

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Posgrado y Educación Continua



Tesis Doctoral

Desarrollo de un método de medición tridimensional para la caracterización del viento en ambientes urbanos complejos.

Gastón César Saez de Arregui

Directora: Dra. Sonia Beatriz Concari

Co-Director: Dr. Jorge Luis Lassig

Agosto 2024

RESUMEN

Actualmente existen métodos de medición tridimensional del viento empleando instrumentos de origen extranjero que poseen un costo de importación que excede las posibilidades de muchas instituciones de investigación. La ausencia de estos equipos dificulta realizar dichas mediciones en nuestra región limitando, de este modo, el estudio del recurso eólico en ambientes urbanos.

Atendiendo a esta problemática, en esta tesis, se desarrolló un método de medición tridimensional para la caracterización del viento en ambientes urbanos complejos.

El trabajo se organizó estudiando el viento urbano, su interacción con la rugosidad del terreno y las características que son necesarias conocer para optimizar la explotación de energía eólica con fines energéticos. Se evaluaron las diferentes tecnologías e instrumentos disponibles para realizar esas mediciones y se diseñó y fabricó un anemómetro tridimensional que permite, a partir del método de medición desarrollado, la caracterización tridimensional del viento en ambientes urbanos.

Se llevaron adelante estudios a escala en túnel de viento que se contrastaron con mediciones en el terreno.

Los resultados logrados fueron satisfactorios, obteniendo mediciones que se correlacionan con estudios previos y con estudios realizados en instituciones tanto argentinas como extranjeras en contextos diversos.

La contribución más relevante de este trabajo al campo de la investigación en energías renovables ha sido comprobar la factibilidad de caracterizar las variables complejas presentes en el viento urbano con equipamientos que usualmente son utilizados para determinar escurrimientos unidimensionales y en valores medios temporales. Así mismo, el método permite disponer de suficiente información para decidir la mejor localización de un aerogenerador sobre la azotea de un edificio emplazado en un ambiente urbano, contribuyendo al uso eficiente de la energía.

ABSTRACT

Currently, three-dimensional wind measurements in urban environments are hindered by the high cost of imported instruments, limiting research capabilities in many institutions. To address this issue, this thesis presents a novel method for characterizing urban wind using a custom-designed three-dimensional anemometer.

The study investigated urban wind, its interaction with surface roughness, and the characteristics necessary for optimizing wind energy exploitation. Various measurement technologies and instruments were evaluated, leading to the design and fabrication of a three-dimensional anemometer. This anemometer, coupled with the developed measurement method, enables comprehensive three-dimensional wind characterization in urban settings.

Scale model studies in a wind tunnel were conducted and validated with field measurements. The results were satisfactory, demonstrating strong correlations with previous studies conducted both domestically and internationally in various contexts.

The most significant contribution of this work to renewable energy research is the validation of the feasibility of characterizing complex urban wind variables using equipment typically used for one-dimensional, time-averaged flow measurements. Furthermore, the method provides sufficient data to determine the optimal location for a wind turbine on an urban building rooftop, thereby contributing to efficient energy utilization.

PALABRAS CLAVE

Eólica Urbana, Energía Renovable, Sustentabilidad, Desarrollo Sostenible.

DEDICATORIA

Dedico esta obra a mi esposa María Cecilia y mis cuatro hijos, Lorea, Iker, Sofía y María Pía, por el apoyo incondicional que he tenido todo este tiempo que me demandó esta formación, aceptando ausencias que nunca podré compensar.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a la Directora y Co Director de este trabajo, la Dra. Sonia Beatriz Concari y el Dr. Jorge Luis Lassig, quienes han volcado su riqueza como personas e investigadores aportando hasta lo inimaginable para llevar adelante el desarrollo de este trabajo y tantos otros, infinitamente agradecido por su afecto, dedicación, tiempo, paciencia, aportes, confianza y compromiso.

Agradecer a mis colegas, amigos y compañeros de la Facultad. A todo el personal de la Escuela de Posgrado y Educación Continua. A Virginia Scotta y a Susana Marchisio, por estar y haber estado a mi lado siempre en este proyecto académico y en muchos otros.

Quiero agradecer a Mariano Re, metrólogo del INTI, quien con paciencia y dedicación me ayudo con muchos aportes y dedicación para desarrollar aspectos claves en este proyecto.

