	Muestreo de señal adquirida	22
1.17.	Método utilizado para determinar tiempo de vuelo t_{of}	23
1.18.	Muestreo de señales adquiridas	24
1.19.	Emparejamiento de señales adquiridas	25
1.20.	Fuerzas actuantes sobre una aeronave	27
1.21.	Ilustración del área transversal A_T	28
1.22.	Coefficientes de arrastre para distintos cuerpos	28
1.23.	Dominio computacional para simulaciones de anemómetro	29
1.24.	Simulación 1 de anemómetro por CFD	30
1.25.	Simulación 2 de anemómetro por CFD	31
1.26.	Deformación elástica de instrumento para viento a 27 m/s	31
1.27.	Distribución polar de intensidad del sensor ultrasónico	32
1.28.	Vistas para análisis de geometría de reflector	32
1.29.	Elipse con rayos entre focos	33
1.30.	Círculo con rayos desde y hacia el centro	33
1.31.	Desviaciones para reflector esférico	34
1.32.	Desviaciones para reflector elipsoidal	34
1.33.	Anemómetro ultrasónico desarrollado	35

1.34. Vista en perspectiva inferior de anemómetro	36
1.35. Vista explosionada de anemómetro	37
1.36. Elementos de anemómetro desarrollado	37
1.37. Rollo comercial de filamento PET-G	38
1.38. Barras y perfiles de acero inoxidable austenítico UNS S30400	39
1.39. Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería	40
1.40. Anemómetro UNI-T UT363	41
1.41. Característica de túnel de viento	41
1.42. Captura de osciloscopio	42
1.43. Contraste de anemómetros	44
1.44. Contraste entre instrumentos en sentido opuesto	45
1.45. Contraste de anemómetros con error según GUM	46
1.46. Error relativo de medición de anemómetro según GUM	47
1.47. Anemómetros dentro de túnel de viento para contraste	47
1.48. Contraste de anemómetros en Facultad de Ingeniería	48
1.49. Ruido en señal en ensayo de contraste	49
1.50. Anemómetro de la Estación Meteorológica	49
2.1. Pluviómetro estándar sin grabación	54
2.2. Pluviómetro tipo balanza	55
2.3. Pluviómetro flotante	55
2.4. Pluviómetro tipo tipping-bucket	56
2.5. Posiciones de equilibrio del pluviómetro	57
2.6. Esquema de fuerzas y momentos en pluviómetro	57
2.7. Efecto del viento sobre el pluviómetro según forma del colector	59
2.8. Interpolación polinomial cúbica para intensidad de precipitación	60
2.9. Caudal máximo según diámetro de orificio para columnas de agua	61
2.10. Pluviómetro de cubeta basculante desarrollado	62
2.11. Componentes del pluviómetro	63
2.12. Vista perspectiva de ensamblaje de pluviómetro	64
2.13. Vista explosionada de ensamblaje de pluviómetro	64
2.14. Columna de agua según intensidad de precipitación para $\phi = 1\text{ mm}$	65
2.15. Puntos de calibración de pluviómetro	67
2.16. Ángulo de contacto de gota de agua en superficie	68
2.17. Calibración de error sistemático por mojado	69
2.18. Ensayo de calibración de error sistemático	70
2.19. Saturación máxima de humedad en aire según temperatura	71
2.20. Implementación de pluviómetro desarrollado	72
2.21. Vista de cubeta basculante en contenedor	72
2.22. Comparación de pluviómetros en primer período	73
2.23. Estación meteorológica Davis	74
2.24. Comparación de pluviómetros en segundo período	74
2.25. Comparación de pluviómetros en tercer período	75
2.26. Comparación de pluviómetros en período completo	75
2.27. Comparación de pluviómetros en período completo con corrección	77
2.28. Comparación de pluviómetros (24/11/2020)	78
2.29. Comparación de pluviómetros (19/12/2020)	79
3.1. Raspberry Pi 3 Model B	84

3.2.	Panel I/O de la Raspberry Pi	84
3.3.	Fuente de alimentación 5V	85
3.4.	Sensor auxiliar de temperatura y humedad	85
3.6.	Ilustración del entorno de programación por bloques Node-RED	86
3.7.	Logo de la base de datos InfluxDB	87
3.8.	Logo de Grafana	87
3.9.	Sistema de reporte montado en riel DIN	88
3.10.	Conexión de interruptor magnético a Raspberry Pi	89
3.11.	Captura de interfaz de usuario	89
3.12.	Diagrama de flujo de pluviómetro	90
3.13.	Programa del sistema en Node-RED - Anemómetro	91
3.14.	Programa del sistema en Node-RED - Pluviómetro	92
4.1.	Anemómetros comerciales	98
4.2.	Pluviómetros comerciales	98
A.1.	Rango de frecuencias de ondas acústicas	103
A.2.	Paul Langevin y su transductor “le triplet”	104
A.3.	Onda acústica y su propagación en el medio	104
A.4.	Velocidad del sonido en aire seco a presión atmosférica	106
A.5.	Distintos cerámicos piezoeléctricos	107
A.6.	Modos de vibración de un piezoeléctrico	107
B.1.	Configuración para reflexión y transmisión con incidencia normal	110
B.2.	Configuración de capa de espesor d_{capa} entre dos medios con incidencia normal	111
B.3.	Configuración de interfaz líquido-sólido con incidencia oblicua	112
B.4.	Reflexión según ángulo de incidencia en interfaz aire - PET-G	113
E.1.	Sensor ultrasónico PUI UTR 1440K-TT-R	135

Índice de tablas

1.1. Parámetros de modelo BVD	19
1.2. Parámetros de simulación CFD	30
1.3. Configuración de viento para simulación 1	30
1.4. Configuración de viento para simulación 2	31
1.5. Desviaciones máximas según reflector	34
1.6. Parámetros de anemómetro	37
1.7. Composición química del UNS S30400	38
1.8. Características de anemómetro UT363	40
1.9. Características de túnel de viento utilizado	41
1.10. Parámetros del código empleado	43
1.11. Ensayo de contraste de anemómetros	44
1.12. Resultados de análisis GUM	46
2.1. Especificaciones de colector	62
2.2. Especificaciones de contenedor	63
2.3. Parámetros de pluviómetro	65
2.4. Incertidumbre de medición con jeringa	66
2.5. Calibración de pluviómetro de cubeta basculante	67
2.6. Error sistemático por mojado	70
2.7. Características principales de estación Davis	76
2.8. Detalles del vaciado de recipiente colector	76
2.9. Medición de pluviómetro desarrollado en período considerado	76
2.10. Detalles del vaciado de recipiente colector (24/11/2020)	77
2.11. Detalles del vaciado de recipiente colector (19/12/2020)	78
2.12. Error asociado a comparación de pluviómetros	79
3.1. Especificaciones de Raspberry Pi 3 Model B	84
3.2. Datos característicos de la fuente de alimentación	85
3.3. Puertos de los diferentes servicios en ejecución	90
3.4. Datos de autenticación de base de datos	91
3.5. Conexión de interruptor magnético en Raspberry Pi	91
4.1. Lista de precios de anemómetros comerciales	98
4.2. Lista de precios de pluviómetros comerciales	98
4.3. Costos de Estación Meteorológica	99
B.1. Impedancias características longitudinales de algunos materiales	110
B.2. Valores característicos de algunos materiales	113
E.1. Especificaciones eléctricas del transductor	135

Nomenclatura

α	Ángulo de inclinación del sensor respecto de la vertical
Δt_p	Intervalo de tiempo para cálculo de I_p
$\Delta X_{elipsoide}$	Desviación máxima en plano horizontal para reflector elipsoidal
ΔX_{esfera}	Desviación máxima en plano horizontal para reflector esférico
γ	Índice adiabático
ω	Velocidad angular de onda acústica
ϕ_{capa}	Desfase en espesor de capa interpuesta
$\phi_{colector}$	Diámetro máximo de colector de pluviómetro
ϕ_{orif}	Diámetro de orificio en salida de colector
ψ	Ángulo de inclinación de $v_{viento}^{\vec{}}$ respecto de la horizontal
ρ	Densidad volumétrica del medio
Θ	Coefficiente de evaporación
θ_c	Ángulo de contacto que caracteriza hidrofobia de superficie
θ_i	Ángulo de incidencia con respecto a la normal a la interfaz
θ_L	Ángulo de transmisión longitudinal con respecto a la normal a la interfaz
θ_r	Ángulo de reflexión con respecto a la normal a la interfaz
θ_S	Ángulo de transmisión transversal con respecto a la normal a la interfaz
$v_{EO}^{\vec{}}$	Vector velocidad del viento en la dirección oeste-este
$v_{NS}^{\vec{}}$	Vector velocidad del viento en la dirección sur-norte
$v_{viento}^{\vec{}}$	Vector velocidad del viento
A_p	Profundidad de precipitación
A_T	Área transversal opuesta al paso del fluido
A_{AB}	Área de semicírculo de la señal S_{AB}

A_{BA}	Área de semicírculo de la señal S_{BA}
$A_{expuesta}$	Área del sistema de descarga expuesta al ambiente
c	Velocidad del sonido en el medio
c'	Velocidad de propagación del pulso acústico
C_D	Coefficiente de arrastre
C_f	Capacitancia libre de transductor para circuito equivalente BVD
C_p	Capacitancia paralelo en circuito equivalente BVD
C_s	Capacitancia serie en circuito equivalente BVD
c'_{AI}	Velocidad de propagación del pulso acústico en primera mitad de trayectoria
c'_{IB}	Velocidad de propagación del pulso acústico en segunda mitad de trayectoria
d	Desplazamiento volumétrico por propagación de onda acústica
d_{capa}	Espesor de capa delgada
$d_{e/s}$	Distancia entre sensores
d_{viaje}	Distancia de viaje de pulso acústico
e_{anem}	Discrepancia media entre anemómetros para una dada frecuencia
e_{rel}	Error relativo por no considerar ψ
f_r	Frecuencia de resonancia de transductor
f_s	Frecuencia de muestreo
$F_{arrastre}$	Fuerza de arrastre
f_{es}	Altura de precipitación de sistema de descarga a corregir
g_h	Tasa de evaporación de agua acumulada en sistema de descarga
h	Altura de columna de agua
$H_{c/5}$	Reporte de pluviómetro en período de 5 minutos
H_{precip}	Profundidad de precipitación
$h_{retenido}$	Altura de precipitación retenida debido al mojado del sistema de descarga
I	Incertidumbre de medición
I_p	Intensidad de precipitación

I_{sal}	Incertidumbre en la medición de volumen egresado
K	Módulo de elasticidad del medio
K_F	Constante dinámica por acabado superficial de alrededores de orificio
k_i	Número de onda del medio i
K_{geom}	Constante geométrica por disposición de sensores
K_{offset}	Proporción de V_{offset} que la muestra objetivo debe superar
L_s	Inductancia serie en circuito equivalente BVD
M	Masa molar del medio
n_i	Número ordinal de muestra objetivo
n_{avg}	Número de lecturas que componen una medición de v_{viento}
n_{tips}	Número de lecturas de pluviómetro en período de 5 minutos
P	Presión en el medio
p	Presión de sonido
P_e	Presión estática (sin propagación de onda acústica)
p_e	Presión específica
p_i	Onda de presión incidente
p_r	Onda de presión reflejada
p_t	Onda de presión transmitida
$p_{t(L)}$	Onda de presión longitudinal transmitida en el sólido
$p_{t(S)}$	Onda de presión transversal transmitida en el sólido
Q	Caudal de fluido
Q_m	Índice de acoplamiento mecánico para circuito equivalente BVD
R	Constante universal de los gases
R_s	Resistencia serie en circuito equivalente BVD
R_{ef}	Índice de reflexión
S_{AB}	Señal ultrasónica desde el sensor A hacia el sensor B
S_{BA}	Señal ultrasónica desde el sensor B hacia el sensor A
T	Temperatura del medio
t	Factor de la distribución Student

t_{AB}	Tiempo de viaje del pulso acústico del sensor A al sensor B
t_{AVG}	Media geométrica de los tiempos de viaje entre los sensores
t_{BA}	Tiempo de viaje del pulso acústico del sensor B al sensor A
t_{et}	Tiempo transcurrido entre lecturas de pluviómetro
t_{hold}	Tiempo de espera entre inicio de excitación y comienzo de muestreo
t_{of}	Tiempo de viaje del pulso acústico
$T_{ra(L)}$	Índice de transmisión longitudinal
$T_{ra(S)}$	Índice de transmisión transversal
T_{ra}	Índice de transmisión
u_c	Incertidumbre combinada del error
u_i	Aporte a la incertidumbre de las mediciones y su variabilidad
u_x	Incertidumbre típica del instrumento de medición UNI-T UT363
v	Velocidad de partículas en el medio
V_i	Velocidad del sonido en el medio i
V_L	Velocidad del sonido longitudinal en el medio
V_S	Velocidad del sonido transversal en el medio
v_x	v_{viento} en la dirección del eje x
v_y	v_{viento} en la dirección del eje y
v_z	v_{viento} en la dirección del eje z
$V_{expulsado}$	Volumen de agua que provoca cambio de posición en pluviómetro
$v_{lectura}$	Velocidad del viento que reporta el instrumento
$V_{nominal}$	Volumen nominal de jeringa para cálculo de incertidumbre
V_{offset}	Voltaje de offset que caracteriza la señal en el receptor
V_{pluv}	Volumen de agua que cae sobre el pluviómetro
v_{real}	Velocidad del viento real en plano horizontal
$V_{retenido}$	Volumen de agua retenido debido al mojado del sistema de descarga
V_{sal}	Volumen egresado de agua para calibración de error por mojado
v_{viaje}	Velocidad de desplazamiento de vehículo
v_{viento}	Velocidad del viento

W	Número de semiciclo de S_{BA} aparejado con semiciclo de señal S_{AB}
x	Saturación de humedad en aire
x_s	Saturación de humedad en aire máxima
z	Impedancia acústica del medio
Z_i	Impedancia característica del medio i
Z_L	Impedancia característica longitudinal del medio
Z_S	Impedancia característica transversal del medio
z_{eff}	Impedancia característica efectiva del sólido
Z_{eq}	Impedancia característica equivalente de doble interfaz

Introducción

El panorama energético está cambiando. Frente al progresivo incremento del consumo energético [1, 2], el mundo busca abastecerse de diversas fuentes renovables para suplir la demanda.

El aprovechamiento de la energía eólica se posiciona como una de las opciones más prometedoras. Como puede observarse en la figura 1, el crecimiento de la utilización de este tipo de energía se ha acelerado en las últimas dos décadas [3]. En Argentina, la potencia eólica instalada creció alrededor de 100 % durante el año 2019 y, a la fecha, alcanza 2623 MW [4].

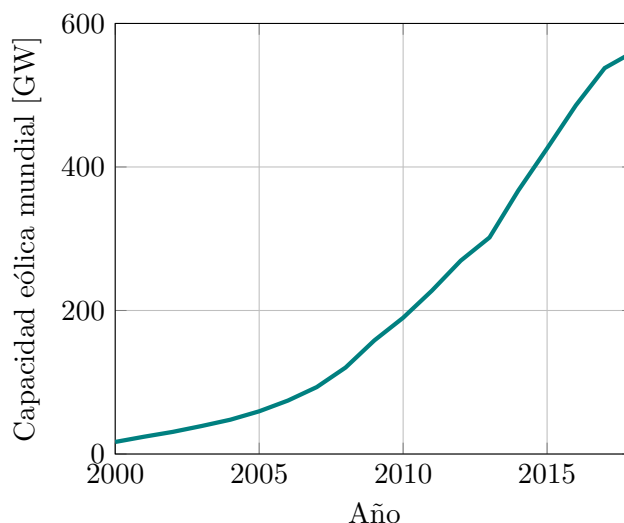


Figura 1: Evolución de la potencia eólica instalada mundialmente [3]

Desarrollos recientes en tecnología de turbinas eólicas llevaron a la integración de pequeños generadores eólicos (de potencia inferior a 10 kW) en el contexto urbano [5]. La ubicación más prometedora para esta clase de instalaciones corresponde a las terrazas de altos edificios [6]. Sin embargo, un gran número de instalaciones eólicas de este tipo ignoran el estudio previo de factibilidad [6, 7] y, en consecuencia, pueden producirse fallas prematuras en los generadores. Además, la incorrecta o ausente evaluación de un sitio puede resultar en un mal aprovechamiento del recurso por una ubicación ineficiente [8–10].



Figura 2: Instalación de aerogeneradores de eje vertical en el Reino Unido

A diferencia de los sitios en los cuales se instalan generadores eólicos de alta potencia, el comportamiento del viento en entornos edificados es altamente complejo, presentando bajas velocidades, alta turbulencia, inestabilidad y rápidos cambios tanto en velocidad como en dirección. Esto es debido a la interacción del flujo de aire con edificaciones circundantes y otras obstrucciones propias del ámbito urbano [6, 8, 11–14].

A pesar de que los generadores con mayor presencia son los de eje horizontal, los aerogeneradores de eje vertical son más apropiados para entornos urbanos (ver figuras 2 y 3), debido a que [5, 11, 15]:

- 1 Su extracción energética es independiente de la dirección del viento
- 2 Las tareas de mantenimiento tienen menor complejidad, principalmente debido a la ubicación de la transmisión en la base de la turbina
- 3 Tienen mejor comportamiento para vientos distorsionados e inestables
- 4 Su impacto visual y acústico es más reducido



Figura 3: VAWTs del tipo helicoidal en terraza de edificio

En la actualidad, avances recientes en arquitecturas de control y electrónica de potencia posibilitan el aprovechamiento de la energía “extra” de las ráfagas a través de rápidos cambios de torque en el rotor, lo cual incrementa significativamente la eficiencia de las instalaciones de generadores eólicos de eje vertical (o VAWT, por *Vertical Axis Wind Turbine*, en inglés) [5, 6, 11, 16]. Existen diferentes tipos de VAWT, siendo los principales el helicoidal y el Daerrius, como se observa en la figura 4. Por lo tanto, para lograr conseguir una estimación precisa del potencial de un sitio para una instalación eólica, la evaluación del recurso debe considerar tales características particulares a los ambientes urbanos [17].

La normativa internacional vigente que trata sobre instalaciones eólicas urbanas, la IEC 61400-2 [18], resulta a la fecha inapropiada ya que no considera la alta dinámica asociada a sitios altamente turbulentos (especialmente relevante para pequeñas instalaciones). La frecuencia de muestreo allí estipulada de 1 Hz es insuficiente [6, 8]. Recientemente, han sido registradas fallas por fatiga en turbinas y desempeños pobres e inconsistentes, dejando en evidencia la inadecuación de la normativa [8, 9].

La literatura sugiere el uso de anemómetros ultrasónicos debido a la relativamente alta tasa de muestreo requerida (los anemómetros a cazoletas presentan un encarecimiento en la precisión conforme incrementa la frecuencia de muestreo) y propone tomar mediciones por encima de 10 Hz [6, 19, 20]. Además, el estudio del recurso en el sitio propuesto posibilita el desarrollo de algoritmos específicos al lugar, de manera tal de optimizar el aprovechamiento energético de la instalación [5].

En este contexto, el proyecto se presenta como una solución y se diseña, construye e implementa un anemómetro ultrasónico de dos ejes de medición y alta frecuencia de muestreo para el estudio del recurso en áreas urbanas.



Figura 4: Dos clases de VAWT

Por otra parte, existen diversos factores ambientales que afectan el comportamiento del viento y la medición: la temperatura del aire, la presión atmosférica, la humedad relativa y la lluvia. Consecuentemente, resulta importante medir dichos parámetros para arribar a decisiones más criteriosas en cuanto a equipar un sitio con un generador eólico. Para una evaluación climática completa, se proyecta a futuro construir una estación meteorológica integral, incorporando la medición de otros parámetros como temperatura, humedad, lluvia y radiación solar. En especial, el estudio de la precipitación y su medición es seleccionado como tema de desarrollo en el presente trabajo y se aborda la construcción de un pluviómetro de alta resolución y bajo error. Asimismo, un aspecto no menor de los instrumentos de medición climática es el reporte de las medidas y el fácil acceso a las mismas por parte de un usuario. Resulta imperativo, entonces, crear un sistema completo que evalúe desde la medición de los recursos hasta la interacción del usuario con el equipo. Con ese propósito, en el presente trabajo se describe la utilización y cooperación de distintos componentes. Los sensores ultrasónicos, base del funcionamiento del anemómetro, están alimentados por una PCB de diseño especial para el presente proyecto. Por otro lado, una computadora Raspberry Pi se utiliza como interfaz entre instrumentos y usuario, incorporando software específico para el almacenamiento y reporte de mediciones. En la figura 5 se ilustra la Estación Meteorológica que se desarrolla en este trabajo y cómo se relacionan los diversos componentes.

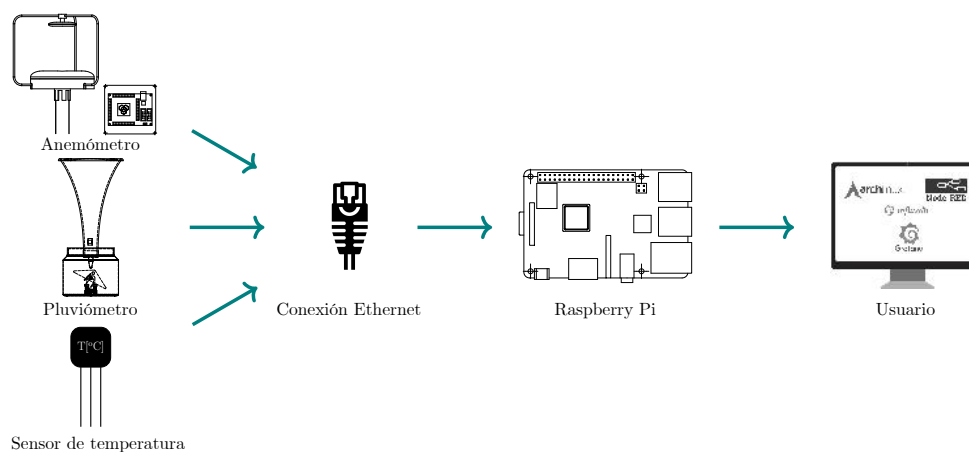


Figura 5: Diagrama de Estación Meteorológica

Bibliografía

- [1] Asadi Abolhassani, Acharya. Impact of hybrid electric vehicles on the world's petroleum consumption and supply. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [2] JE Hake. International energy outlook - 2000 with projection to 2020.
- [3] Ali Sayigh and David Milborrow. *The Age of Wind Energy: Progress and Future Directions from a Global Perspective*. Springer Nature, 2019.
- [4] CAMMESA. Potencia instalada. <https://despachorenovables.cammesa.com/potencia-instalada/>, 2020.
- [5] Filippo Bonaccorso, Giacomo Scelba, Alfio Consoli, and Giovanni Muscato. EKF-based mppt control for vertical axis wind turbines. In *IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 3614–3619. IEEE, 2011.
- [6] Amir Bashirzadeh Tabrizi, Jonathan Whale, Thomas Lyons, and Tania Urmee. Rooftop wind monitoring campaigns for small wind turbine applications: Effect of sampling rate and averaging period. *Renewable energy*, 77:320–330, 2015.
- [7] Amir Bashirzadeh Tabrizi, Jonathan Whale, Thomas Lyons, and Tania Urmee. Performance and safety of rooftop wind turbines: Use of cfd to gain insight into inflow conditions. *Renewable Energy*, 67:242–251, 2014.
- [8] D Goodfield, SP Evans, A Kc, DR Bradney, TP Urmee, J Whale, and PD Clausen. The suitability of the iec 61400-2 wind model for small wind turbines operating in the built environment. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2:Article–Number, 2017.
- [9] Encraft. Warwick wind trials-final report, 2009.
- [10] PAB James, MF Sissons, J Bradford, LE Myers, AS Bahaj, A Anwar, and S Green. Implications of the uk field trial of building mounted horizontal axis micro-wind turbines. *Energy Policy*, 38(10):6130–6144, 2010.
- [11] Louis Angelo Danao, Okeoghene Eboibi, and Robert Howell. An experimental investigation into the influence of unsteady wind on the performance of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy*, 107:403–411, 2013.
- [12] A Makkawi, AN Celik, and T Muneer. Evaluation of micro-wind turbine aerodynamics, wind speed sampling interval and its spatial variation. *Building Services Engineering Research and Technology*, 30(1):7–14, 2009.
- [13] Keith Sunderland, Thomas Woolmington, Michael Conlon, and Jonathan Blackledge. Urban deployment of small wind turbines: power performance and turbulence. In *2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, pages 1–6. IEEE, 2013.

-
- [14] Amir Bashirzadeh Tabrizi, Jonathan Whale, Thomas Lyons, and Tania Urmee. Extent to which international wind turbine design standard, iec61400-2 is valid for a rooftop wind installation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139:50–61, 2015.
- [15] James F Manwell, Jon G McGowan, and Anthony L Rogers. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [16] Vasilis A Riziotis and Spyros G Voutsinas. Fatigue loads on wind turbines of different control strategies operating in complex terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(3):211–240, 2000.
- [17] Joshua Earnest and Sthuthi Rachel. *Wind power technology*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2019.
- [18] International Electrotechnical Commission et al. Iec 61400-2: Wind turbines—part 2: small wind turbines, 2013.
- [19] DC Anderson, J Whale, PO Livingston, and D Chan. Rooftop wind resource assessment using a three-dimension ultrasonic anemometer. 2008.
- [20] Tihomir S Hristov, Scott D Miller, and Carl A Friehe. Linear time-invariant compensation of cup anemometer and vane inertia. *Boundary-layer meteorology*, 97(2):293–307, 2000.

Capítulo 1

Anemómetro

1.1. Introducción

Un anemómetro es un instrumento meteorológico empleado para la medición de la velocidad del viento con el objetivo de estudiar el recurso, pronosticar el clima o hacer evaluaciones específicas. En este capítulo se describe el desarrollo de un anemómetro ultrasónico de dos ejes de medición.

1.1.1. Objetivos

Se busca diseñar, fabricar e implementar un anemómetro ultrasónico que provea la velocidad y dirección del viento en tiempo real. Para ello, se plantean los siguientes objetivos:

- Estudiar los anemómetros disponibles comercialmente en la actualidad
- Crear un diseño que permita el buen desempeño del sistema de medición
- Instalar equipo electrónico con desarrollo de software que provea mediciones precisas
- Fabricar un instrumento robusto y durable para ser situado en la Facultad de Ingeniería de la UNMdP

1.1.2. Estructura del capítulo

El capítulo está organizado como sigue. Primero, en 1.1.3, se describen algunas de las distintas clases de anemómetro presentes a la fecha. Luego, en 1.2, se desarrolla el principio de funcionamiento del anemómetro, explicitando además la geometría adoptada. Más adelante, en 1.3, se incluye todo lo referente al procesamiento de la señal proveniente de los transductores, el reporte y el almacenamiento de las mediciones. En 1.4 se presenta el diseño, enumerando piezas y ensamblaje. Adicionalmente, se especifica la metodología del diseño, los principios o lineamientos seguidos para su creación y los materiales elegidos para la fabricación del instrumento. El capítulo continúa con la implementación del instrumento, en 1.5, donde se describen ensayos y resultados experimentales. Finalmente, se escriben las conclusiones del capítulo en 1.6.

1.1.3. Antecedentes

La medición del viento data de hace casi 600 años, a partir de la invención del primer anemómetro mecánico atribuida al romano Leon Battista Alberti, contemporáneo a Leonardo Da Vinci (quien luego inventa una versión “mejorada” partiendo de su diseño) [1]. A la fecha, existe un gran abanico de anemómetros disponibles comercialmente. Algunos de ellos se presentan a continuación.

Anemómetro a cazoletas/copas

También llamados anemómetros rotativos, constan de una hélice con copas que rotan según la velocidad del viento (ver figura 1.1). Usualmente asociados a una veleta, son capaces de reportar tanto velocidad como dirección del viento. Es un anemómetro relativamente antiguo y probado cuya robustez, relativamente alta precisión y bajo costo lo han posicionado como el más utilizado [2].



Figura 1.1: Anemómetros mecánicos a copas

La velocidad angular (ω) del anemómetro es una función lineal de la velocidad del viento a lo largo de prácticamente todo el rango de velocidades posibles (para velocidades por debajo de 1 m/s deja de serlo [3]). La mayor desventaja de este anemómetro es que la respuesta dinámica a fluctuaciones del viento es lenta y altamente no lineal. Asimismo, responde más rápido a incrementos de velocidad que a descensos (comportamiento propio de la inercia del sistema) [4]. En consecuencia, no son adecuados para el estudio de ráfagas. Por otro lado, requieren mantenimiento periódico que incluye limpieza de las copas, ajustes, reemplazo de rodamiento, entre otras tareas.

Otros anemómetros

Existen otros anemómetros de diferentes principios de funcionamiento. El anemómetro tubular de presión, más conocido como *tubo de Pitot*, es de los más utilizados a bordo de aeronaves y en túneles de viento (ver figura 1.2a). La diferencia de presión entre la estática y la total se traducen en la presión dinámica causada por el viento, la cual es proporcional a su velocidad.

El anemómetro de cable caliente (*hot wire*, en inglés) consta de un conductor de tungsteno o platino con una corriente eléctrica circulante, calentándolo. Cuando un fluido (como el aire) pasa sobre el dispositivo, lo enfría, quitándole parte de la energía y alcanzando una temperatura de equilibrio dependiente de dicho flujo. Midiendo la resistencia del conductor de forma continua se puede estimar la velocidad del viento [5]. Generalmente, están asociados a instrumentos digitales que reportan la medición, como puede observarse en la figura 1.2b.

Por último, existen prototipos de anemómetros que operan según el efecto Doppler mediante rayos láser o con radar. Un instrumento transmite un pulso a la atmósfera y recibe una pequeña parte de la señal que “rebota” en los aerosoles y otras partículas suspendidas en el aire y desplazándose con el viento. Mediante la variación en la frecuencia de la señal recibida respecto de la emitida, es posible determinar la velocidad del viento. Estos dispositivos están aún en desarrollo.



(a) Pitot



(b) Hot-wire

Figura 1.2: Otros anemómetros

Anemómetro ultrasónico

Este tipo de instrumento usa transductores que emiten y reciben ondas a frecuencias ultrasónicas para medir la velocidad del viento. Existen diversos tipos de anemómetros de esta categoría con uno, dos y hasta tres ejes de medición (figuras 1.3a y 1.3b, respectivamente). Las componentes del vector velocidad de viento se derivan de la composición del tiempo de viaje de los pulsos en los ejes sónicos [2]. Los transductores pueden afectar la precisión de la medición al causar turbulencia alrededor del camino que recorre la onda y, en consecuencia, el diseño del instrumento tiene un papel importante en la reducción de la influencia del propio anemómetro en el flujo [6]. Sin embargo, los efectos de distorsión de flujo son usualmente corregidos a través de tablas de calibración [7]. Cabe destacar que este tipo de anemómetro es sensible a variaciones de temperatura y humedad ambiental, modificándose la velocidad del sonido en el medio (ver apéndice A).



(a) 2D



(b) 3D

Figura 1.3: Anemómetros ultrasónicos

Este tipo de anemómetro suele tener problemas en presencia de lluvia y nieve, alterando intermitentemente la propagación de los pulsos sónicos [2]. Debido a que, por lo general, toman mediciones con una resolución temporal muy fina (alrededor de 20 Hz), son efectivos en la medición de ráfagas, valores pico y turbulencia [8]. La gran ventaja es la ausencia de partes móviles y el hecho de que no requieren mantenimiento. Este tipo de anemómetro es el elegido para el presente trabajo.

1.2. Medición

1.2.1. Principio de medición

En un dado instante y según las condiciones atmosféricas, la velocidad del sonido en el aire adquiere un valor determinado c (ver apéndice A). Eso significa que, como se observa en la figura 1.4, para recorrer cierta distancia d_{viaje} existe un tiempo fijo t_{of} que un pulso acústico tomará. Dicho tiempo se conoce como tiempo de viaje (o *time of flight*, en inglés). En ecuaciones:

$$t_{of} = \frac{d_{viaje}}{c} \tag{1.1}$$

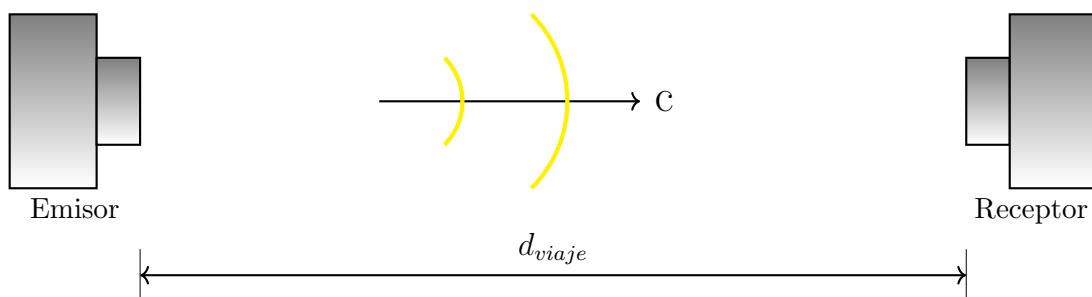


Figura 1.4: Viaje de onda acústica en viento calmo

No obstante, en presencia de viento, el pulso ultrasónico tomará un tiempo de viaje mayor o menor que en (1.1). El caso más simple de analizar es el de viento “soplando” en la dirección y sentido de viaje del pulso a una velocidad v_{viento} . Para tal situación (ver figura 1.5), puede escribirse:

$$t_{of} = \frac{d_{viaje}}{c + v_{viento}} \tag{1.2}$$

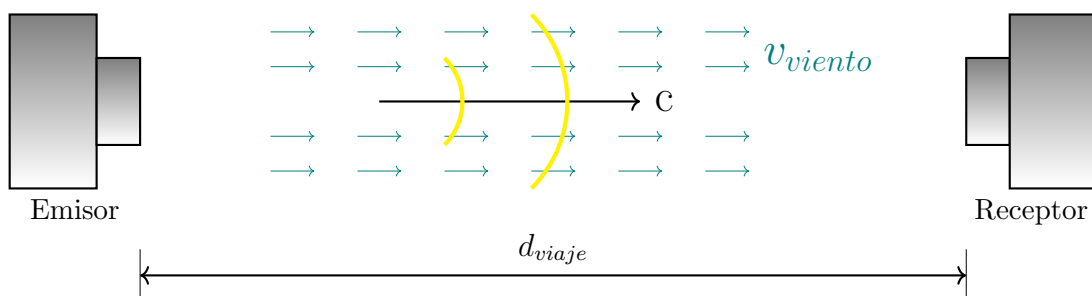


Figura 1.5: Viaje de onda acústica con viento en dirección de la propagación

En consecuencia, puede estimarse la velocidad del viento v_{viento} midiendo el tiempo de viaje t_{of} .

1.2.2. Disposición de sensores

Para el anemómetro del presente trabajo, y para cada par de transductores, se disponen los sensores según la geometría representada en la figura 1.6.

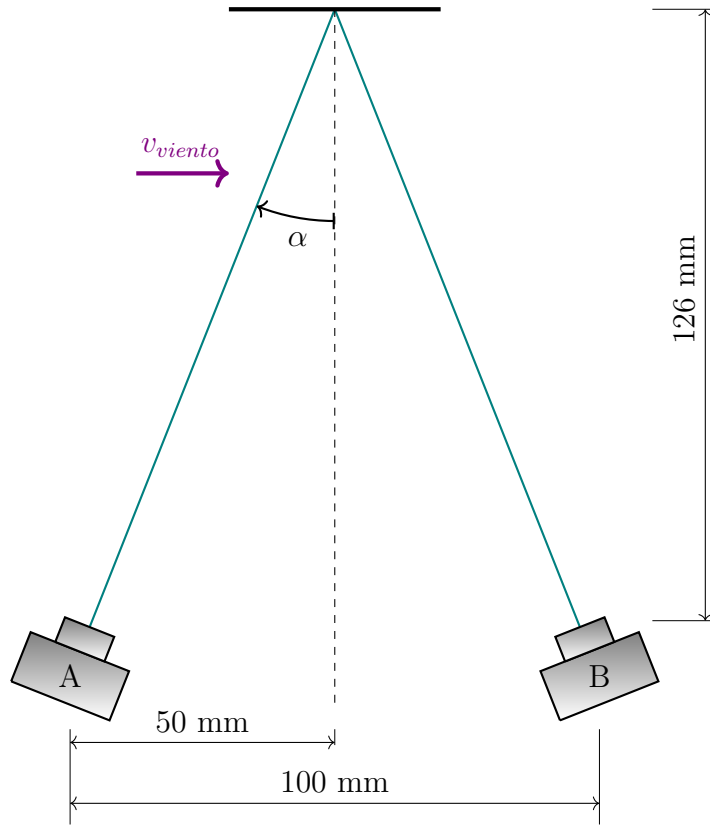


Figura 1.6: Disposición de sensores en anemómetro

El objeto de dicha disposición es reducir la inserción del anemómetro en el viento (ver sección 1.1.3). La consecuencia directa de tal colocación de los sensores es que el viento representa una variación en el tiempo de vuelo t_{of} afectada por una relación trigonométrica. La velocidad que adquiere la onda ultrasónica c' puede escribirse, en ecuaciones:

$$c' = c + v_{viento} \cdot \sin(\alpha) \quad (1.3)$$

También puede expresarse, ya que la distancia a recorrer por la onda $d_{e/s}$ es conocida, el tiempo de vuelo en función de la velocidad del viento.

$$t_{AB} = \frac{d_{e/s}}{c'} = \frac{d_{e/s}}{c + v_{viento} \cdot \sin(\alpha)} \quad (1.4)$$

Como se describe en detalle en 1.3.3, resulta conveniente que cada sensor funcione intermitentemente como emisor y receptor. En consecuencia, se contará con dos tiempos de vuelo, uno en cada sentido. De igual manera que en (1.4), queda:

$$t_{BA} = \frac{d_{e/s}}{c - v_{viento} \cdot \sin(\alpha)} \quad (1.5)$$

Operando matemáticamente con (1.4) y (1.5):

$$\frac{d_{e/s}}{t_{AB}} - \frac{d_{e/s}}{t_{BA}} = 2 \cdot v_{viento} \cdot \sin(\alpha) \quad (1.6)$$

$$d_{e/s} \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} t_{BA}} = d_{e/s} \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AVG}^2} = 2 \cdot v_{viento} \cdot \sin(\alpha) \quad (1.7)$$

$$(1.8)$$

donde t_{AVG} es la media geométrica de ambos tiempos de vuelo, que corresponde al tiempo promedio de vuelo en viento calmo. En ecuaciones:

$$t_{AB} \cdot t_{BA} = \frac{d_{e/s}^2}{c^2 - [v_{viento} \cdot \sin(\alpha)]^2} \quad (1.9)$$

Si se cumple que $v_{viento} \cdot \sin(\alpha) \ll c$ entonces:

$$t_{AB} \cdot t_{BA} = t_{AVG}^2 = \frac{d_{e/s}^2}{c^2} \quad (1.10)$$

En consecuencia:

$$t_{AVG} = \frac{d_{e/s}}{c} \quad (1.11)$$

Finalmente, puede escribirse el siguiente conjunto de ecuaciones que caracterizan el cálculo de la velocidad del viento para cada uno de los dos métodos:

$$v_{viento} = \frac{d_{e/s}/t_{AB} - c}{\sin(\alpha)} \quad (1.12)$$

$$v_{viento} = K_{geom} c^2 (t_{BA} - t_{AB}) \quad (1.13)$$

siendo K_{geom} una constante geométrica que depende de la disposición de los sensores.

$$K_{geom} = \frac{1}{2 d_{e/s} \sin(\alpha)} \quad (1.14)$$

Para obtener la dirección del viento se opera con dos ondas cuyos ejes sónicos se corten perpendicularmente. Calculando la velocidad en ambas direcciones, la composición trigonométrica de ambos valores resulta en el vector velocidad de viento (ver figura 1.7).

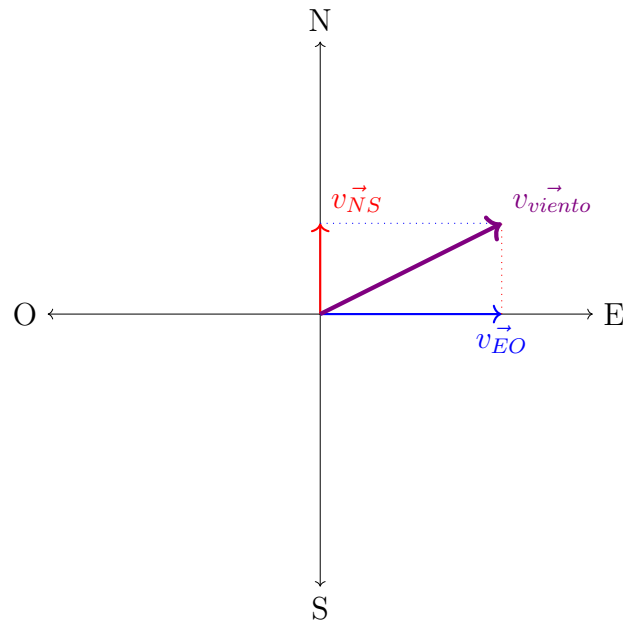


Figura 1.7: Composición vectorial para obtener magnitud y dirección del viento

1.2.3. Efecto de viento vertical

Al medir la velocidad y dirección del viento ubicando el vector según los puntos cardinales, la componente en dirección vertical de la velocidad del viento no está siendo considerada. La situación se ilustra en la figura 1.8.

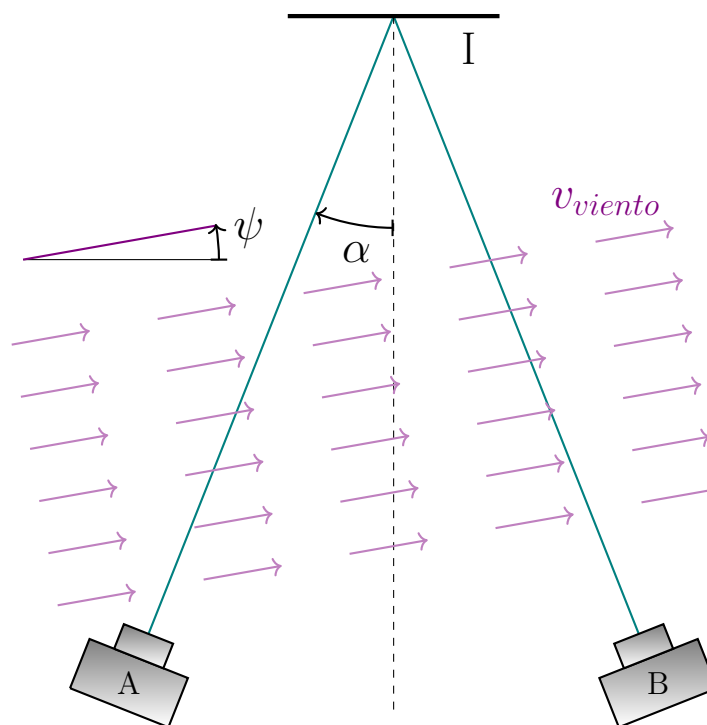


Figura 1.8: Situación de viento con componente vertical

En este escenario, el pulso sónico adquiere velocidades distintas en la primera y segunda mitad del trayecto. Operando igual que en (1.3) y dividiendo el análisis del

tiempo de vuelo en dos, resulta:

$$c'_{AI} = c + v_{viento} \cdot \sin(\alpha + \psi) \quad (1.15)$$

$$c'_{IB} = c + v_{viento} \cdot \sin(\alpha - \psi) \quad (1.16)$$

Combinando (1.15), (1.16) y (1.4) se puede escribir:

$$\frac{d_{e/s}}{2 c'_{AI}} + \frac{d_{e/s}}{2 c'_{IB}} = t_{AB} \quad (1.17)$$

La componente vertical de la velocidad del viento, aún en áreas urbanas donde ésta se hace más pronunciada, es relativamente pequeña y el ángulo ψ es siempre inferior a 5° [9–11]. Definiendo error relativo como:

$$e_{rel} = \frac{v_{lectura} - v_{real}}{v_{real}} \quad (1.18)$$

donde v_{real} es la velocidad real del viento en el plano horizontal que el anemómetro busca determinar y $v_{lectura}$ es la velocidad que el instrumento mide. Para distintas velocidades, el error relativo porcentual que se comete queda representado en la figura 1.9.

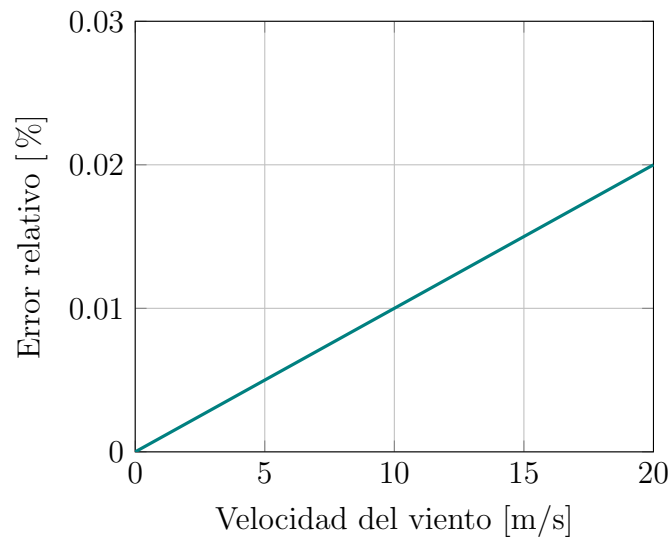


Figura 1.9: Error relativo para $\psi = 5^\circ$ según velocidad de viento real

No considerar la componente vertical de la velocidad del viento, entonces, no introduce un error significativo. Se concluye que puede despreciarse el efecto en la medición.

1.3. Electrónica

1.3.1. Modelo de transductor ultrasónico

Para el presente trabajo, se diseñaron los circuitos que se emplean para la transmisión y la recepción. Para cumplir ese objetivo, una gran proporción del trabajo es realizada a través de software de simulación (se utilizó LTspice); la restante siendo ocupada en la validación del sistema. En ese contexto, es imprescindible contar con un modelo eléctrico del transductor ultrasónico que represente fielmente su comportamiento. Esto permite la selección de los componentes más adecuados sin requerir armar físicamente el circuito y experimentar, incurriendo en costos adicionales.

Los transductores piezoeléctricos utilizados para el anemómetro del presente trabajo (PUI Audio UTR-1440K-TT-R, ver apéndice E) pueden ser modelados por el circuito equivalente propuesto por Butterworth-van Dyke (BVD) expuesto en la figura 1.10. Este modelo, a pesar de no ser suficientemente preciso para frecuencias lejanas a la de resonancia, sí lo es para frecuencias que rondan la de resonancia (40 kHz, para el sensor utilizado) [12, 13]. En consecuencia, este modelo se adecúa a los propósitos del proyecto donde interesa estudiar el comportamiento de los sensores en la frecuencia de operación. Para obtener algunos de los parámetros del circuito que corresponden al transductor utilizado en el presente trabajo (ver apéndice E) se utilizan los valores enunciados en la hoja de datos. Realizando cálculos propios del modelo y en consideración de las características del piezoeléctrico, es posible completar el circuito equivalente [14, 15]. Los parámetros se enuncian en la tabla 1.1.

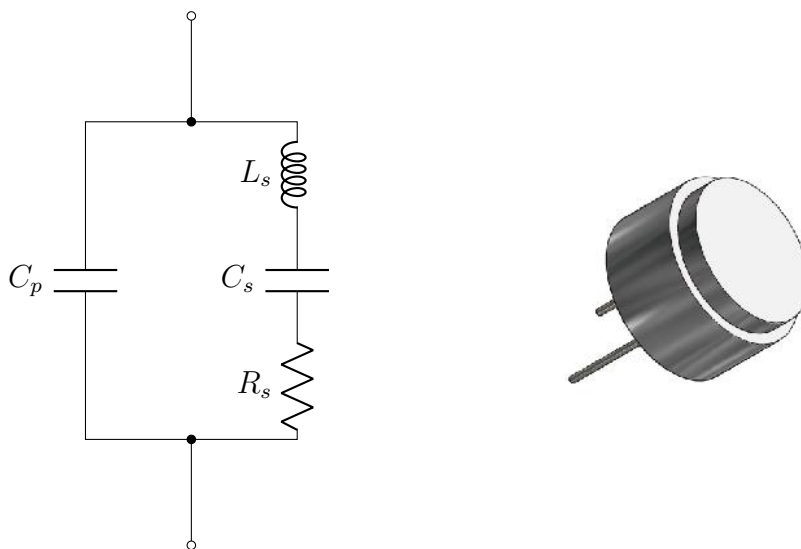


Figura 1.10: Circuito equivalente BVD y sensor ultrasónico utilizado

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s \cdot C_s}} \quad (1.19)$$

$$Q_m = \frac{1}{2\pi \cdot f_r \cdot R_s \cdot C_s} \quad (1.20)$$

$$C_f = C_p + C_s \quad (1.21)$$

El modelo BVD consiste en una rama serie compuesta por una resistencia R_s , un capacitor C_s y una inductancia L_s , en paralelo con un capacitor C_p . La capacitancia C_p representa la capacitancia dieléctrica del material piezoeléctrico, y modela la parte estática del transductor. Por otra parte, la rama serie representa el comportamiento mecánico del sistema, siendo R_s sinónimo de las pérdidas mecánicas. La frecuencia de resonancia f_r , a su vez, viene dada por la impedancia de la rama serie.

Frecuencia de resonancia	f_r	40	kHz
Acoplamiento mecánico	Q_m	70	
Capacitancia libre	C_f	1900	pF
Capacitancia paralelo	C_p	1800	pF
Capacitancia serie	C_s	100	pF
Resistencia serie	R_s	560	Ω
Inductancia serie	L_s	159	mH

Tabla 1.1: Parámetros de modelo BVD

1.3.2. Desarrollo de circuitos y PCB

Circuito de alimentación de sensores

Debido al bajo voltaje de salida del procesador NXP y el alto voltaje requerido para la excitación del transductor ultrasónico (ver apéndice E), un circuito de alimentación debe ser empleado. Su función es la de amplificar la señal de tensión para obtener un número de pulsos a la entrada del transductor emisor y se ilustra en la figura 1.11. Específicamente, se alimenta el sensor con 16 pulsos a frecuencia equivalente a la resonancia del sensor (40 kHz) y con un ciclo de trabajo de 50% (ver figura 1.12). Por los diagramas esquemáticos completos, ver apéndice E.

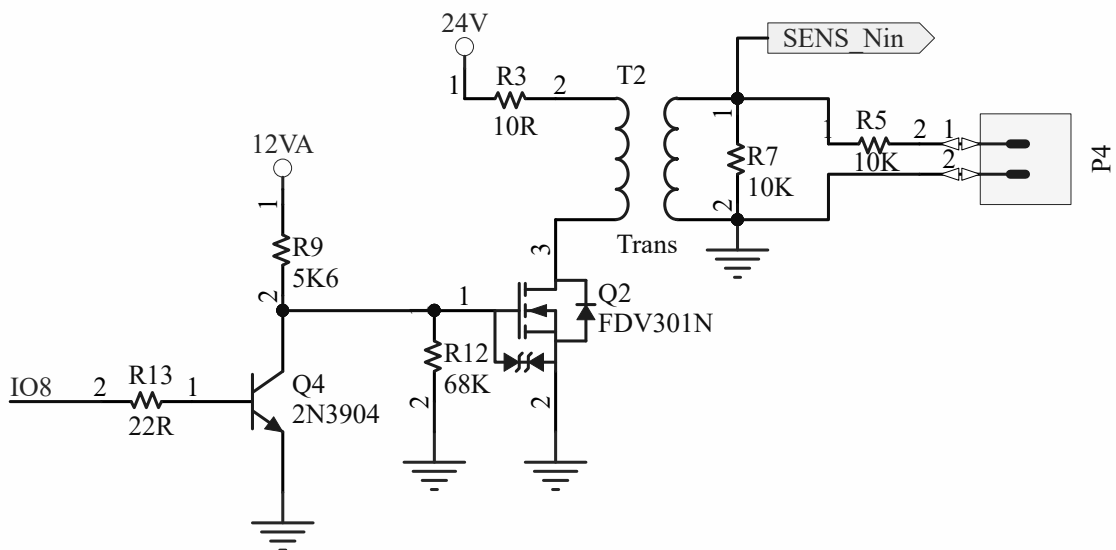


Figura 1.11: Circuito de alimentación por sensor

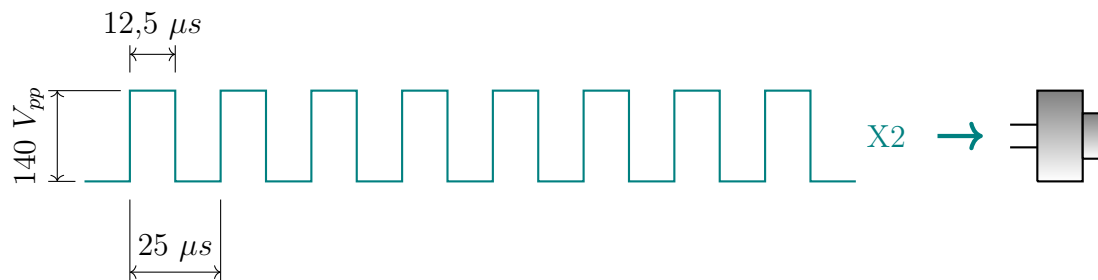


Figura 1.12: Pulsos de alimentación de sensores

Circuito de recepción

Por otra parte, una vez que el pulso ultrasónico llega al receptor, la señal recibida debe ser filtrada y amplificada antes de ser muestreada por el procesador. Con ese objetivo, se diseña el circuito de recepción presentado en la figura 1.13.

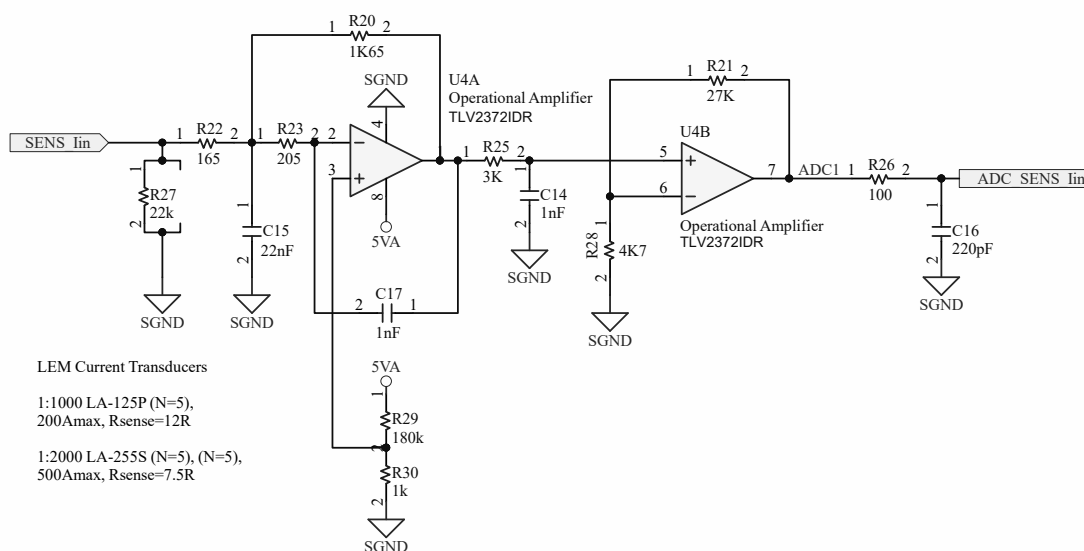


Figura 1.13: Circuito de recepción de sensores

Procesador NXP i.MX RT1010

Para la operación del anemómetro se utiliza un PCB de dos capas de bajo costo con alimentación por USB del fabricante NXP. Posee la MCU cruzada i.MX RT1010 en un paquete 80LQFP, que presenta la implementación avanzada de NXP del núcleo ARM Cortex-M7. Este núcleo funciona a velocidades de hasta 500 MHz para proporcionar un alto rendimiento de la CPU y respuesta en tiempo real. Este procesador (figura 1.14) se ocupa de dar las órdenes de excitación de los sensores, muestrear la recepción y aplicar el método de procesamiento para identificar el tiempo de vuelo t_{of} .



Figura 1.14: NXP i.MX RT1010

PCB desarrollada

Los circuitos anteriormente descritos se incorporan a una placa de circuito impreso que opera como nexo entre el procesador NXP y los sensores del anemómetro. La placa se alimenta externamente y se conecta al procesador a través de los paneles de entrada y salida (ver figura 1.15).



Figura 1.15: PCB en procesador NXP

El desarrollo de la placa aporta solidez y fiabilidad al equipo. Además, independiza a la Estación Meteorológica a partir del simple montaje y desmontaje de la misma. Para los esquemas completos, ver apéndice E.

1.3.3. Procesamiento de señal

Método seleccionado

En el presente trabajo, se desarrollan dos métodos de procesamiento para determinar la velocidad del viento. Se utiliza un método basado en la medición directa del tiempo de vuelo t_{of} (ver sección 1.2) y se propone un método de implementación más extensa que puede mejorar el desempeño del instrumento.

A continuación se presenta la secuencia de operaciones a realizarse correspondiente al método utilizado.

- 1 Identificación de señal ultrasónica en recepción
- 2 Muestreo de las señales adquiridas
- 3 Determinación de tiempo de vuelo t_{of}
- 4 Cálculo de velocidad de viento

▷ Identificación de señal ultrasónica en recepción

La señal de voltaje que convierte el transductor es una onda con componente de tensión alterna y continua. Por lo tanto, la señal es una sinusoidal cuyo valor medio es distinto de cero. La primera etapa del método consiste en identificar el valor medio de la señal para, posteriormente, distinguir correctamente el “lóbulo” que recibe el sensor del emisor (ver figura 1.16).

Previo a excitar el emisor, se efectúa un muestreo del receptor. Se toma un número de muestras y se obtiene el valor medio de todas ellas, definiéndose así el *offset* de la señal que caracteriza a la señal que genera el receptor presente en ese período. Este valor de voltaje V_{offset} condiciona el umbral a superar para identificar el tiempo de vuelo.

▷ Adquisición y muestreo de señales

Una vez que el transductor transforma el pulso ultrasónico en una señal de voltaje en sus terminales, ésta última pasa por el circuito de recepción, filtrando y amplificándose. Luego, esa señal es recibida por el procesador, que efectúa el muestreo de la señal utilizando un convertidor ADC a frecuencia de muestreo f_s .

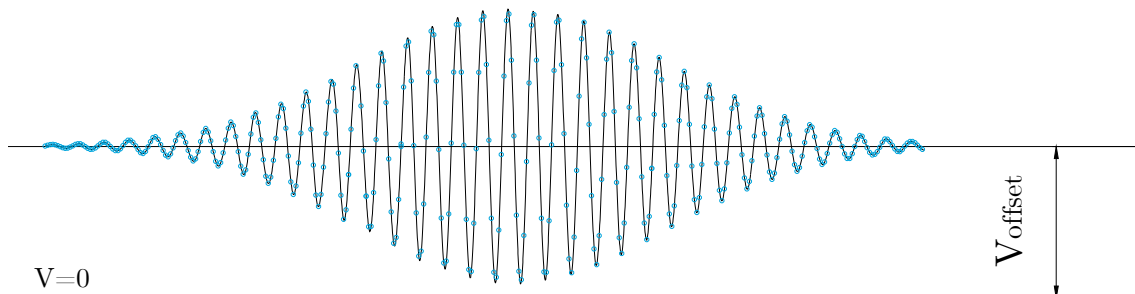


Figura 1.16: Muestreo de señal adquirida

Desde el inicio de la excitación del emisor, el procesador permanece en espera durante un tiempo t_{hold} , luego del cual comienza el período en el que se adquiere un segundo número de muestras. Cada muestra es almacenada temporalmente junto al valor de voltaje y un número ordinal que diferencia a cada una.

▷ Determinación de t_{of}

Se define, como punto de partida, un umbral de voltaje que, superado, determina el tiempo de vuelo buscado (ver figura 1.17). Para este trabajo, la muestra que define el tiempo de vuelo t_{of} es la primera de voltaje superior a $K_{offset} \cdot V_{offset}$. En ecuaciones:

$$n_i = \min q / f(q) \geq K_{offset} \cdot V_{offset} \quad (1.22)$$

donde n_i es el número de la muestra buscada, q es el número ordinal asignado a la muestra, $f(q)$ es el voltaje adquirido de la muestra q y K_{offset} es la constante de proporción que define el umbral de voltaje a superar.

El tiempo de vuelo t_{of} , finalmente, se expresa como función del tiempo de espera previo al muestreo t_{hold} , el número ordinal de la primera muestra en superar el umbral n_i y la frecuencia de muestreo f_s (ver ecuación 1.24).

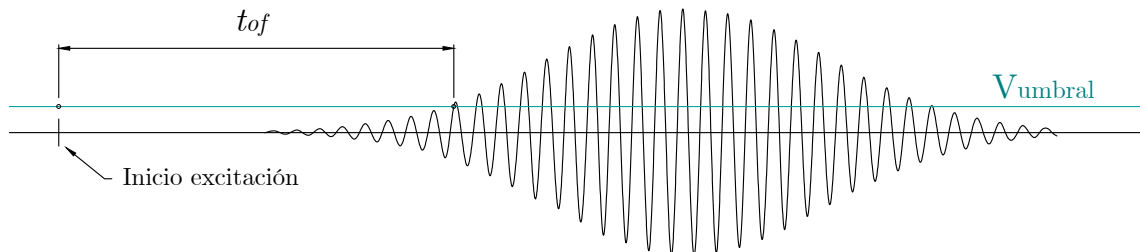


Figura 1.17: Método utilizado para determinar tiempo de vuelo t_{of}

El número ordinal descrito es la información que el procesador envía al sistema de reporte. Consecuentemente, es el sistema de reporte el encargado de calcular la velocidad del viento.

▷ Cálculo de velocidad de viento

El número ordinal de la primera muestra que supera el umbral (llamado también índice n_i) es recibido por el sistema de reporte donde se define el número de lecturas que componen una única medición. Es el valor medio de un número n_{avg} de índices el utilizado para calcular la velocidad del viento. En ecuaciones:

$$\bar{n}_i = \frac{1}{n_{avg}} \sum_{m=0}^{n_{avg}} n_i(m) \quad (1.23)$$

$$t_{of} = t_{hold} + \frac{\bar{n}_i}{f_s} \quad (1.24)$$

La medición de velocidad del viento puede escribirse, para el par de sensores alineados según la dirección Norte-Sur (ver sección 1.2):

$$|v_{\vec{NS}}| = \frac{d_{e/s}/t_{of}^{NS} - c}{\sin(\alpha)} \quad (1.25)$$

Y realizando la misma secuencia de operaciones para el otro par de sensores, puede obtenerse el vector velocidad del viento para ese instante.

$$v_{\vec{viento}} = v_{\vec{NS}} + v_{\vec{EO}} \quad (1.26)$$

El método es descrito en mayor profundidad en la sección 1.5.2.

Método propuesto

Se propone un método de procesamiento de señal alternativo a implementar que puede derivar en una mayor precisión de las mediciones.

Una vez que el receptor recibió el pulso ultrasónico enviado del emisor, éste se filtra y amplifica por el circuito de recepción. Como fue determinado, por cada eje de medición, primero el sensor A emite y el B recibe, y después el sensor B emite, siendo A el receptor. De esta manera, se tienen dos señales temporales recibidas, llamadas S_{AB} y S_{BA} , respectivamente. Luego, las señales deben ser leídas por el procesador y los cálculos necesarios llevados a cabo para poder arribar a una medición de la velocidad del viento. En ese contexto, a continuación se presenta la secuencia de operaciones a realizarse.

- 1 Muestreo de las señales adquiridas
- 2 Interpolar linealmente los puntos muestreados para cada una
- 3 Dividir semiciclos de la señal
- 4 Calcular área de cada semiciclo
- 5 Aparejar semiciclos de S_{AB} con semiciclos de S_{BA}
- 6 Obtener $t_{BA} - t_{AB}$

▷ Adquisición y muestreo de señales

Una vez que el transductor transforma el pulso ultrasónico en una señal de voltaje en sus terminales, ésta última pasa por el circuito de recepción, filtrando y amplificándose. Luego, esa señal es recibida por el procesador, que efectúa el muestreo de la señal utilizando un convertidor ADC a frecuencia de muestreo f_s , como se observa en la figura 1.18.

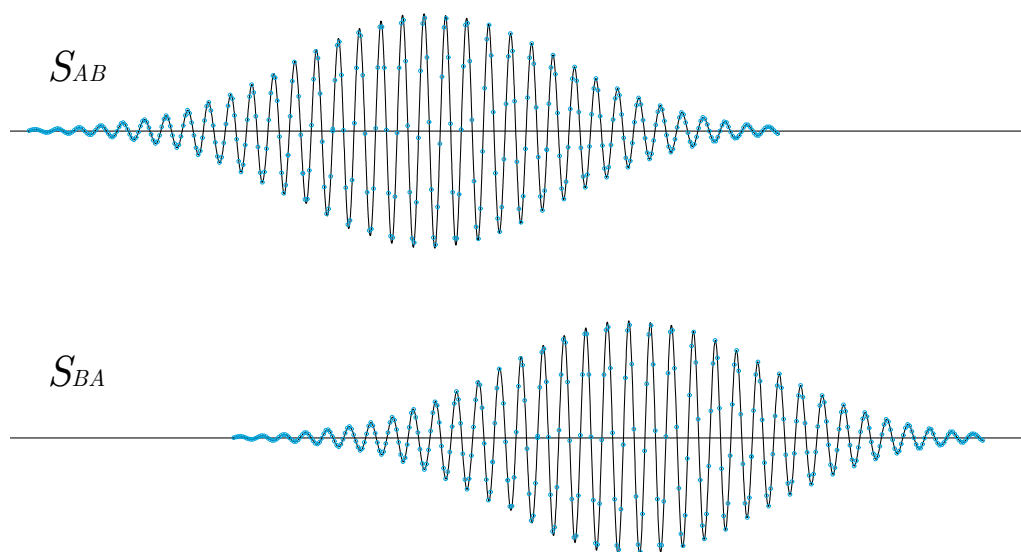


Figura 1.18: Muestreo de señales adquiridas

▷ **Interpolación y división de semiciclos**

El procesador, a través del muestreo, obtiene un número de puntos que caracterizan la señal recibida. Para que estos puntos compongan una señal, se hace uso de la función de interpolación lineal. De tal manera, pueden identificarse las raíces de la curva y así dividir y enumerar los semiciclos de la señal.

▷ **Cálculo de áreas y emparejamiento**

El método seleccionado para el emparejamiento de semiciclos, cuyo objetivo es reconocer el paquete sónico en las señales de ida y vuelta (S_{AB} y S_{BA} , respectivamente), consiste en calcular el área de cada semiciclo y emparejar cada uno de la señal S_{AB} con su semiciclo análogo en la señal par S_{BA} (ver figura 1.19). En ecuaciones:

$$A_{AB}(m) = \sum_{j=0}^n S_{AB}^m(t) \cdot \Delta t \quad (1.27)$$

$$A_{BA}(p) = \sum_{j=0}^n S_{BA}^p(t) \cdot \Delta t \quad (1.28)$$

donde m y p corresponden al número ordinal de semiciclo de las señales S_{AB} y S_{BA} , respectivamente; y se toman los n puntos muestreados de la señal particulares al semiciclo para el cálculo de su área.

Se genera una función $W(m)$ que especifica el número de semiciclo aparejado en la señal S_{BA} correspondiente al semiciclo m de la señal S_{AB} .

$$W(m) = q / \min([A_{AB}(m) - A_{BA}(p)]^2) = [A_{AB}(m) - A_{BA}(q)]^2 \quad (1.29)$$

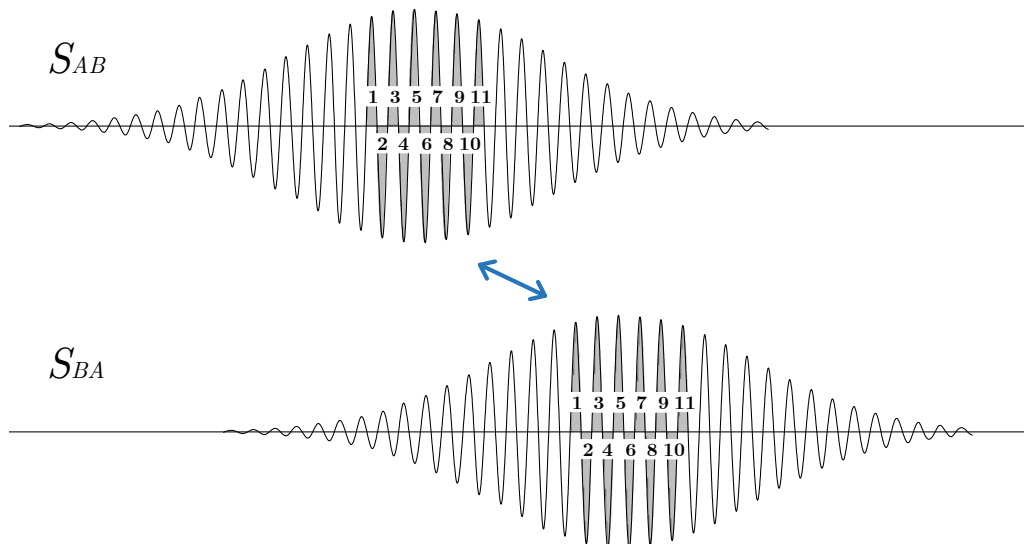


Figura 1.19: Emparejamiento de señales adquiridas

Para emparejar todos los semiciclos, basta con emparejar sólo un número reducido de ellos. En ese contexto, se trabaja sobre los semiciclos cuyo valor de área supere un umbral predeterminado, identificándolos y luego hallando su par a través de la menor diferencia de área (y respetando secuencia o contiguidad de semiciclos).

Partiendo de los ciclos en los que se trabaja y que logran aparejarse, el resto de los semiciclos se emparejan por orden de secuencia.

▷ **Obtención de $t_{BA} - t_{AB}$**

Cada semiciclo cuenta con un número de muestras que lo caracterizan (previa interpolación). Recordando que el objetivo es encontrar la diferencia entre los tiempos de viaje de ida y vuelta, es posible trabajar con cada pareja de semiciclos individualmente y luego encontrar el valor medio de las diferencias calculadas. En ecuaciones:

$$t_{AB}(m) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n t_{AB}^m(i) \quad (1.30)$$

$$t_{BA}(m) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n t_{BA}^m(i) \quad (1.31)$$

donde m es el número de pareja y se calcula el valor medio de todos los puntos temporales muestreados por semiciclo. Finalmente, para obtener $t_{BA} - t_{AB}$, se calcula el valor medio de todas las diferencias entre semiciclos aparejados.

$$\frac{1}{k} \sum_{m=0}^k [t_{BA}(m) - t_{AB}(m)] = t_{BA} - t_{AB} \quad (1.32)$$

donde k es el número total de semiciclos aparejados.

Nuevamente, para el par de sensores alineados según la dirección Norte-Sur la velocidad del viento es:

$$|v_{\vec{NS}}| = K_{geom} c^2 (t_{BA} - t_{AB}) \quad (1.33)$$

donde K_{geom} , como se enuncia en la ecuación (1.14), es una constante dependiente de la geometría de los sensores en el anemómetro y t_{BA} y t_{AB} son los tiempos de vuelo calculados desde el sensor norte al sur y desde el sensor sur al norte, respectivamente. Y repitiendo para el otro par de sensores, el vector velocidad del viento para ese instante resulta:

$$v_{viento}^{\vec{}} = v_{NS}^{\vec{}} + v_{EO}^{\vec{}} \quad (1.34)$$

1.4. Diseño

1.4.1. Diseño aerodinámico

El anemómetro, como tal, estará permanentemente expuesto a corrientes de aire. Corresponde entonces estudiar:

- Influencia del propio anemómetro en la medición
- Fuerzas desarrolladas sobre el anemómetro

Remitiéndose a la disciplina de *aerodinámica aplicada*, para un diseño aerodinámico se estudian la *sustentación*, el *arrastre* y el *momento* (ver figura 1.20) [16]. Dichos parámetros caracterizan, entre otros, diseños de aeronaves y vehículos terrestres. Para el anemómetro, el foco estará puesto en el arrastre (o *drag*, en inglés).

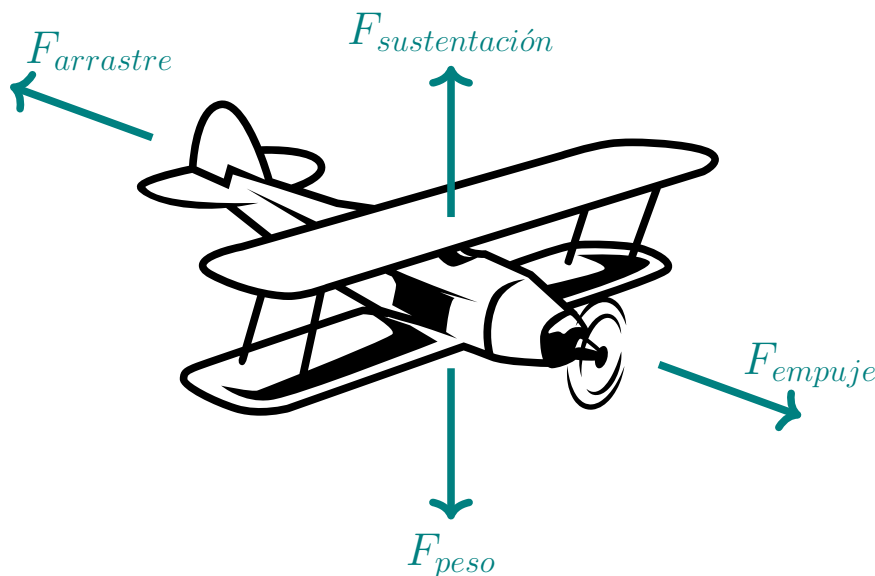


Figura 1.20: Fuerzas actuantes sobre una aeronave

Se define arrastre como la fuerza aerodinámica que se opone al movimiento de un cuerpo a través del aire [17]. Análogamente, para un cuerpo en reposo, el arrastre es la fuerza producida sobre el cuerpo en la dirección del viento. En ecuaciones:

$$F_{arrastre} = \frac{1}{2} \rho A_T C_D v_{viento}^2 \quad (1.35)$$

donde ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , A_T es el área de referencia en m^2 , C_D es el coeficiente de arrastre (adimensional) y v_{viento} la velocidad del viento en m/s . La fuerza $F_{arrastre}$ queda expresada en N [18].

Puede afirmarse que, a menor $F_{arrastre}$, menor será la influencia del anemómetro en el viento. Entonces, para el diseño del dispositivo, se debe buscar minimizar la magnitud de esa fuerza. Para ello, se cuenta con dos estrategias:

- 1 Reducir el área A_T
- 2 Reducir el coeficiente de arrastre C_D

Utilizadas en conjunto, se logrará reducir la fuerza desarrollada sobre el anemómetro.

▷ **Área A_T**

Es el área que “ve” el viento. Es decir, el área de corte del anemómetro según un plano normal al vector velocidad del viento [16]. A modo de ejemplo, en la figura 1.21 se ilustra el área A_T para un vehículo en movimiento.



Figura 1.21: Ilustración del área transversal A_T

Para reducir esta área, se deben reducir las dimensiones del anemómetro en general.

▷ **Coefficiente de arrastre C_D**

Es un coeficiente que depende de la forma del cuerpo inmerso en el fluido. Se define como un parámetro adimensional que se usa para cuantificar la resistencia de un objeto en un medio como el agua o el aire [19]. A continuación se presenta una serie de formas geométricas con su respectivo coeficiente de arrastre o drag.









Forma		Coefficiente de arrastre	Forma		Coefficiente de arrastre		
Esfera	→		0,47	Cubo rotado	→		0,80
Media esfera	→		0,42	Cilindro largo	→		0,82
Cono	→		0,50	Cilindro corto	→		1,15
Cubo	→		1,05	Cuerpo aerodinámico	→		0,04

Figura 1.22: Coeficientes de arrastre para distintos cuerpos

Para el diseño del anemómetro, en consecuencia, se buscará reducir este coeficiente trabajando sobre el diseño, acercándose en lo posible al cuerpo aerodinámico de la figura 1.22.

Por otro lado, se debe tener en cuenta la simetría del diseño. La calibración del anemómetro se puede complejizar si el viento se ralentiza más o menos según la dirección que tome.

1.4.2. Evaluación por CFD

Establecidos los objetivos del diseño, resulta necesaria una herramienta para poder comparar diseños y así arribar al mejor. Para ello, se trabaja con fluidodinámica computacional (*Computational Fluid Dynamics*, o CFD, en inglés). Esta herramienta, que inicialmente se usaba exclusivamente en aeronáutica y astronáutica [20], es relativamente moderna y en la última década ha tomado mayor relevancia al ser utilizada en distintas industrias ingenieriles. El algoritmo resuelve la ecuación de Navier-Stokes [21] y, a diferencia de otros métodos matemáticos, se consideran los efectos de viscosidad fluídica [22]. Para este trabajo se utilizó *SOLIDWORKS Flow Simulation* para determinar esfuerzos sobre la estructura y estudiar el comportamiento del aire a través del instrumento.

Una representación del comportamiento del anemómetro, tras simulación, puede observarse en las figuras 1.24 y 1.25. Los parámetros de simulación se expresan en las tablas 1.2, 1.3 y 1.4 y el dominio computacional, el volumen en el que se computa el comportamiento del fluido, puede observarse en la figura 1.23. La temperatura fue establecida en la media anual de Mar del Plata [23] y la intensidad de la turbulencia es función de v_{viento} [24].

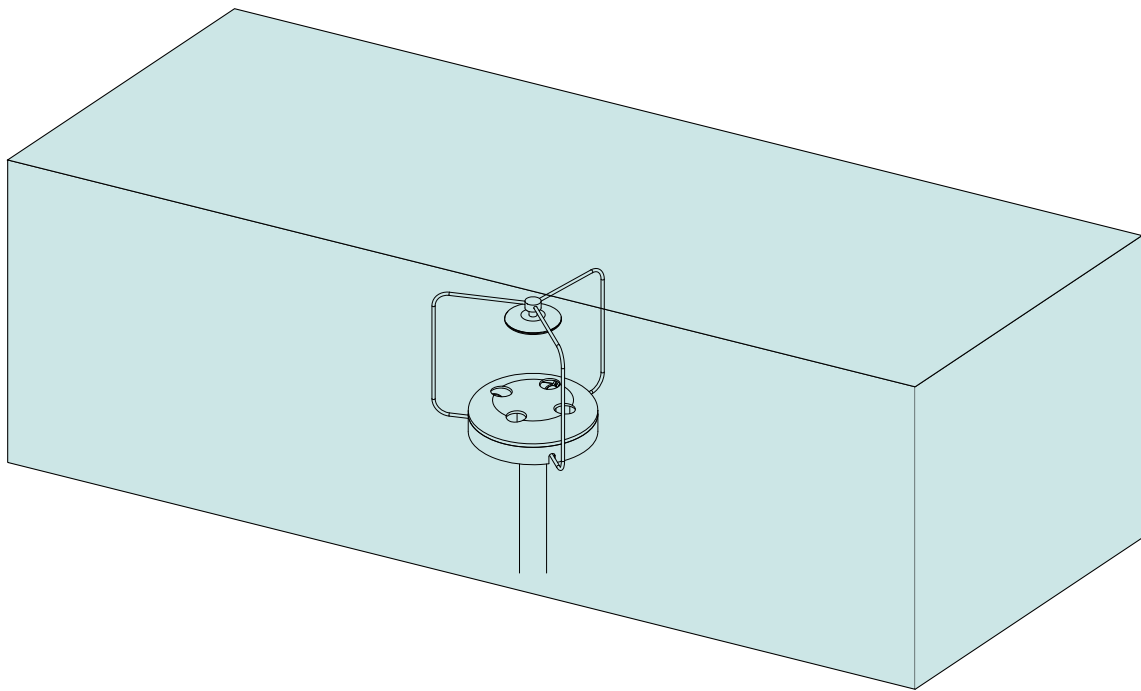


Figura 1.23: Dominio computacional para simulaciones de anemómetro

Dimensiones del dominio computacional ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)	(10, 1, 1)	m
Presión atmosférica	101 325	Pa
Temperatura	288	$^{\circ}\text{K}$
Densidad volumétrica	1,225	kg/m^3

Tabla 1.2: Parámetros de simulación CFD

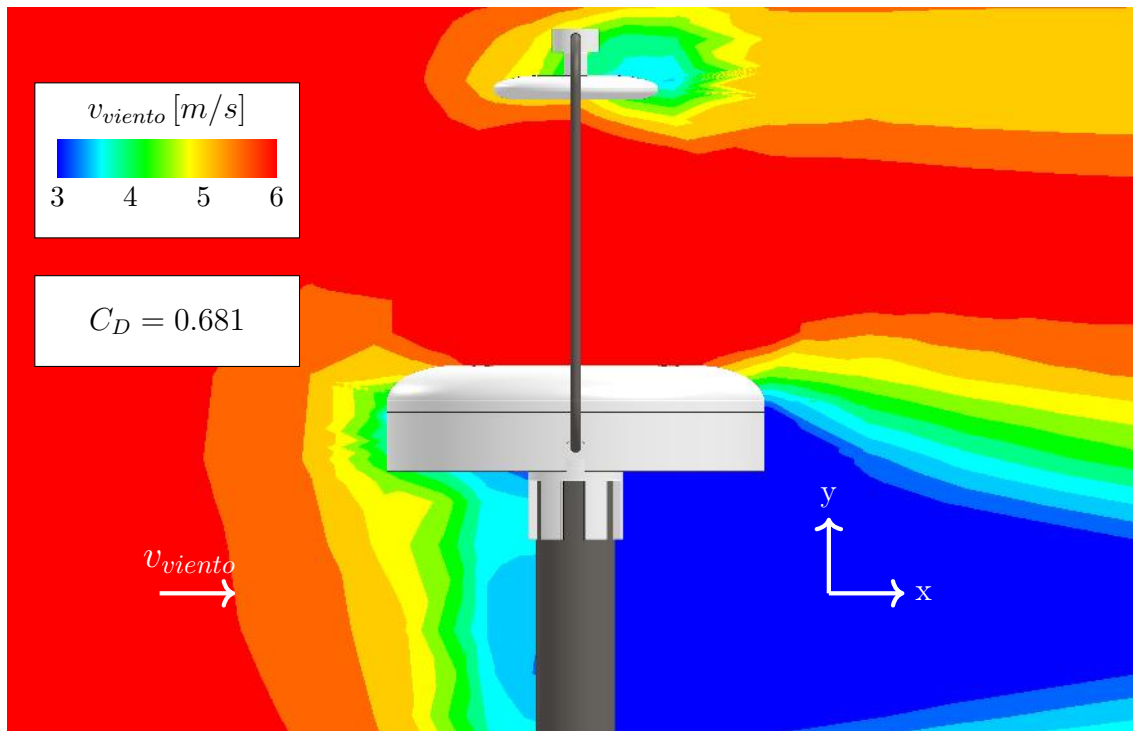


Figura 1.24: Simulación 1 de anemómetro por CFD

$\vec{v}_{viento} (v_x, v_y, v_z)$	(6, 0, 0)	m/s
Intensidad de turbulencia	15	%

Tabla 1.3: Configuración de viento para simulación 1

En Mar del Plata, el viento promedio es de $20 \text{ km}/h$ (aproximadamente $6 \text{ m}/s$) [23, 25]. En la figura 1.24 se expone la situación a la que el instrumento se ve expuesto en esas condiciones. Por su parte, en la figura 1.25 queda representado el comportamiento del viento a través del instrumento cuando adquiere una velocidad de $100 \text{ km}/h$ (la velocidad máxima registrada por la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería [23]). En este último escenario, la deformación elástica del instrumento puede observarse en la figura 1.26.

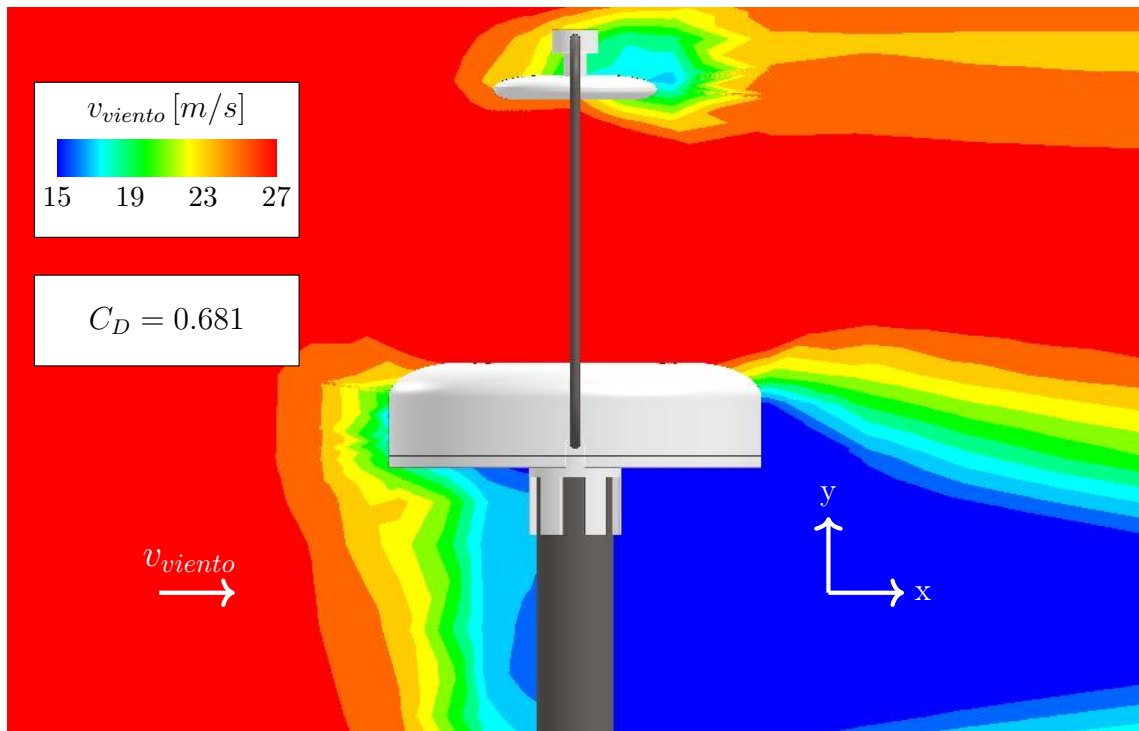


Figura 1.25: Simulación 2 de anemómetro por CFD

$\vec{v}_{viento} (v_x, v_y, v_z)$	(27, 0, 0)	m/s
Intensidad de turbulencia	10	%

Tabla 1.4: Configuración de viento para simulación 2

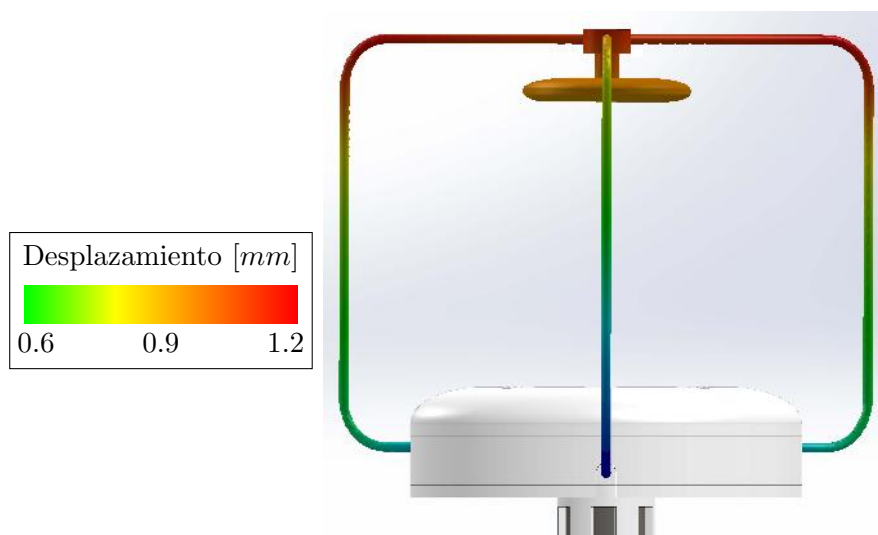


Figura 1.26: Deformación elástica de instrumento para viento a 27 m/s

La deformación elástica producida a velocidades de viento elevadas introduce invariablemente un error en la medida debido a la temporal modificación de la variable $d_{e/s}$. Sin embargo, dicha modificación es mínima (alrededor de un 0,002 %) y se tra-

duce en un error en el cálculo de velocidad de viento de $0,02 \frac{m}{s}$. Consecuentemente, puede despreciarse este efecto en la medición.

1.4.3. Geometría de reflector

Como es descrito en la sección 1.2.2, la disposición es tal que la onda en su camino se desvía según un reflector. Sin embargo, los sensores ultrasónicos no transmiten una onda única, sino que existe una distribución polar de intensidad tanto para la emisión como para la recepción.

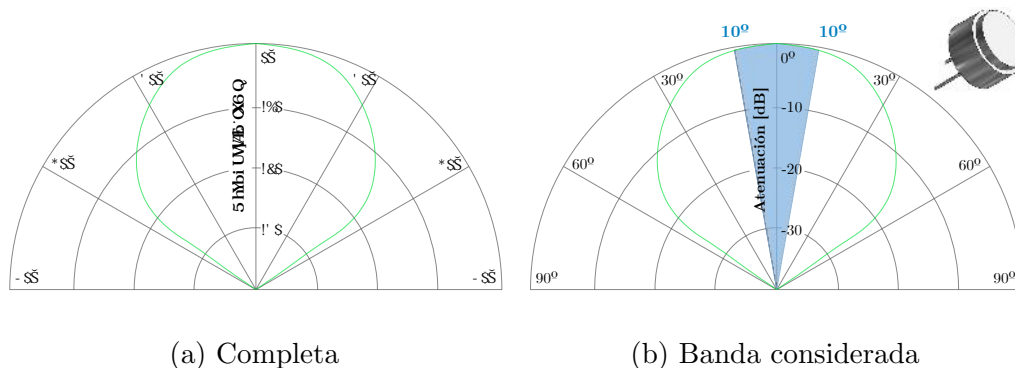


Figura 1.27: Distribución polar de intensidad del sensor ultrasónico

Por lo tanto, la superficie en cuestión debe tener una geometría tal que maximice la potencia desarrollada en el sensor. Es decir, se busca llevar la mayor parte de la energía emitida por el emisor al receptor. La distribución polar (ver figura 1.27a) demuestra que existe intensidad radiante en un rango polar amplio. Se decide considerar una banda angular de 20° con el fin de limitar las dimensiones del reflector, como se observa en la figura 1.27b.

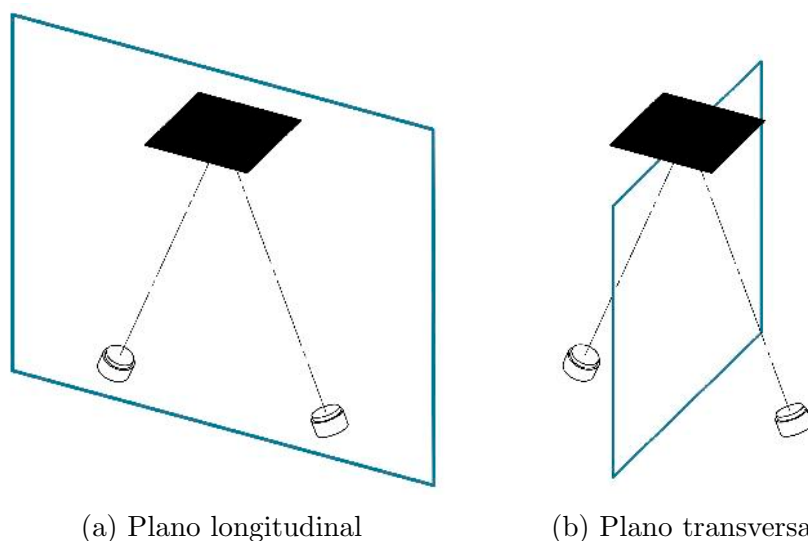


Figura 1.28: Vistas para análisis de geometría de reflector

Idealmente, el reflector debe dirigir todos los rayos emitidos en esa banda desde el emisor hacia el receptor. En dos dimensiones, para el plano longitudinal (figura

1.28a), la curva que logra esto es la elipse. Ubicando los sensores en los focos, todos los rayos salientes de un sensor llegan al otro (ver figura 1.29).

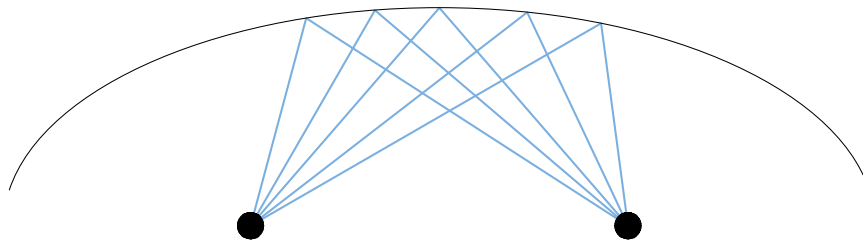


Figura 1.29: Elipse con rayos entre focos

No obstante, para el plano transversal (figura 1.28b), la curva que lleva todos los rayos de un sensor al otro (que ahora están superpuestos) es un círculo, como en la figura 1.30.

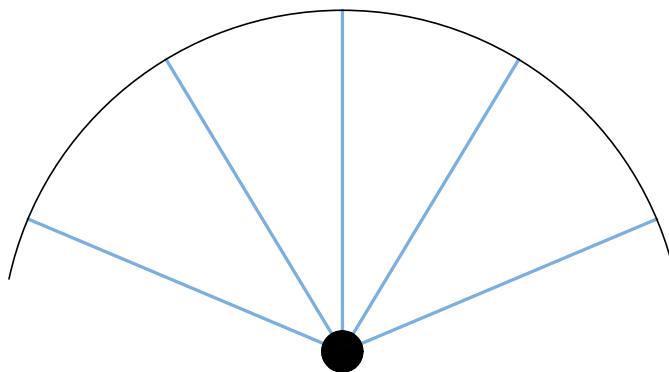


Figura 1.30: Círculo con rayos desde y hacia el centro

El gran limitante en el diseño es el hecho de que ambos pares de sensores se reflejan sobre el mismo reflector. En consecuencia, la superficie debe ser de revolución. Como criterio de comparación, se analiza la mayor desviación en el plano horizontal de los sensores como consecuencia de la elección de cada superficie reflectiva.

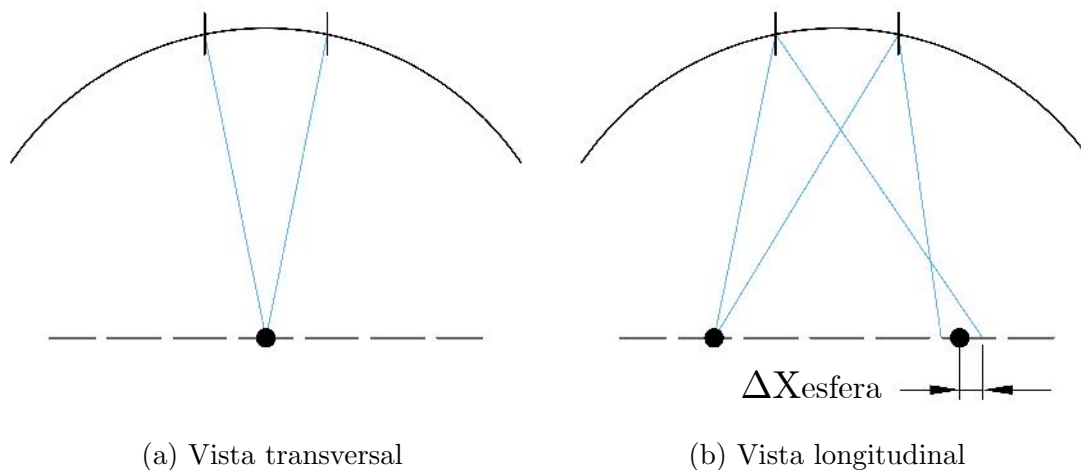


Figura 1.31: Desviaciones para reflector esférico

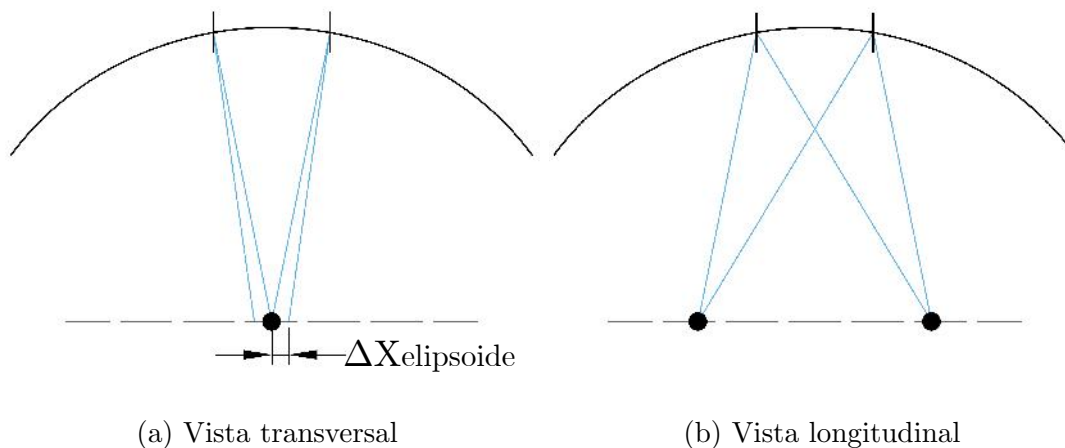


Figura 1.32: Desviaciones para reflector elipsoidal

ΔX_{esfera}	9,46	mm
$\Delta X_{elipsoide}$	7,44	mm

Tabla 1.5: Desviaciones máximas según reflector

A partir de la figuras 1.31 y 1.32 se observa que ambas superficies reflectoras son imperfectas. La elección de una ofrece mejor desempeño en un plano pero peor en otro. Si se elige una esfera como superficie de revolución reflectora, y para la geometría del anemómetro definida (ver sección 1.2.2), la desviación máxima es mayor que para una elipsoide como superficie reflectora. Por lo tanto, se concluye que la elección de un reflector elipsoidal resulta en un mejor desempeño.

1.4.4. Presentación de diseño

El anemómetro fue diseñado para ser colocado en la Facultad de Ingeniería, en una zona no perturbada y acoplado a una columna de soporte. Dispone de alojamientos cilíndricos para los sensores (ver apéndice E) con ajuste en posición, pieza que da el ángulo de inclinación al sensor (ver figura 1.36b). El reflector elipsoidal es

ubicado por un arreglo de tres varillas y refleja, sin atenuación (ver apéndice B), las ondas ultrasónicas incidentes. El instrumento desarrollado se presenta en las figuras 1.33 y 1.34.



Figura 1.33: Anemómetro ultrasónico desarrollado



Figura 1.34: Vista en perspectiva inferior de anemómetro

La longitud de las varillas fue definida a partir del diseño iterativo con simulación por CFD (ver sección 1.4.2), de manera tal de minimizar su influencia y, así, lograr que el anemómetro tenga comportamiento independiente de la dirección de incidencia del viento. La base del anemómetro contiene divisores que aíslan cada sensor e impiden que haya transmisión directa de ondas ultrasónicas (sin pasar por reflector) entre sensores, como puede observarse en la figura 1.36a. En la figura 1.35 se ilustran los distintos componentes que forman parte del instrumento. Para dimensiones de componentes y ensamblaje, ver dibujos técnicos en apéndice D.

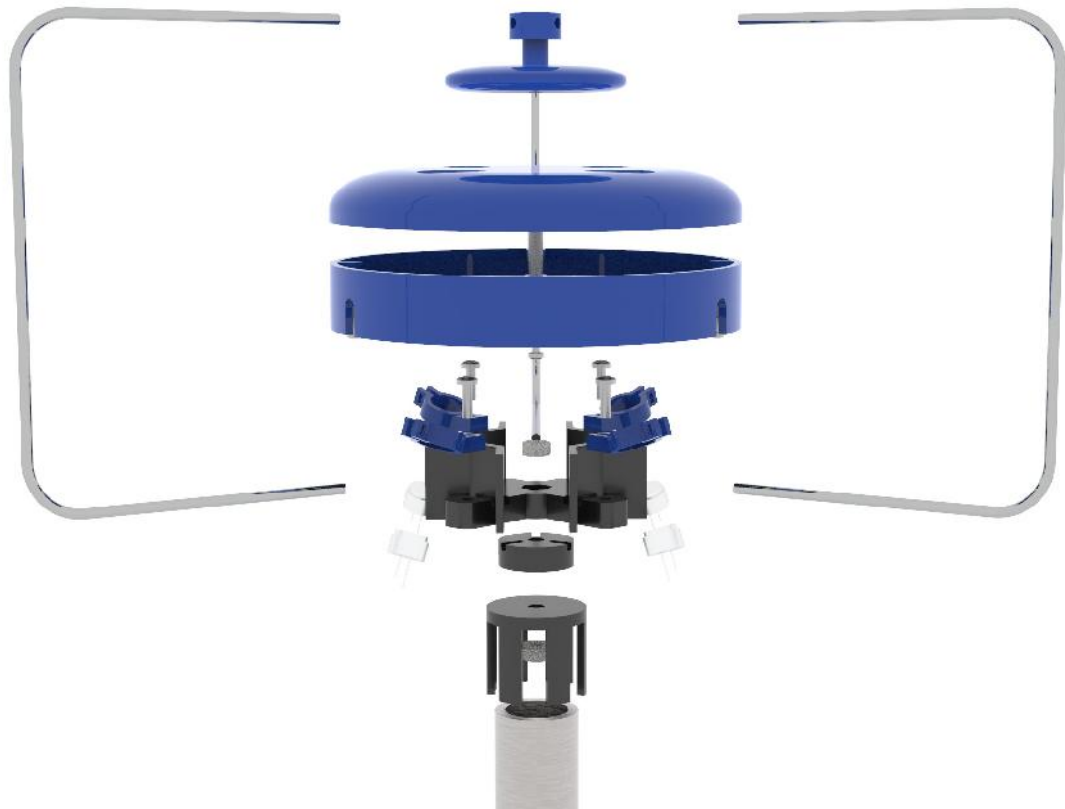


Figura 1.35: Vista explosionada de anemómetro

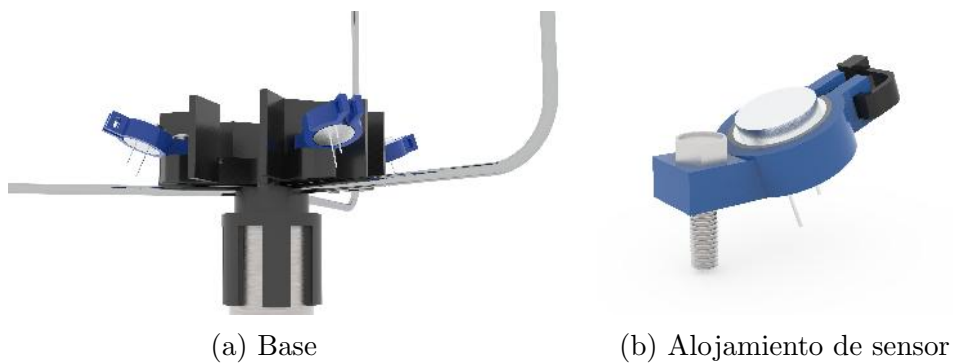


Figura 1.36: Elementos de anemómetro desarrollado

Coefficiente de arrastre C_D	0,681
Máximo desplazamiento ($v_{viento} = 100 \text{ km/h}$)	1,2 mm

Tabla 1.6: Parámetros de anemómetro

1.4.5. Materiales y fabricación

Siendo que el anemómetro estará permanentemente a la intemperie, resulta crucial la utilización de materiales que resistan las agresiones del medio y no se degraden

con el tiempo. Se decide, entonces, trabajar con plástico PET-G para las impresiones en 3D (ver figura 1.37) y acero inoxidable austenítico UNS S30400 (figura 1.38) para las varillas.

▷ PET-G

El tereftalato de polietileno glycol-modificado es una variación apta para imprimir en 3D del plástico más usado mundialmente, el PET [26]. El contenido de glycol previene que el termoplástico cristalice bajando su punto de fusión para facilitar la impresión. Mientras que el PET cambia de estado a los 260°C, el PETG lo hace alrededor de los 230°C [27]. Este material, además, es afectado mínimamente por la radiación UV, especialmente comparado con otros materiales para impresión como el ABS o el PLA [28]. Soporta sin pérdida de propiedades mecánicas temperaturas de hasta 80°C, y es resistente químicamente al ataque de ácidos y bases [29]. A la fecha, junto con los ya nombrados, es de los plásticos en filamento de mayor disponibilidad en el país.

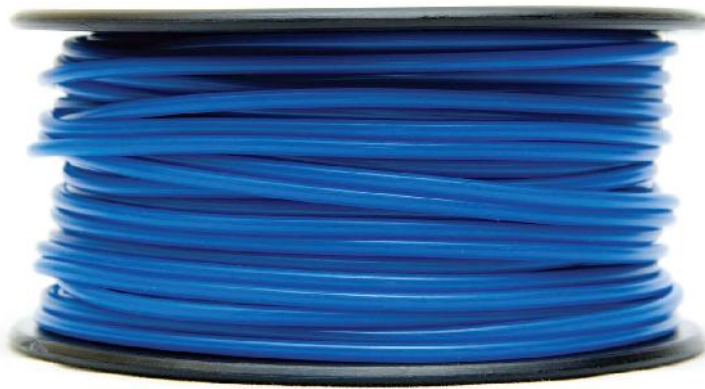


Figura 1.37: Rollo comercial de filamento PET-G

▷ Acero inoxidable AISI 304

Es el acero inoxidable más común. Los aceros inoxidables son aleaciones que se seleccionan por su excelente resistencia a la corrosión, factor fundamental para la integridad del anemómetro en el mediano y largo plazo. Dicha resistencia se debe principalmente al contenido de cromo y, en menor medida, de níquel [30]. El acero elegido es del tipo austenítico, destacado por su buen comportamiento frente a la corrosión y buenas propiedades mecánicas. La composición química del AISI 304, denominado UNS S30400 y regido por la normativa ASTM A240 se presenta en la siguiente tabla [31].

Elemento presente [%]								
C	Mn	P	S	Cr	Ni	Si	N	
-0.08	-2	-0.045	-0.03	18 – 20	8 – 10.5	-0.75	-0.1	

Tabla 1.7: Composición química del UNS S30400

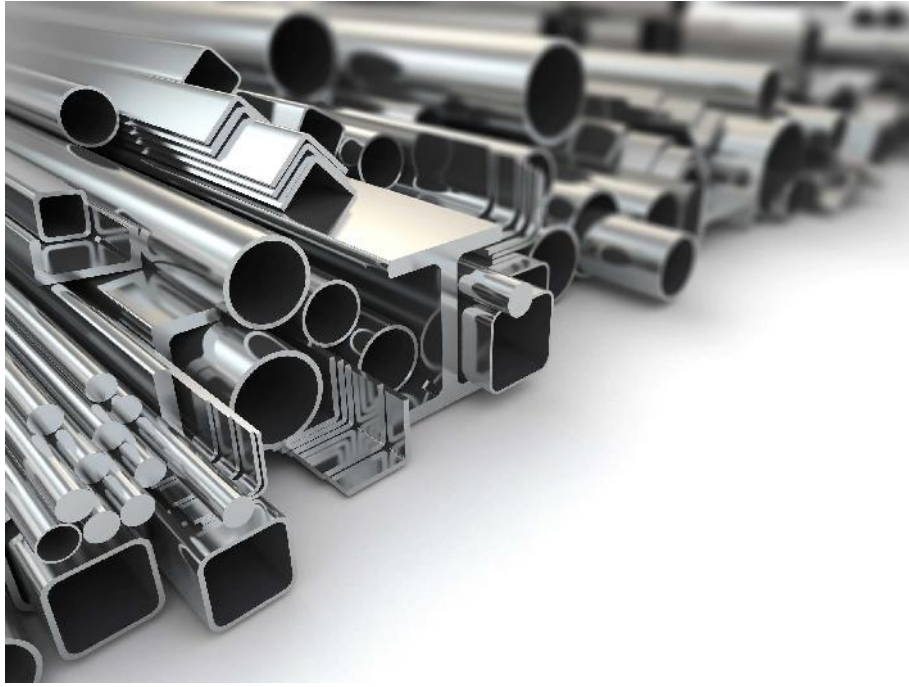


Figura 1.38: Barras y perfiles de acero inoxidable austenítico UNS S30400

1.5. Ensayos e implementación

1.5.1. Calibración

La Organización Meteorológica Mundial (o WMO, por *World Meteorological Organization*, en inglés) no da especificaciones sobre cómo el procedimiento de calibración de un anemómetro debe llevarse a cabo. En cambio, asevera que cuando el anemómetro es un prototipo o proyecto especial, la realización de ensayos en túnel de viento puede resultar útil. Existen, además, recomendaciones de mantenimiento específicas para anemómetros a cazoletas, no aplicables al anemómetro ultrasónico desarrollado en el presente trabajo [32].

En ese contexto, se hizo uso de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNMdP para la calibración, valiéndose del túnel de viento allí presente (figura 1.39). Las características del mismo se detallan en la tabla 1.9. El tubo de Pitot asociado al túnel no se encuentra en servicio y, por ende, no es utilizado como referencia. En su lugar, se hace uso de un anemómetro manual mecánico comercial UNI-T UT363 (figura 1.40). Se incorporó un variador de frecuencia al forzador de aire para lograr modificar la velocidad del flujo de aire. En la figura 1.41 se ilustra la curva relevada correspondiente a la velocidad del viento (medida con el UT363) según la frecuencia de alimentación del motor.



Figura 1.39: Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería

Rango de utilización	0 – 30	m/s
Resolución	0,1	m/s
Error de medición	$\pm(5\%rdg + 0,5)$	m/s
Frecuencia de muestreo	2	Hz

Tabla 1.8: Características de anemómetro UT363

Dimensiones generales		
Longitud máxima	4,00	m
Ancho máximo	0,56	m
Altura máxima	0,40	m
Recinto de evaluación		
Longitud	0,81	m
Ancho	0,42	m
Altura	0,28	m
Forzador de aire		
Clase de motor	Monofásico	
Potencia	0,37	kW
Diámetro ventilador	0,50	m

Tabla 1.9: Características de túnel de viento utilizado



(a)



(b) En túnel

Figura 1.40: Anemómetro UNI-T UT363

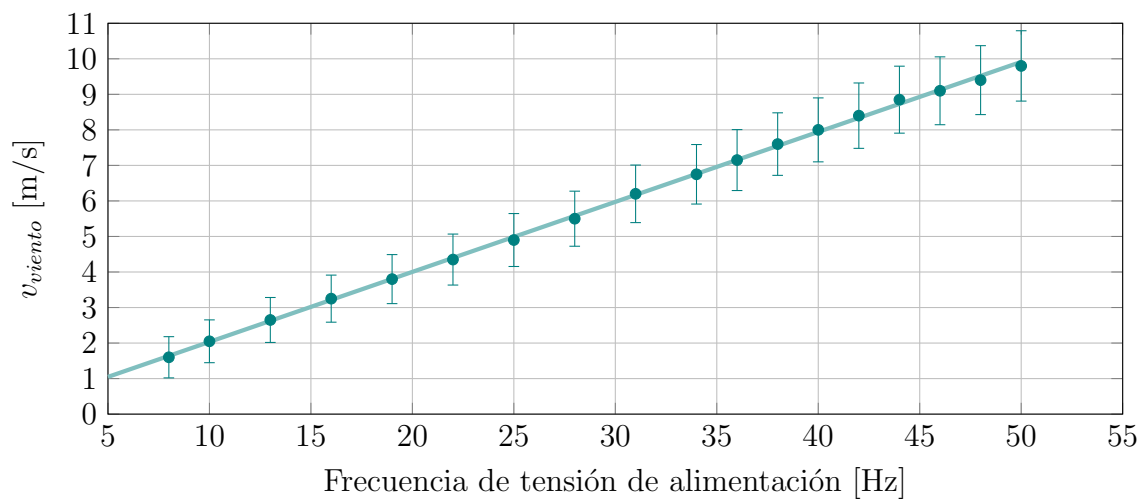


Figura 1.41: Característica de túnel de viento

1.5.2. Resultados experimentales

Se construye el anemómetro con las especificaciones anteriormente enunciadas. Adicionalmente, se destacan:

- Utilización de conector D-sub de 15 pines incorporado a dos cables mallados para la conexión de los sensores con el procesador
- Mejora en acabado superficial con masilla plástica que disminuye inserción de instrumento y optimiza el comportamiento del reflector
- Utilización de recipiente como base para el ensayo en el túnel de viento

En la etapa de desarrollo, se utilizó un osciloscopio con el propósito de analizar la interacción entre el procesador y los sensores. En la figura 1.42 se ilustra el comportamiento del sistema. De acuerdo a lo descrito en la sección 1.3.3, existe una primera etapa de muestreo (la señal amarilla caracteriza los períodos de captura del convertidor ADC) en la cual se determina V_{offset} , variable que define el umbral que la señal ultrasónica que llega al receptor debe superar de manera tal de distinguir el paquete de onda ultrasónica emitida. Luego de esa captura, el procesador comienza la excitación del emisor y aguarda un tiempo t_{hold} antes de iniciar el muestreo de la señal que llega al receptor. Para ambos períodos de muestreo, existe un número fijo de muestras a adquirir. Cabe destacar que la señal del receptor es filtrada y amplificada previo a ser recibida por el convertidor ADC (ver sección 1.3.2).

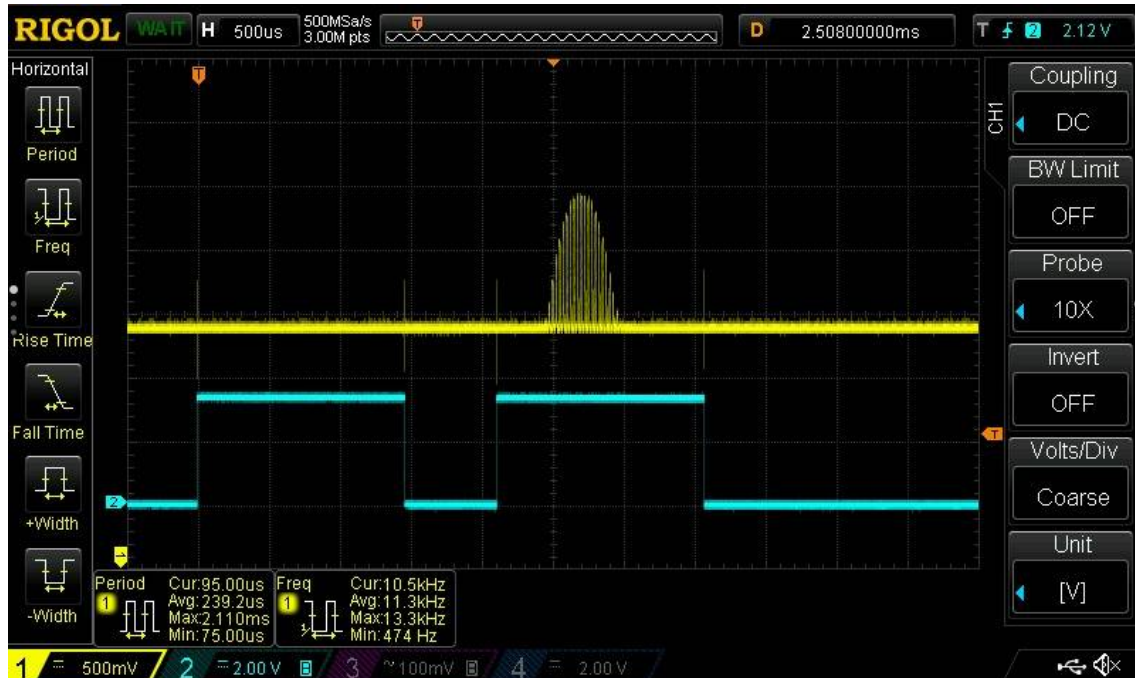


Figura 1.42: Captura de osciloscopio

Durante esta segunda etapa de captura, se adquieren muestras a frecuencia f_s y se almacena temporalmente el valor de voltaje que corresponde a cada una. Es el procesador quien determina el número de índice n_i y lo envía por comunicación *serial* al sistema de reporte.

Una vez finalizada dicha tarea, el proceso vuelve a comenzar. Los parámetros que caracterizan el proceso se presentan en la tabla 1.10. Cabe destacar que, debido al relativamente reducido tiempo del proceso y la simplicidad del método, el instrumento puede realizar alrededor de 280 lecturas por segundo. Es el sistema de reporte (ver capítulo 3) el que limita el número de mediciones que se registran usando promedio móvil.

Frecuencia de muestreo	f_s	700	kHz
Constante de proporción umbral	K_{offset}	1,4	
Tiempo de espera	t_{hold}	600	μs
Número de muestras por período		1024	
Tiempo total de proceso	<	3600	μs
Mediciones máximas	\approx	280	1/s

Tabla 1.10: Parámetros del código empleado

Se procedió a colocar tanto el anemómetro desarrollado como el anemómetro UNI-T dentro del túnel de viento, como puede observarse en las figuras 1.47 y 1.48. Teniendo en cuenta lo enunciado en la sección 1.5.1, se tomaron lecturas de ambos instrumentos variando la frecuencia de la tensión de alimentación del forzador. Para este ensayo, se utilizó un único eje de medición que fue alineado según la dirección del flujo y se tomaron medidas con frecuencia ascendente y descendente, obteniendo dos medidas para una dada frecuencia de alimentación (que son promediadas en la tabla 1.11). Seguidamente, se repitió el ensayo girando 180° el instrumento, midiendo la velocidad del viento en sentido opuesto.

Para el ensayo se contó con un osciloscopio digital, un variador de frecuencia y una fuente de corriente continua variable para alimentar con 24 V la placa montada sobre el procesador. Se ignoran las lecturas almacenadas en el equipo con el fin de analizar el comportamiento del anemómetro independientemente del sistema de reporte.

Los resultados del ensayo se encuentran expresados en la tabla 1.11 y de manera gráfica en las figuras 1.43 y 1.44, donde la recta celeste caracteriza una pendiente unitaria.

Frec. [Hz]	Anemómetro UNI-T		Anemómetro Est. Met.
	Lectura [m/s]	Error máx. [m/s]	Lectura [m/s]
10	2,05	0,60	1,63
15	3,10	0,66	2,51
20	4,00	0,70	3,27
25	4,93	0,75	4,74
30	6,05	0,80	5,45
35	7,00	0,85	6,21
40	8,15	0,91	7,46
45	9,05	0,95	9,41
50	9,95	1,00	9,89
<hr/>			
8	1,45	0,57	1,86
10	1,95	0,60	2,50
15	2,78	0,64	3,60
20	3,73	0,69	4,46
25	4,55	0,73	5,33
30	5,65	0,78	6,13
35	6,60	0,83	6,82
40	7,60	0,88	8,71
45	8,35	0,92	9,57
50	9,10	0,96	10,48

Tabla 1.11: Ensayo de contraste de anemómetros

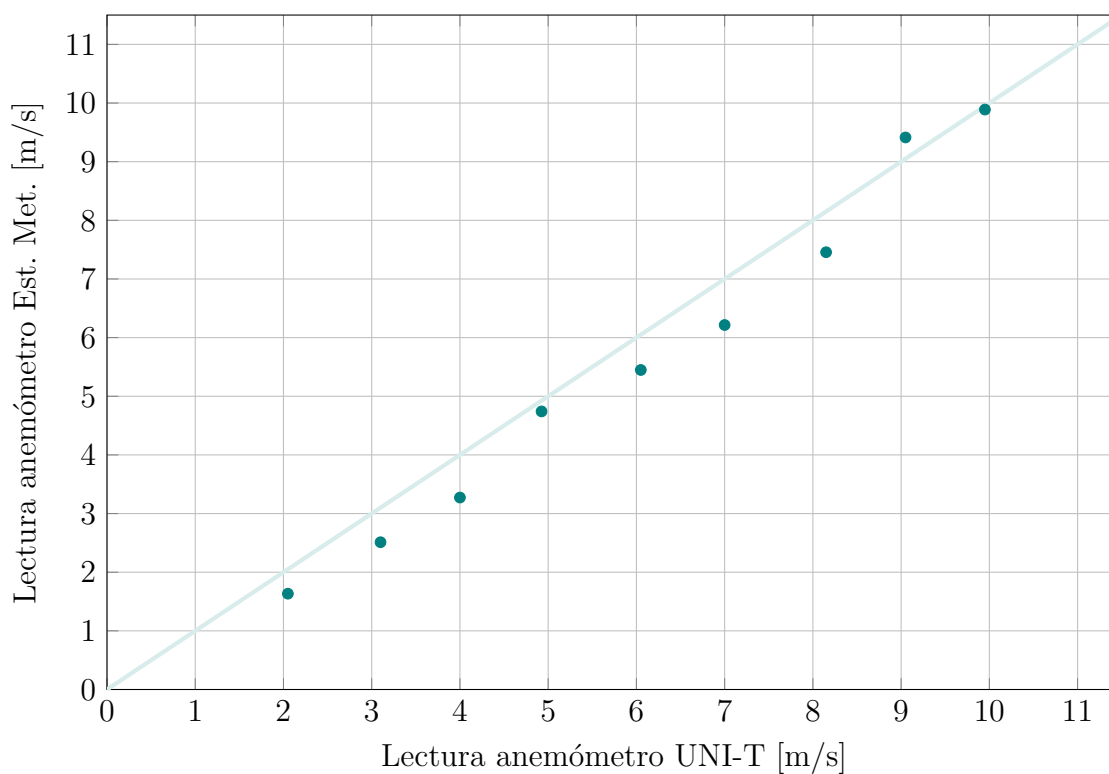


Figura 1.43: Contraste de anemómetros

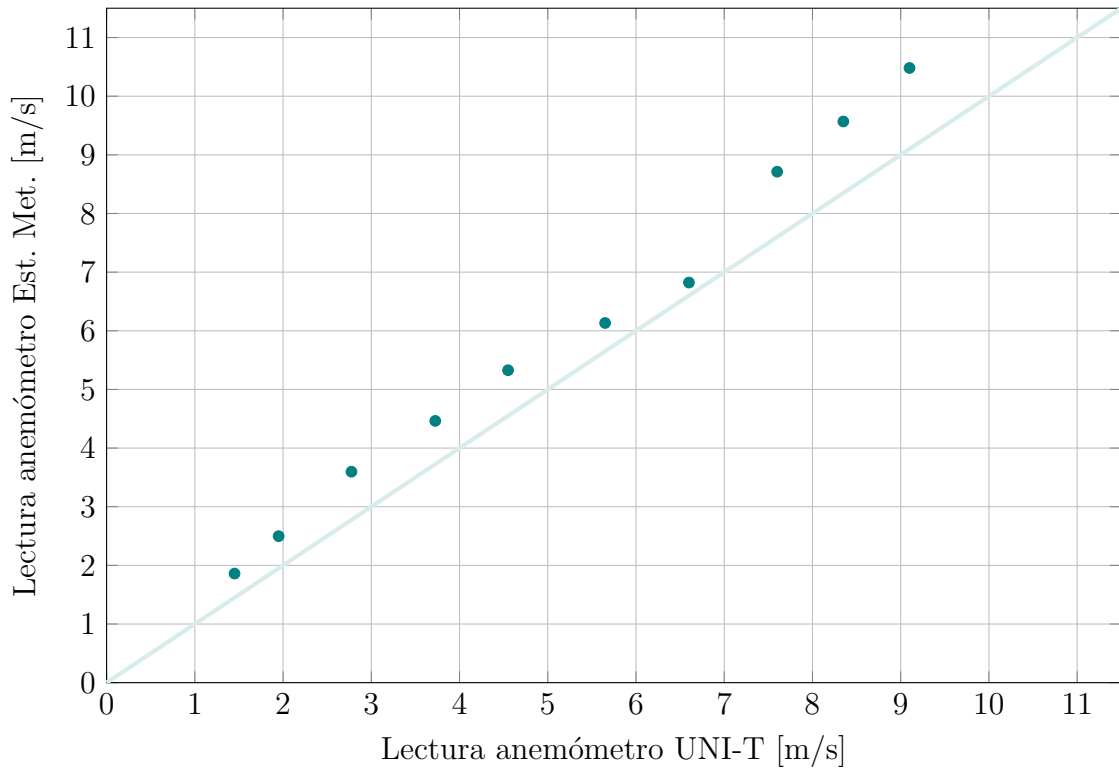


Figura 1.44: Contraste entre instrumentos en sentido opuesto

Para el estudio del error, se emplea la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en una Medición (GUM) descrita en la normativa IRAM 35050. Esta herramienta estadística permite expresar el error asociado a las mediciones tomadas con el anemómetro de la Estación Meteorológica considerando que el patrón también es un instrumento impreciso.

Con ese objetivo, se analizan las mediciones para cada frecuencia de alimentación y se calcula la incertidumbre combinada, considerando distribución rectangular para el error del anemómetro UNI-T y el factor t de la distribución de Student correspondiente a una probabilidad del 68% [33].

Como primer paso se toma el valor medio de las lecturas del anemómetro UNI-T y el desarrollado en el presente trabajo para cada frecuencia del VFD. Seguidamente, puede calcularse el error o discrepancia entre ambos instrumentos e_{anem} . A continuación, y según los lineamientos de la normativa enunciada, se calcula u_c (la incertidumbre del error e_{anem}).

En ecuaciones, la incertidumbre típica u_x del anemómetro UNI-T puede escribirse:

$$u_x = \frac{0.05 \cdot rdg + 0,5}{\sqrt{3}} \quad (1.36)$$

Por su parte, considerando la desviación estándar de las mediciones del anemómetro de la Estación Meteorológica, el aporte a la incertidumbre u_i por las 2 mediciones realizadas en cada punto (o frecuencia) se escribe:

$$u_i = t \frac{S(v_{viento})}{\sqrt{2}} \quad (1.37)$$

Finalmente, ambas ecuaciones pueden combinarse y formar la incertidumbre combinada u_c , que resulta:

$$u_c = \sqrt{u_x^2 + u_i^2} \quad (1.38)$$

Los resultados del análisis estadístico se encuentran en la tabla 1.12 y las figuras 1.45 y 1.46.

f [Hz]	e_{anem} [m/s]	u_x [m/s]	u_i [m/s]	u_c [m/s]	Error [m/s]	Error rel. [%]
10	0,065	0,35	0,89	0,95	1,02	49
15	0,115	0,37	0,92	0,99	1,10	36
20	0	0,40	0,95	1,03	1,03	26
25	0,295	0,42	0,63	0,76	1,05	21
30	-0,060	0,46	0,70	0,84	0,90	15
35	-0,285	0,49	0,66	0,82	1,10	17
40	0,210	0,52	1,17	1,28	1,48	18
45	0,790	0,54	0,56	0,78	1,57	17
50	0,660	0,56	0,94	1,09	1,75	17

Tabla 1.12: Resultados de análisis GUM

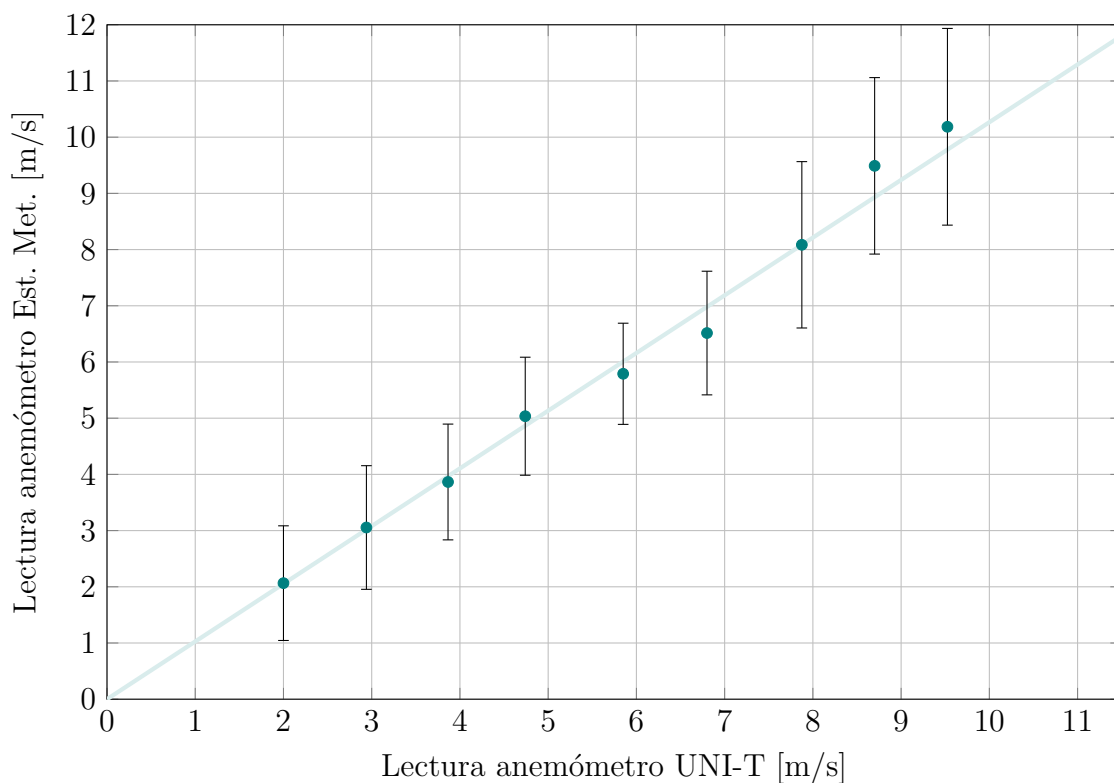


Figura 1.45: Contraste de anemómetros con error según GUM

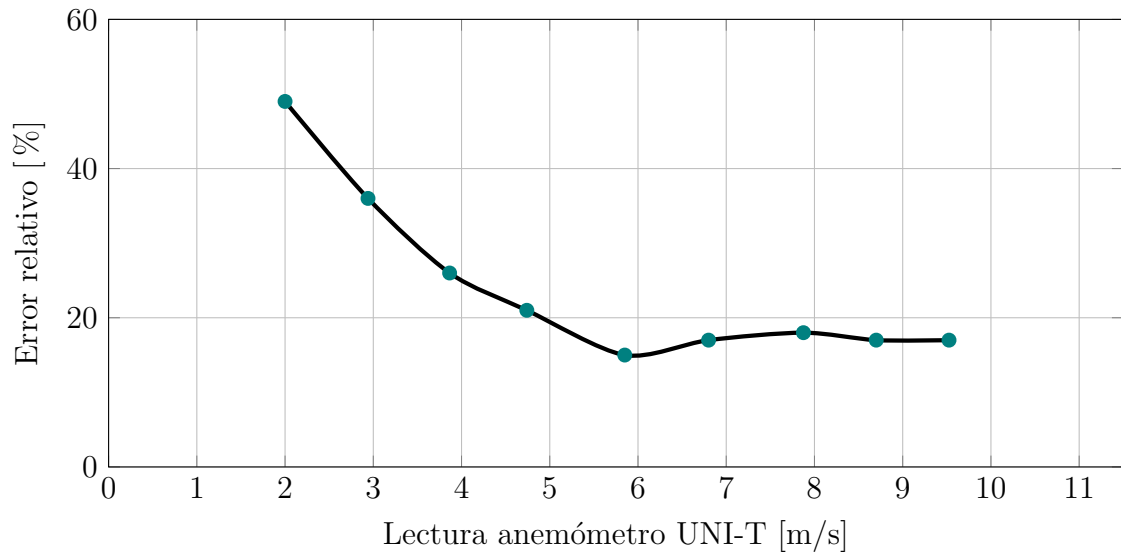


Figura 1.46: Error relativo de medición de anemómetro según GUM

Los resultados muestran que, al considerar el error asociado a cada instrumento, el comportamiento se ubica por debajo de lo esperado a pesar de registrar un buen desempeño del anemómetro desarrollado que se presenta en la figura 1.50. El error es elevado y perjudica la utilidad de la calibración. Hay margen de mejora.

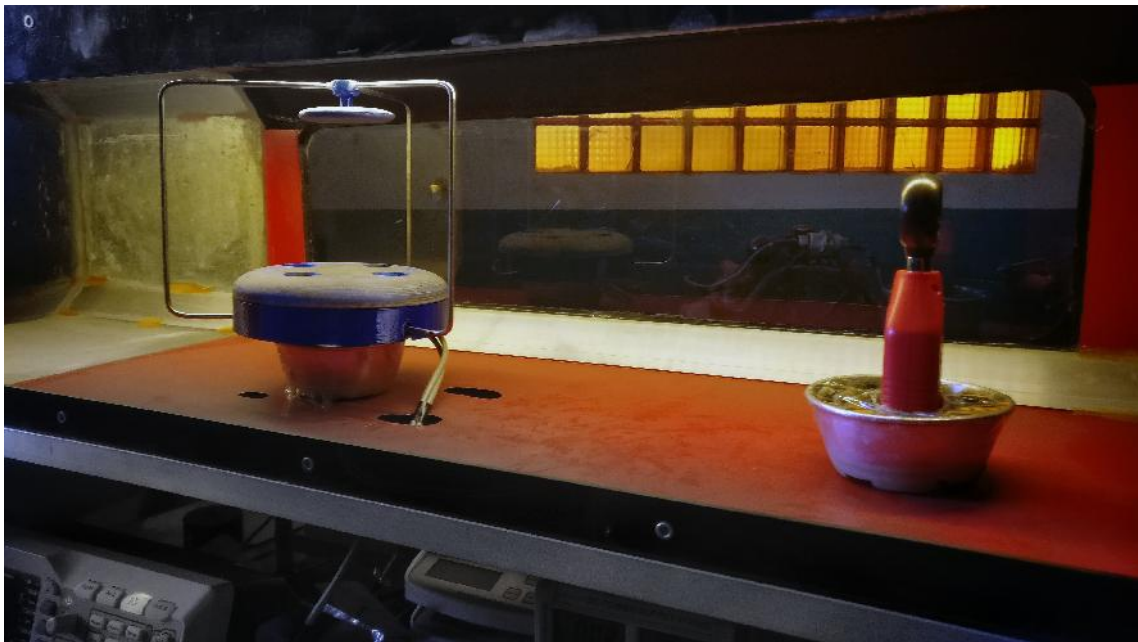


Figura 1.47: Anemómetros dentro de túnel de viento para contraste



Figura 1.48: Contraste de anemómetros en Facultad de Ingeniería

Por un lado, se destaca el hecho que el anemómetro considerado patrón reporta distintas velocidades de viento para una misma velocidad angular del forzador de aire (o lo que es lo mismo, frecuencia de tensión de alimentación). A pesar de ello, dicha diferencia no se desvía del error asociado que, por otro lado, es relativamente alto para un instrumento patrón. La característica de este instrumento, como puede verse en la figura 1.41, es lineal; pero una tendencia a subestimar o sobreestimar la velocidad del viento no puede ser descartada. En este contexto, se propone utilizar un anemómetro patrón de mayor precisión y exactitud en un futuro ensayo de contraste.

También, es importante destacar que una proporción importante del error expresado en el análisis GUM (tabla 1.12 y figura 1.46) se debe al reducido número de mediciones. En ese contexto, un mayor número de mediciones para cada punto de evaluación resultaría necesario. No obstante, esta tarea se limita al análisis estadístico del presente informe y el anemómetro toma un número importante de mediciones por segundo, lo cual minimiza dicho error.

Adicionalmente, la utilización de un variador de frecuencia (VFD) para la regulación de la velocidad del flujo aéreo incorpora ruido en la señal de magnitud no despreciable (ver figura 1.49). Este fenómeno resulta en un mayor error en las mediciones del instrumento desarrollado, cuya electrónica es sensible a ruido eléctrico. A pesar de ello, una vez instalado, se espera que el anemómetro se comporte con mayor precisión debido a la ausencia de dicha fuente de ruido.



Figura 1.49: Ruido en señal en ensayo de contraste

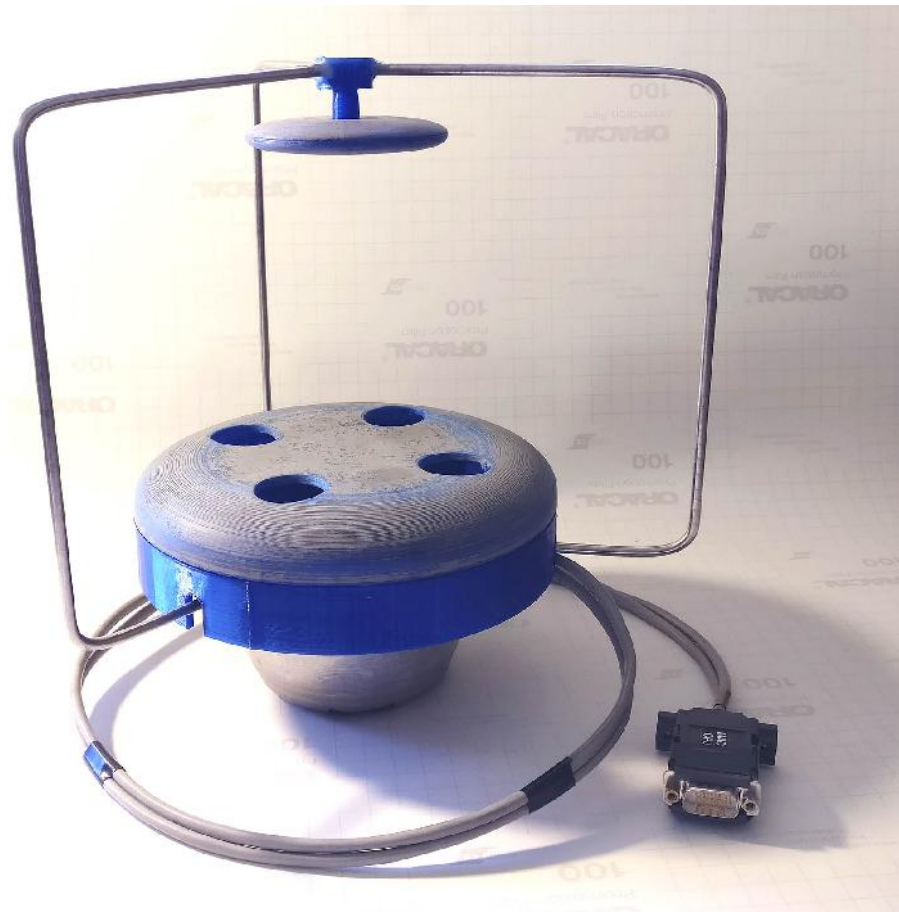


Figura 1.50: Anemómetro de la Estación Meteorológica

1.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo, se estudiaron las distintas clases de anemómetro presentes en la actualidad, identificando ventajas y desventajas. Habiendo seleccionado para el desarrollo un anemómetro ultrasónico, se especifican las variables involucradas en la medición y se enuncia el principio de funcionamiento del instrumento.

En lo que a electrónica se refiere, se modelan los sensores mediante el circuito equivalente BVD, posicionado en la literatura como idóneo para el estudio del transductor en frecuencias cercanas a la de resonancia. Contando con ese modelo, se logra desarrollar un circuito de alimentación que derive en un adecuado comportamiento y, en consecuencia, un pulso ultrasónico de magnitud suficiente para ser eficazmente empleado por el procesador NXP. Para asegurar la fiabilidad y robustez del equipo electrónico, se diseña y fabrica una placa de circuito impreso que se monta directamente sobre el procesador y se alimenta externamente. Esta placa se encarga de excitar los emisores y amplificar la señal recibida por los receptores. Una vez que esta señal llega al procesador, es éste quien se encarga de tratar la señal y extraer un índice proporcional a la velocidad del viento. Este proceso puede realizarse de diversas maneras, y en este trabajo se desarrollan dos métodos, aplicándose uno de ellos. Consecuentemente, se sientan las bases para el progreso de la Estación Meteorológica en la Facultad de Ingeniería.

Por otro lado, se estudió el comportamiento del anemómetro como un cuerpo expuesto a corrientes de aire, buscando minimizar su inserción y maximizar la durabilidad del instrumento. Utilizando principios de aerodinámica, estudios por fluidodinámica computacional (CFD) y diseño iterativo, se crea un anemómetro cuyo diseño mantiene baja la fuerza desarrollada sobre el instrumento, incluso para vientos fuertes. Asimismo, la baja inserción y dimensionamiento de la tríada de varillas aseguran la exactitud en la medición. Se considera, además, la distribución polar de la emisión y recepción ultrasónica, diseñando un reflector con superficie elipsoidal que, aún con un reducido tamaño, dirige las ondas del emisor al receptor. Considerando la exposición al ambiente del instrumento, se seleccionan materiales que, además de cumplir con los requerimientos mecánicos, posean resistencia a los elementos.

Finalmente, se hace uso del túnel de viento presente en la Facultad de Ingeniería para ensayar el instrumento desarrollado. Los resultados del contraste realizado denotan un buen comportamiento del anemómetro de la Estación Meteorológica. Sin embargo, se hace presente la propuesta de contar con un instrumento patrón de mayor precisión y un ensayo *in situ*, deshaciéndose del ruido en la señal que encarece los resultados.

En conclusión, se diseña, fabrica e implementa un anemómetro de tecnología ultrasónica que incorpora un desarrollo polifacético: se trabaja la disposición de los sensores, el acabado superficial del anemómetro, la generación y recepción de los pulsos ultrasónicos, el tratamiento de la señal recibida y el diseño aerodinámico del instrumento, entre otros. Los resultados obtenidos son logrados, pero existe margen de mejora. En ese contexto, se proponen futuras tareas en pos de la continuación y el progreso del proyecto.

Bibliografía

- [1] GreenLane. Historia del anemómetro - 4 anemómetros y sus inventores. <https://www.greelane.com/es/humanidades/historia-y-cultura/history-of-the-anemometer-1991222/>, 2017.
- [2] Irene Suomi and Timo Vihma. Wind gust measurement techniques—from traditional anemometry to new possibilities. *Sensors*, 18(4):1300, 2018.
- [3] L Kristensen. The perennial cup anemometer. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 2(1):59–75, 1999.
- [4] Luis González Sotelino, Nicolas De Coster, Peter Beirinckx, and Pieter Peeters. Intercomparison of cup anemometer and sonic anemometers on site at uccle/belgium. In *Proceedings of the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2012), Brussels, Belgium*, pages 16–18, 2012.
- [5] DT Wasan and KM Baid. Measurement of velocity in gas mixtures: Hot-wire and hot-film anemometry. *AIChE Journal*, 17(3):729–731, 1971.
- [6] John C Wyngaard and Shi-Feng Zhang. Transducer-shadow effects on turbulence spectra measured by sonic anemometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2(4):548–558, 1985.
- [7] NG Mortensen. Wind measurements for wind energy applications. a review. In *16th British Wind Energy Association Conference*, pages 353–360. Mechanical Engineering Publications Limited, 1994.
- [8] Joshua Earnest and Sthuthi Rachel. *Wind power technology*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2019.
- [9] DC Anderson, J Whale, PO Livingston, and D Chan. Rooftop wind resource assessment using a three-dimension ultrasonic anemometer. 2008.
- [10] J Whale, TJ Lyons, HM Dreher, and DM Chand. Investigating the use of a mesoscale model as part of a feasibility study for a rooftop wind system. 2008.
- [11] James F Manwell, Jon G McGowan, and Anthony L Rogers. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [12] ANSI/IEEE Std 176-1987. Ieee standard on piezoelectricity, 1987.
- [13] Standard Definitions. Methods of measurement for piezoelectric vibrators. *IEEE Std 177*, 1966.
- [14] N Radeljic-Jakic. Integrated readout circuit for cross-correlation based ultrasonic ranging. 2015.
- [15] Murata Electronics. Piezoelectric ceramic sensors (piezotite). Catalogue, 2014.
- [16] John D Anderson. *Fundamentals of aerodynamics*. McGraw Hill, 2009.

- [17] Nancy Hall. What is drag? <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/drag1.html>, 2015. NASA.
- [18] Julian Happian-Smith. *An introduction to modern vehicle design*. Elsevier, 2001.
- [19] Barnes W McCormick. Aerodynamics. *Aeronautics, and Flight Mechanics*, 1979.
- [20] Jiyuan Tu, Guan Heng Yeoh, and Chaoqun Liu. *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [21] Fadl Moukalled, L Mangani, Marwan Darwish, et al. *The finite volume method in computational fluid dynamics*, volume 113. Springer, 2016.
- [22] Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe, and Ervin Bossanyi. *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, 2011.
- [23] UNMdP Laboratorio de Instrumentación y Control (LIC) de la Facultad de Ingeniería. Datos meteorológicos anuales (2017, 2018 y 2019). Accedido: 11-05-2020.
- [24] CA Lopez-Villalobos, O Rodriguez-Hernandez, R Campos-Amezcu, Guillermo Hernandez-Cruz, OA Jaramillo, and JL Mendoza. Wind turbulence intensity at la ventosa, mexico: A comparative study with the iec61400 standards. *Energies*, 11(11):3007, 2018.
- [25] Weather Spark. Clima promedio en mar del plata, argentina. <https://es.weatherspark.com/y/29078/Clima-promedio-en-Mar-del-Plata-Argentina-durante-todo-el-ano>, 2020.
- [26] Diego Trapero. Todo sobre el petg en impresión 3d. <https://bitfab.io/es/blog/petg-impresion-3d/>, 2020.
- [27] Thomas Sanladerer. Things you should know about petg. <https://toms3d.org/2018/02/05/things-know-petg/>, 2018.
- [28] Hironori Kondo. PETG vs ABS: The differences – simply explained. <https://all3dp.com/2/petg-vs-abs-3d-printing-filaments-compared/>, 2019.
- [29] FelFil. Petg filament for 3d printing: Learning about plastic materials. <https://felFil.com/petg-filament/?v=5b61a1b298a0>, 2018.
- [30] Cátedra de Materiales Mecánicos. *Aceros Inoxidables*. Dpto. Ingeniería Mecánica, FI UNMdP, 2019.
- [31] D Stainless-Steel Sheet. Astm a 240/a 240m. *Type*, 304:18–8.
- [32] M Jarraud. Guide to meteorological instruments and methods of observation (wmo-no. 8). *World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland*, 29, 2008.
- [33] Cátedra de Mediciones Eléctricas. *Apunte Complementario: Expresión de la Incertidumbre*. Dpto. Ingeniería Eléctrica, FI UNMdP, 2020.

Capítulo 2

Pluviómetro

2.1. Introducción

Un pluviómetro es un instrumento meteorológico que recoge y cuantifica la precipitación. En este capítulo se describe el pluviómetro de cubeta basculante desarrollado en el proyecto.

2.1.1. Objetivos

Se busca diseñar, fabricar e implementar un pluviómetro de cubeta basculante (o *tipping bucket*, en inglés) de bajo error y confiable respuesta. Para ello, se plantean los siguientes objetivos:

- Estudiar los pluviómetros disponibles en la actualidad
- Diseñar pluviómetro de manera tal de obtener una respuesta consistente y óptima para la cuantificación de la precipitación
- Estudiar las distintas fuentes de error del pluviómetro y eliminar o minimizar su influencia en la medición
- Construir un instrumento preciso y robusto que pueda estar permanentemente instalado y funcionando en la Facultad de Ingeniería de la UNMdP para evaluar cómo la lluvia afecta el desempeño de un generador eólico urbano

2.1.2. Estructura del capítulo

El capítulo está organizado de la siguiente manera. Primero, en 2.1.3, se enumeran distintos tipos de pluviómetros disponibles comercialmente a la fecha. Más adelante, en 2.2, se describe cómo funciona el pluviómetro, definiendo los parámetros necesarios. En 2.3 se presenta el diseño, enumerando piezas y ensamblaje y explicitando los materiales utilizados. El capítulo continúa con la implementación del instrumento, en 2.4, donde se describen ensayos y la implementación del instrumento. Finalmente, se escriben las conclusiones del capítulo en 2.5.

2.1.3. Antecedentes

Cualquier instrumento capaz de recoger y medir cantidad de lluvia se denomina *pluviómetro*. La cantidad total de precipitación que llega al suelo en un dado período se expresa en términos de profundidad vertical de agua que cubriría sobre una proyección horizontal de la superficie terrestre, usualmente en milímetros [1]. La intensidad de precipitación, por su parte, se mide en profundidad por hora (milímetros por hora). Por lo general, resulta de utilidad registrar las mediciones por hora, cada 3 horas y por día, según la aplicación.

Los pluviómetros pueden dividirse en tres clases principales: los tipo balanza, los tipo cubeta basculante (*tipping bucket*, en inglés) y los del tipo flotante.

Pluviómetro estándar

El pluviómetro más comúnmente utilizado consiste de un colector situado debajo de un embudo donde el agua y la nieve se acumulan (figura 2.1). Es necesario un observador que registre la medida y vacíe el contenedor entre períodos de observación (sin grabación). Este instrumento es el más primitivo pero, aún hoy, sigue siendo aceptado y sus mediciones son exactas. De hecho, este tipo de pluviómetro se utiliza según normativa para la calibración periódica de otros pluviómetros [1].



Figura 2.1: Pluviómetro estándar sin grabación

Esta clase de instrumento es utilizada en el presente trabajo para contrastar la medida del pluviómetro desarrollado, operando como patrón.

Pluviómetro balanza

En estos instrumentos, el peso de un contenedor junto con la precipitación acumulada dentro de él es medido o grabado de forma continua. Generalmente, utilizan un mecanismo con resorte pero carecen de la capacidad de auto-vaciado. Por lo tanto, requieren que una persona se encargue de esta operación periódicamente. Este tipo de instrumento es particularmente útil cuando quiere medirse conjuntamente precipitación líquida y sólida y se presenta en la figura 2.2.

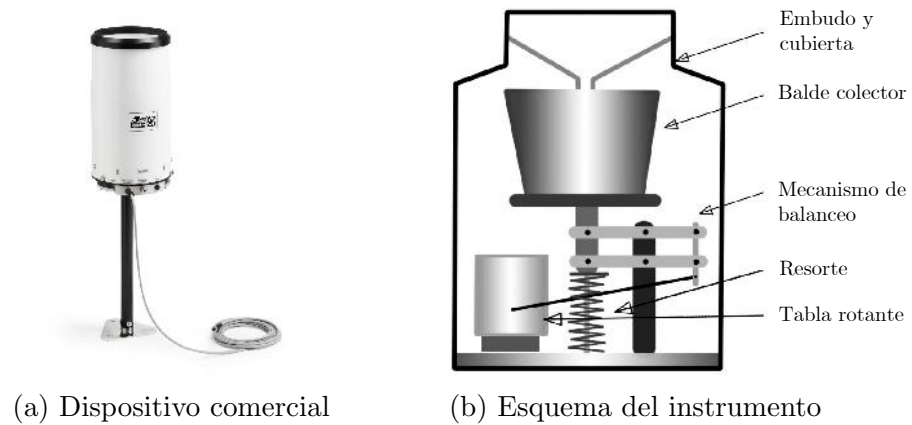


Figura 2.2: Pluviómetro tipo balanza

Los errores de mayor peso asociados a este tipo de pluviómetro son los siguientes [1]:

- Error debido a la pérdida por mojado de paredes de colector o nieve retenida en él.
- Error debido a evaporación dentro del contenedor.
- Error sistemático mecánico o de muestreo debido a la respuesta dinámica del instrumento.
- Error aleatorio por oscilación de sistema contenedor-resorte al soplar viento por encima.

Pluviómetro flotante

En este tipo de instrumento, la lluvia pasa a una cámara o recipiente donde hay un flotante liviano que, a través de algún mecanismo simple, indica el nivel de agua (ver figura 2.3). Ajustando las dimensiones del colector, el flotante y el recipiente, es posible obtener la escala deseada.

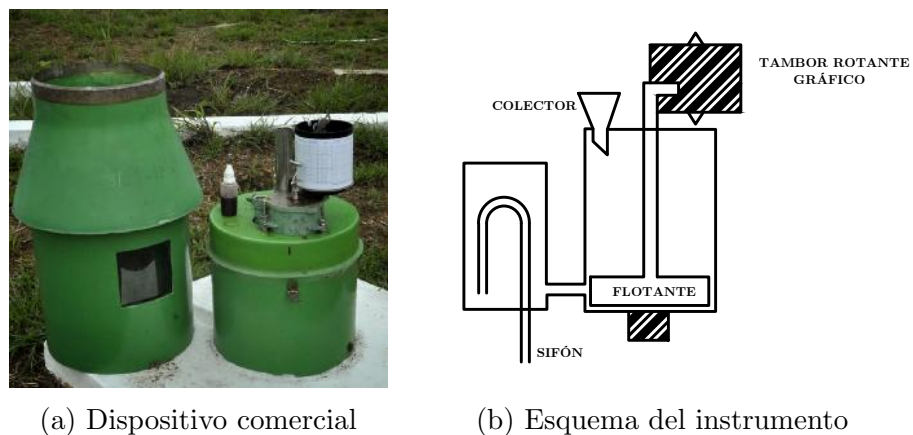


Figura 2.3: Pluviómetro flotante

Las fuentes de error para este tipo de pluviómetro, a excepción de la oscilación del sistema contenedor-resorte, son las mismas que para el pluviómetro de balanza [1].

Pluviómetro de cubeta basculante

Los pluviómetros *tipping-bucket* son usados para medir lluvia acumulada y también su tasa de caída. Se conforman por un colector o embudo y el propio dispositivo de medición (ver figura 2.4). Está compuesto por dos cubetas y, cuando una se llena, el dispositivo bascula y queda lista para empezar a llenarse la otra cubeta. Dicha basculación puede medirse a través de algún sensor o interruptor y se comunica con una computadora o dispositivo similar que registre la medición. La resolución del instrumento depende del tamaño de las cubetas. Según las dimensiones del colector, existe una relación entre volumen de agua que cae sobre el pluviómetro V_{pluv} y el formato estándar de reporte en *milímetros*. Siendo $\phi_{colector}$ el diámetro del colector de sección circular, en ecuaciones:

$$\frac{V_{pluv}}{250 \pi \phi_{colector}^2} = H_{precip} \quad (2.1)$$

donde se obtiene H_{precip} en milímetros, siendo V_{pluv} expresado en mililitros y el diámetro $\phi_{colector}$, en metros.

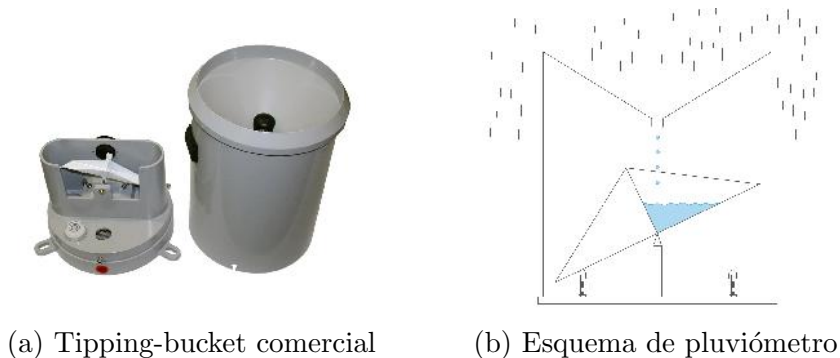


Figura 2.4: Pluviómetro tipo tipping-bucket

Este pluviómetro es el más utilizado actualmente debido al mínimo mantenimiento y su funcionamiento autónomo [2, 3]. Las fuentes de error para este tipo de pluviómetro son enunciadas en 2.2.2. Debido a su relativamente alta precisión, la característica de auto-vaciado y su funcionamiento autónomo, es el tipo de pluviómetro seleccionado para desarrollar en el presente trabajo.

2.2. Medición

2.2.1. Principio de medición

La precipitación cae sobre un colector y se dirige a la cubeta basculante que realiza la medición. La pieza basculante (ver figura 2.5) tiene dos posiciones de equilibrio y el agua, al caer, se deposita en una de las dos cubetas. Cuando el volumen de agua allí acumulado alcanza un valor prefijado, la pieza alterna posición y descarga el agua. Al hacerlo, se realiza la lectura del cambio de posición y se repite el proceso con la segunda cubeta.

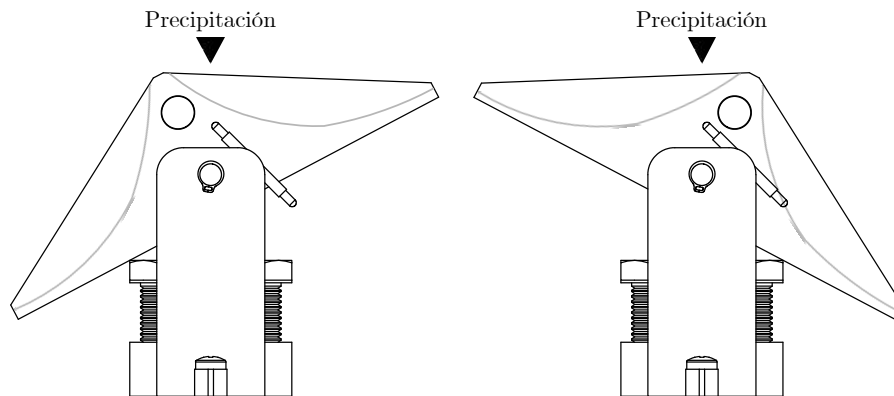
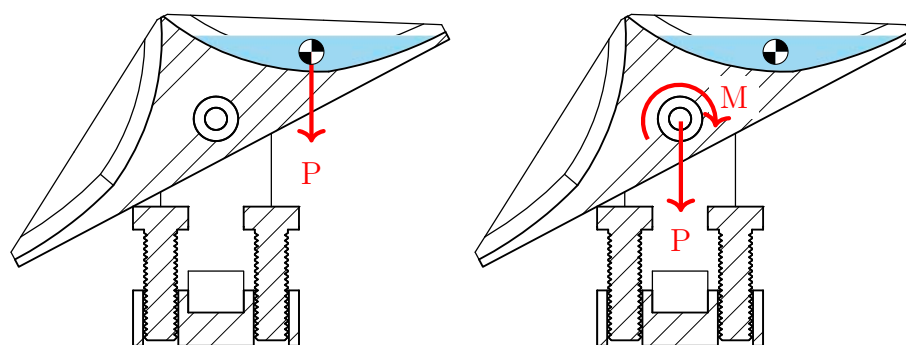


Figura 2.5: Posiciones de equilibrio del pluviómetro

El volumen de agua que se traduce en un momento angular respecto del eje de rotación (ver figura 2.6) y provoca la alternancia entre las dos posiciones de equilibrio es ajustable mediante dos tornillos ubicados sobre la base. Dicha operación compone parte de la calibración (ver sección 2.4).



(a) Peso del agua en cubeta (b) Traslación al centro de rotación

Figura 2.6: Esquema de fuerzas y momentos en pluviómetro

La lectura se lleva a cabo a partir de la interacción de un interruptor magnético y un imán cilíndrico de neodimio. Como se observa en la figura 2.5, existe una posición de equilibrio para la cual el imán y el interruptor se acercan. En esta posición, el

interruptor está cerrado, y dicha situación se lee electrónicamente. En cambio, en la otra posición de equilibrio el imán y el interruptor están alejados y éste último permanece abierto, situación que (igualmente) es leída. Entonces, se afirma que cada vez que la cubeta bascula y descarga cierto volumen prefijado de agua, el interruptor alterna estado.

2.2.2. Fuentes de error y correcciones

Los errores asociados a la medición de precipitación en este tipo de instrumento pueden dividirse en dos categorías: error de captura y error de conteo.

- Error de captura: está relacionado con la habilidad del pluviómetro de representar la intensidad o cantidad de precipitación que hubiera caído en el suelo sobre un área equivalente a la cubierta por el instrumento si éste no estuviera presente.
 - Errores inducidos por el viento
 - Evaporación de precipitación antes del conteo
 - Gotas que salpican hacia dentro o afuera del colector
 - Mojado de las superficies del pluviómetro
- Error de conteo: está relacionado con la habilidad del pluviómetro de reportar correctamente la cantidad e intensidad de precipitación.
 - Pérdidas mecánicas a diferentes intensidades de precipitación
 - Repetibilidad del mecanismo basculante
 - Bloqueos de los componentes mecánicos
 - Errores electrónicos, de algoritmo o de registro

De los errores de captura, el de más peso es el producido por el viento [3]. En su presencia, algunas gotas de agua se desvían y no logran ingresar al colector. Por ende, el instrumento tiene una tendencia a medir de menos conforme aumenta la velocidad del viento; efecto que también se acentúa para bajas intensidades de precipitación. Diversos estudios se han realizado a lo largo de los años [4–7] en búsqueda de una curva de corrección que caracterice este fenómeno. Sin embargo, la relación entre la captura y la velocidad del viento es compleja y no se ha logrado, a la fecha, obtener una corrección universal. La literatura propone utilizar un diseño aerodinámico del colector (ver figura 2.7), lo cual logra minimizar considerablemente la influencia de esta fuente de error [7, 8].

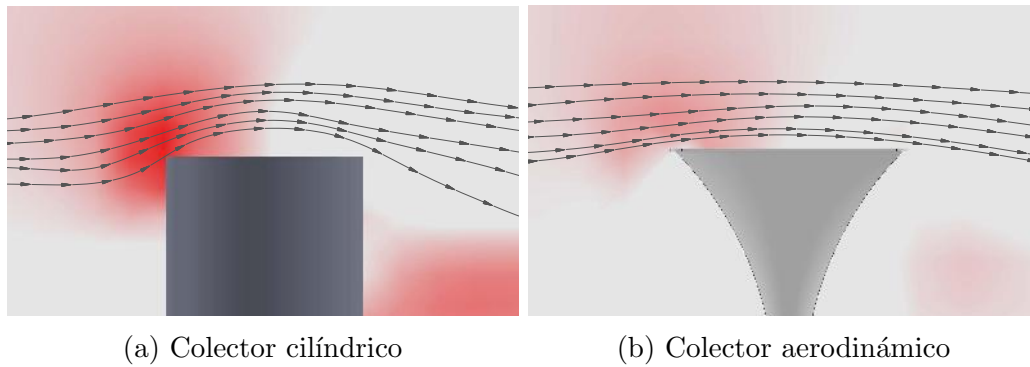


Figura 2.7: Efecto del viento sobre el pluviómetro según forma del colector

De los errores de conteo, el de mayor influencia es el de muestreo [3], dependiente del método utilizado para estimar la intensidad de precipitación. A pesar de que la medición de profundidad de precipitación está inafectada, el cálculo de la intensidad está fuertemente relacionado con la naturaleza discreta del pluviómetro de cubeta basculante. Siendo I_p la intensidad de precipitación en mm/h , A_p la profundidad de precipitación en mm y Δt_p un intervalo de tiempo en h , puede escribirse:

$$I_p = \frac{A_p}{\Delta t_p} \quad (2.2)$$

Este error es inversamente proporcional al intervalo de tiempo Δt_p y a la resolución del instrumento y depende del algoritmo utilizado [3, 9–11]. Por lo tanto, reducir el volumen de agua involucrado en cada *tip* se traduce en un instrumento más preciso. En cuanto al algoritmo elegido, el pluviómetro reporta la profundidad de precipitación según el número de cambios de posición. La intensidad instantánea, entonces, se extrae de esa medición de precipitación acumulada mediante interpolación. Existen diversos métodos de ajuste; no obstante, el que está asociado a un menor error es el de *interpolación polinomial cúbica* (presentado en la figura 2.8) [12, 13]. Cabe destacar que el reporte de la intensidad de precipitación es específico de ciertas aplicaciones del pluviómetro (ver sección 2.4) y no es tenido en cuenta en el presente trabajo.

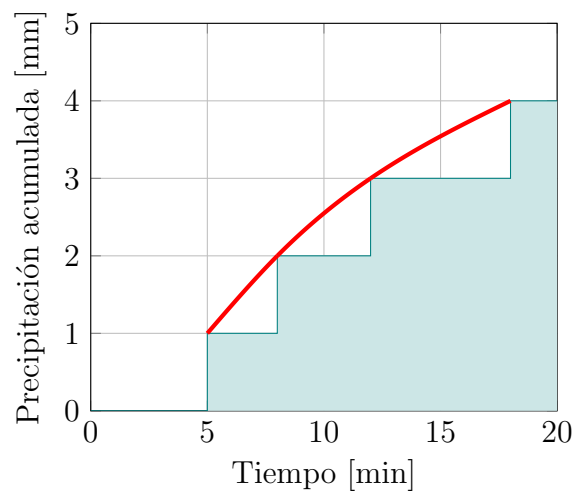


Figura 2.8: Interpolación polinomial cúbica para intensidad de precipitación

Las restantes fuentes de error pueden minimizarse a través de un buen diseño, una favorable selección de materiales y periódico mantenimiento [11] (ver sección 2.4).

2.3. Diseño

2.3.1. Regulación de caudal

Para un comportamiento óptimo, es importante que el agua caiga consistentemente en el mismo lugar para cada una de las dos posiciones de la cubeta. Con este propósito, se incorpora un orificio calibrado entre el colector y la propia cubeta basculante. Esto no sólo garantiza el posicionamiento de la gota al caer sino que también es una restricción al paso del agua. El caudal que fluye por el orificio se observa en la figura 2.9 y, en ecuaciones, puede escribirse:

$$Q = K_F \cdot \sqrt{h} \cdot \phi_{orif}^2 \quad (2.3)$$

donde $K_F = 145,93 \frac{\sqrt{cm}}{min}$ es una constante que depende del fluido en estudio y del acabado superficial de los alrededores del orificio, h es la altura de la columna de agua en metros y ϕ_{orif} es el diámetro del orificio en milímetros. Q , por su parte, es el caudal en $\frac{ml}{min}$ [14].

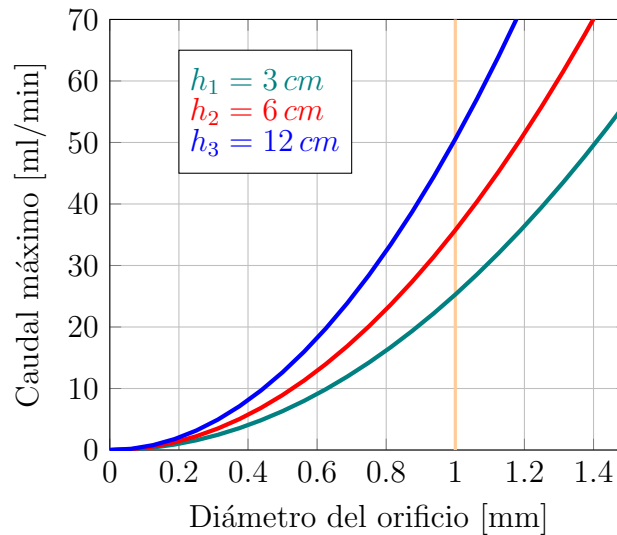


Figura 2.9: Caudal máximo según diámetro de orificio para columnas de agua

Partiendo de (2.1) y (2.3), puede escribirse para un colector de sección circular y diámetro $\phi_{colector}$:

$$h = \frac{240}{\pi \phi_{colector}^2} \left(\frac{1}{K_F \cdot \phi_{orif}^2} \right)^2 \cdot Q^2 \quad (2.4)$$

con h en milímetros, $\phi_{colector}$ en metros, ϕ_{orif} en milímetros y Q en $\frac{mm}{h}$.

2.3.2. Presentación de diseño

El pluviómetro desarrollado en el presente trabajo puede observarse en la figura 2.10. La minimización de las fuentes de error, la simplicidad de ensamblaje y la durabilidad fueron las prioridades de diseño y selección de componentes y materiales.

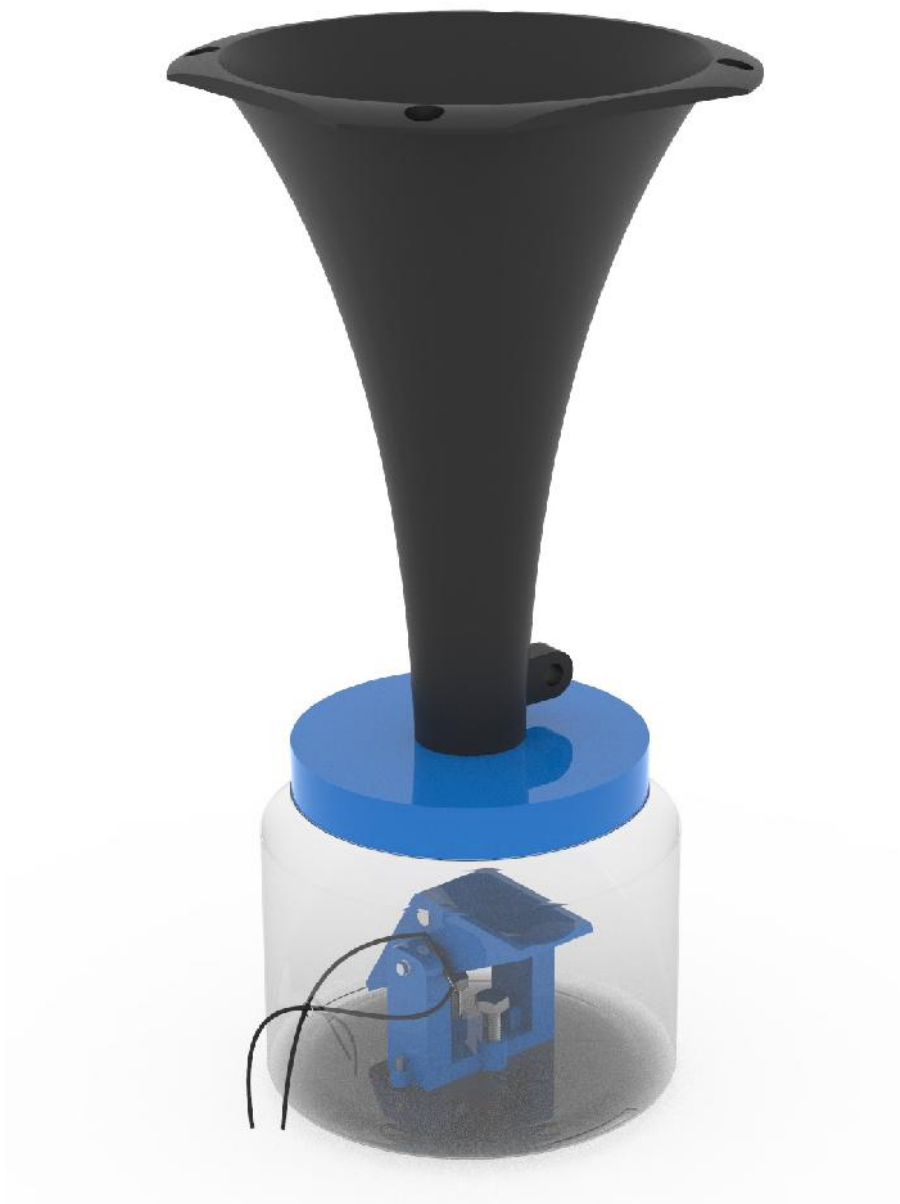


Figura 2.10: Pluviómetro de cubeta basculante desarrollado

▷ **Selección de recipiente y colector**

Para la selección del colector se consideraron las dimensiones del mismo (que definen la resolución del instrumento) y el diseño aerodinámico (ver sección 2.2.2), colaborando en la reducción de los errores de captura. En consecuencia, se utiliza un difusor (ver figura 2.11a) cuyas características se encuentran en la tabla 2.1.

$\phi_{colector}$	146	mm
Diámetro de garganta	25,4	mm
Altura de difusor	237	mm

Tabla 2.1: Especificaciones de colector

Diámetro exterior	135	mm
Diámetro de entrada colector	35	mm
Altura de contenedor	110	mm

Tabla 2.2: Especificaciones de contenedor

En un extremo del colector se encuentra la tapa con la boquilla reguladora de caudal. Esto es logrado (ver sección 2.3.1) mediante un único orificio en la misma de diámetro $\phi_{orif} = 1$ mm (ver figura 2.11b).

Por otro lado, el contenedor seleccionado es cilíndrico y alberga la cubeta basculante junto a su mecanismo y contiene perforaciones para su sujeción, la colocación del colector y la salida del conector correspondiente al interruptor magnético. Además, en la zona inferior se incorporan ranuras para el desagote del agua. Las características se especifican en la tabla 2.2.

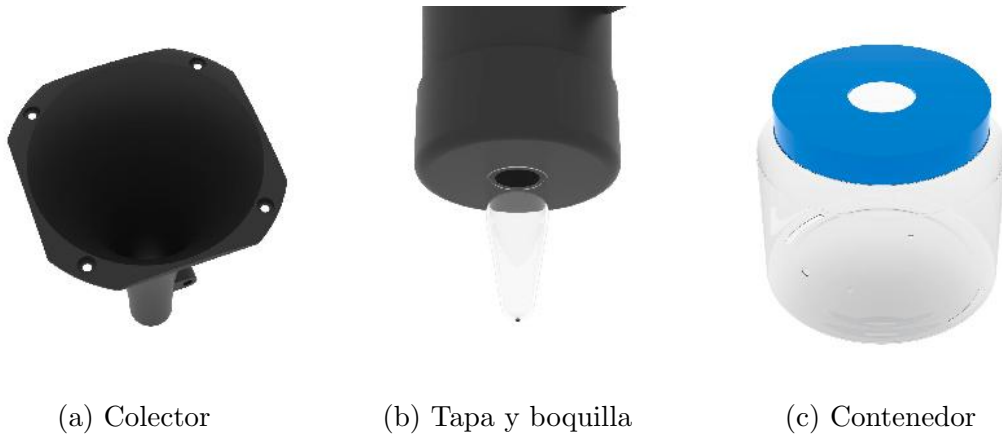


Figura 2.11: Componentes del pluviómetro

▷ Diseño de cubeta basculante

El pluviómetro consta de una cubeta basculante y componentes auxiliares que funcionan como soporte y ajuste del instrumento y se presenta en las figuras 2.12 y 2.13. El reporte de la medición se realiza a través de un interruptor magnético que opera en conjunto con un imán cilíndrico incorporado a la cubeta.



Figura 2.12: Vista perspectiva de ensamblaje de pluviómetro

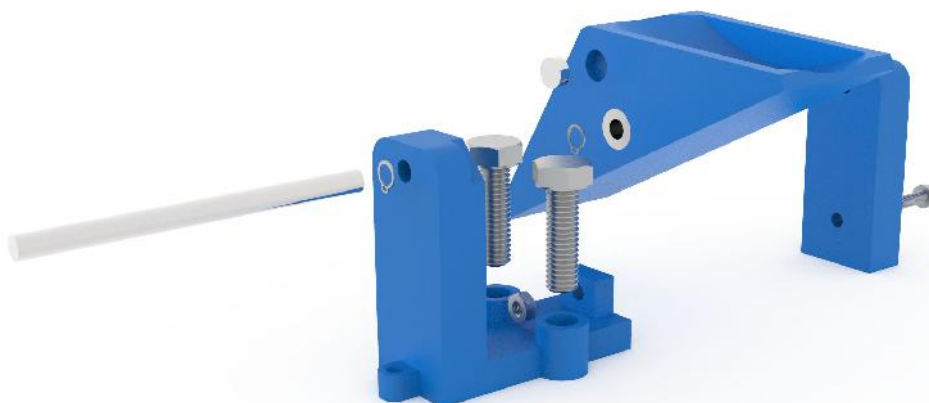


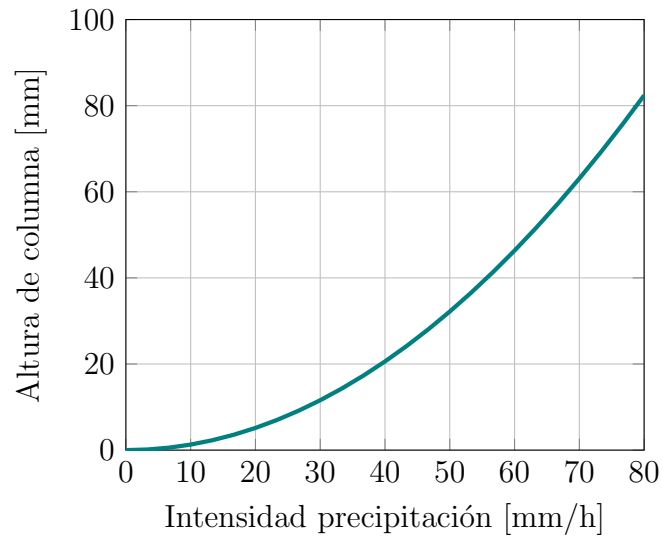
Figura 2.13: Vista explosionada de ensamblaje de pluviómetro

Un sistema de rodamiento por contacto deslizante (o buje) de acero inoxidable permite la rotación de la cubeta basculante, limitada por tornillos de ajuste que definen el volumen de agua que hace que el pluviómetro alterne posición. Estos tornillos utilizan como tuerca los propios orificios de la pieza, diseñados para un ajuste estrecho. De allí se extrae la alta resolución del pluviómetro (expuesta en la tabla 2.3), que lo diferencia de la mayoría de los dispositivos comerciales (ver capítulo 4). Por dimensiones de componentes y ensamblaje, ver dibujos técnicos en apéndice D.

ϕ_{orif}	1	mm
$A_{colector}$	167	cm ²
Volumen de agua umbral	1	ml
Resolución pluviómetro	0,06	mm

Tabla 2.3: Parámetros de pluviómetro

La característica de regulación de caudal del pluviómetro del presente trabajo está representada en la figura 2.14 de acuerdo a la ecuación (2.4).

Figura 2.14: Columna de agua según intensidad de precipitación para $\phi = 1 \text{ mm}$

2.3.3. Materiales y fabricación

De igual manera que para el anemómetro (ver sección 1.4.5), la construcción del pluviómetro involucra fabricación aditiva (impresión 3D) y el mecanizado de acero. El plástico elegido, nuevamente, es el PET-G. De los plásticos disponibles en filamento es de los más hidrofóbicos, y se trabaja con los parámetros de impresión en pos de minimizar el “mojado” [15]. Por su parte, el acero inoxidable austenítico AISI 304 es seleccionado por su amplia disponibilidad y resistencia a la corrosión. Esto asegura la durabilidad y robustez del instrumento. Para dibujos de las piezas, ver apéndice D.

2.4. Ensayos e implementación

2.4.1. Calibración

La Organización Meteorológica Mundial reconoce a los pluviómetros de cubeta basculante y establece recomendaciones para su calibración y mantenimiento. El documento provisto diferencia el proceso a seguir según la utilización del pluviómetro en cuestión: para lectura de cantidad de precipitación o para lectura de intensidad de precipitación. Esta última categoría corresponde a aquellos usuarios cuyo fin es interpretar patrones de precipitación, modelado de eventos de precipitación y pronósticos [1]. Para el pluviómetro del presente trabajo, entonces, se abordará el proceso de calibración recomendado por la WMO para lectura de cantidad de precipitación. Por otro lado, la WMO aconseja realizar calibraciones de mantenimiento periódicas, basadas en comparar la medición del instrumento con la captura de un recipiente cilíndrico graduado colector luego de un evento de precipitación [1].

La calibración consiste en pasar una cantidad conocida de agua a través del pluviómetro y hacia la cubeta, ajustando el mecanismo asociado hasta que el cambio de posición se produzca para el volumen de agua de diseño. La información a registrarse se presenta a continuación:

- Temperatura ambiente: 21 °C
- Humedad ambiental relativa: 60 %
- Presión atmosférica: 1014 hPa
- Tipo de agua utilizada: Corriente (subterránea)
- Temperatura del agua: 19 °C
- Fecha y hora de realización: 18/08/2020 a las 10:26 a.m.

Para la tarea, se utilizó una jeringa graduada de 4 ml de capacidad cuya incertidumbre viene dada por la normativa IEC 7886-1 y toma la forma descrita en la tabla 2.4 donde $V_{nominal}$ es el volumen de capacidad nominal de la jeringa y $V_{expulsado}$ es el volumen de agua que expulsa la jeringa, equivalente al volumen de agua que lleva al cambio de posición del pluviómetro.

	si	⇒	Incertidumbre I
$V_{nominal} < 5$ ml	$V_{expulsado} < \frac{V_{nominal}}{2}$		$1.5\% V_{nominal} + 2\% V_{expulsado}$
$V_{nominal} < 5$ ml	$V_{expulsado} \geq \frac{V_{nominal}}{2}$		$5\% V_{expulsado}$
$V_{nominal} \geq 5$ ml	$V_{expulsado} < \frac{V_{nominal}}{2}$		$1.5\% V_{nominal} + 1\% V_{expulsado}$
$V_{nominal} \geq 5$ ml	$V_{expulsado} \geq \frac{V_{nominal}}{2}$		$4\% V_{expulsado}$

Tabla 2.4: Incertidumbre de medición con jeringa

Una vez realizada la calibración mediante los tornillos de ajuste incorporados al pluviómetro, se procedió a efectuar 25 mediciones por cubeta, las cuales están especificadas en la tabla 2.5 (de forma gráfica en la figura 2.15) y cuyo fin es verificar el ajuste.

Cubeta izquierda		Cubeta derecha	
$V_{expulsado}$ [ml]	$\pm I$ [ml]	$V_{expulsado}$ [ml]	$\pm I$ [ml]
1,00	0,08	1,02	0,08
0,95	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,02	0,08
1,00	0,08	1,05	0,08
1,05	0,08	1,05	0,08
1,00	0,08	1,05	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,05	0,08	1,00	0,08
1,05	0,08	1,05	0,08
1,02	0,08	1,00	0,08
1,05	0,08	1,05	0,08
1,02	0,08	1,00	0,08
1,05	0,08	1,05	0,08
1,00	0,08	1,05	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,02	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,05	0,08
1,00	0,08	1,05	0,08
1,00	0,08	1,00	0,08
1,02	0,08	1,00	0,08
1,00	0,08	1,02	0,08

Tabla 2.5: Calibración de pluviómetro de cubeta basculante

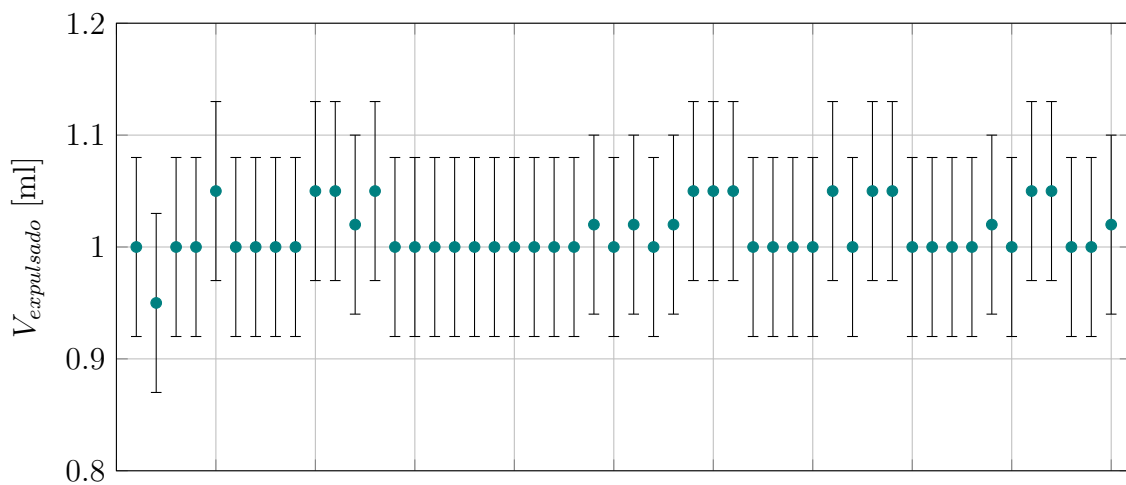


Figura 2.15: Puntos de calibración de pluviómetro

Cuantificación de fuentes de error

En un evento de precipitación, existe un error sistemático que se comete y debe incorporarse al post-procesamiento para incrementar la exactitud del instrumento. Se analiza como fuente de error sistemático el mojado de los elementos que componen la descarga de agua hacia la cubeta basculante: el colector, la tapa inferior y la boquilla.

La hidrofobia de una superficie se caracteriza por el ángulo de contacto. Éste se define como el ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con una superficie sólida (ver figura 2.16) [19]. En cuanto al colector, la hidrofobia de la superficie interior del difusor determina qué volumen de agua quedará “adherida” a la superficie durante una lluvia. Si el ángulo de contacto es 180° , se dice que la superficie es totalmente hidrofóbica y el volumen de agua retenido en el colector será nulo. Sin embargo, ese valor representa una superficie ideal y no caracteriza al colector seleccionado. Además, dicho volumen retenido depende del tamaño de la gota de la precipitación. En conclusión, el ángulo de contacto de la superficie interior del colector inferior a 180° genera un error en la medición y su estimación está sujeta a múltiples variables. Consecuentemente, no es cuantificado en el presente trabajo.

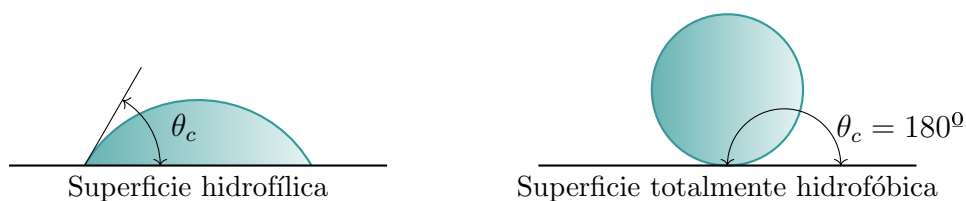


Figura 2.16: Ángulo de contacto de gota de agua en superficie

Por otro lado, el sistema de descarga (tapa y boquilla) del pluviómetro genera un error sistemático debido al mojado de las superficies. Específicamente, los efectos de tensión superficial en la punta de la boquilla impiden que se descargue todo el agua, manteniéndose dentro de ella un volumen fijo. Este error se cuantifica y es corregido en la medición.

Error sistemático en sistema de descarga

Para incrementar la exactitud del pluviómetro desarrollado, puede reducirse el error sistemático provocado por la acumulación de líquido en el sistema de descarga (tapa y boquilla) del instrumento (ver figura 2.17). Para ello, este volumen de agua retenido debe cuantificarse y, posteriormente, corregirse.

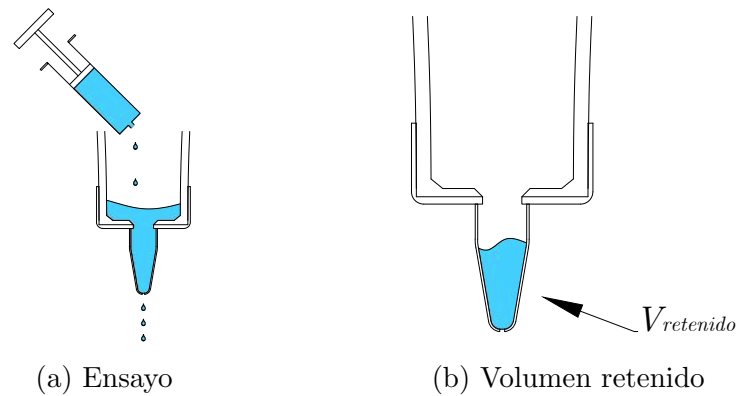


Figura 2.17: Calibración de error sistemático por mojado

En la experimentación, se parte con todas las superficies en análisis secas y se incorporan distintos volúmenes de agua y se mide el volumen descargado por el sistema en cada iteración. Las condiciones ambientales a registrar se presentan a continuación:

- Temperatura ambiente: 22 °C
- Humedad ambiental relativa: 60 %
- Presión atmosférica: 1025 hPa
- Tipo de agua utilizada: Corriente (subterránea)
- Temperatura del agua: 19 °C
- Fecha y hora de realización: 07/09/2020 a las 05:42 p.m.

Se realizarán ensayos con jeringa de 4 ml, 5 ml, 6 ml y 10 ml. La incertidumbre I_{sal} asociada a la medición con jeringa viene dado por la normativa IEC 7886-1. El procedimiento propuesto es el siguiente:

- 1 Secar todas las superficies interiores del sistema de descarga
- 2 Ingresar volumen conocido de agua ($V_{nominal}$ de jeringa)
- 3 Medir volumen egresado de agua V_{sal}
- 4 Repetir operación n veces, tal que $V_{sal}(n) - V_{nominal}(n) \leq \frac{I_{sal}(n)}{2}$

Los resultados se encuentran enunciados en la tabla 2.6 y la figura 2.18. El error sistemático analizado, finalmente, resulta:

$$V_{retenido} = (2,00 \pm 0,26) \text{ ml} \quad (2.5)$$

o lo que es lo mismo, dadas las dimensiones del pluviómetro:

$$h_{retenido} = (0,120 \pm 0,016) \text{ mm} \quad (2.6)$$

Este volumen retenido (o altura de precipitación retenida) es compensado a través de la programación del sistema de reporte (ver capítulo 3), anulando así su influencia.

Iteración	$V_{nominal}$ [ml]	V_{sal} [ml]	I_{sal} [ml]	$V_{retenido}^{accum}$ [ml]
1	4,00	2,68	0,13	1,32
2	4,00	3,60	0,18	1,72
3	4,00	3,78	0,19	1,94
4	4,00	3,90	0,20	2,04
1	5,00	3,20	0,13	1,80
2	5,00	4,78	0,19	2,02
3	5,00	4,92	0,20	2,10
1	6,00	4,35	0,17	1,65
2	6,00	5,75	0,23	1,90
3	6,00	6,00	0,24	1,90
1	10,00	8,10	0,32	1,90
2	10,00	9,95	0,40	1,95

Tabla 2.6: Error sistemático por mojado

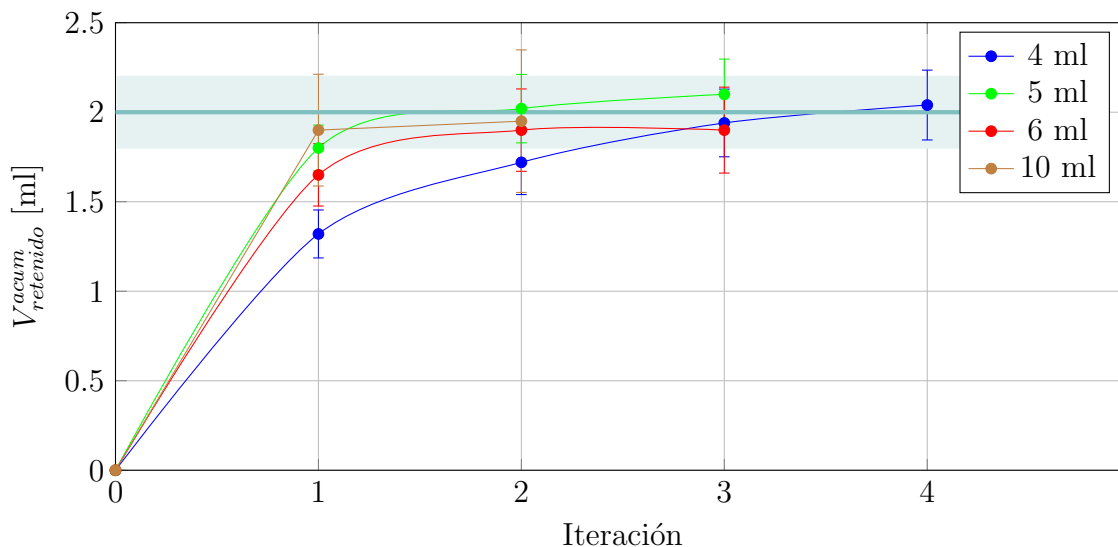


Figura 2.18: Ensayo de calibración de error sistemático

Para la incorporación del error sistemático, se estipula una tasa de evaporación acorde a las condiciones ambientales de Mar del Plata. Con ese propósito, se adquiere como referencia la temperatura media anual de la ciudad [16]. La tasa de evaporación del agua acumulada en el sistema de descarga g_h viene dada en ml/h por la siguiente expresión [17].

$$g_h = 1000 \cdot \Theta \cdot A_{expuesta} \cdot (x_s - x) \quad (2.7)$$

donde $\Theta = 25 + 19 \cdot v_{viento}$ es el coeficiente de evaporación y va expresado en kg/m^2h , $A_{expuesta}$ es el área en m^2 de la superficie expuesta al ambiente y x_s y x corresponden a la saturación de humedad en el aire máxima (para humedad 100 %, ver figura 2.19) y actual, respectivamente y en kg_w/kg_a (masa de agua en masa de aire).

La humedad relativa media durante una precipitación se ubica en 91 % [18] y el valor de x viene calculado para esa condición (la humedad relativa durante una precipitación debe ser 100 % donde ésta se genera, a la altura de la nube). Finalmente, considerando viento calmo (debido a la presencia del colector):

$$g_h = 0,04 \text{ ml/h} = 0,0024 \text{ mm/h} \quad (2.8)$$

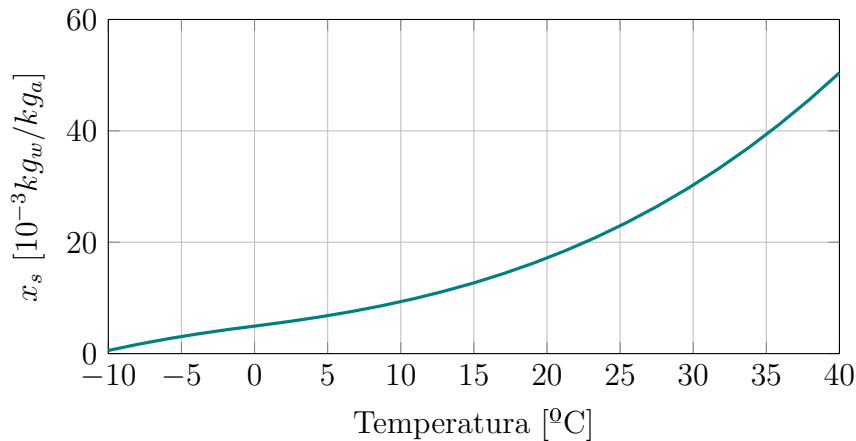


Figura 2.19: Saturación máxima de humedad en aire según temperatura

En consecuencia, para la evaporación de la totalidad del volumen acumulado en el sistema de descarga se requieren 50 horas. Dado un tiempo entre tips t_{et} expresado en h, la corrección del error sistemático puede caracterizarse por la función f_{es} expresada en mm.

$$f_{es}(t_{et}) = \begin{cases} 0,0024 \cdot t_{et} & \text{si } t_{et} < 50 \text{ h} \\ 0,12 & \text{si } t_{et} \geq 50 \text{ h} \end{cases} \quad (2.9)$$

Finalmente, y puesto que el pluviómetro reporta lecturas cada 5 minutos (ver capítulo 3 sección 3.2.3), se puede caracterizar dicho reporte con la función $H_{c/5}$ expresada en mm.

$$H_{c/5} = n_{tips} \cdot 0,06 + f_{es}(t_{et}) \quad (2.10)$$

siendo n_{tips} el número de basculaciones producido dentro del período y 0,06 corresponde a la resolución del pluviómetro en mm.

2.4.2. Resultados experimentales

Se construye el pluviómetro con los parámetros y consideraciones anteriormente enunciados y se presenta en las figuras 2.20 y 2.21. Adicionalmente, se destacan:

- Utilización de conector de audio analógico de 3,5 mm para la comunicación entre el instrumento (interruptor magnético) y el sistema de reporte (ver capítulo 3)
- Incorporación de puntas vinílicas que disminuyen mojado de cubeta (retención de gotas de agua en cubeta luego de haberse vaciado la misma)
- Fijación de interruptor magnético en posición con adhesivo epoxi
- Sellado con silicona de entrada de colector en contenedor
- Sellado con silicona de salida de conector



Figura 2.20: Implementación de pluviómetro desarrollado



Figura 2.21: Vista de cubeta basculante en contenedor

▷ Precipitaciones del 26/9/2020 al 28/9/2020

Durante las fechas enunciadas, en Mar del Plata se registraron precipitaciones y se puso en funcionamiento el pluviómetro desarrollado para ensayar su operación. En ese contexto, se recuperaron los datos registrados por la estación meteorológica Davis (figura 2.23) instalada en la Facultad de Ingeniería (relevantes por la cercanía física siendo que ambos pluviómetros distan aproximadamente 300 metros) y se ubicó un recipiente colector a menos de 2 metros del pluviómetro en ensayo.

En los tres días registrados, existió cierta intermitencia en la caída de precipitación y, por lo tanto, puede dividirse la comparación entre los pluviómetros en tres períodos de precipitación (ver figuras 2.22, 2.24 y 2.25). No obstante, también se presentan en la figura 2.26 las lecturas de ambos instrumentos durante todo el período en el que se registraron lecturas.

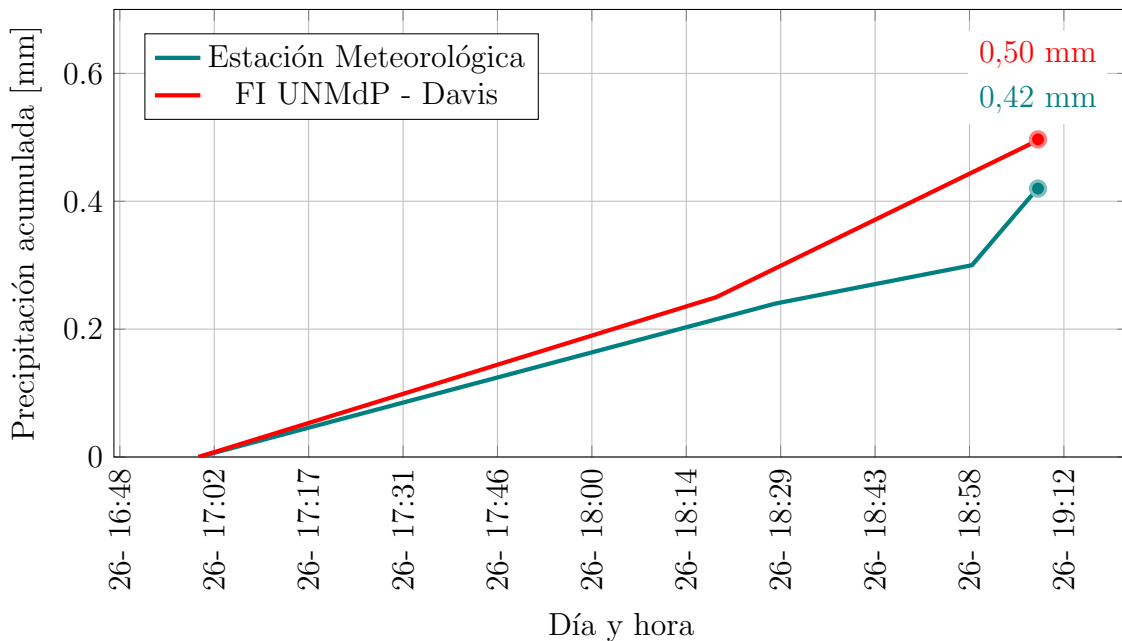


Figura 2.22: Comparación de pluviómetros en primer período



Figura 2.23: Estación meteorológica Davis

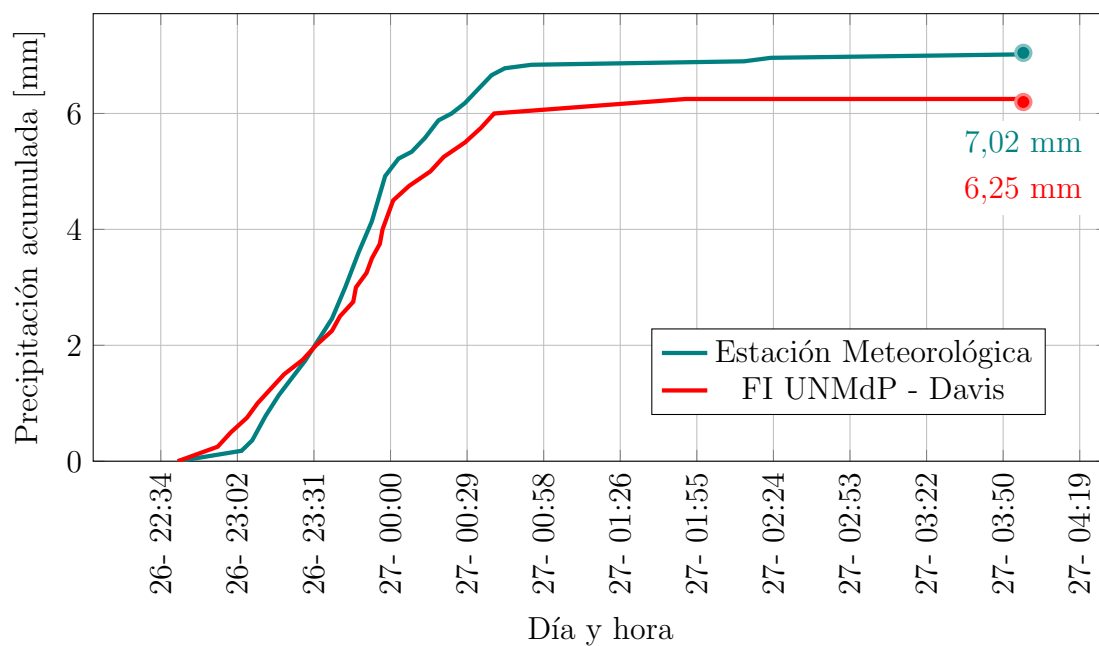


Figura 2.24: Comparación de pluviómetros en segundo período

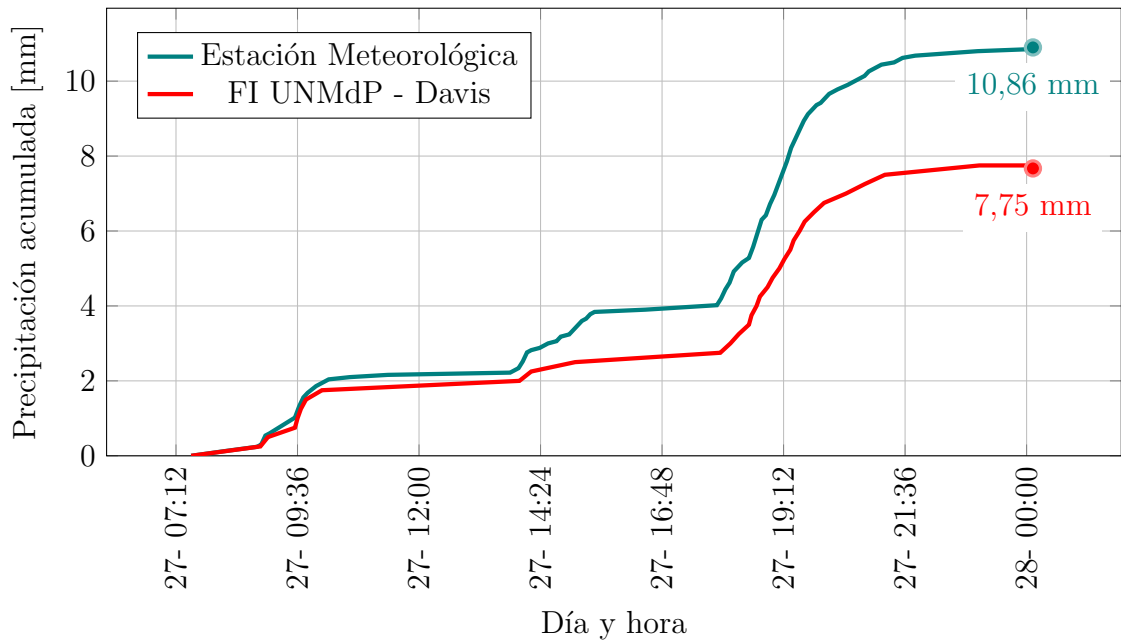


Figura 2.25: Comparación de pluviómetros en tercer período

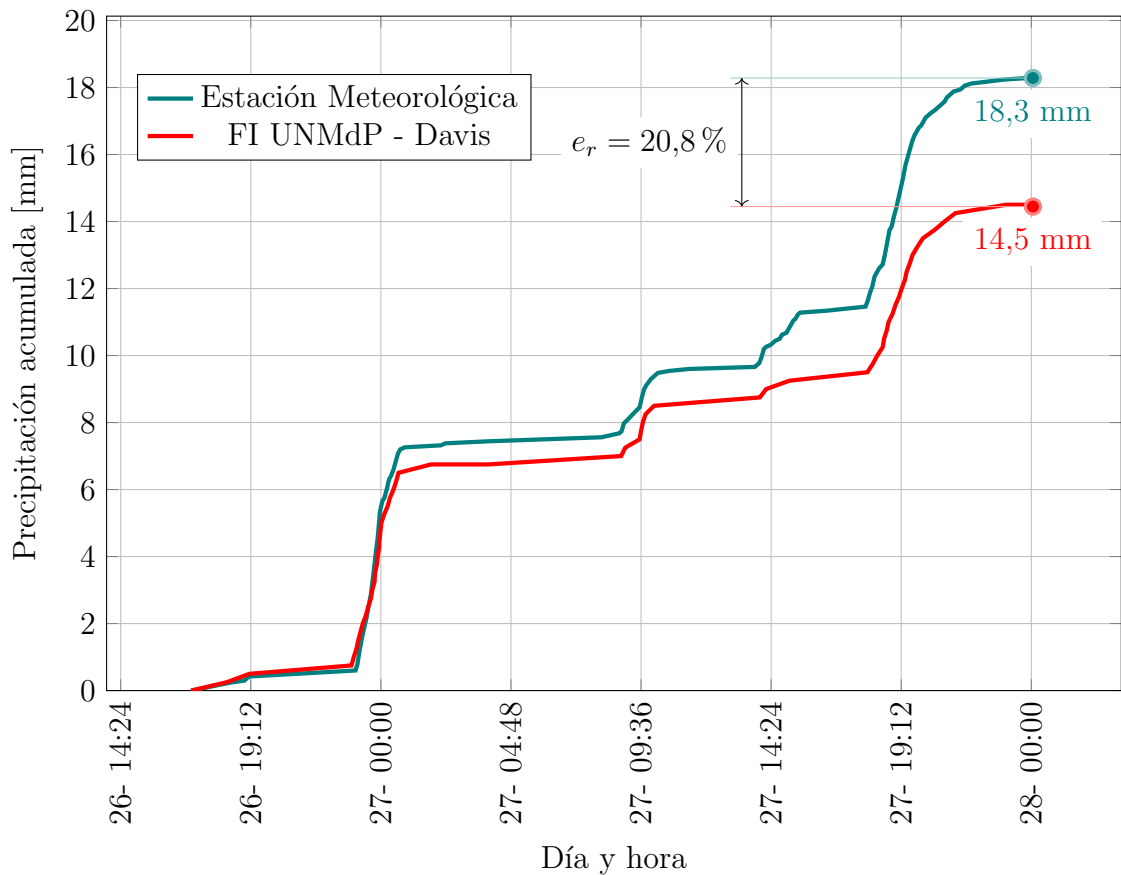


Figura 2.26: Comparación de pluviómetros en período completo

Por su parte, la precipitación caída sobre el colector situado en la cercanía del pluviómetro desarrollado (de diámetro $\phi_{colector} = 114$ mm) fue cuantificada en dos ocasiones dentro del período en evaluación. Este colector, que equivale a un plu-

viómetro estándar, puede considerarse como patrón (ver sección 2.1.3). La cuantificación de la precipitación recuperada fue realizada con una jeringa de 10 ml de volumen nominal. El error asociado se calcula según la normativa IEC 7886-1. Los datos se encuentran expresados en las tablas 2.8 y 2.9.

$\phi_{colector}$	16,51	cm
Resolución	0,25	mm

Tabla 2.7: Características principales de estación Davis

Período evaluado		Recipiente colector	
Inicio	Fin	Volumen	Altura de precipitación
26/9/2020 10:00	27/9/2020 15:50	(118,0 ± 4,8) ml	(11,56 ± 0,47) mm
27/9/2020 15:50	28/9/2020 08:00	(71,0 ± 3,0) ml	(6,96 ± 0,29) mm

Tabla 2.8: Detalles del vaciado de recipiente colector

Período evaluado		Estación Meteorológica
Inicio	Fin	Altura de precipitación
26/9/2020 10:00	27/9/2020 15:50	11,28 mm
27/9/2020 15:50	28/9/2020 08:00	7,02 mm

Tabla 2.9: Medición de pluviómetro desarrollado en período considerado

El pluviómetro desarrollado, en conclusión, mide de forma coherente con el recipiente colector utilizado en comparación. Por otra parte, bajo la premisa que la precipitación caída sobre el pluviómetro Davis es idéntica a la que cae sobre el pluviómetro en ensayo, el instrumento colocado en la Facultad de Ingeniería muestra una tendencia a subestimar la altura de precipitación y se aleja de las mediciones del pluviómetro de la presente Estación Meteorológica.

A bajas intensidades de precipitación la diferencia de resolución entre los instrumentos comparados (ver figura 2.22) cobra importancia. En los dos restantes períodos evaluados, dadas la mayor intensidad y la también mayor altura de precipitación presentes, la resolución del instrumento deja de ser factor y se registran consistentemente mayores intensidades en el instrumento desarrollado que en la estación Davis. En las figuras 2.24 y 2.25 se observa que, consistentemente, la pendiente del pluviómetro del presente trabajo es mayor a la de su contraparte. Esta diferencia puede deberse a que la estación Davis, producto de una falta de calibración periódica, bascule con un volumen de agua menor al indicado y registrado. Dicha hipótesis justificaría la diferencia observada en el primer período (figura 2.22) y las menores pendientes observadas en los otros dos. Por otro lado, la Estación Meteorológica desarrollada se ubicó en una zona poco perturbada y en el suelo; mientras que la estación Davis se encuentra montada en una zona expuesta a corrientes de viento, condición que puede exacerbar el error inducido por el viento, en especial a bajas intensidades (ver sección 2.2.2).

A raíz esa hipótesis, en la figura 2.27 se presenta el comportamiento de ambos pluviómetros para el período de observación completo modificando la resolución del pluviómetro Davis (ahora 0,28 mm) y realizando una compensación adicional a las

15:00 del 27 de septiembre, tiempo alrededor del cual se considera un mayor efecto del viento en la medición (evidenciado por las mediciones del anemómetro Davis incorporado a la estación colocada en la Facultad de Ingeniería [18]).

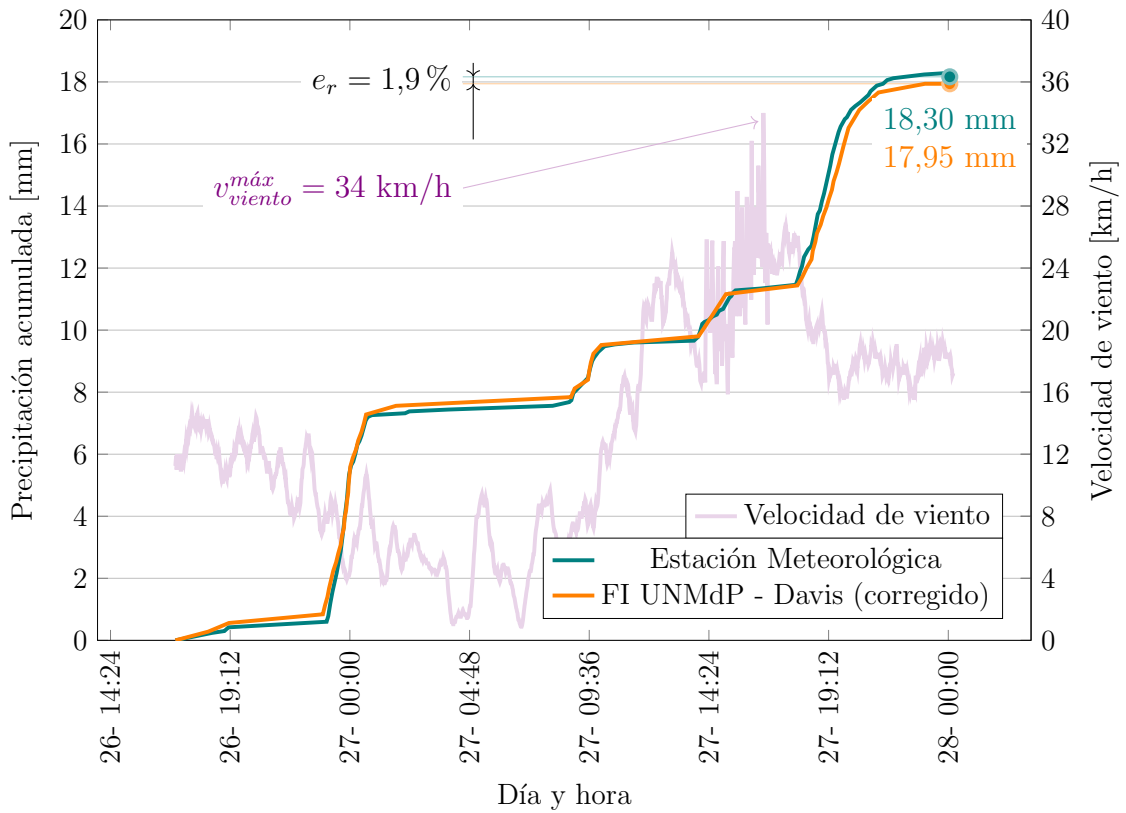


Figura 2.27: Comparación de pluviómetros en período completo con corrección

▷ **Precipitaciones del 24/11/2020**

Durante la fecha enunciada, en Mar del Plata se registraron precipitaciones y se puso en funcionamiento nuevamente el pluviómetro desarrollado para ensayar su operación. Se colocó a su lado un recipiente colector que actúa como patrón y se realiza una comparación con los datos registrados por la estación Davis ubicada en la Facultad de Ingeniería.

Período evaluado		Recipiente colector	
Inicio	Fin	Volumen	Altura de precipitación
24/11/2020 08:05	24/11/2020 15:00	(41,5 ± 1,8) ml	(4,06 ± 0,18) mm

Tabla 2.10: Detalles del vaciado de recipiente colector (24/11/2020)

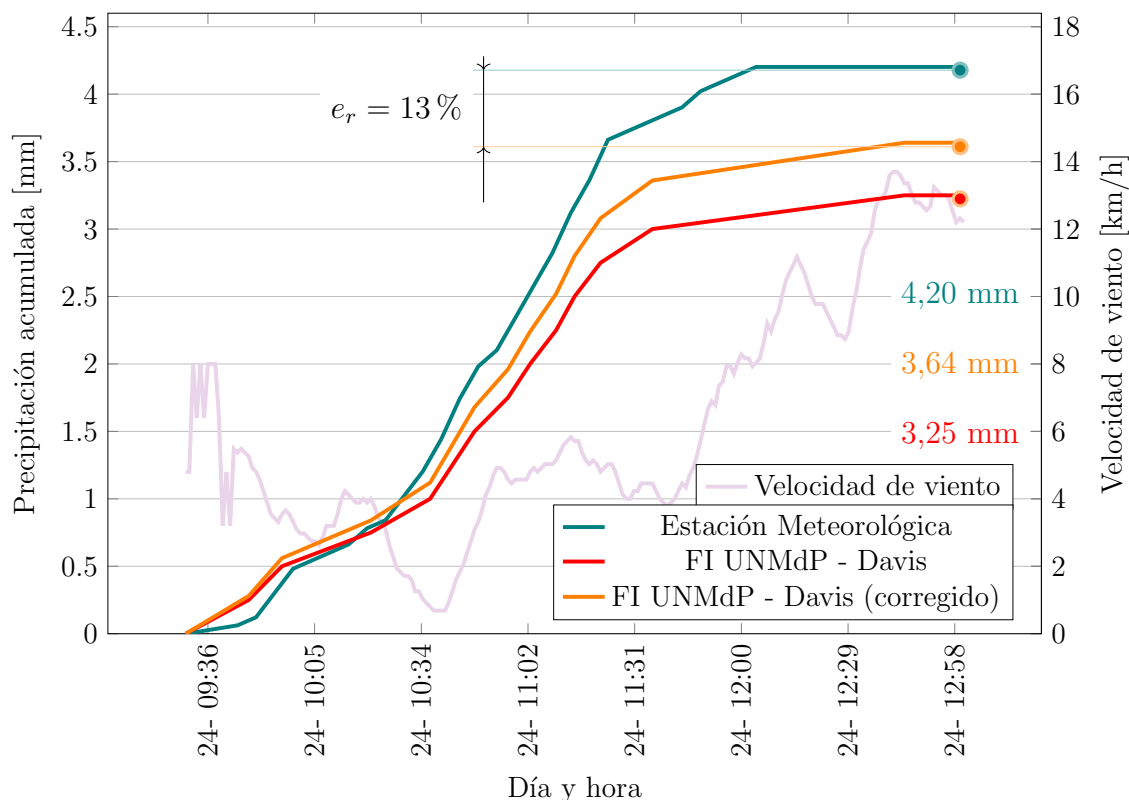


Figura 2.28: Comparación de pluviómetros (24/11/2020)

El error producido entre los instrumentos, aún aplicando la corrección propuesta en la resolución del pluviómetro Davis, es esta vez más significativo (ver gráfico 2.28). Sin embargo, el pluviómetro de la Estación Meteorológica logra tener un comportamiento consistente con lo medido en el recipiente colector, como se presenta en la tabla 2.10.

▷ Precipitaciones del 19/12/2020

Se registró la precipitación caída en la fecha enunciada y se compara el desempeño con el pluviómetro Davis de la Facultad de Ingeniería. Asimismo, se coloca un recipiente colector que cumple la función de instrumento patrón. Los resultados se presentan en la figura 2.29.

Período evaluado		Recipiente colector	
Inicio	Fin	Volumen	Altura de precipitación
19/12/2020 19:45	20/12/2020 07:30	$(89 \pm 3,7)$ ml	$(8,70 \pm 0,36)$ mm

Tabla 2.11: Detalles del vaciado de recipiente colector (19/12/2020)

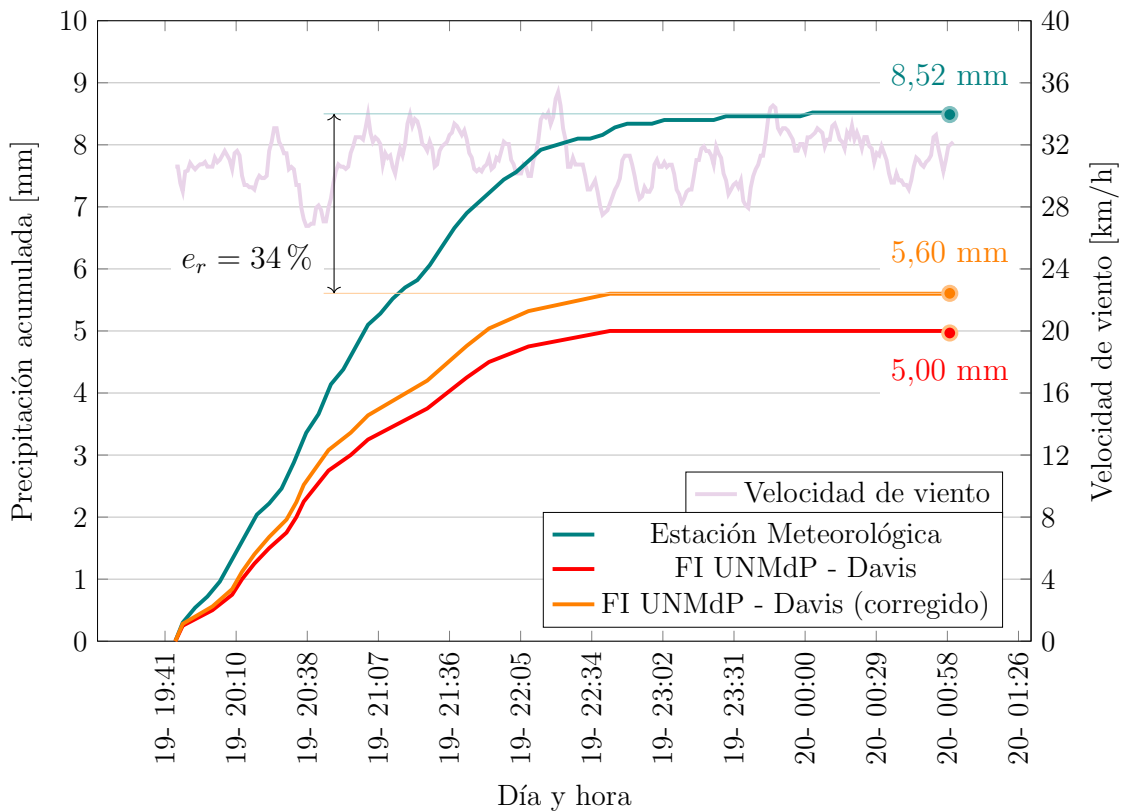


Figura 2.29: Comparación de pluviómetros (19/12/2020)

Al igual que lo registrado en la fecha 24/11/2020, la discrepancia del pluviómetro Davis con el desarrollado es significativa. La velocidad del viento se mantiene alta durante todo el período en evaluación y es factor en el error. No obstante, la altura de precipitación medida por la Estación Meteorológica es consistente con lo cuantificado por el recipiente colector (ver tabla 2.11).

A forma de conclusión, en la tabla 2.12 se enuncia el error asociado a cada período de comparación.

Período evaluado		Lectura pluviómetro [mm]		Error	
Inicio	Fin	Est. Met.	Davis corregido	Abs. [mm]	Rel. [%]
26/09 17:00	27/09 04:00	7,44	7,56	-0,12	-1,6 %
27/09 07:00	28/09 00:00	10,86	10,39	0,47	4,3 %
26/09 17:00	28/09 00:00	18,30	17,95	0,35	1,9 %
24/11 09:00	24/11 13:00	4,20	3,64	0,56	13,0 %
19/12 19:45	20/12 07:30	8,52	5,60	2,92	34,3 %

Tabla 2.12: Error asociado a comparación de pluviómetros

2.5. Conclusiones del capítulo

En este capítulo, se estudiaron los pluviómetros presentes en la actualidad y se seleccionó el de cubeta basculante para el desarrollo.

La literatura evidencia que existen múltiples consideraciones a tenerse en cuenta en el diseño del pluviómetro. Se diferencia entre errores de captura y errores de conteo, y se consigue reducir ambos mediante una efectiva selección de componentes y materiales, la configuración de parámetros de fabricación y la calibración del instrumento. En ese contexto, se destaca la selección de un colector aerodinámico, cuyo principal efecto es reducir el error de captura inducido por el viento. Asimismo, se ajusta el mecanismo de descarga a través de un orificio calibrado con el propósito de limitar el caudal de agua y así asegurar la consistencia en el comportamiento de la cubeta basculante. Por otra parte, se utiliza un plástico de alta resistencia a la corrosión (PET-G) y acero inoxidable para el mecanismo de rotación y tornillería, alargando la durabilidad del instrumento. También, se siguen los lineamientos estipulados por la Organización Meteorológica Mundial para la calibración y se realiza experimentación adicional para reducir el error sistemático en la medición.

Los resultados obtenidos durante las precipitaciones en las cuales se puso en funcionamiento el instrumento desarrollado demuestran el buen desempeño del mismo, siendo siempre consistente con la lectura del instrumento patrón (recipiente colector cilíndrico situado a pocos metros del primero). Durante el estudio se realiza la comparación con el pluviómetro Davis instalado en la Facultad de Ingeniería con el cual, por otro lado, la discrepancia es mayor.

En conclusión, se construye un pluviómetro robusto, durable y de alta resolución; cuya fabricación y selección de componentes favorece el comportamiento consistente del mecanismo basculante y mediante el post-procesamiento se corrige el error sistemático asociado al instrumento.

Bibliografía

- [1] World Meteorological Organization. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. Secretariat of the World Meteorological Organization, 2014.
- [2] WL Pelton. A comparison of three types of rain gauges. *Canadian Journal of Plant Science*, 45(2):194–196, 1965.
- [3] Emad Habib, Witold F Krajewski, and Anton Kruger. Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2):159–166, 2001.
- [4] Matteo Colli, Michael Pollock, Mattia Stagnaro, Luca G Lanza, Mark Dutton, and Enda O’Connell. A computational fluid-dynamics assessment of the improved performance of aerodynamic rain gauges. *Water Resources Research*, 54(2):779–796, 2018.
- [5] MD Pollock, Greg O’Donnell, Paul Quinn, Mark Dutton, Andrew Black, ME Wilkinson, Matteo Colli, Mattia Stagnaro, LG Lanza, Elizabeth Lewis, et al. Quantifying and mitigating wind-induced undercatch in rainfall measurements. *Water Resources Research*, 54(6):3863–3875, 2018.
- [6] Vladislav Nešpor and Boris Sevruk. Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 16(4):450–464, 1999.
- [7] M Pollock, M Colli, G O’Donnell, M Stagnaro, LG Lanza, P Quinn, M Dutton, M Wilkinson, A Black, C Kilsby, et al. A novel experimental design to investigate the wind-induced undercatch. In *Poster presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2016, P3-64)*, 2016.
- [8] Katie Muchan and Harry Dixon. Insights into rainfall undercatch in differing gauge types and heights: the impact of wind speed and rainfall event intensity. 2018.
- [9] Paul Muñoz, Rolando Céleri, and Jan Feyen. Effect of the resolution of tipping-bucket rain gauge and calculation method on rainfall intensities in an andean mountain gradient. *Water*, 8(11):534, 2016.
- [10] M Colli, LG Lanza, and PW Chan. Co-located tipping-bucket and optical drop counter ri measurements and a simulated correction algorithm. *Atmospheric Research*, 119:3–12, 2013.
- [11] M Colli, LG Lanza, P La Barbera, and PW Chan. Measurement accuracy of weighing and tipping-bucket rainfall intensity gauges under dynamic laboratory testing. *Atmospheric research*, 144:186–194, 2014.
- [12] Jianxin Wang, Brad L Fisher, and David B Wolff. Estimating rain rates from tipping-bucket rain gauge measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(1):43–56, 2008.

-
- [13] Mattia Stagnaro, Matteo Colli, Luca Giovanni Lanza, and Pak Wai Chan. Performance of post-processing algorithms for rainfall intensity using measurements from tipping-bucket rain gauges. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(12):5699, 2016.
- [14] TLV: A Steam Specialist Company. Water flow rate through an orifice. <https://www.tlv.com/global/ME/calculator/water-flow-rate-through-orifice.html>, 2015. Steam.
- [15] Juan M Barrios and Pablo E Romero. Improvement of surface roughness and hydrophobicity in petg parts manufactured via fused deposition modeling (fdm): An application in 3d printed self-cleaning parts. *Materials*, 12(15):2499, 2019.
- [16] Municipalidad de Gral. Pueyrredón. Información estratégica: Climatología. <https://www.mardelplata.gob.ar/Contenido/informaci2020>.
- [17] Engineering Toolbox. Evaporation from water surface. <https://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d-690.html>, 2004.
- [18] UNMdP Laboratorio de Instrumentación y Control (LIC) de la Facultad de Ingeniería. Datos meteorológicos diarios (septiembre 2020). Accedido: 10-10-2020.
- [19] YC Ko, BD Ratner, and AS Hoffman. Characterization of hydrophilic—hydrophobic polymeric surfaces by contact angle measurements. *Journal of Colloid and Interface Science*, 82(1):25–37, 1981.

Capítulo 3

Reporte de datos

3.1. Introducción

Las mediciones realizadas tanto por el anemómetro como por el pluviómetro deben ser capturadas y reportadas a fin de ser de utilidad para el investigador. En este capítulo se describe el equipo utilizado y su configuración para producir una interfaz de visualización y análisis de las mediciones.

3.1.1. Objetivos del capítulo

Se busca implementar un sistema íntegro de adquisición y reporte para los instrumentos desarrollados. Para ello, se plantean los siguientes objetivos:

- Determinar equipo y software adecuados para el sistema
- Configurar y programar los dispositivos para efectivizar la adquisición y almacenamiento de las mediciones
- Crear interfaz conveniente en cliente que visualice las mediciones de forma intuitiva para el usuario

3.1.2. Estructura del capítulo

El capítulo está organizado de la siguiente manera. Primero, en 3.2.1, se enuncian los dispositivos seleccionados para el sistema de reporte. Luego, en 3.2.2, se describe el software utilizado en dichos dispositivos. Más adelante, en 3.2.3, se explicita en detalle el despliegue del sistema, así como también la configuración realizada en cada dispositivo. Finalmente, se escriben las conclusiones del capítulo en 3.3.

3.2. Desarrollo

3.2.1. Hardware

Raspberry Pi

El estado del interruptor magnético del pluviómetro (ver capítulo 2 sección 2.2) y la lectura de velocidad y dirección de viento proveniente del procesador asociado

(capítulo 1 sección 1.3) se envían a una computadora que se encarga de la interpretación, clasificación y almacenamiento. Para la estación meteorológica del presente trabajo se utiliza una Raspberry Pi 3 Model B (ver figura 3.1). Esta computadora de placa reducida se destaca por su bajo costo [1] y está compuesta por un SoC, CPU, memoria RAM, puertos de entrada y salida, conectores para audio y video, etc.



Figura 3.1: Raspberry Pi 3 Model B

Esta computadora funcionará con Arch Linux como sistema operativo (ver sección 3.2.2) y se utilizarán sus puertos GPIO para la comunicación tanto con el anemómetro como con el pluviómetro. Para las especificaciones de la Raspberry Pi 3 Model B, ver tabla 3.1 [2].

Procesador	Broadcom BCM2837 64bit 1,2 GHz quad-core
Memoria RAM	1 GB DDR3
Pines GPIO	40
Puertos USB	4
Ethernet	100 Mbit/s
Voltaje de alimentación	5 V
Corriente máxima	2,5 A

Tabla 3.1: Especificaciones de Raspberry Pi 3 Model B

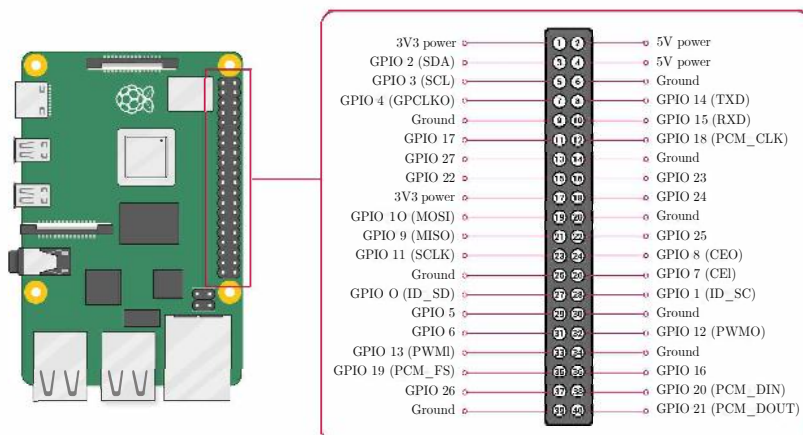


Figura 3.2: Panel I/O de la Raspberry Pi

Fuente de alimentación

La Raspberry Pi debe ser alimentada por una fuente de alimentación, de manera tal que la computadora permanezca encendida de forma continua. Para ese propósito, se utiliza una fuente de las características enunciadas en la tabla 3.2 y presentada en la figura 3.3.



Figura 3.3: Fuente de alimentación 5V

Voltaje de entrada	100 – 240	V
Voltaje de salida	5,1	V
Corriente de salida	5	A

Tabla 3.2: Datos característicos de la fuente de alimentación

Honeywell HIH9131

Como es enunciado (ver Introducción y apéndice A), la velocidad del sonido c es función de la temperatura. Por lo tanto, se incorpora en la Estación Meteorológica el Honeywell HIH9131, un sensor de temperatura y humedad (figura 3.4). El mismo provee una precisión de $\pm 1.7\%$ para la humedad relativa y $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura del aire (con un rango operativo entre -40°C y 125°C). El sensor, que se conecta al procesador NXP y se comunica con la Raspberry Pi a través de las entradas RX/TX, se destaca por su alta estabilidad y fiabilidad. Para el presente trabajo, se lo utilizará para medir la temperatura y así definir la velocidad del sonido.



Figura 3.4: Sensor auxiliar de temperatura y humedad

3.2.2. Software

Arch Linux

Como sistema operativo ejecutado en la Raspberry Pi se usa Arch Linux (figura 3.5a). Arch Linux es una distribución de Linux para sistemas x86-64 compuesta por

software libre. No contiene herramientas adicionales (o *bloatware*, en inglés) y se sitúa como una de las distribuciones más livianas y flexibles, confiando en la comunidad para su crecimiento [3, 4]. Dichas características posicionan a este sistema operativo como una plataforma eficaz y de bajo consumo de recursos, brindando simplicidad para la Estación Meteorológica.



(a) Distribución Arch Linux



(b) Python

Sobre el sistema operativo se ejecuta un programa en Python 3 [5]. Python es un lenguaje de programación relativamente moderno (creado en el año 1991) cuyo logo se observa en la figura 3.5b y ha cobrado relevancia en los últimos años debido a su multitud de usos en el ámbito de la robótica y la inteligencia artificial [6–9]. Para la estación meteorológica, el programa de Python se utiliza como intérprete de las señales analógicas de la Raspberry Pi llamadas GPIO a través de la carga de la librería RPi.GPIO. Esto permite la comunicación desde el anemómetro y el pluviómetro a Node-Red.

Node-RED

Una vez adquirida la medición e interpretada por Arch Linux y Python, debe clasificarse y almacenarse en una base de datos. Node-RED (figura 3.6) es una herramienta de programación visual por bloques (*flow-based programming*, o FBP, en inglés) utilizada para la conexión de dispositivos físicos con APIs (interfaz de programación de aplicaciones) o servicios online [10, 11]. Provee un editor accesible por navegador web y un importante número de plugins que se ajustan a múltiples aplicaciones [12]. En el contexto de la Estación Meteorológica, Node-RED y el plugin *node-red-node-pi-gpio* en conjunto traducen las mediciones adquiridas y las clasifican para luego almacenarse en una base de datos.

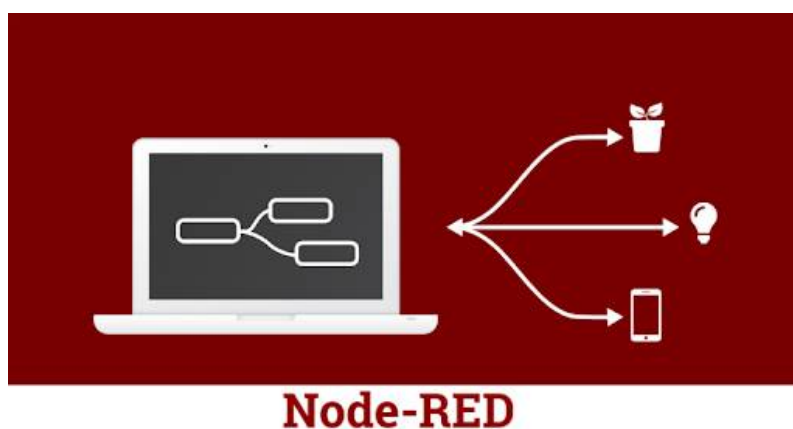
**Node-RED**

Figura 3.6: Ilustración del entorno de programación por bloques Node-RED

Se selecciona esta herramienta debido a su confiabilidad e intuitivo uso. En la Estación, el programa de Node-RED ejecutándose en la Raspberry Pi (ver 3.2.1),

a través de múltiples funciones y bloques, manda a una base de datos basada en InfluxDB las mediciones clasificadas.

InfluxDB

En la actualidad, existen diversas bases de datos compatibles con Node-RED y Grafana disponibles. Se trabaja con InfluxDB (figura 3.7), una base de datos basada en series temporales de código abierto (TSDB) desarrollada por InfluxData [13]. A diferencia de las bases de datos basadas en SQL, este tipo de base de datos está creada específicamente para el almacenamiento de información cuyo tiempo de aparición (o *timestamp*, en inglés) es la característica principal que la define [14]. Para la Estación Meteorológica, donde se busca reportar la velocidad y dirección del viento y la altura de precipitación para un determinado período, este atributo resulta idóneo.



Figura 3.7: Logo de la base de datos InfluxDB

Adicionalmente, InfluxDB se destaca por su robustez, velocidad y políticas de retención configurables [15]. Esta última característica permite conservar en memoria sólo la información considerada relevante pasado cierto tiempo, habilitando el registro de grandes bases de datos sin por ello requerir excesiva capacidad de almacenamiento [16]. Finalmente, InfluxDB se integra a Grafana, que la incluye de forma nativa [17].

Grafana

Grafana es una plataforma de análisis de métricas utilizada por miles de compañías para monitorear cualquier tipo de parámetro desde infraestructura, aplicaciones, plantas energéticas, etc. Este software de código abierto permite consultar, visualizar y alertar sobre los datos de interés sin importar la cercanía física a la fuente de información [18].



Figura 3.8: Logo de Grafana

Cuenta con múltiples plugins y opciones de visualización que hacen que Grafana (figura 3.8) sea una herramienta muy versátil y útil para muy diversas aplicaciones.

Para la Estación Meteorológica, Grafana permite acceder a la base de datos e informar sobre las lecturas de ambos dispositivos de medición desde cualquier computadora o dispositivo conectado a la misma red que el equipo.

3.2.3. Implementación y despliegue

En la computadora Raspberry Pi se instala lo siguiente:

- Sistema operativo Arch Linux 64-bit
- Python 3.8.5-1
- Node.js y Node-RED
- InfluxDB
- Librería piGPIO

En el ordenador que se utilizará como cliente, por su parte, se instala Grafana y se crea un panel conveniente para la lectura de las mediciones de la Estación Meteorológica (ver figura 3.11). En la figura 3.9 se ilustra el sistema de reporte junto al procesador NXP instalados en un riel DIN.

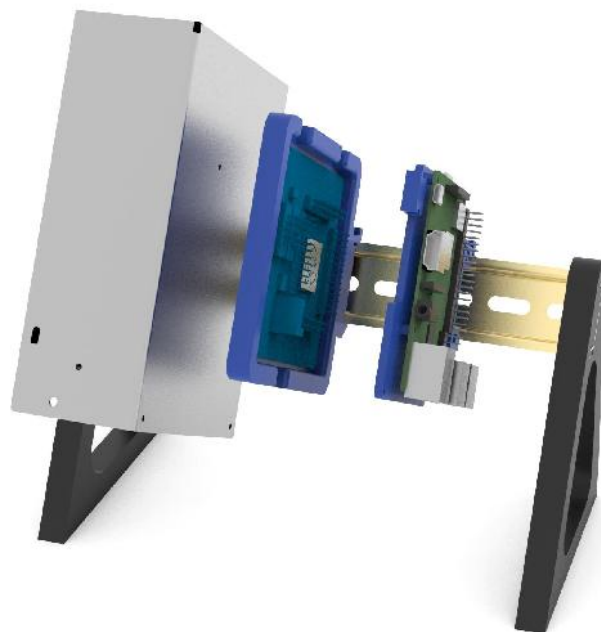


Figura 3.9: Sistema de reporte montado en riel DIN

En conjunto, permiten que el pluviómetro (a través del interruptor magnético, cuya conexión puede observarse en la figura 3.10) y el anemómetro (desde el procesador NXP) se comuniquen con la computadora y las mediciones puedan ser adquiridas, procesadas y almacenadas. Desde una computadora conectada a la misma red que la Raspberry Pi pueden leerse y analizarse las mediciones en tiempo real con Grafana.

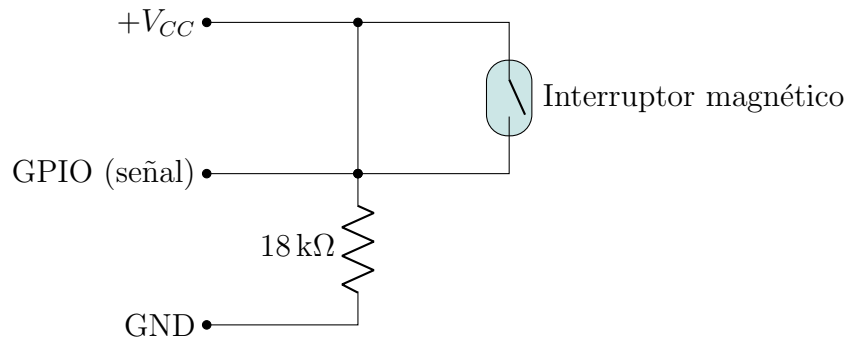


Figura 3.10: Conexión de interruptor magnético a Raspberry Pi

Por otra parte, se configura el software definiendo puertos y parámetros y se crean las bases de datos a utilizar para el almacenamiento de las mediciones. Dichas bases de datos (llamadas *lluvia* y *viento*) son referenciadas en el programa de Node-RED. Además, se establece la configuración de autenticación (usuario y contraseña) de manera tal que el cliente, a través de Grafana, pueda acceder a las mediciones.

De forma automática en el encendido, los servicios *pigpiod*, *InfluxDB* y *Node-RED* se ejecutan en la Raspberry Pi y permanecen en operación de manera autónoma. Esto evita la necesidad de intervención de un usuario para el funcionamiento de la Estación Meteorológica.

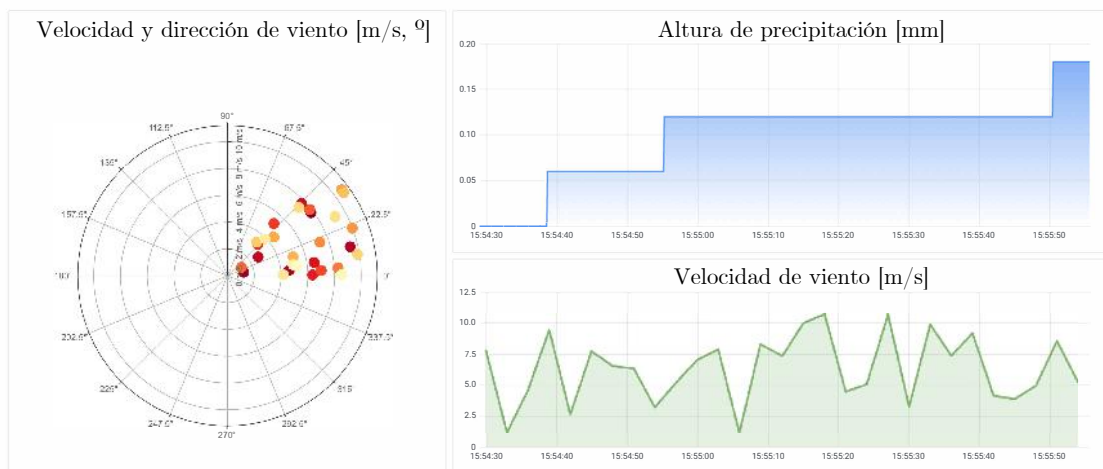


Figura 3.11: Captura de interfaz de usuario

Las lecturas del anemómetro son enviadas a la computadora a través de la interfaz de comunicación RS232 y la conexión entre el procesador NXP y la computadora Raspberry Pi es realizada entre las terminales TX/RX de ambos dispositivos.

Además, como se enuncia en el capítulo 2 (sección 2.4), se realiza la corrección en la medición de la precipitación cuando se identifica el comienzo de la misma, considerando la evaporación del agua acumulada en el sistema de descarga. Adicionalmente, se incorpora un *debounce* (tiempo a partir de un cambio de posición durante el cual ignora cualquier lectura) para el interruptor magnético de 250 ms. Para el código empleado, ver apéndice C.

Servicio	Puerto
piGPIO	8888
InfluxDB	8186
Node-RED	1880
Grafana (cliente)	3000

Tabla 3.3: Puertos de los diferentes servicios en ejecución

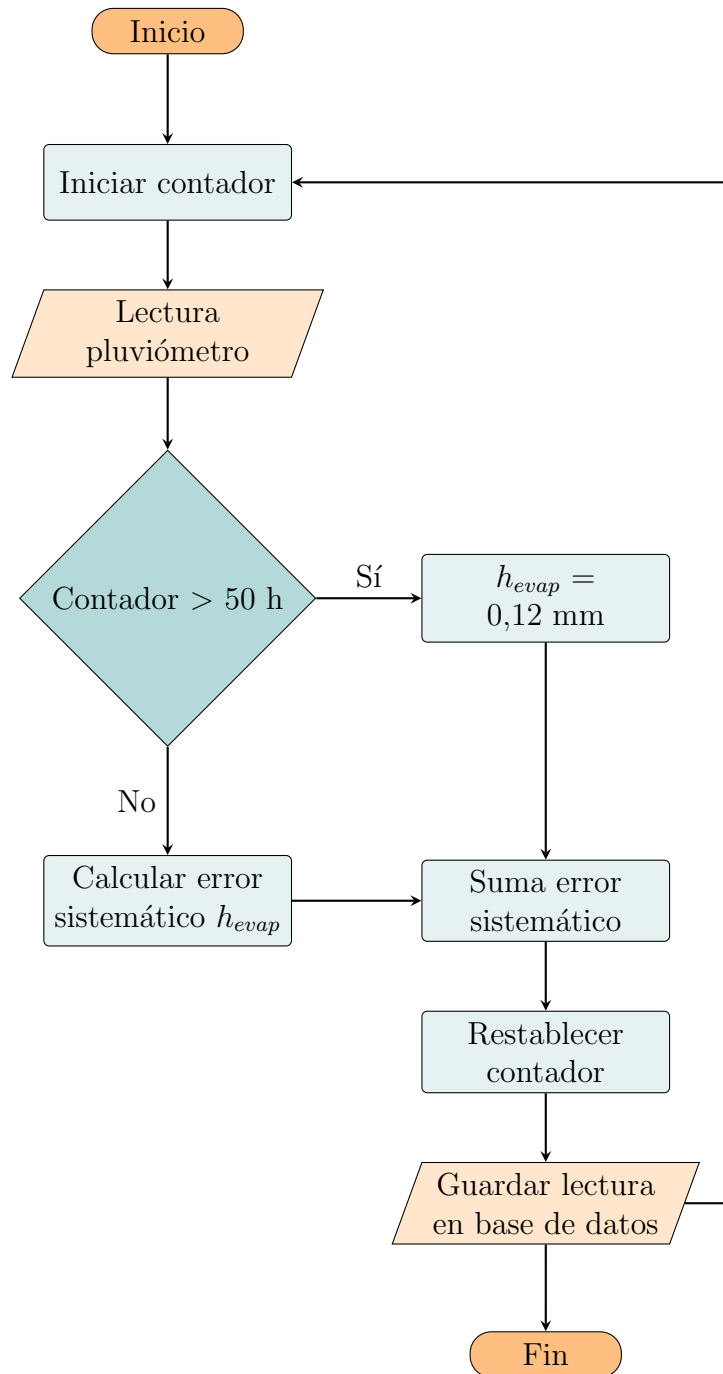


Figura 3.12: Diagrama de flujo de pluviómetro

InfluxDB	
Usuario	clima
Contraseña	clima

Tabla 3.4: Datos de autenticación de base de datos

Interruptor magnético	
Pin $+V_{CC}$	1
Pin señal	22 (GPIO 25)
Pin GND	25

Tabla 3.5: Conexión de interruptor magnético en Raspberry Pi

Funcionamiento de programa

El programa tiene como función principal la de adquirir, procesar y almacenar datos. A continuación se describe la secuencia de operaciones del programa dividiendo el mismo en anemómetro y pluviómetro.

▷ Subprograma: Anemómetro

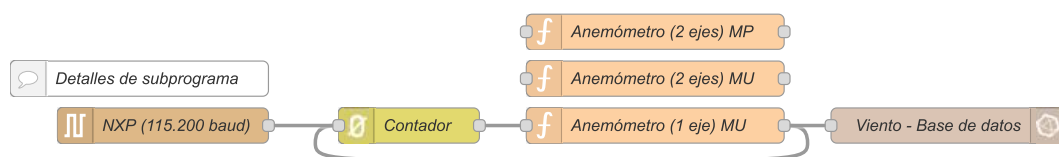


Figura 3.13: Programa del sistema en Node-RED - Anemómetro

Al iniciarse la Raspberry Pi y el servicio de Node-RED, se establece la comunicación con el procesador NXP asociado al anemómetro. Se selecciona como velocidad de transmisión 115 200 baudios y se utilizan los pines TX/RX de la computadora (ver figura 3.2). Entre la base de datos y la recepción de mensajes se interponen dos bloques: contador y anemómetro. El subprograma “anemómetro” se encarga de las siguientes tareas:

- Convertir mensaje proveniente de procesador NXP en variables internas (tiempos de vuelo y temperatura)
- Calcular velocidad (y dirección) del viento

Como es descrito en el capítulo 1 sección 1.3.3, en el presente trabajo se proponen dos métodos de procesamiento de la señal para el cálculo de la velocidad del viento. En ese contexto, existen tres bloques (ver figura 3.13) que pueden ser utilizados: dos para el método utilizado (para 1 y 2 ejes de medición) y uno, “Anemómetro (2 ejes) MP”, para el método propuesto. A continuación se presenta un extracto de la función correspondiente al método desarrollado en el trabajo (para el código completo, ver apéndice C):

En principio, se definen las variables de la expresión del tiempo de vuelo t_{of} (ver ecuación 1.24) y los parámetros del instrumento: el número de lecturas n_{avg} que componen una medición y la distancia entre sensores d_{es} . También, opcionalmente, puede definirse la temperatura.

En cada mensaje, el procesador NXP envía a la Raspberry Pi el tiempo de vuelo en cada dirección y la lectura de temperatura. Con el objetivo de promediar un número n_{avg} de lecturas, se utiliza el bloque “contador” que enumera los mensajes recibidos a través de la variable `msg.count` y se reinicia cada vez que se envía una medición a la base de datos.

Finalmente, la salida de la función “anemómetro” tiene tres componentes: el módulo de la velocidad del viento, la dirección del viento y el comando de reinicio para el contador. Los dos primeros son almacenados en la base de datos de manera tal de ser leídos e interpretados por Grafana.

▷ Subprograma: Pluviómetro

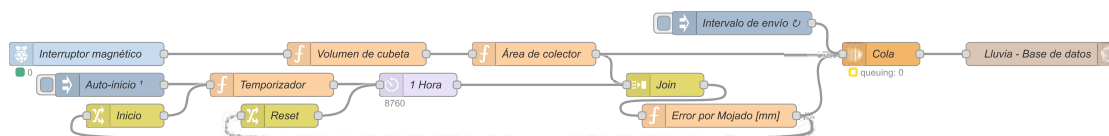


Figura 3.14: Programa del sistema en Node-RED - Pluviómetro

Al iniciarse la Raspberry Pi y el servicio de Node-RED, se ejecuta el bloque denominado *Auto-inicio*. Este bloque inicia el contador compuesto por el bloque de función *Temporizador*, que establece el límite de horas del contador antes del reinicio y asigna el tema “contador” al mensaje para luego ser interpretado para el bloque encargado del error sistemático; y el bloque de retraso *1 Hora*, que define el paso del contador (en este caso configurado en una hora).

El interruptor magnético está conectado a la Raspberry Pi según lo identificado en la figura 3.10 y la tabla 3.5 y es leído por el programa de Node-RED a través del servicio piGPIO. En ese contexto, el bloque *Interruptor magnético* (ver figura 3.14) alterna entre dos estados: 0 y 1. Por lo tanto, la función *Volumen de cubeta* se ocupa de leer el flanco (o cambio de estado) del interruptor y traducir esa lectura en un mensaje cuyo argumento es el volumen en mililitros que descarga la cubeta basculante en cada cambio de posición. Sin embargo, por convención, la cantidad de precipitación se mide a través de la altura de la lámina de agua formada en una superficie de 1 m^2 y el estándar es en milímetros. La conversión se realiza según el área del colector (ver capítulo 2 sección 2.1.3) y con ese propósito se incorpora el bloque de función *Área de colector*.

El error sistemático asociado al mojado de las superficies del sistema de descarga (descrito en el capítulo 2, sección 2.4, y cuyo diagrama de flujo se ilustra en la figura 3.12) debe añadirse a la medición según el tiempo transcurrido entre la última lectura y la anterior. La función *Error por mojado* se encarga de realizar la corrección del error. Al detectar una lectura accede al contador de horas y, según su valor, envía el error sistemático correspondiente. Seguidamente, reinicia el contador. El bloque *Join* posibilita la entrada diferenciada de tanto de la lectura del interruptor magnético como del estado del contador.

En pos de reducir el número de escrituras en la memoria de la Raspberry Pi (que puede superar las 30 escrituras por minuto para lluvias fuertes), el bloque *Intervalo de envío* es el encargado de definir cada cuánto tiempo se envían las lecturas, en caso de haberlas. La consecuencia directa es la pérdida de resolución, una característica especialmente importante cuando se busca estudiar la intensidad de precipitación. Para los propósitos del presente trabajo, se establece como intervalo 5 minutos debido a que el pluviómetro fue diseñado para la medición de precipitación acumulada y no para el análisis de la intensidad de precipitación. De forma periódica (cada 5 minutos) se almacenan las lecturas efectuadas durante el período (retenidas por el bloque *Cola*) en la base de datos.

3.3. Conclusiones del capítulo

En este capítulo, se desarrolló el sistema de reporte asociado a la Estación Meteorológica. Se seleccionaron hardware y software y se realizó la implementación del equipo.

La base del sistema es la computadora Raspberry Pi que reúne, almacena y reporta la información de los instrumentos. Esto se efectiviza a través de la comunicación con el procesador NXP (del anemómetro) y el interruptor magnético (del pluviómetro). De forma accesoria se incorpora un sensor de humedad y temperatura que es utilizado para el cálculo de la velocidad del viento. Asimismo, se selecciona Node-RED para la programación por bloques. En él, se introduce el código encargado de la interpretación y almacenamiento de las mediciones en una base de datos basada en InfluxDB, incorporando en dicha programación la corrección del error sistemático para la lectura del pluviómetro. Por otra parte, es Grafana el servicio elegido para generar la interfaz gráfica accesible por el usuario. Este software se comunica con la base de datos en la Raspberry Pi y presenta las medidas de ambos instrumentos de forma intuitiva y útil; permitiendo, además, acceder a información pasada. La totalidad del software enunciado se apoya en el sistema operativo Arch Linux, cuya baja demanda de recursos deriva en un sistema eficiente.

En conclusión, el sistema de reporte funciona como nexo entre la Estación Meteorológica y el usuario. Son la selección de componentes y programas y su implementación quienes posibilitan el correcto funcionamiento de la Estación Meteorológica como un sistema integral y autónomo.

Bibliografía

- [1] Raspberry Pi Foundation. Help videos: What is a Raspberry Pi? <https://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi>, 2020.
- [2] Xataka. Raspberry Pi 3 Model B+, análisis: más potencia y mejor WiFi para un miniPC que sigue asombrando. <https://www.xataka.com/ordenadores/raspberry-pi-3-model-b-analisis-mas-potencia-y-mejor-wifi-para-un-minipc-que-sigue-asombrando>, 2018.
- [3] Aaron Griffin. Arch Linux Wiki. <https://wiki.archlinux.org/index.php/Arch-Linux>, 2020.
- [4] Aaron Griffin. Arch Linux compared to other distributions (GNU/Linux and UNIX-like). <https://wiki.archlinux.org/index.php/Arch-compared-to-other-distributions>, 2020.
- [5] Felix Yan. Packages and libraries: Python 3.8.5-1 package for Arch Linux. <https://www.archlinux.org/packages/extra/x86-64/python/>, 2020.
- [6] MA Alvarez. Qué es Python. *Lenguaje de programación de propósito general, orientado a objetos, que también puede utilizarse para el desarrollo web*, 2003.
- [7] Alex Owen-Hill. What is the best programming language for robotics? <https://blog.robotiq.com/what-is-the-best-programming-language-for-robotics>, 2016.
- [8] Zulaikha Lateef. A comprehensive guide to artificial intelligence with Python. <https://www.edureka.co/blog/artificial-intelligence-with-python/>, 2020.
- [9] Andrew Luashchuk. 8 reasons why python is good for artificial intelligence and machine learning. <https://djangostars.com/blog/why-python-is-good-for-artificial-intelligence-and-machine-learning/>, 2019.
- [10] Jesús Darío. Programación visual con Node-RED: Conectando el internet de las cosas con facilidad. <https://www.toptal.com/nodejs/programacion-visual-con-node-red-conectando-el-internet-de-las-cosas-con-facilidad>, 2018.
- [11] Pablo Sancho. Fundamentos de Node-RED. <https://www.techedgegroup.com/es/blog/fundamentos-node-red>, 2020.
- [12] Node-RED. Node-RED: Features. <https://nodered.org/features>, 2020.
- [13] InfluxData. InfluxDB: Release notes. <https://docs.influxdata.com/influxdb/v2.0/reference/release-notes/influxdb/>, 2020.
- [14] Julian Ganz, Matthias Beyer, and Christian Plotzky. Time-series based solution using InfluxDB. *No. 1*, 2017.
- [15] InfluxData. InfluxDB database: Comparison to other NoSQL databases. <https://www.influxdata.com/products/compare/>, 2020.

- [16] InfluxData. Influxdb glossary: Retention policies (how long InfluxDB keeps data). <https://docs.influxdata.com/influxdb/v18/concepts/glossary/retention-policy-rp>, 2020.
- [17] Grafana. InfluxDB in Grafana: Data Source - add and configure data sources. <https://grafana.com/docs/grafana/latest/features/datasources/influxdb/>, 2020.
- [18] Grafana. Grafana: The analytics platform for all your metrics. <https://grafana.com/grafana/>, 2020.

Capítulo 4

Análisis económico

4.1. Introducción

El aspecto económico es factor en la implementación de una estación meteorológica. En este capítulo se presentan los instrumentos disponibles comercialmente y se comparan con los desarrollados en el presente trabajo desde el punto de vista económico.

4.1.1. Objetivos

Se busca realizar un análisis de posicionamiento en el mercado para los instrumentos desarrollados. Para ello, se plantean los siguientes objetivos:

- Recopilar información de anemómetros y pluviómetros disponibles en el mercado actual
- Expresar costos asociados a la construcción de cada uno de los instrumentos
- Comparar instrumentos desarrollados con la competencia en el mercado

4.1.2. Estructura del capítulo

El capítulo está organizado de la siguiente manera. Primero, en 4.2.1, se exponen los anemómetros y pluviómetros disponibles comercialmente con sus precios de venta. Luego, en 4.2.2 se enuncian los costos asociados a la construcción del anemómetro y el pluviómetro desarrollados, en conjunto con el sistema de reporte. Además, se realiza una comparación con los dispositivos evaluados en 4.2.1. Finalmente, se escriben las conclusiones del capítulo en 4.3.

4.2. Desarrollo

4.2.1. Mercado actual

En Argentina, la disponibilidad de dispositivos de medición de velocidad de viento y lluvia corresponde exclusivamente a productos importados. Se contactaron diversos fabricantes y a continuación se presentan, en las tablas 4.1 y 4.2, los precios publicados en dólares estadounidenses (US\$). En las figuras 4.1 y 4.2 se observan algunos de los instrumentos comerciales.

Marca y modelo	Tipo	Precio [U\$S]
Barani MeteoWind Compact	Cazoletas	350
Thies First Class Advanced X	Cazoletas	826
Omni Instruments WindSonic	Ultrasónico (2D)	640
Omni Instruments WindObserver 65	Ultrasónico (2D)	1445
Gill Instruments Windmaster 3D	Ultrasónico (3D)	1866
Scientific Sales 102874 Sonic Sensor	Ultrasónico (2D)	2399
Gill Instruments Windmaster 3D Pro	Ultrasónico (3D)	2679

Tabla 4.1: Lista de precios de anemómetros comerciales

Marca y modelo	Tipo	Resol. [mm]	$A_{colector}$ [cm ²]	Precio [U\$S]
Barani MeteoRain SEB200	TB	0,2	200	180
EML ARG314	TB	0,2	314	410
HydrologicalUSA TB6	TB	0,2	314	650
EML SBS314	TB	0,1	314	655
Casella TBRG	TB	0,1	400	679
HydrologicalUSA TB3	TB	0,1	314	1050

Tabla 4.2: Lista de precios de pluviómetros comerciales



Figura 4.1: Anemómetros comerciales



Figura 4.2: Pluviómetros comerciales

4.2.2. Costo de Estación Meteorológica

Se evalúan los costos asociados a la construcción de la Estación Meteorológica de manera íntegra, considerando que tanto anemómetro como pluviómetro comparten la electrónica perteneciente al sistema de reporte. Los valores se expresan en la moneda americana (U\$S), aún aquellos gastos realizados en pesos argentinos (AR\$). Para ello, se utiliza como equivalencia $U\$S 1,00 = AR\$ 88,47$ (conversión del dólar oficial al 8 de febrero de 2021). En la tabla 4.3 se expresa en detalle el costo de la Estación Meteorológica del presente trabajo.

Componente	Cantidad	Precio un. [U\$S]	Precio [U\$S]
Transductor ultrasónico	4	10,35	41,40
Raspberry Pi	1	64,56	64,56
Procesador NXP	1	39,78	39,78
Sensor Honeywell H9131	1	14,91	14,91
Interruptor magnético	1	1,86	1,86
PCB y componentes	1	25,00	25,00
Fuente de alimentación	1	14,17	14,17
Impresión 3D 1-1-1	4	0,08	0,32
Impresión 3D 1-1-2	1	1,97	1,97
Impresión 3D 1-1-3	1	0,37	0,37
Impresión 3D 1-1-4	1	2,02	2,02
Impresión 3D 1-1-5	1	4,11	4,11
Impresión 3D 1-1-6	1	2,13	2,13
Impresión 3D 1-1-7	1	0,63	0,63
Impresión 3D 2-1-1	1	0,81	0,81
Impresión 3D 2-1-2	1	0,51	0,51
Impresión 3D 2-1-3	1	1,54	1,54
Impresión 3D 3-1-1	1	1,25	1,25
Impresión 3D 3-1-2	1	3,02	3,02
Impresión 3D 3-1-3	1	0,25	0,25
Tornillo M3 x 10 mm	4	0,19	0,78
Tornillo M3 x 16 mm	3	0,19	0,58
Tornillo M4 x 12 mm	4	0,13	0,53
Tornillo M6 x 20 mm	2	0,12	0,23
Tornillo M6 x 60 mm	1	0,34	0,34
Tuerca M3	1	0,06	0,06
Tuerca M4	4	0,07	0,28
Tuerca M6	1	0,06	0,06
Tuerca M6 autofrenante	1	0,17	0,17
Arandela M4	4	0,02	0,07
Arandela M6	4	0,03	0,11
Aro Seeger 4 mm	4	0,01	0,04
Precinto 3.6 mm	4	0,03	0,11
Imán cilíndrico 6 mm	1	0,13	0,13
Varilla 304 4 mm	2,0 m	0,79	1,59
Varilla 304 8 mm	0,3 m	1,36	0,41
Colector pluviómetro	1	3,96	3,96
Contenedor pluviómetro	1	1,08	1,08
Total			231,11

Tabla 4.3: Costos de Estación Meteorológica

El costo de la Estación Meteorológica resulta U\$S 231,64. Este valor no considera el costo de la mano de obra debido a la naturaleza prototípica del proyecto. Sin embargo, el valor enunciado se ubica por debajo de casi la totalidad de los productos disponibles comercialmente.

El anemómetro es el instrumento de mayor costo de la Estación Meteorológica. A

pesar de contar con sensores ultrasónicos para la medición y un relativamente complejo sistema electrónico de procesamiento y reporte, el instrumento más económico de similares características se ubica por encima del triple del costo de fabricación de la misma. En el otro extremo, el anemómetro ultrasónico de dos ejes de medición más caro se posiciona un orden de magnitud por encima del valor de la Estación. Consecuentemente, se resaltan los altos costos asociados al desarrollo de un instrumento del tipo y el competitivo valor del anemómetro desarrollado. Sin embargo, los costos de desarrollo y calibración no se tienen en cuenta y pueden introducir un aumento significativo en el valor calculado.

Con respecto al pluviómetro, a pesar de que en el presente trabajo se incluye en conjunto ambos instrumentos desarrollados, se destaca que los costos del mismo son reducidos (sumando exactamente U\$S 91,44 si se incluye el sistema de reporte) y en la comparación directa se ubica a la mitad del precio de la “competencia” más económica. Para ese caso, el proceso de ensamblaje y calibración, cuyo costo no es cuantificado, puede incrementar significativamente el costo final del instrumento. Las diferencias visuales entre los pluviómetros enunciados (ver figura 4.2) no son significativas; son la calidad de los materiales, el trabajo en el diseño y la resultante precisión del instrumento (también dada por los procedimientos de calibración) los que definen el precio.

Un análisis más profundo es necesario para determinar la viabilidad comercial de la producción de la Estación Meteorológica.

4.3. Conclusiones del capítulo

En este capítulo, se analizaron los costos asociados a la fabricación de la Estación Meteorológica y se la enfrentó a los anemómetros y pluviómetros disponibles comercialmente en la actualidad.

Debido a que se fabrica solamente una unidad de cada instrumento, existe un proceso de investigación y desarrollo dedicado a su concepción cuyo costo, en el contexto del presente trabajo, no es tenido en cuenta en el estudio. La mano de obra asociada a la construcción de la Estación Meteorológica, del mismo modo, tampoco es considerada.

En consecuencia, si se buscara posicionar estratégicamente los instrumentos desarrollados con fines comerciales, debe abordarse un análisis más profundo que involucre disponibilidad de componentes y mano de obra correspondiente a la fabricación de varios ejemplares de la Estación.

No obstante, el análisis comparativo expuesto en el presente capítulo deja en evidencia que un anemómetro de características similares al desarrollado lleva consigo un alto costo de producción. El anemómetro ultrasónico más económico (entre los referenciados) se ubica a casi el triple del costo de producción de la Estación Meteorológica (anemómetro y pluviómetro). Los pluviómetros, por su parte, se ubican por debajo y llegan a ser relativamente económicos (ignorando la precisión o falta de ella que estos dispositivos pueden tener).

En conclusión, la fabricación de la Estación Meteorológica con fines comerciales puede ser rentable. Sin embargo, mayores estudios deben plantearse para poder determinar con exactitud la justificación del emprendimiento.

Capítulo 5

Conclusión

Este trabajo presenta la ideación, el desarrollo y la implementación de una Estación Meteorológica de altas prestaciones a un costo reducido. Se estudiaron las variables involucradas en la medición del viento y la lluvia y se optimizaron las características de los instrumentos en pos de minimizar el error y maximizar la eficiencia.

El proyecto parte del análisis de los instrumentos presentes actualmente en el mercado, identificando virtudes e inconvenientes. Seguidamente, se acude a la literatura especializada en el tema para distinguir los parámetros que mejoran la precisión de los instrumentos. Entre ellos, se destacan el diseño aerodinámico (tanto para el anemómetro como para el colector del pluviómetro), la selección de los materiales y el desarrollo de software. Se hizo uso de herramientas computacionales para alcanzar esos objetivos, simulando comportamientos previo a la fabricación de los instrumentos.

Por otro lado, se hizo foco en la interacción estación-usuario, incorporando software dedicado para el procesamiento de las medidas y el posterior reporte en una interfaz de fácil lectura e interpretación. Se desarrollaron circuitos y se fabricaron placas que simplifican y robustecen la Estación Meteorológica. Asimismo, se sentaron las bases para la continuación del proyecto, especificando un método de procesamiento que promete aumentar considerablemente la precisión del anemómetro y alistando tanto el hardware como el software para futuras mejoras.

Finalmente, se estudiaron los costos involucrados en la fabricación de la Estación Meteorológica y se comparó el valor calculado con el precio de venta de diversos instrumentos disponibles en el mercado a la fecha. Queda allí evidenciado el potencial comercial de la Estación, a pesar de requerir estudios económicos más profundos.

Pese a no ser incorporados en el presente trabajo, se propone también incorporar la medición de humedad y posibilitar así el modelado en tiempo real de la evaporación del volumen de agua retenido en el sistema de descarga del pluviómetro. Dicha adición requeriría, además, un estudio posterior de validación. Igualmente, a raíz de un ensayo de calibración dinámica (que requiere instrumentación de laboratorio para regulación de caudal), puede utilizarse el pluviómetro para medir intensidades de precipitación. Esta característica puede resultar útil para estudios meteorológicos específicos. Asimismo, resta realizar la colocación de los instrumentos en la Facultad de Ingeniería, lugar donde se proyecta su ubicación permanente.

Se concluye que es posible construir una Estación Meteorológica integral y autónoma la cual es útil para el estudio de los recursos ambientales urbanos y, además, es una plataforma para futuras adiciones o mejoras.

Apéndice A

Ultrasonido y transductores ultrasónicos

A.1. Introducción

En este apartado se introduce el ultrasonido y se describen las características y parámetros que lo definen. Además, se caracteriza a los transductores ultrasónicos y, en especial, a los piezoeléctricos.

A.2. Ultrasonido

El ultrasonido es una rama específica de la acústica que trabaja con ondas vibratorias en sólidos, líquidos y gases a frecuencias por encima de la auditiva. Por ende, compone todas aquellas frecuencias entre 20 kHz y aproximadamente 1 THz (ver figura A.1). Cabe destacar que el límite inferior es algo arbitrario ya que una persona joven puede llegar a escuchar frecuencias levemente por encima de los 20 kHz.

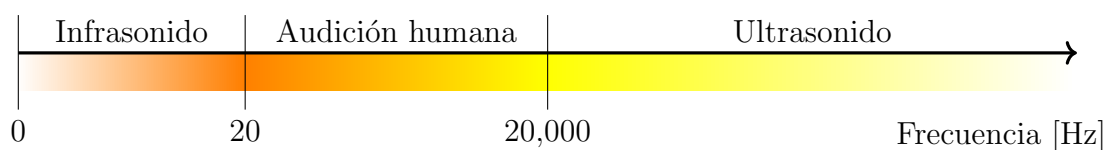


Figura A.1: Rango de frecuencias de ondas acústicas

El ultrasonido, originalmente llamado supersonido, se ha convertido en un objeto de estudio científico a partir de la Primera Guerra Mundial (1918) cuando Paul Langevin, un físico francés, inventó el primer transductor ultrasónico de cuarzo (figura A.2) [1].

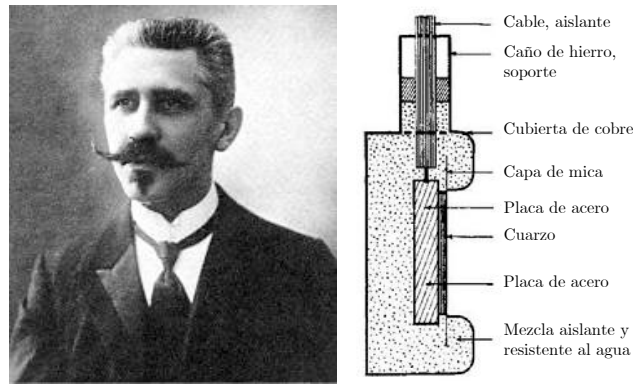


Figura A.2: Paul Langevin y su transductor “le triplet”

Se conoce que las ondas ultrasónicas se mueven en el medio a la velocidad del sonido en ese medio. Las ondas acústicas requieren un medio para propagarse (a diferencia de la luz) y la velocidad que adquieren depende de él. A la fecha, existen múltiples aplicaciones del ultrasonido que van desde la soldadura hasta la formación de imágenes o caracterización de fluidos [1, 2].

A.3. Ondas acústicas y propagación en el medio

Las ondas acústicas se definen como ondas longitudinales y transversales de vibración elástica propagándose en un medio elástico (figura A.3) [3]. Las ondas longitudinales implican pequeños cambios de volumen del medio y, las transversales, deformaciones sin cambios volumétricos (también llamadas ondas de corte). Los medios fluidicos, excluyendo los viscoelásticos, no soportan deformaciones, y como resultado las ondas transversales no se propagan en estos medios. La velocidad de propagación de las ondas acústicas (velocidad del sonido) depende del tipo de onda.



Figura A.3: Onda acústica y su propagación en el medio

Para ondas acústicas propagándose en un fluido (ondas longitudinales), los cambios de volumen son caracterizados por una variación de presión en el medio. Se define como la diferencia entre la fluctuación en la presión P y la presión estática P_s (sin propagación de onda acústica). En ecuaciones [3]:

$$p(x, t) = P - P_s \quad (\text{A.1})$$

A partir de dicha diferencia de presión, las ondas acústicas causadas por cambios de volumen se pueden describir como el desplazamiento d de un pequeño volumen en un punto $x(x, y, z)$.

$$p = -K \cdot \nabla \vec{d} = -K \cdot \left(\frac{\partial \vec{d}}{\partial x}, \frac{\partial \vec{d}}{\partial y}, \frac{\partial \vec{d}}{\partial z} \right) \quad (\text{A.2})$$

donde K es el módulo de elasticidad del medio. Sustituyendo en las ecuaciones de Euler que caracterizan el movimiento de fluidos no viscosos, y usando la relación $\partial(\nabla \vec{d})/\partial t = \nabla \vec{u}$ (\vec{u} es el vector velocidad de una partícula del fluido de la propagación de la onda acústica). Con esto, puede escribirse:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K}{\rho} \cdot \Delta p \quad (\text{A.3})$$

Esta ecuación se conoce como la *ecuación de la onda* e indica que p se propaga con la velocidad del sonido c que puede escribirse:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (\text{A.4})$$

o lo que es lo mismo:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (\text{A.5})$$

siendo γ el índice adiabático (adimensional, 1.4), ρ es la densidad del aire y P es la presión atmosférica. Para escribir la velocidad del sonido como función de la temperatura y la humedad (que son parámetros de sencilla medición), puede utilizarse la ley de los gases ideales [4]:

$$P = \frac{\rho RT}{M} \quad (\text{A.6})$$

donde P es la presión atmosférica, R es la constante universal de los gases ($8,314 \frac{J}{mol \cdot kg}$), T es la temperatura del aire y M es su masa molar. Sustituyendo (A.6) en (A.5) se llega a la siguiente expresión:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (\text{A.7})$$

Para condiciones normales de presión (CNP), la velocidad del sonido se presenta en la figura A.4 y la expresión se reduce a:

$$c = 20,046\sqrt{T} \quad (\text{A.8})$$

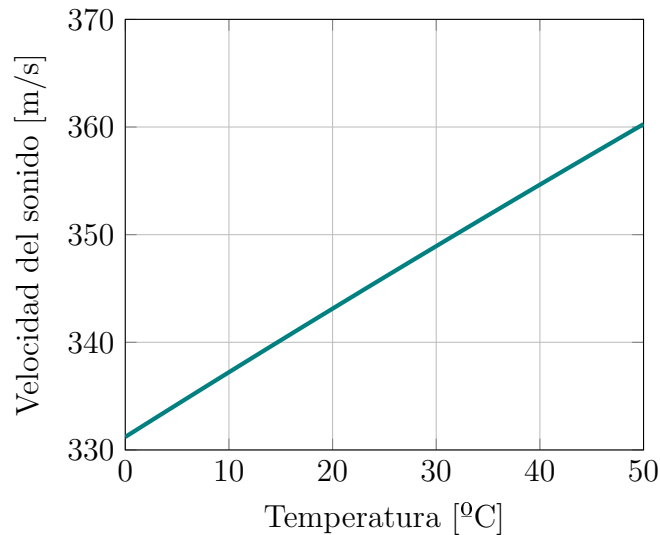


Figura A.4: Velocidad del sonido en aire seco a presión atmosférica

A.4. Transductores ultrasónicos

Para la emisión y recepción de las ondas ultrasónicas se utilizan transductores. Un transductor, por definición, es un dispositivo que es actuado por potencia de un sistema para proporcionar potencia en otra forma a un segundo sistema [1]. Particularmente, los transductores ultrasónicos transforman energía eléctrica en energía ultrasónica.

ENERGÍA ELÉCTRICA \iff ENERGÍA ULTRASÓNICA

Por lo tanto, el mismo dispositivo puede utilizarse para emitir una onda ultrasónica a partir de una excitación eléctrica; y también como receptor, en sentido contrario. Existen diversos tipos de transductores ultrasónicos: magnetostrictivos, electromagnéticos, neumáticos y piezoeléctricos. Estos últimos (ver figura A.5) son los más utilizados [5] y los seleccionados para el anemómetro.



Figura A.5: Distintos cerámicos piezoeléctricos

Transductores piezoeléctricos

Los cristales y cerámicos piezoeléctricos son usados como detectores y radiadores de potencia acústica desde frecuencias bajas hasta por encima de $10^9 Hz$. Funcionando como emisor, cuando se somete a este piezoeléctrico a una diferencia de potencial, genera una vibración mecánica. Esto se define como *efecto piezoeléctrico* [6]. Lo inverso también es verdadero. La gran mayoría de los transductores piezoeléctricos utilizados son cerámicos debido a su alta eficiencia, facilidad de construcción, amplio rango de características, estabilidad y bajo costo. Estos cerámicos pueden tener distintos *modos de vibración*, según su geometría y la dirección del campo eléctrico aplicado (ver figura A.6) [7]. Los transductores utilizados en el presente trabajo, así como también la mayoría de los disponibles comercialmente, vibran según el modo *espesor*.

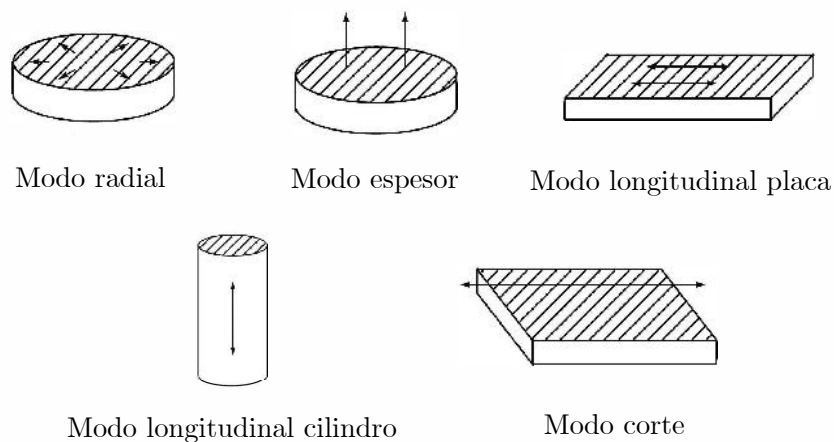


Figura A.6: Modos de vibración de un piezoeléctrico

Bibliografía

- [1] Dale Ensminger and Leonard J Bond. *Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications*. CRC press, 2011.
- [2] J David N Cheeke. *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC press, 2017.
- [3] Yasushi Takeda. *Ultrasonic Doppler velocity profiler for fluid flow*, volume 101. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] V. Cedrón, J.; Landa. *Leyes de los gases ideales*. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2011.
- [5] Oskar E Mattiat. *Ultrasonic transducer materials*. Springer Science & Business Media, 1971.
- [6] Jiashi Yang. *An introduction to the theory of piezoelectricity*, volume 9. Springer, 2005.
- [7] Murata Electronics. Piezoelectric ceramic sensors (piezotite). Catalogue, 2014.

Apéndice B

Reflexión y transmisión en interfaces

B.1. Introducción

Las ondas ultrasónicas dependen del medio para propagarse. En este apartado se describe qué sucede cuando una onda ultrasónica cambia de medio. Se caracteriza el medio y se estudia cómo se comporta la onda acústica en interfaces.

B.2. Impedancia acústica

Se define impedancia acústica de un medio como:

$$z = \frac{p_e}{v} \quad (\text{B.1})$$

donde p_e es la presión específica y v la velocidad de las partículas en ese medio. Dicha velocidad, a su vez, se escribe como:

$$v = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (\text{B.2})$$

donde R es la constante universal de los gases ($8,314 \frac{J}{mol \cdot kg}$), T es la temperatura y M la masa molar.

Otro parámetro relevante, y el utilizado para caracterizar la reflexión y transmisión de ondas ultrasónicas en interfaces, es la *impedancia característica* del fluido Z_i . Z_i depende de la densidad volumétrica del fluido ρ y la velocidad del sonido V_i en el medio. En ecuaciones:

$$Z_i = \rho \cdot V_i \quad (\text{B.3})$$

donde Z_i está en $MRayls$, con la densidad en $10^3 \frac{kg}{m^3}$ y la velocidad del sonido en $\frac{km}{s}$.

A continuación se presentan las impedancias características de algunos materiales [1, 2].

Estado de agregación	Material	Z_L [$M Rayls$]
G	Aire (0 m s.n.m. y 20°C)	$4,29 \cdot 10^{-4}$
G	Hidrógeno (0 m s.n.m. y 20°C)	$1,15 \cdot 10^{-4}$
L	Agua	1,48
L	Etanol	0,95
L	Mercurio	19,58
S	Aluminio	17,33
S	Oro	62,60
S	Acero inoxidable 410	44,20

Tabla B.1: Impedancias características longitudinales de algunos materiales

B.3. Incidencia normal

El caso más simple de analizar es el de una interfaz a incidencia normal (figura B.1). En este caso, dada una onda ultrasónica incidente perpendicular a la interfaz, existe una onda reflejada y una transmitida.

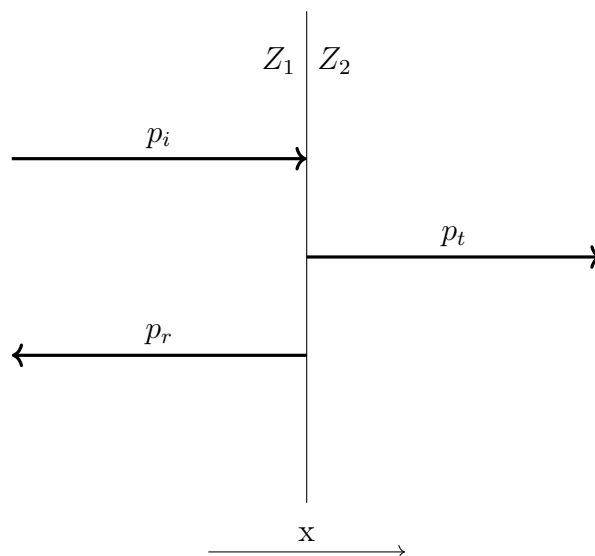


Figura B.1: Configuración para reflexión y transmisión con incidencia normal

Las tres ondas de presión involucradas, y tomando la amplitud de la onda incidente como unitaria, pueden escribirse:

$$p_i = e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (\text{B.4})$$

$$p_r = R_{ef} e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (\text{B.5})$$

$$p_t = T_{ra} e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (\text{B.6})$$

donde p_i , p_r y p_t son las ondas de presión incidente, reflejada y transmitida, respectivamente. k_1 y k_2 son los números de onda para ambos medios. Ya que ambos medios deben estar en contacto íntimo en una interfaz perfecta, las condiciones de contorno son continuidad de presión y velocidad en $x = 0$. Por lo tanto, puede escribirse:

$$R_{ef} + 1 = T_{ra} \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{1}{Z_1}(1 - R_{ef}) = \frac{T_{ra}}{Z_2} \quad (\text{B.8})$$

donde Z_1 y Z_2 son las impedancias acústicas características de los medios. Finalmente, resolviendo (B.7) y (B.8) se llega a:

$$T_{ra} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{B.9})$$

$$R_{ef} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{B.10})$$

que son los índices de transmisión T_{ra} y reflexión R_{ef} .

Cuando, aún con incidencia normal, se interpone entre ambos medios una capa delgada de un medio diferente (ver figura B.2), el análisis cambia. Debe considerarse el espesor de la capa. Operando de igual manera con las ondas de presión y determinando continuidad puede escribirse [1]:

$$R_{ef} = \frac{Z_{eq} - Z_1}{Z_{eq} + Z_1} \quad (\text{B.11})$$

Nótese que la expresión se asemeja a (B.10) y expresa a la capa interpuesta y el medio sucesivo como una única impedancia que “ve” la onda incidente. Dicha impedancia se define como:

$$Z_{eq} = Z_2 \frac{Z_3 - jZ_2 \tan(k_2 d_{capa})}{Z_2 - jZ_3 \tan(k_2 d_{capa})} \quad (\text{B.12})$$

donde $k_2 d_{capa} = \phi_{capa}$ equivale al cambio de fase producido en la capa intermedia.

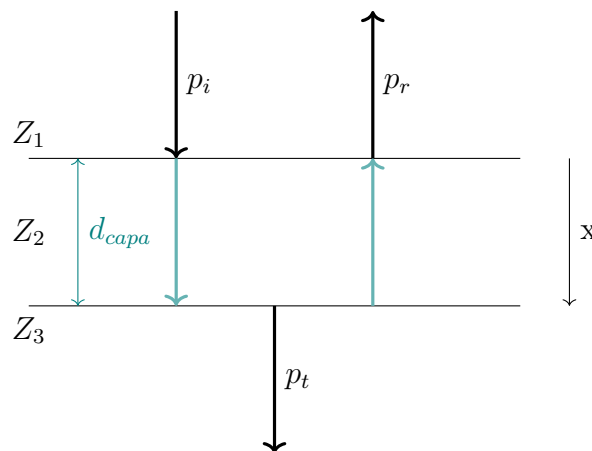


Figura B.2: Configuración de capa de espesor d_{capa} entre dos medios con incidencia normal

B.4. Incidencia oblicua

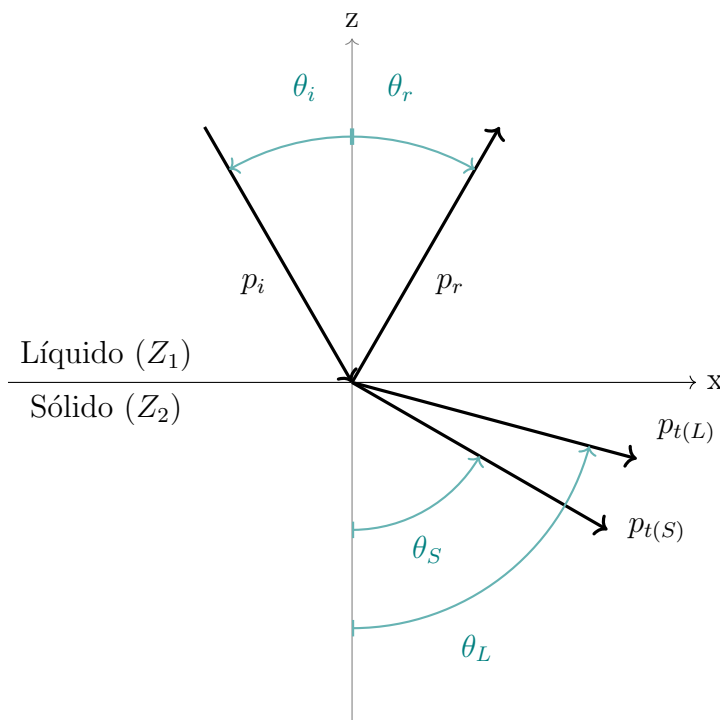


Figura B.3: Configuración de interfaz líquido-sólido con incidencia oblicua

A continuación se analiza el caso de una onda ultrasónica de incidencia oblicua desde el fluido hacia el sólido para una interfaz plana (figura B.3). Considerando la amplitud de la onda incidente como unitaria, puede escribirse:

$$p_i = e^{j(\omega t - k \sin(\theta_i)x + k \cos(\theta_i)z)} \quad (\text{B.13})$$

$$p_r = R_{ef} e^{j(\omega t - k \sin(\theta_r)x - k \cos(\theta_r)z)} \quad (\text{B.14})$$

$$p_{t(L)} = T_{ra(L)} e^{j(\omega t - k_L \sin(\theta_L)x + k_L \cos(\theta_L)z)} \quad (\text{B.15})$$

$$p_{t(S)} = T_{ra(S)} e^{j(\omega t - k_S \sin(\theta_S)x + k_S \cos(\theta_S)z)} \quad (\text{B.16})$$

donde k y k_L son los números de onda longitudinal para el fluido y el sólido, respectivamente; y k_S es el número de onda de corte para el sólido. Por su parte, R_{ef} , T_L y T_S son los coeficientes o índices de reflexión y transmisión longitudinal y transversal.

Estableciendo condiciones de contorno por continuidad en la interfaz y definiendo:

$$Z_1 = \frac{\rho_1 V_1}{\cos(\theta_i)} \quad (\text{B.17})$$

$$Z_L = \frac{\rho_2 V_L}{\cos(\theta_L)} \quad (\text{B.18})$$

$$Z_S = \frac{\rho_2 V_S}{\cos(\theta_S)} \quad (\text{B.19})$$

De aquí puede definirse una impedancia única Z_{eff} que caracteriza al sólido e incluye ambas ondas transmitidas y así poder obtener índices de reflexión y transmisión.

Además, para independizarse de los distintos ángulos y expresar los índices en función del ángulo de incidencia θ_i se utiliza la Ley de Snell.

$$Z_{eff} = Z_L \cos^2(2\theta_S) + Z_S \sin^2(2\theta_S) \quad (\text{B.20})$$

$$\frac{\sin(\theta_i)}{V_1} = \frac{\sin(\theta_r)}{V_1} = \frac{\sin(\theta_S)}{V_S} = \frac{\sin(\theta_L)}{V_L} \quad (\text{B.21})$$

Finalmente:

$$R_{ef}(\theta_i) = \frac{Z_{eff} - Z_1}{Z_{eff} + Z_1} \quad (\text{B.22})$$

El mismo análisis puede realizarse para una interfaz fluido-fluido. En ese caso, la impedancia característica transversal es nula ($Z_S = 0$ y $V_S = 0$).

Material	$\rho [10^3 kg/m^3]$	$V_L [10^3 m/s]$	$V_S [10^3 m/s]$
(G) aire (0 m s.n.m. y 20°C)	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0,34	-
(L) agua (20°C)	1,00	1,48	-
(S) aluminio	2,70	6,42	3,04
(S) cobre	8,93	5,01	2,27
(S) PET-G	1,27	2,34	-

Tabla B.2: Valores característicos de algunos materiales

Expresadas las ecuaciones y junto a los datos de B.2 [1–3], puede estudiarse el comportamiento de una interfaz aire - PET-G según el ángulo de incidencia.

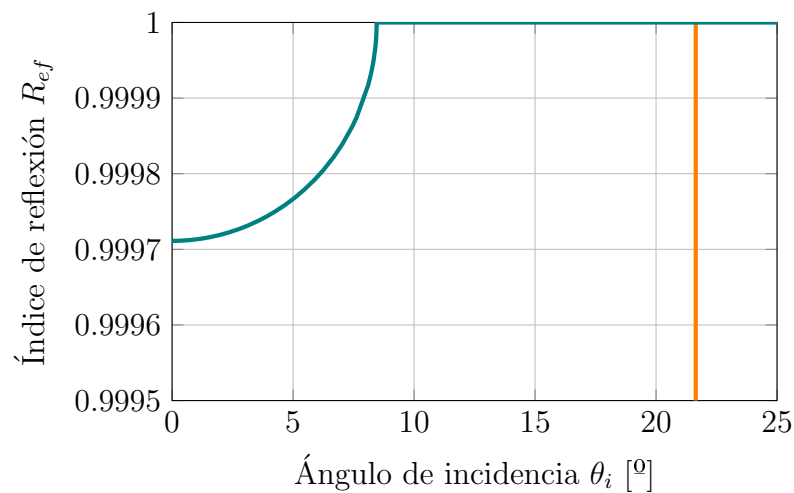


Figura B.4: Reflexión según ángulo de incidencia en interfaz aire - PET-G

De la figura B.4 se deduce que, al ser el aire y el plástico PET-G dos medios altamente disímiles, la transmisión es prácticamente nula para cualquier ángulo de incidencia (la línea vertical marca el ángulo correspondiente al reflector del anemómetro del presente trabajo).

Bibliografía

- [1] Yasushi Takeda. *Ultrasonic Doppler velocity profiler for fluid flow*, volume 101. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] Dale Ensminger and Leonard J Bond. *Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications*. CRC press, 2011.
- [3] J David N Cheeke. *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC press, 2017.

Apéndice C

Código fuente

C.1. Introducción

En este apartado se presenta el código desarrollado para la configuración del software.

C.2. Node-RED (Node.js)

- ▷ Subprograma: Anemómetro
- ▷ Subprograma: Pluviómetro

Apéndice D

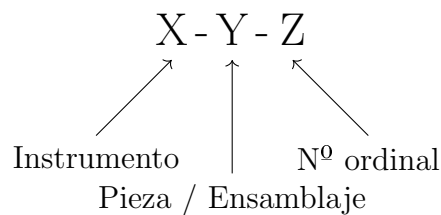
Dibujos técnicos

D.1. Introducción

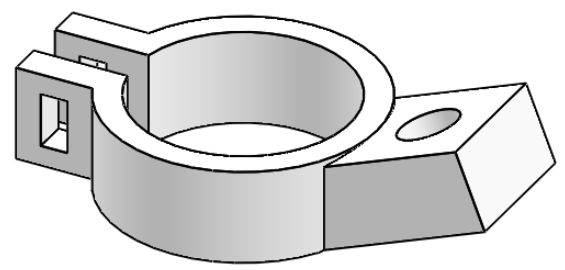
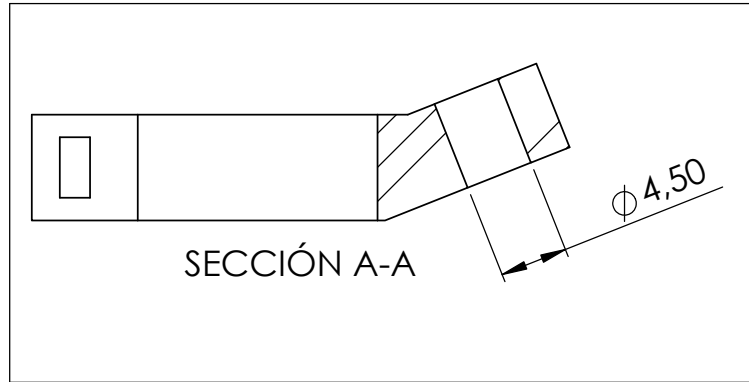
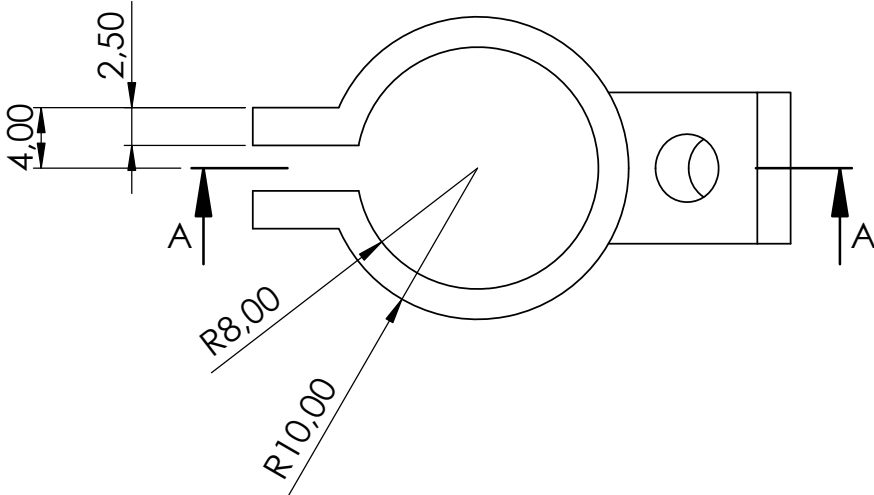
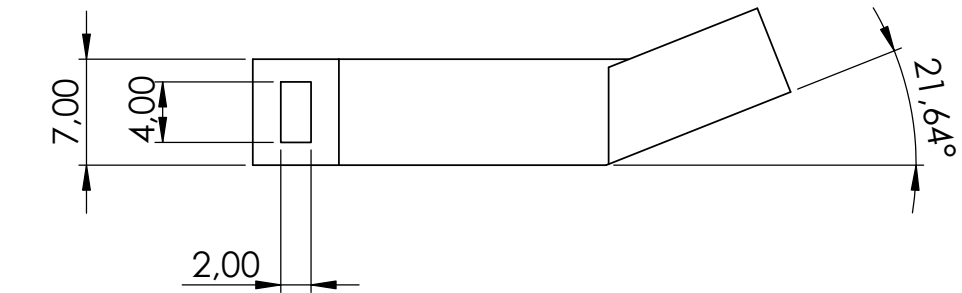
En este apartado se presentan los dibujos técnicos de los elementos que componen los instrumentos desarrollados en el presente trabajo. Todos ellos se adecúan a las normativas IRAM 4501, 4504, 4505, 4513, 4524 y 4540.

D.2. Codificación

Cada dibujo tiene un número asociado que se ajusta a la siguiente codificación.



Nº de dibujo	Instrumento	Tipo	Título
1-1-1	Anemómetro	Pieza	Porta transductor
1-1-2	Anemómetro	Pieza	Cruceta: Base de Sensores
1-1-3	Anemómetro	Pieza	Base de Varillas
1-1-4	Anemómetro	Pieza	Reflector
1-1-5	Anemómetro	Pieza	Tapa superior
1-1-6	Anemómetro	Pieza	Cilindro
1-1-7	Anemómetro	Pieza	Base a Caño
1-1-8	Anemómetro	Pieza	Varilla
1-2-1	Anemómetro	Ensamblaje	Anemómetro: en Perspectiva
2-1-1	Pluviómetro	Pieza	Cubeta basculante: Tipper
2-1-2	Pluviómetro	Pieza	Base: Parte 1
2-1-3	Pluviómetro	Pieza	Base: Parte 2
2-1-4	Pluviómetro	Pieza	Cojinete: Cubeta Basculante
2-2-1	Pluviómetro	Ensamblaje	Pluviómetro: Explosionada
3-1-1	Electrónica	Pieza	Base Raspberry Pi: DIN
3-1-2	Electrónica	Pieza	Base Procesador NXP: DIN
3-1-3	Electrónica	Pieza	Base Fuente: DIN



NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Porta transductor [4 piezas]
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	A4
PET				1-1-1	
MASA [g]: 2.04				ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

F

E

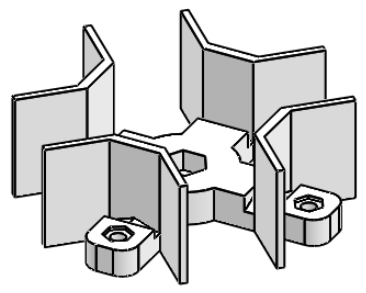
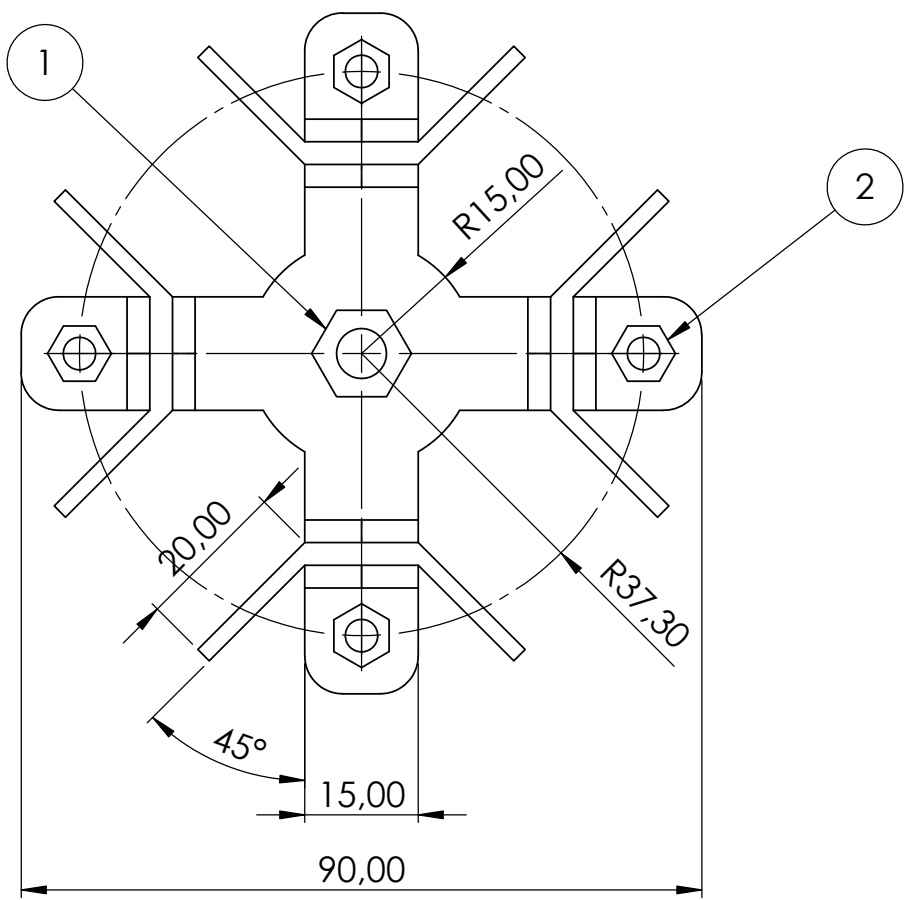
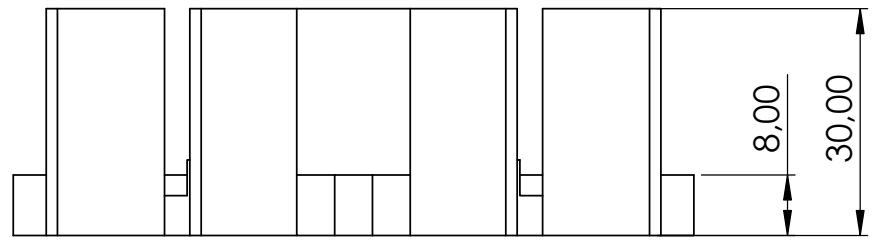
D

C

B

A

1: Tuerca M6
2: Tuerca M4



F

E

D

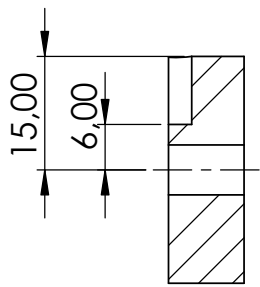
C

B

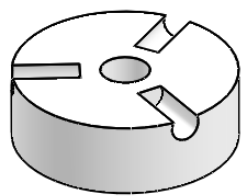
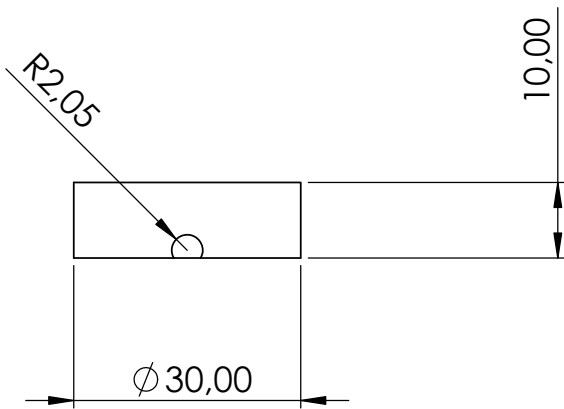
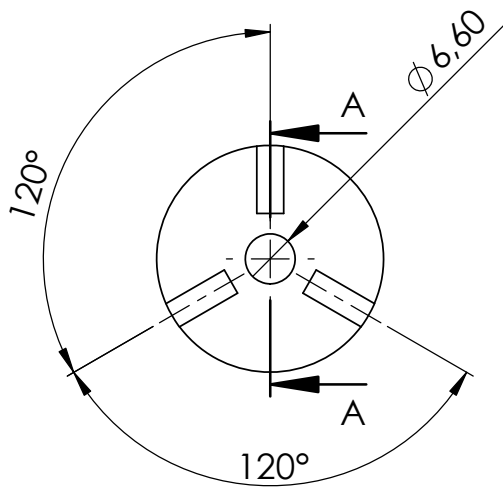
A

NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Cruceta Base de Sensores
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				1-1-2	
MASA [g]: 48.36				ESCALA:1:1	
				HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1



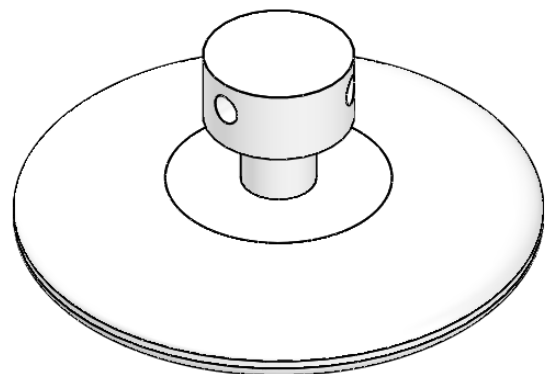
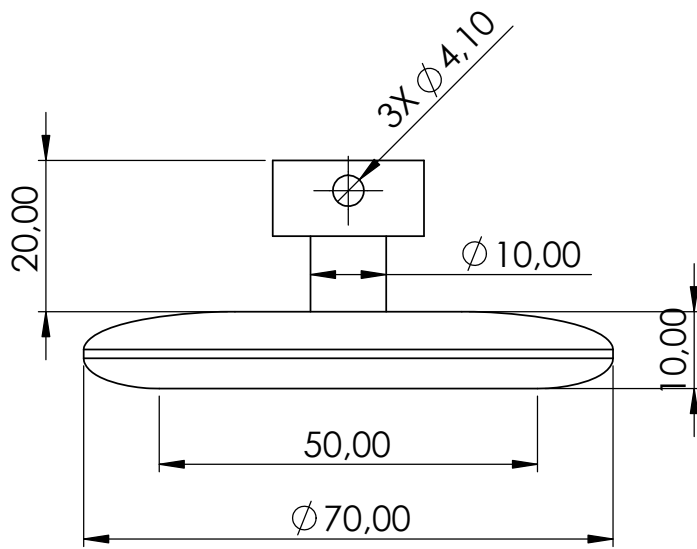
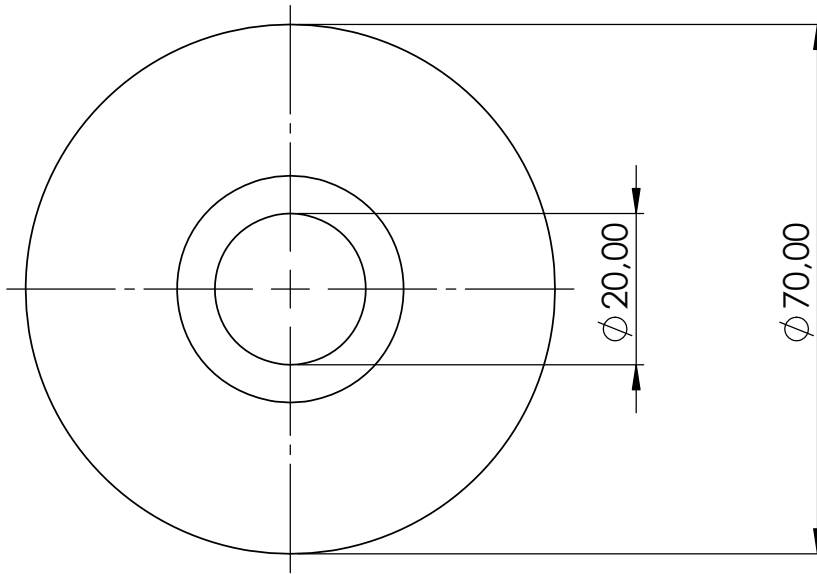
SECCIÓN A-A



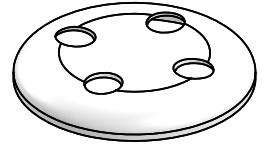
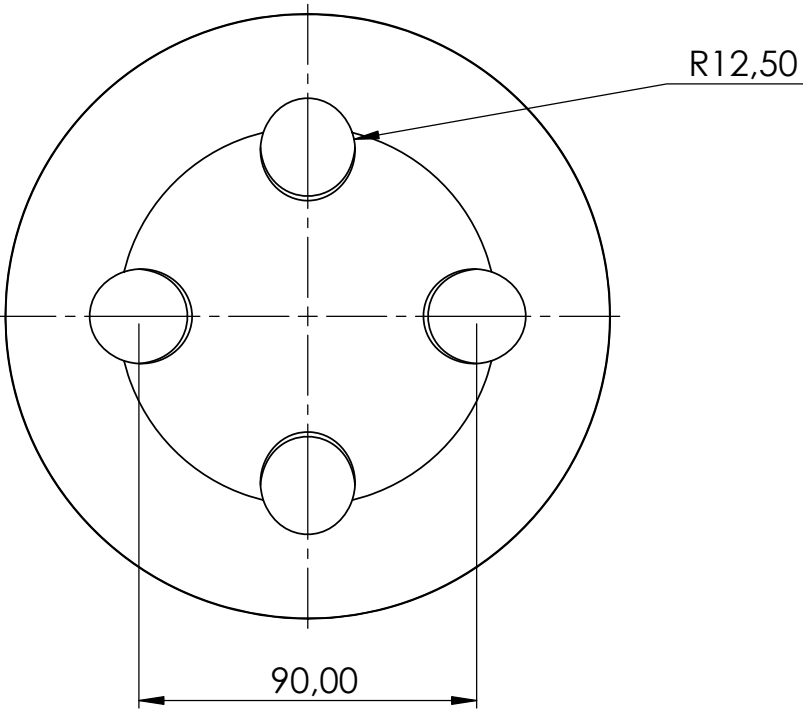
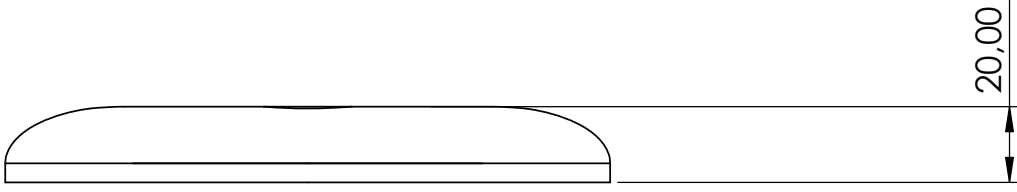
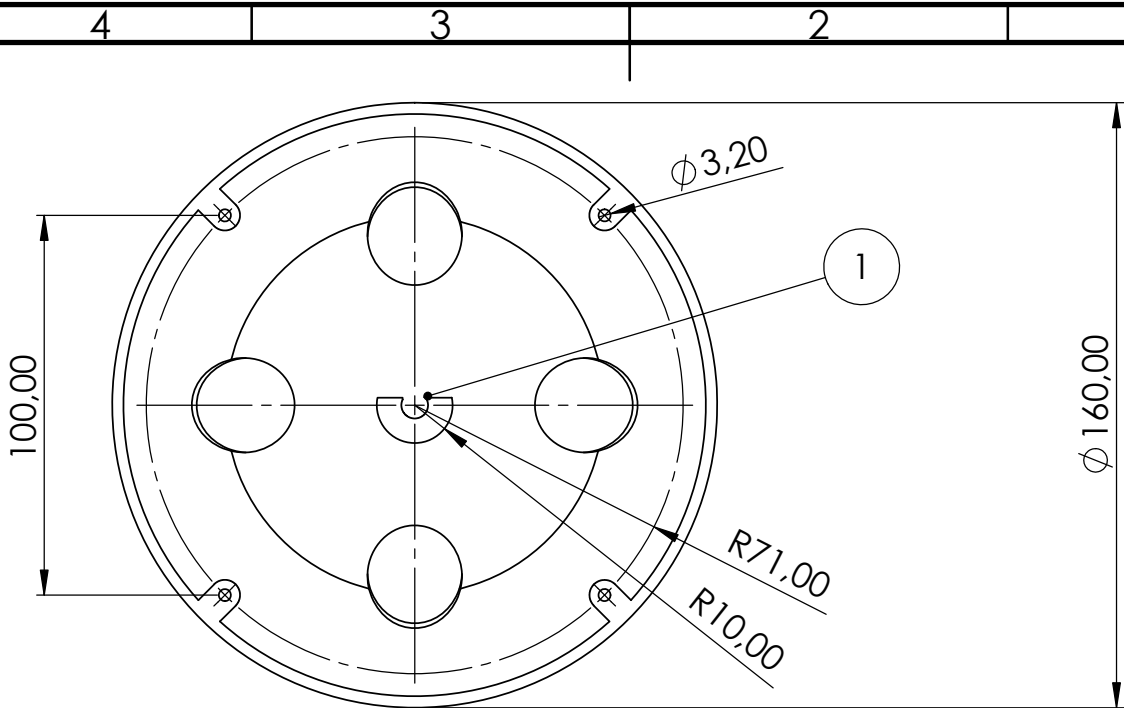
NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Base de Varillas
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				1-1-3	
MASA [g]: 9,15				ESCALA: 1:1	
				HOJA 1 DE 1	

A

A

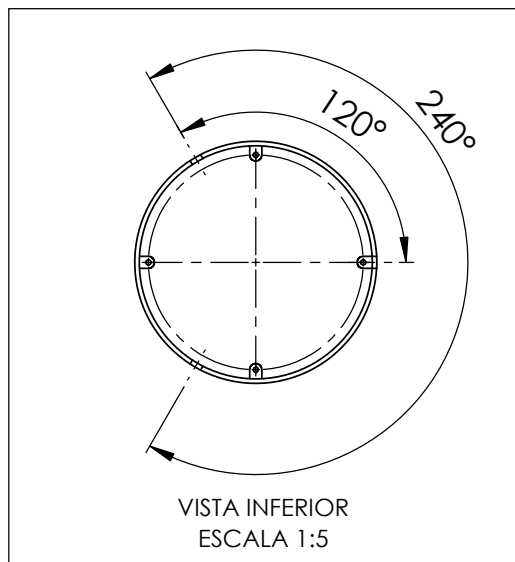
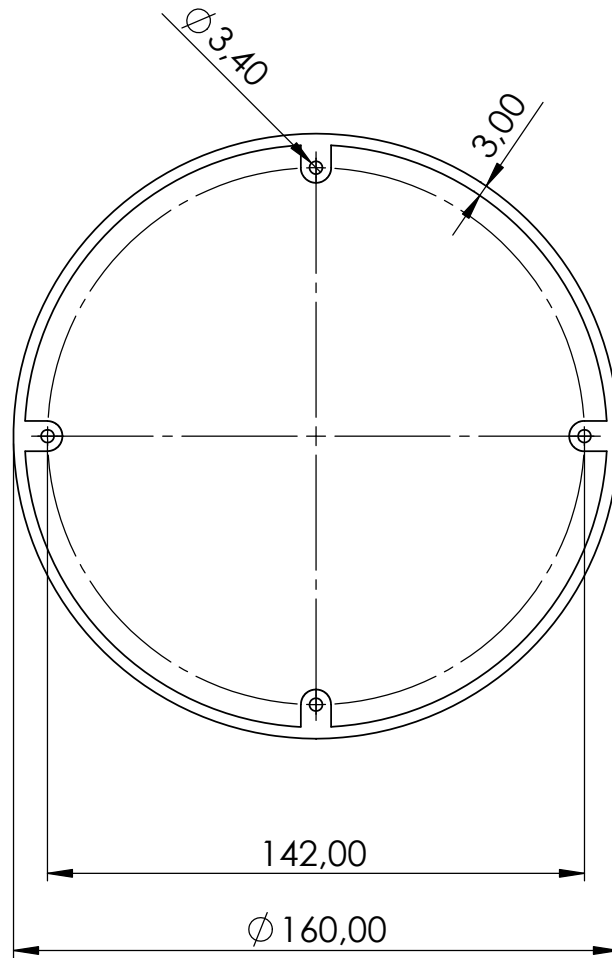
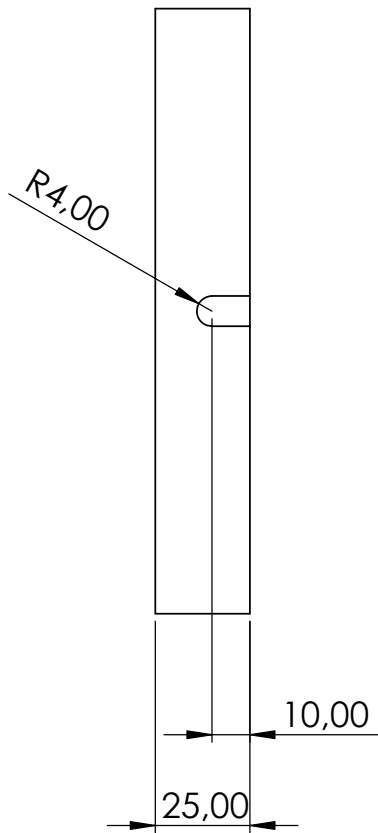


NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Reflector
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				1-1-4	
MASA [g]: 49.51				ESCALA: 1:1	
				HOJA 1 DE 1	

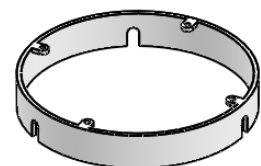


1: Tornillo HEX M6

NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Tapa superior
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				1-1-5	
MASA [g]: 101.08				ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1



VISTA INFERIOR
ESCALA 1:5



NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Cilindro
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				1-1-6	
MASA [g]: 52.27				ESCALA:1:2	
				HOJA 1 DE 1	

A4

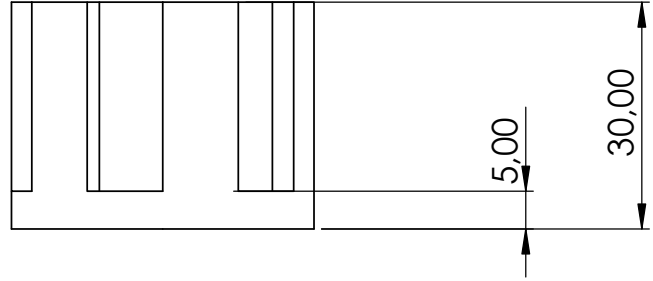
4 3 2 1

F

F

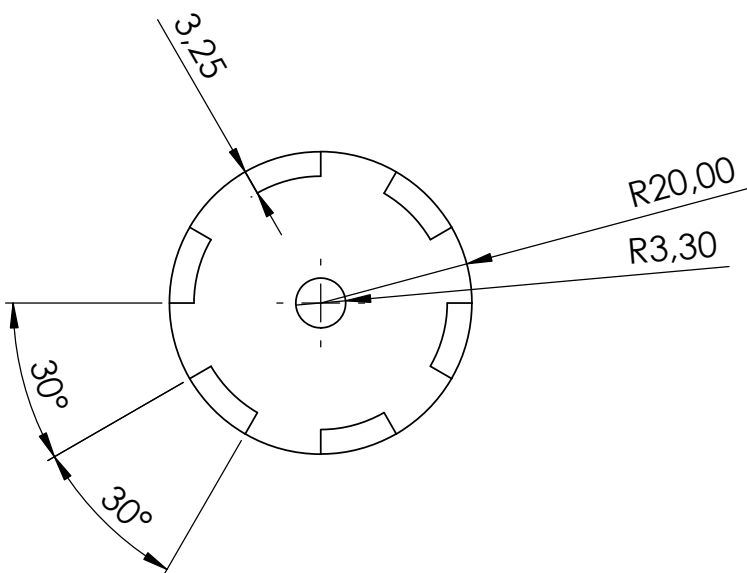
E

E



D

D

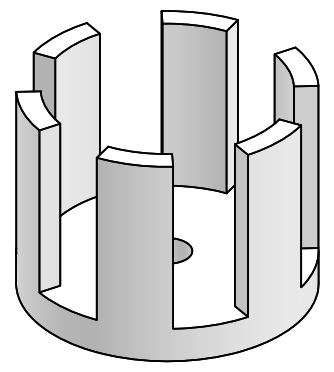


C

C

B

B

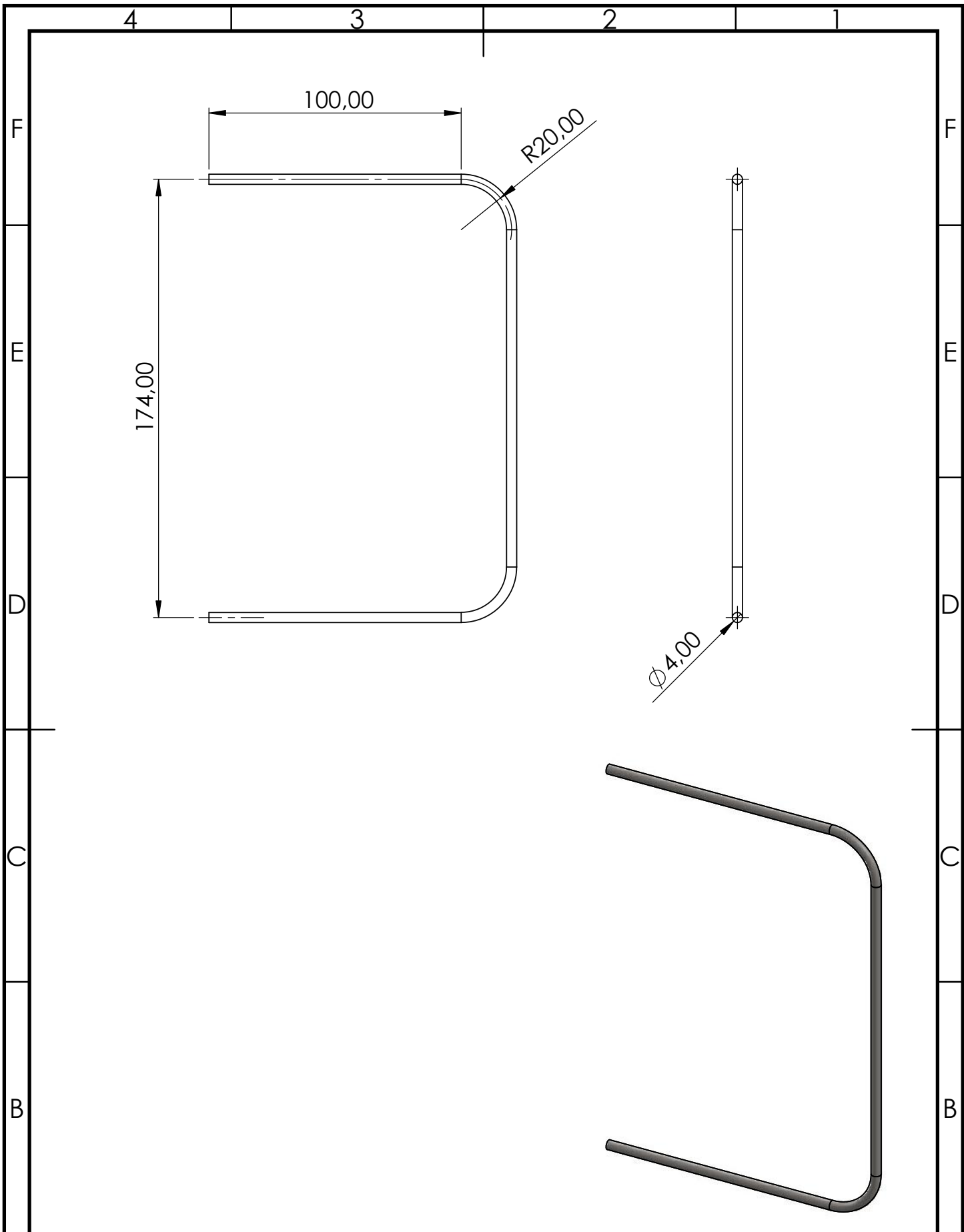


A

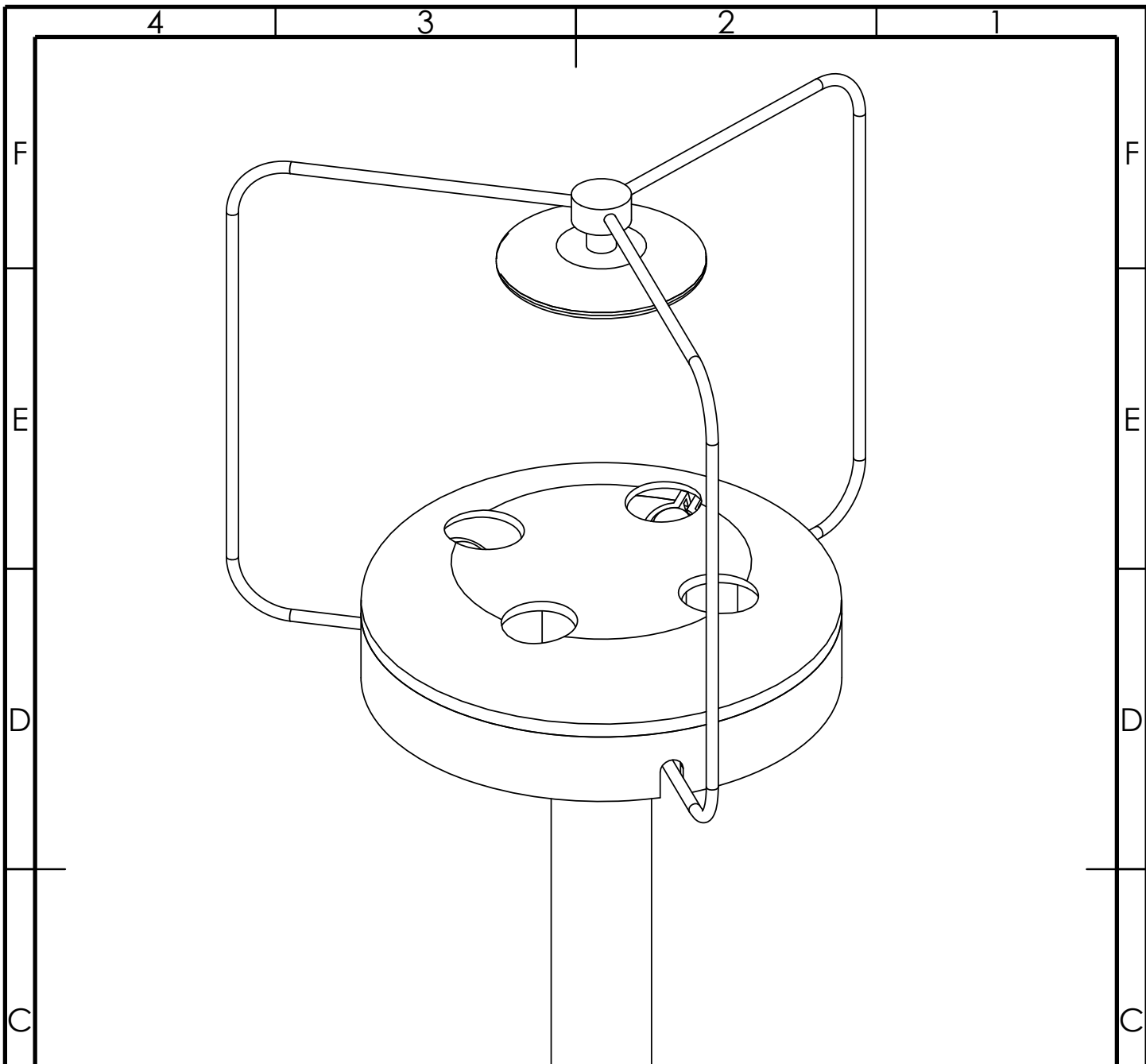
A

NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Base a Caño
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				1-1-7	
MASA [g]: 15.34				ESCALA: 1:1	
				HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1

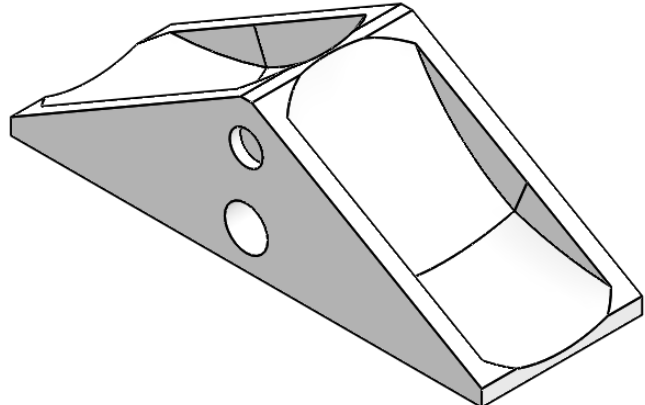
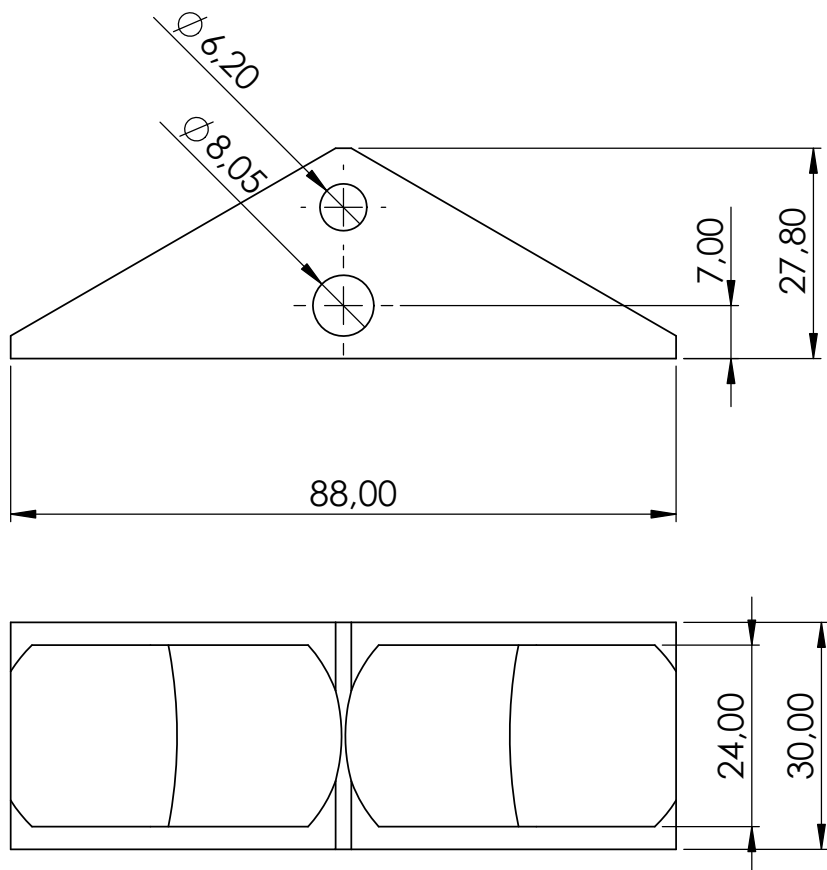


NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Varilla
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	A4
AISI 304				1-1-8	
MASA [g]: 39.87				ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1

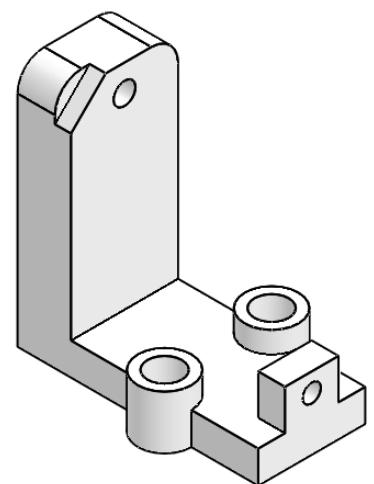
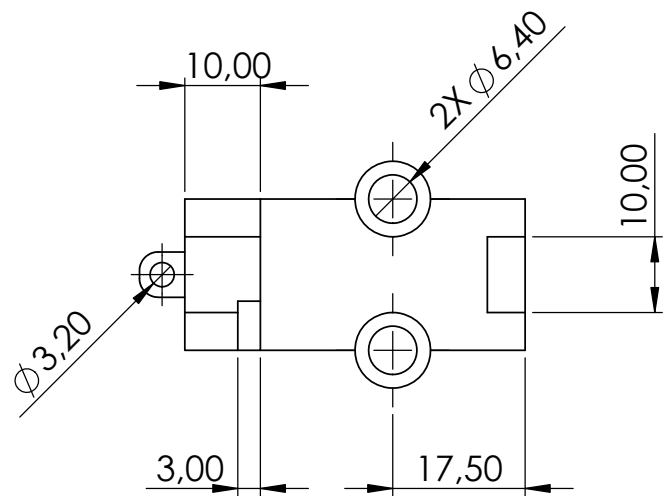
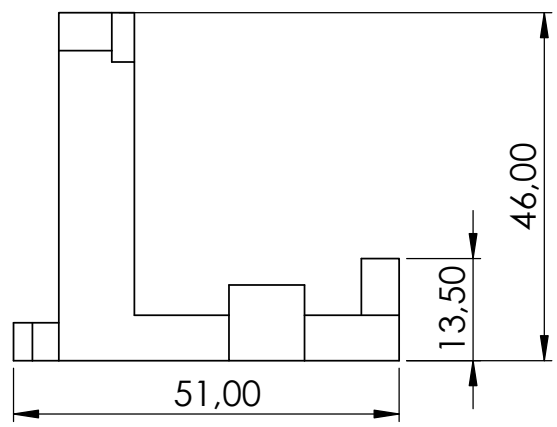
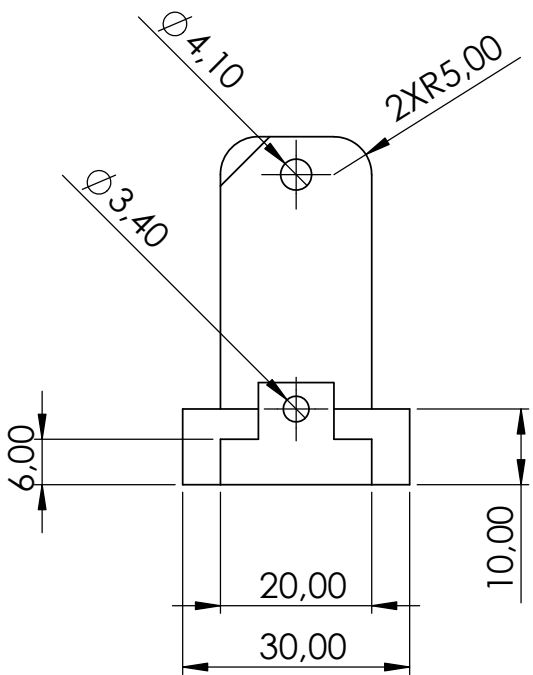


N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	TORNILLO HEX M6 X 60	ACERO INOX.	1
2	TORNILLO HEX M4 X 12	ACERO INOX.	4
3	TORNILLO CABEZA CRUZ M3 X 10	ACERO INOX.	4
4	TUERCA M4	ACERO INOX.	4
5	ARANDELA M6	---	1
6	TUERCA M6	ACERO INOX.	2
7	PRECINTO DE SEGURIDAD 20 X 3,6	PLÁSTICO	4

NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Anemómetro Vista en Perspectiva
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	A4
MASA [g]:				ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1



NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Cubeta basculante Tipper
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				2-1-1	
MASA [g]: 37.83				ESCALA: 1:1	
				HOJA 1 DE 1	



NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Base Parte 1
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				2-1-2	
MASA [g]: 19.92				ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1

A

A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

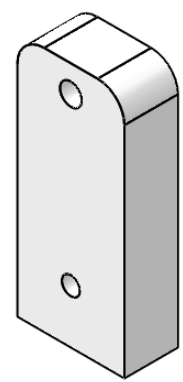
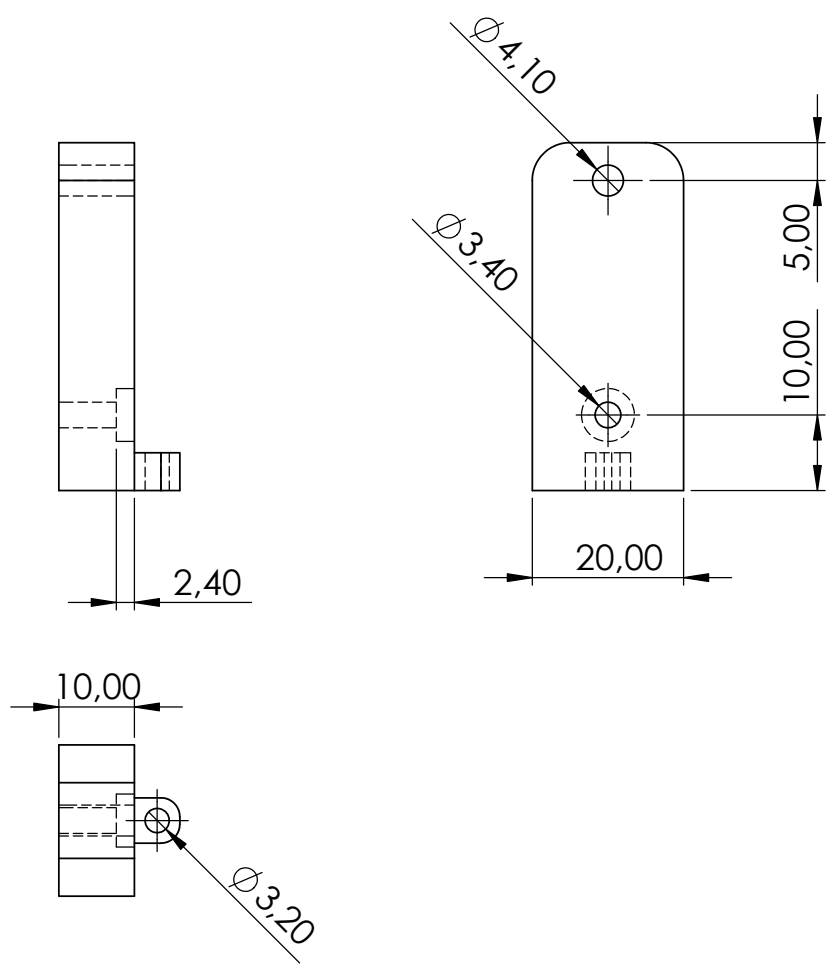
D

C

C

B

B

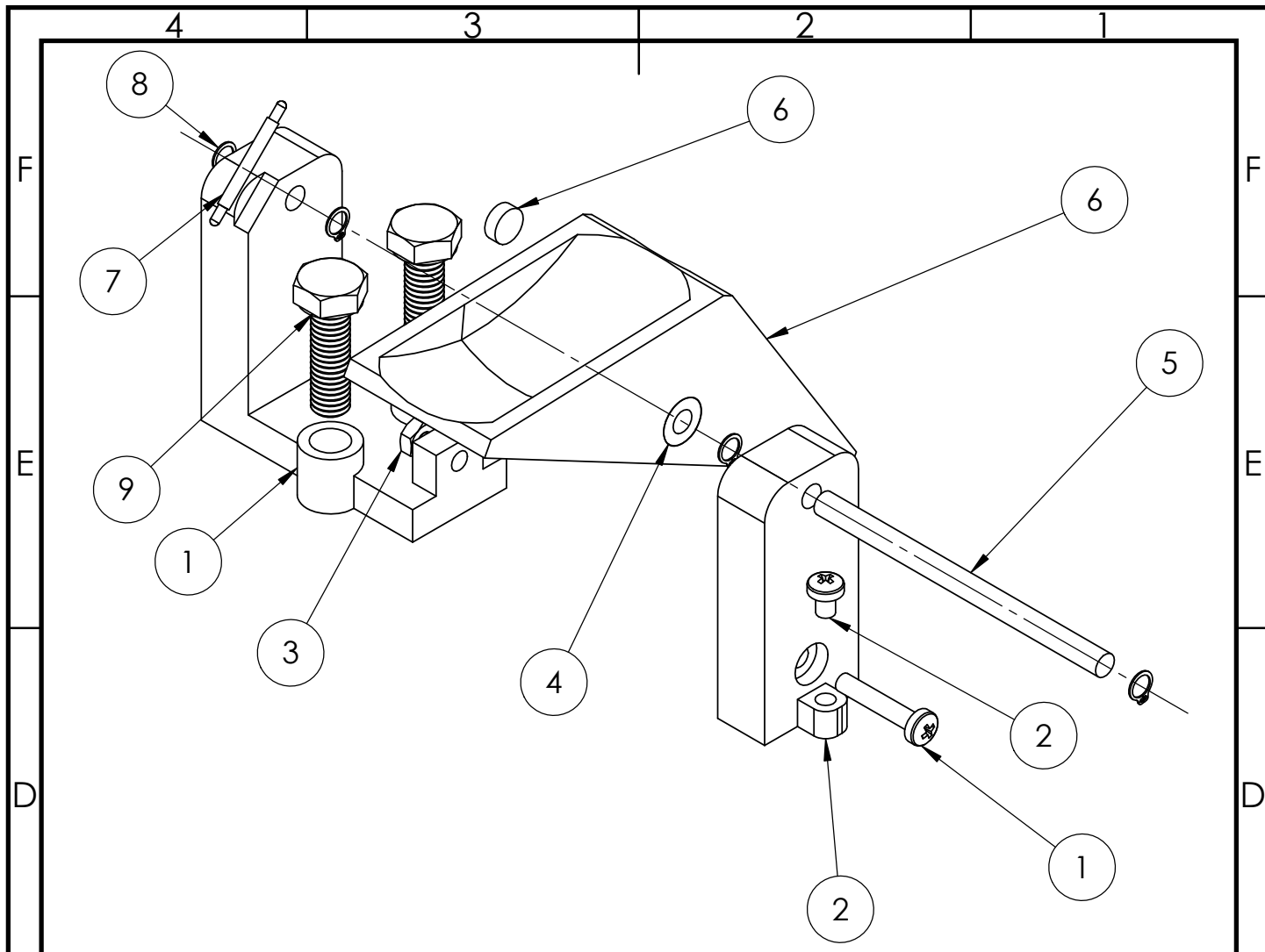


A

A

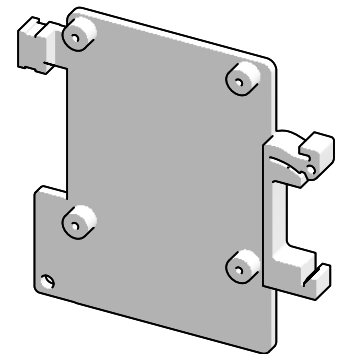
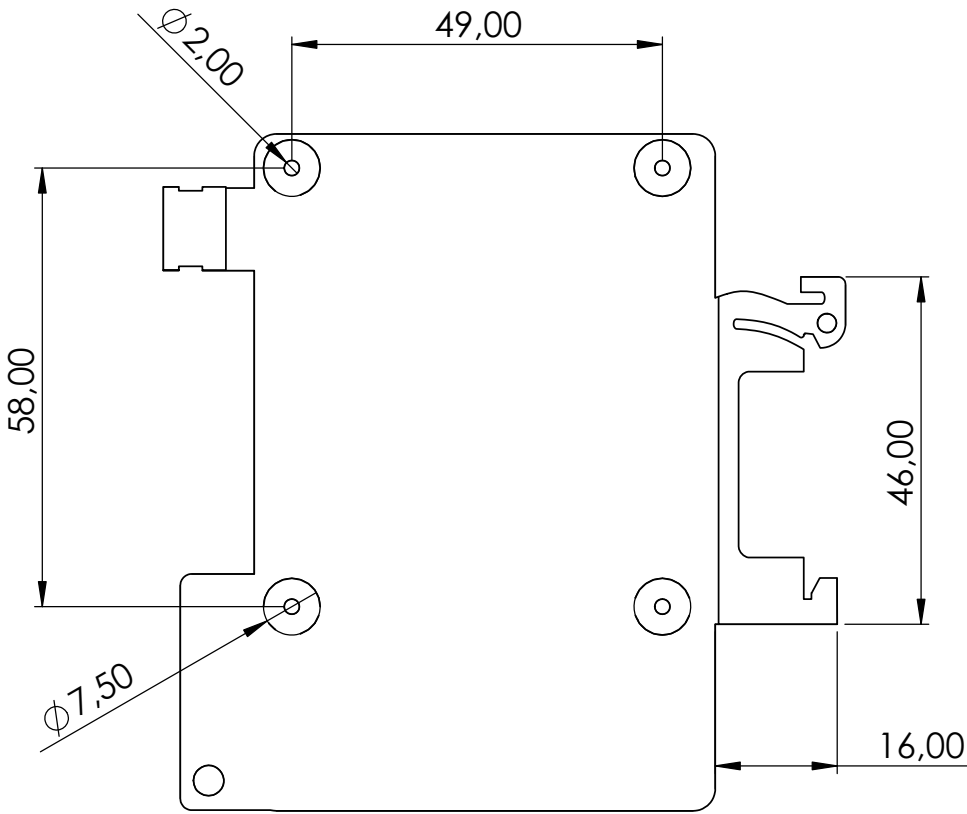
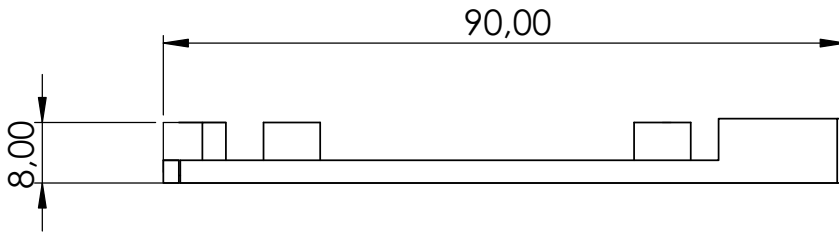
NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Base Parte 2
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				2-1-3	
MASA [g]: 12.67				ESCALA: 2:1	
				HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1



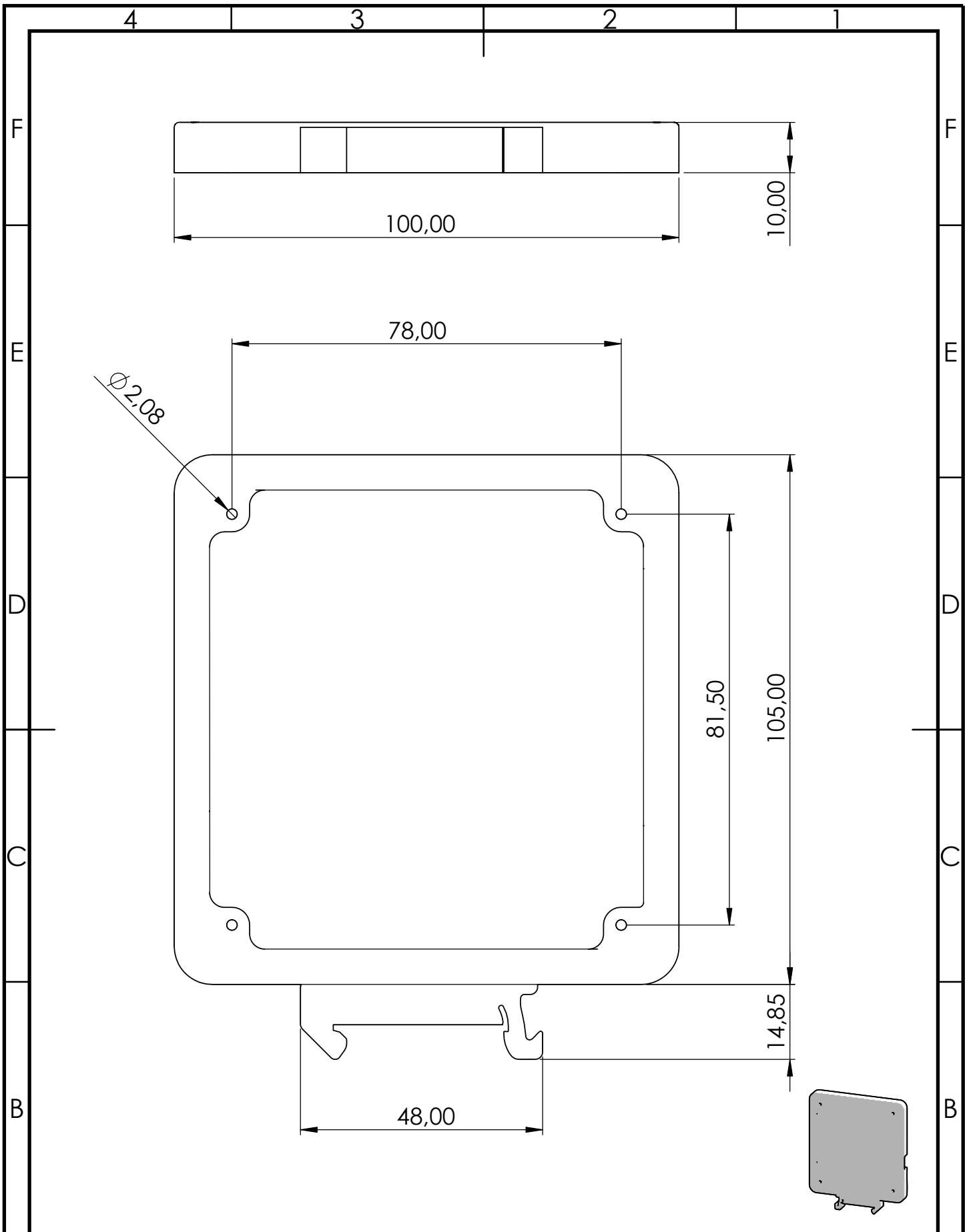
N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	TORNILLO M3 X 16	ACERO INOX.	1
2	TORNILLO M3	ACERO INOX.	2
3	TUERCA M3	ACERO INOX.	1
4	BUJE CILÍNDRICO (ϕ EXT=8 mm, ϕ INT=4 mm)	AISI 304	1
5	VARILLA CILÍNDRICA (4X60 mm)	AISI 304	1
6	IMÁN CILÍNDRICO (6X2 mm)	NEODIMIO	1
7	INTERRUPTOR REED	---	1
8	ANILLO DE RETENCIÓN 4 mm	---	4
9	TORNILLO M6 X 20	ACERO INOX.	2

NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Pluviómetro Vista explosionada
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	A4
MASA [g]:				ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Base Raspberry Pi DIN
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				3-1-1	
MASA [g]: 30.70				ESCALA: 1:1	
				HOJA 1 DE 1	

A



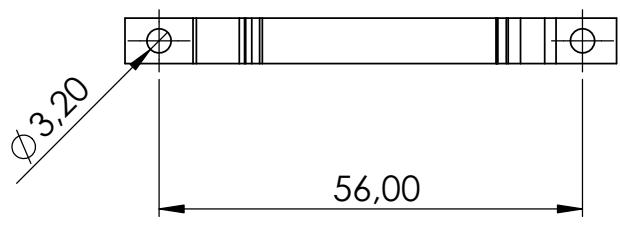
NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Base procesador NXP DIN
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				3-1-2	
MASA [g]: 74.06				ESCALA: 1:1	
				HOJA 1 DE 1	

A

4 3 2 1

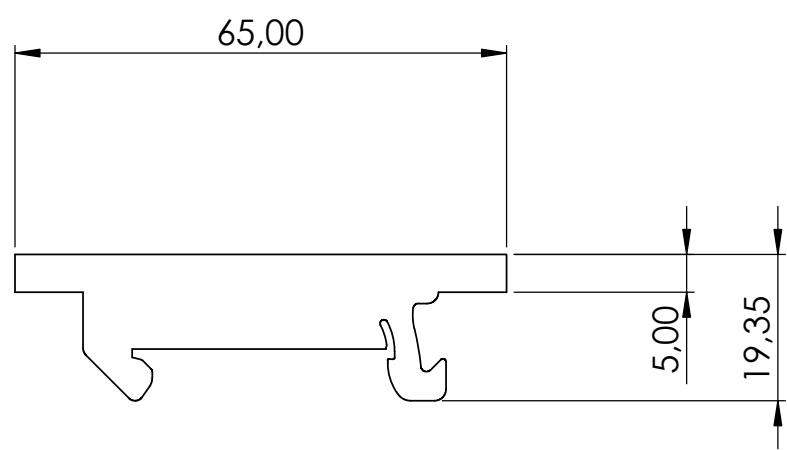
F

F



E

E



D

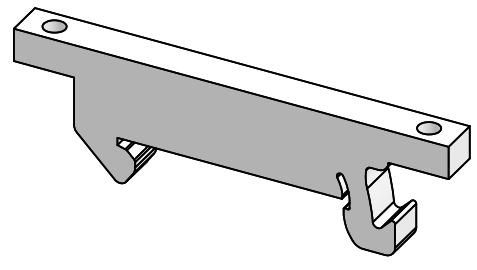
D

C

C

B

B



A

A

NOMBRE		FIRMA	FECHA	REVISIÓN	TÍTULO:
DIBUJ.	Almada, Agustín H.			1	Base fuente DIN
VERIF.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PET				3-1-3	
MASA [g]: 6.10				ESCALA:1:1	
				HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1

Apéndice E

Documentación

E.1. Introducción

En este apartado se incluye la hoja de datos del sensor utilizado para el anemómetro ultrasónico y los diagramas esquemáticos del hardware desarrollado para la Estación Meteorológica. A continuación se enuncian los parámetros más relevantes que caracterizan al sensor piezoeléctrico.

Voltaje de operación	140 Vp-p
Frecuencia resonante	40.0kHz \pm 0.7
Sensibilidad angular	70 ^o (\pm 15 ^o)

Tabla E.1: Especificaciones eléctricas del transductor



Figura E.1: Sensor ultrasónico PUI UTR 1440K-TT-R

E.2. Hoja de datos

SPECIFICATIONS

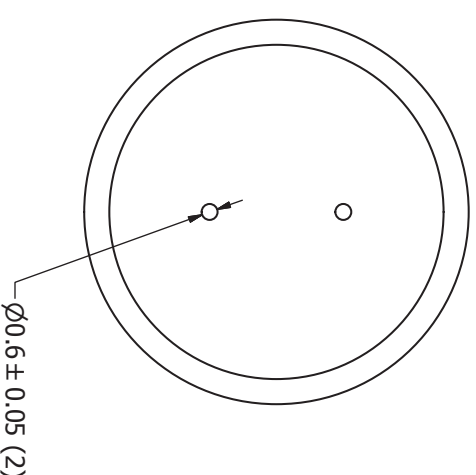
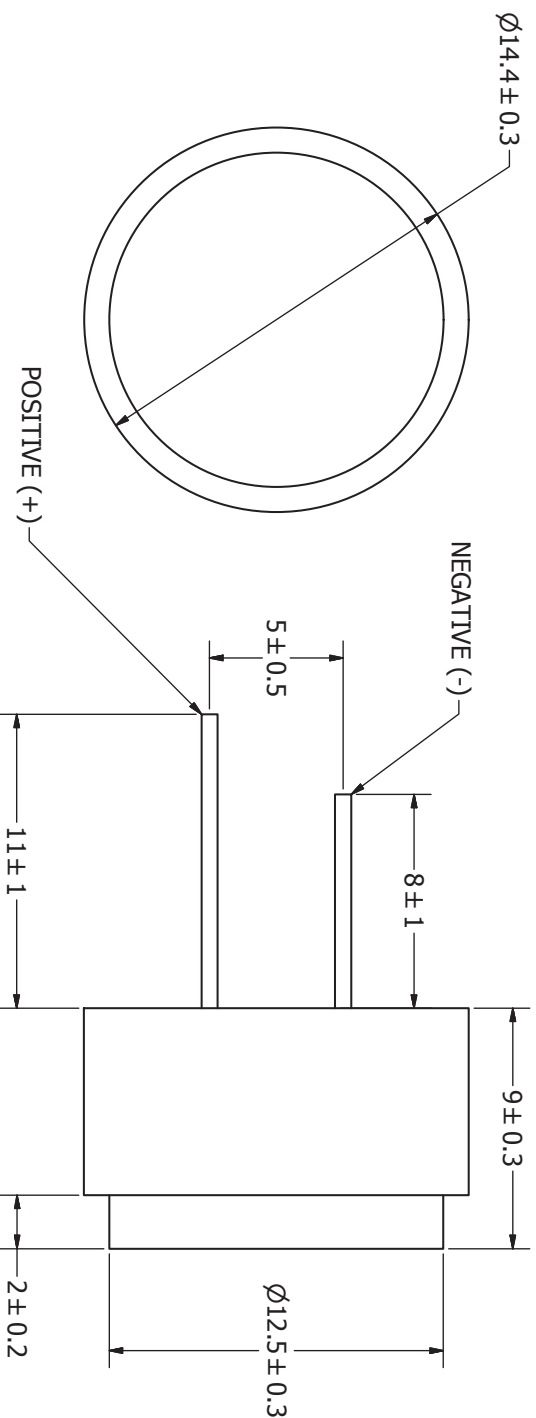
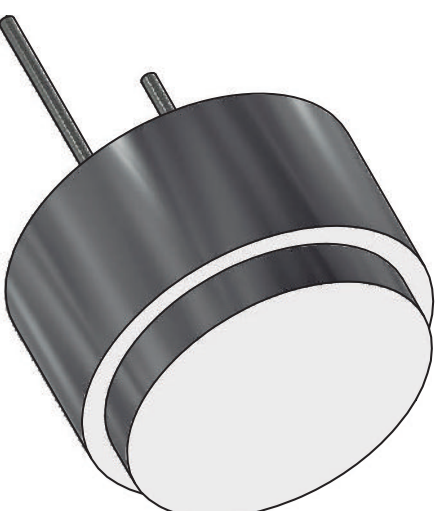
PARAMETERS	VALUES	UNIT
DRIVE VOLTAGE	140	VP-P
CAPACITANCE	1,800 ±15%	pF
ECHO SENSITIVITY	≥200	mV
DECAY TIME	≤1.2	ms
CENTER FREQUENCY	40,000 ±700	Hz
DIRECTIVITY	70° ±15°	-
OPERATING TEMPERATURE	-40 ~ +80	°C
STORAGE TEMPERATURE	-40 ~ +85	°C
TERMINAL MATERIAL	Sn PLATED COPPER	-
HOUSING MATERIAL	ALUMINUM	-
WEIGHT	4.8	grams

THIS DOCUMENT CONTAINS DATA PROPRIETARY TO PROJECTS UNLIMITED, INC. ANY USE OR REPRODUCTION, IN ANY FORM, WITHOUT PRIOR WRITTEN PERMISSION OF PROJECTS UNLIMITED, INC. IS PROHIBITED.

©2003, Projects Unlimited Inc.

REVISION HISTORY

LTR	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
-	RELEASED FROM ENGINEERING	6/1/2016	
A	ADDED HOUSING MATERIAL	6/7/2017	M.V.



NOTES:

1. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
2. SPECIFICATIONS SUBJECT TO CHANGE OR WITHDRAWAL WITHOUT NOTICE.
3. THIS PART IS ROHS 2011/65/EU COMPLIANT.
4. THIS PART MEETS IP65 WATER AND DUST INGRESS STANDARDS.

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 ALL PURCHASES ARE SUBJECT TO AND
 INCORPORATE THE PUI AUDIO TERMS
 AND CONDITIONS SALE FOUND AT
<http://www.puiaudio.com>
 (paper copy available upon request).
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS,
 TOLERANCES ARE ±0.5 AND
 ANGLES ARE 33°

SIZE
A4

Designed by	Date	Checked by	Date
M.V.	6/1/2016	M.V.	6/1/2016

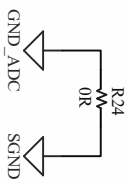
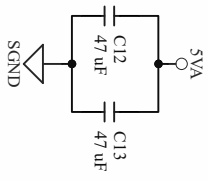
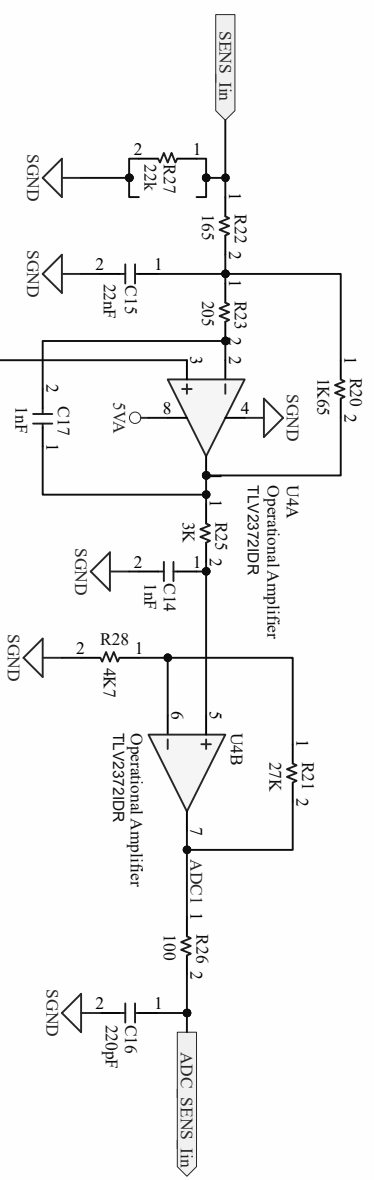
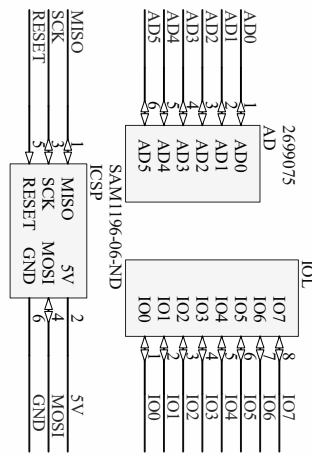
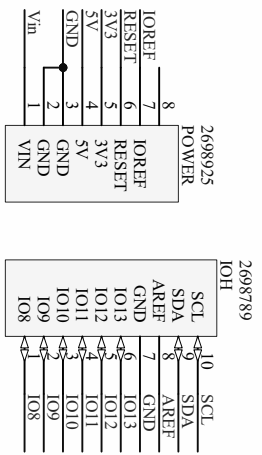
Approved by	Date	Drawn Date
B.R.	6/1/2016	6/1/2016

UTR-1440K-TT-R

Ultrasonic Xmr/Receiver

Edition
 -
 Sheet
 1 / 1

UTR-1440K-TT-R:dw



LEM Current Transducers

1:1000 LA-125P (N=5),
300Amax, Rsense=12R

1:2000 LA-255S (N=5), (N=5),
500Amax, Rsense=7.5R

NP = Not Populated

REF: RECEPCIÓN DE SENSORES

LEM Current Transducers

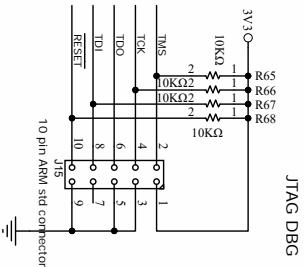
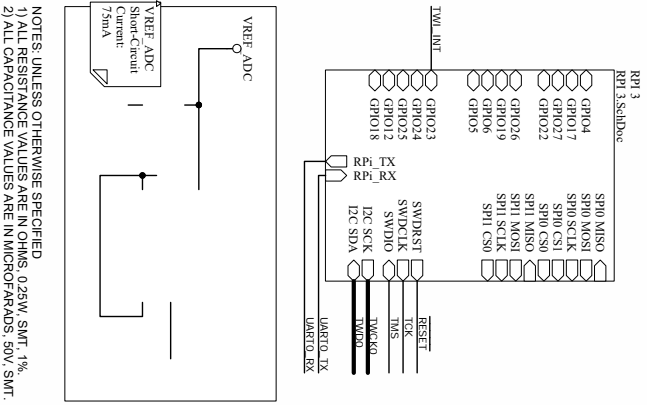
1:1000 LA-125P (N=5),
200Amax, Rsense=12R

1:2000 LA-255S (N=5), (N=5),
500Amax, Rsense=7.5R

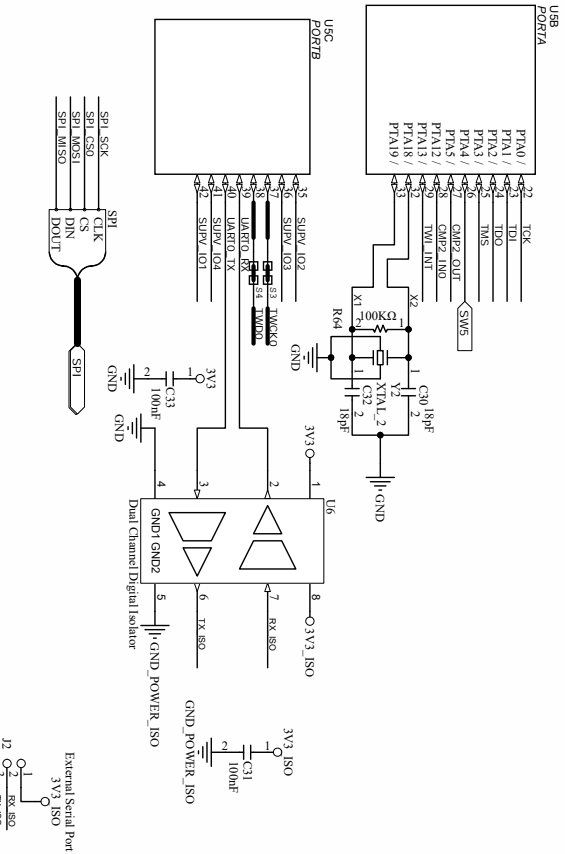
Signature	Date	Title	Scale:	NTS	Revisión:	A	Laboratorio de Instrumentación y Control Facultad de Ingeniería	
S.A. González		LIC - Base Board	Size:	A4	Sheet 2	of 4		

SOLAR SENSOR BOARD

K22F MICROCONTROLLER MK22FN1M0AVLH12 MICROCONTROLLER

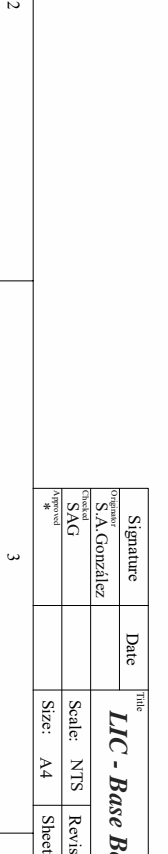
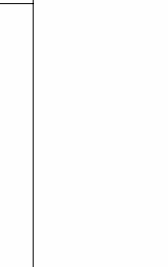
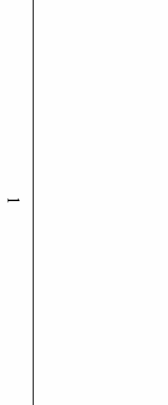
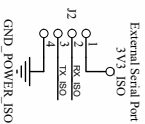


NOTES - UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
 1) ALL RESISTANCE VALUES ARE IN OHMS, 0.25W, 5MT, 1%
 2) ALL CAPACITANCE VALUES ARE IN MICROFARADS, 50V, 5MT.

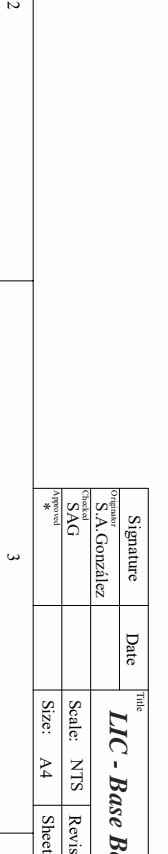
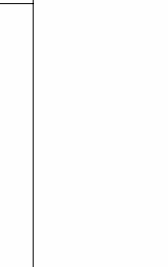


Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm

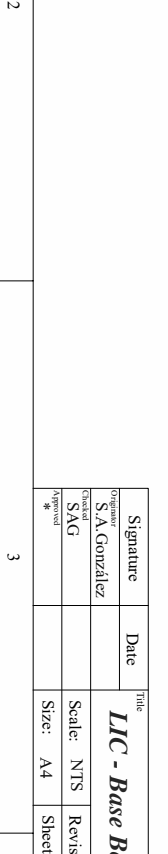
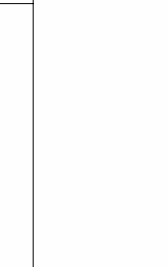
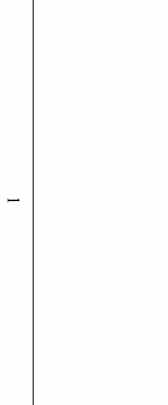
54	GND
53	GND
52	GND
51	CS0
50	DATA
49	DATA
48	DATA
47	DATA
46	DATA
45	DATA
44	DATA
43	DATA
42	DATA
41	DATA
40	DATA
39	DATA
38	DATA
37	DATA
36	DATA
35	DATA
34	DATA
33	DATA
32	DATA
31	DATA
30	DATA
29	DATA
28	DATA
27	DATA
26	DATA
25	DATA
24	DATA
23	DATA
22	DATA
21	DATA
20	DATA
19	DATA
18	DATA
17	DATA
16	DATA
15	DATA
14	DATA
13	DATA
12	DATA
11	DATA
10	DATA
9	DATA
8	DATA
7	DATA
6	DATA
5	DATA
4	DATA
3	DATA
2	DATA
1	DATA



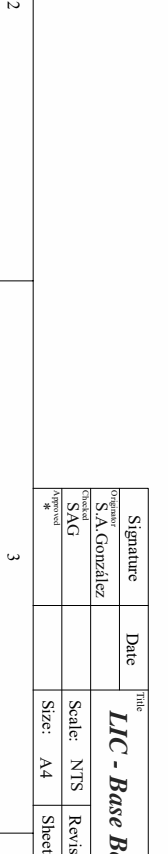
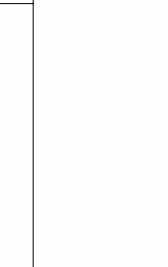
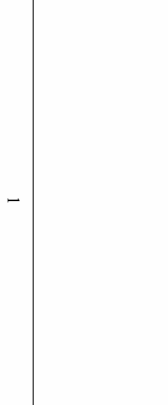
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



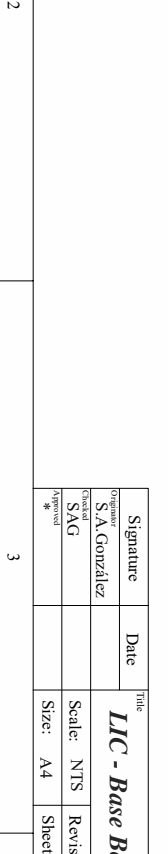
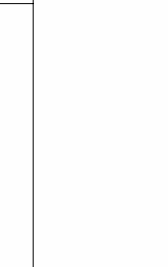
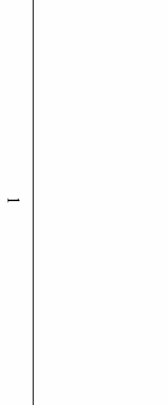
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



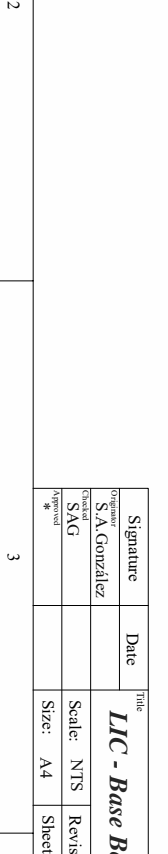
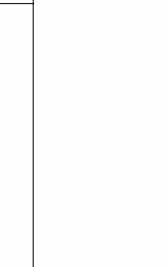
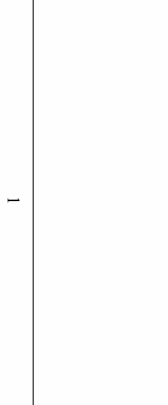
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



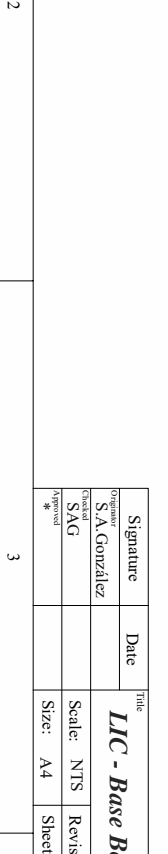
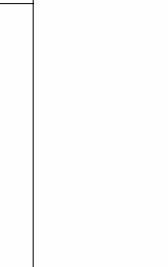
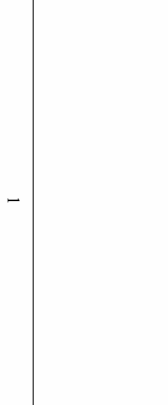
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



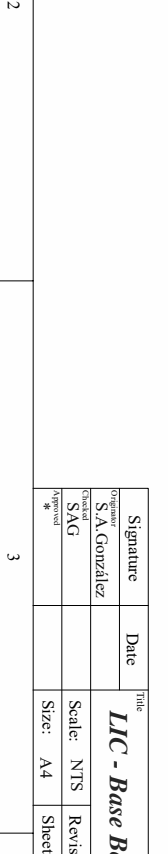
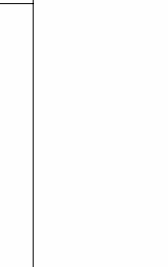
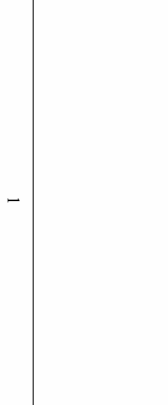
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



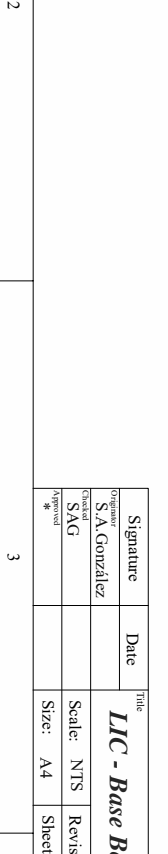
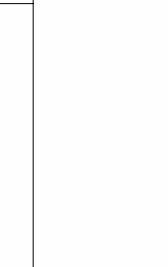
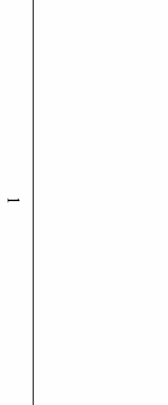
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



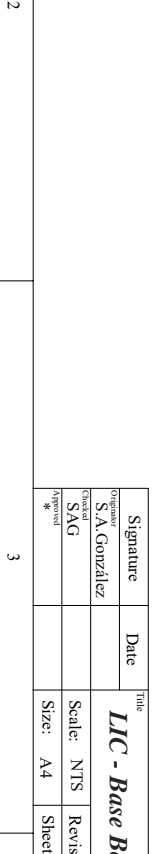
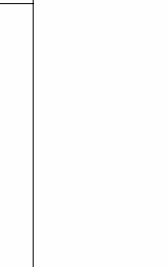
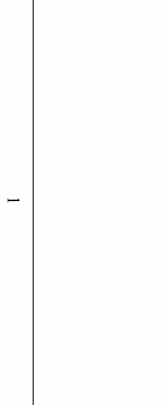
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



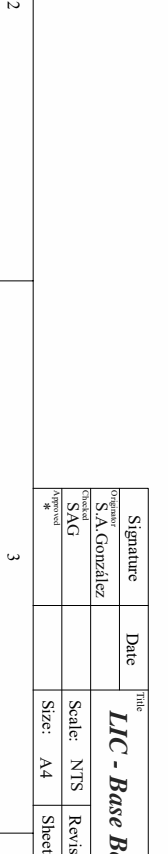
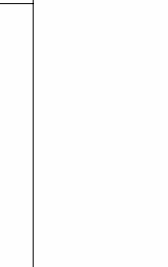
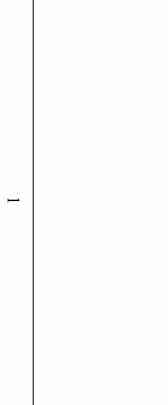
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



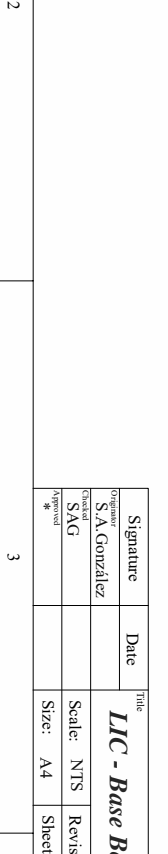
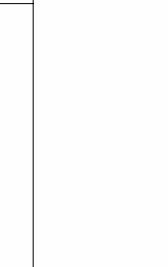
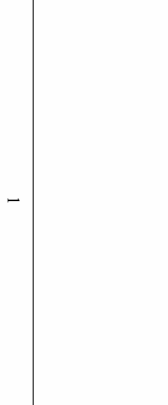
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



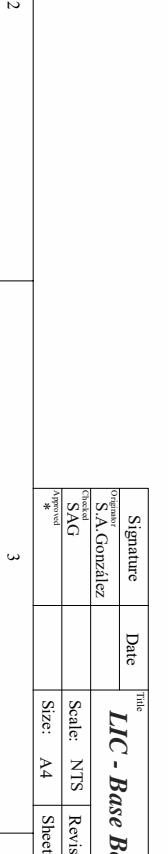
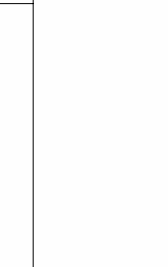
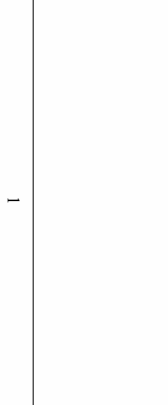
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



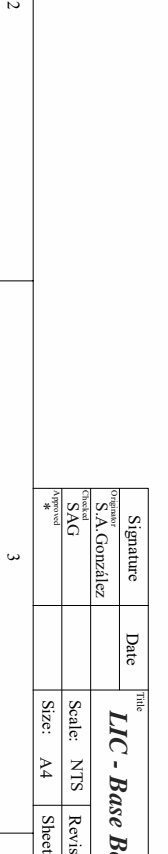
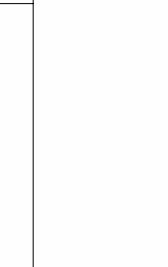
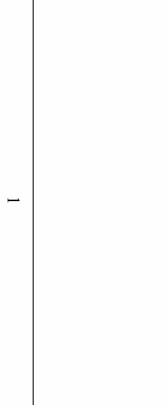
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



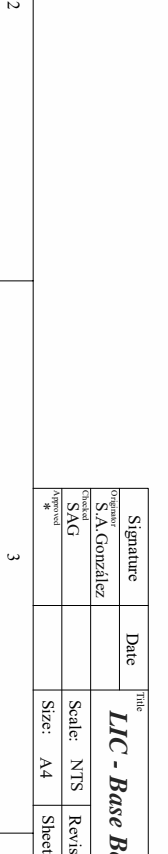
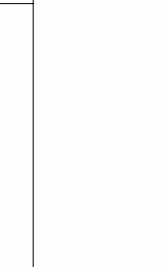
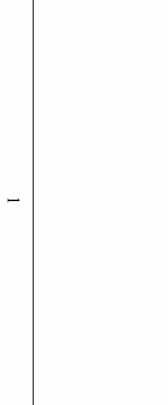
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



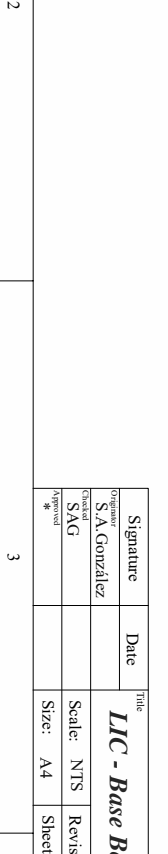
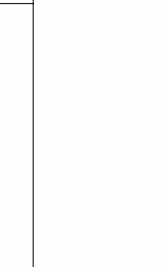
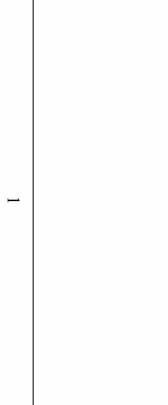
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



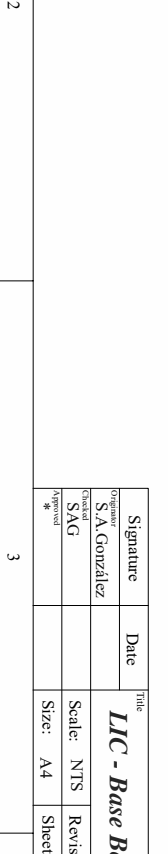
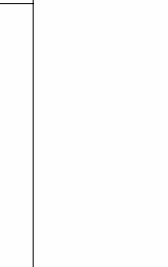
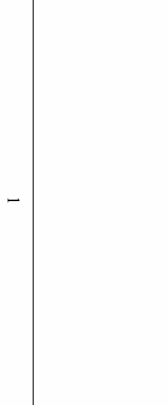
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



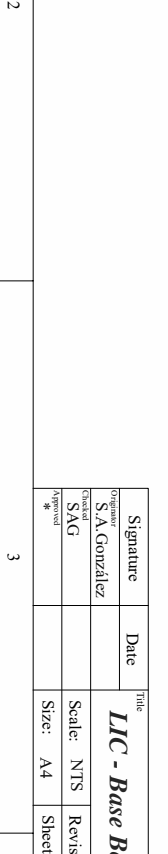
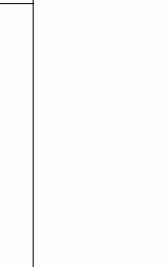
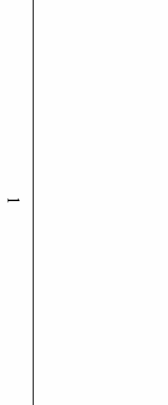
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



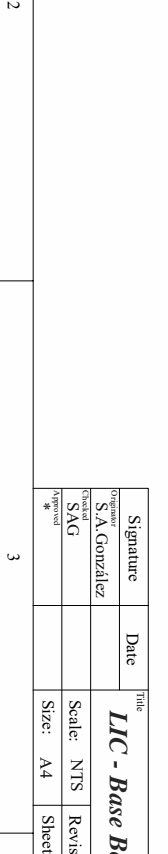
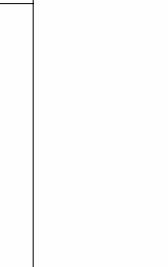
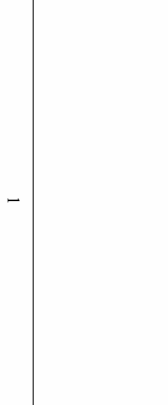
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



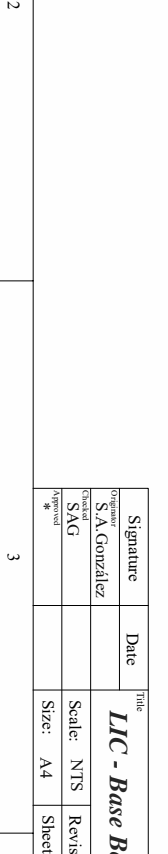
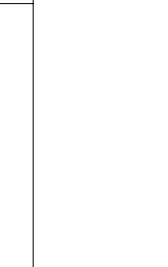
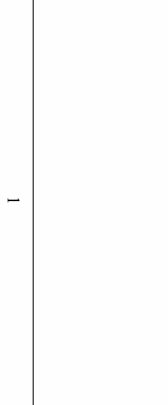
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



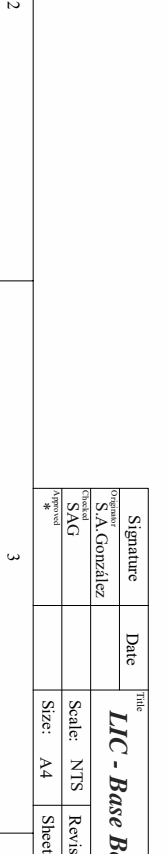
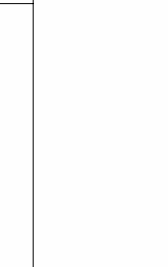
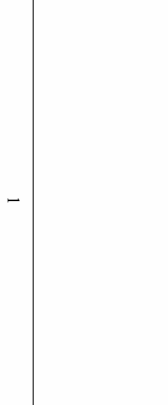
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



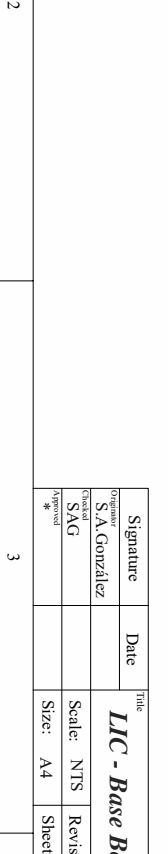
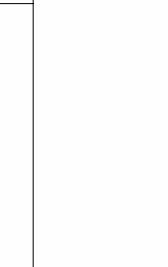
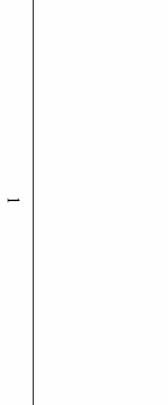
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



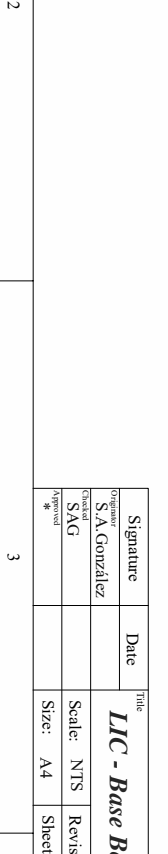
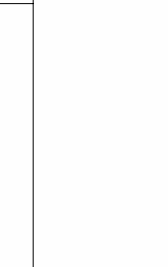
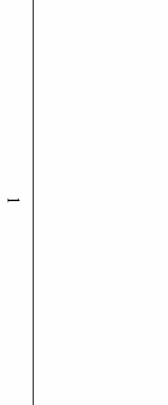
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



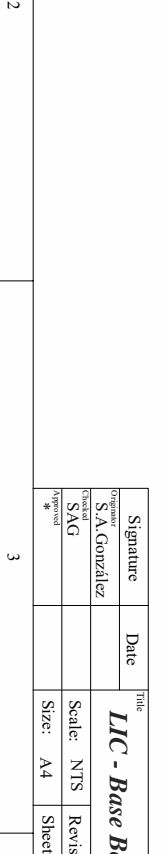
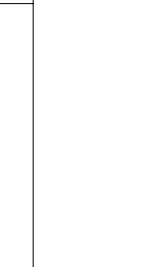
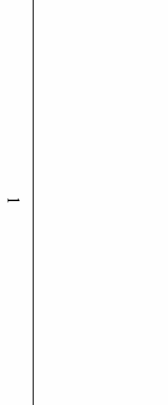
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



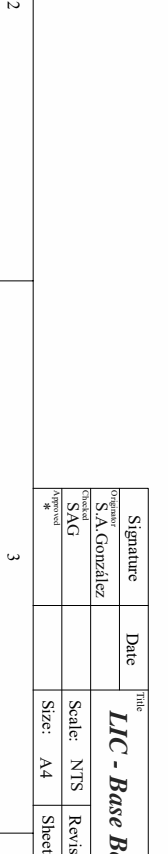
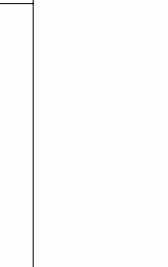
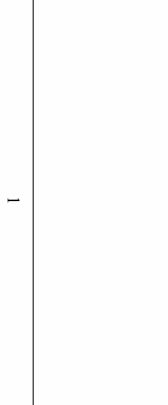
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



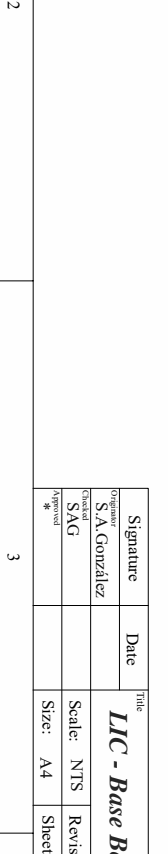
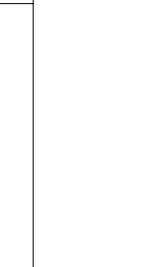
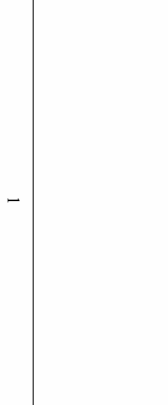
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



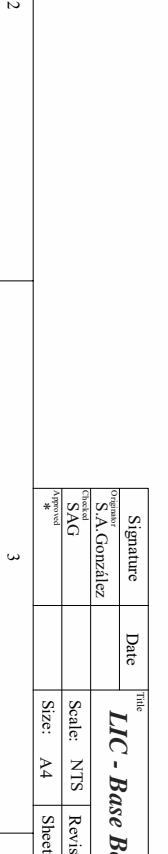
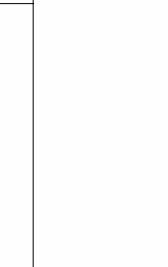
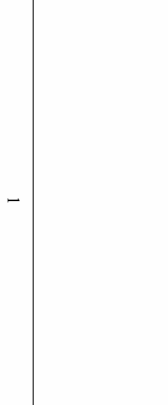
Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm



Part	541C PLATING CN CONTACT AREA
4779D0061	2J7 mm
4779D0061	20J mm