Agradecer a mis compañeros y amigos del Laboratorio de Energías Renovables, por permitirme soñar nuevos horizontes y plantearnos nuevos desafíos. A mi amigos Miguel Plano e Isidro Sansoni, por ayudarme a perseverar y las infinitas charlas mantenidas. Agradecer a la Universidad Nacional de Rosario, por ofrecer desde sus facultades, formación profesional que se extiende al país y al mundo.

A la memoria de Oscar Von Pamel

INDICE

INTRODUCCIÓN	8
Organización del trabajo	14
ANTECEDENTES	17
Métodos para evaluar la capa límite atmosférica en un ambiente urbano	18
Tecnologías para la medición del viento.....	22
El viento en el contexto urbano: una revisión histórica	28
MARCO TEORICO	41
Características principales del recurso eólico	41
Estudio sobre capa límite.....	42
Capa límite atmosférica	46
Estudio de la turbulencia del flujo atmosférico	51
Tipos de estabilidad	53
La fricción en la capa límite	55
Capa Límite Urbana	57
Evaluación de edificios con diferentes formas de techos.....	58
Identificación de las variables relevantes.....	58
Edificios con Techos Planos	61
Geometría del techo	62
METODOLOGIA.....	70
Metodología experimental.....	70
Metodología experimental a escala.....	70
Metodología experimental de campo	70
Procesamiento de los datos de campo – obtención de información	71
Desarrollo de un método para la medición tridimensional del viento en ambientes urbanos empleando instrumentos de bajo costo y de materiales asequibles	72
Obtención de las características del viento urbano a partir de las mediciones obtenidas	76
Intensidad de turbulencia	76
Velocidad de Ráfaga	77
Posición del vector velocidad en el plano (x,y) - R2 - para conocer la dirección horizontal del viento.....	77
Posición del vector velocidad en el espacio – R3	78
Diseño y construcción del prototipo funcional del anemómetro 3D de coperolas.....	79
Desarrollo de un anemómetro 3D de coperolas con elementos de bajo costo	79
Elemento activo para la medición de la velocidad del viento.....	85

Ensayos, modificaciones y ajustes.....	88
Ensayos realizados en túnel de viento	90
Sistema de ecuaciones para determinación de velocidad 3D	96
Ángulos del vector resultante que forman con cada plano.....	98
Diseño y construcción del dispositivo para medición tridimensional del viento –	
Anemómetro 3D	99
Sistema de control y lectura del anemómetro 3D de coperolas.....	101
Detalle de diseño.....	108
Calibración del instrumento desarrollado y cálculo de la incertidumbre de medición..	113
Cálculo de la incertidumbre de medición en la velocidad del viento	114
Variables ambientales.....	118
Metodología experimental.....	121
Metodología experimental a escala.....	121
Metodología experimental de campo.....	121
Construcción de información a partir de los valores obtenidos de campo para caracterizar el viento en el ambiente urbano, método con anemómetro 3d de bajo costo.....	123
Intensidad de turbulencia	123
Velocidad de Ráfaga	123
Posición del vector velocidad en el plano (x,y) - R2 – para conocer la dirección horizontal del viento.....	124
Posición del vector velocidad en el espacio – R3	124
RESULTADOS	126
Método de medición desarrollado	126
Mediciones obtenidas	128
Propuesta didáctica.....	132
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	134
PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS.....	137
REFERENCIAS	138
ANEXOS	141
ANEXO I	142
Detalle de los dos túneles de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue en Neuquén	142
ANEXO II	152
Hoja de datos del microcontrolador Espressif ESP32	152
ANEXO III	154
Hoja de datos del conversor analógico/ digital Texas Instruments ADS 1115	154
ANEXO IV	155
Hoja de datos del sensor Bosch BME 280	155
ANEXO V.....	156

Valores obtenidos por el anemómetro 3D en prueba de campo.....	156
ANEXO VI	187
Definiciones de conceptos y términos	187

INDICE DE GRAFICOS Y FIGURAS

Figura 1: Diagnóstico de la Energía Urbana	11
Figura 2: Vista axonométrica (izq) y superior (der) del anemómetro 3D	12
Figura 3: Dispositivo para determinar el sentido del viento	13
Figura 4: Vista en planta de diferentes mediciones	13
Figura 5: Estudio del viento urbano en la azotea de un edificio	14
Figura 6: Izquierda ejemplo de ciudad altamente edificada	17
Figura 7: Patrón de flujo sobre edificios según la dirección del viento	17
Figura 8: Estudio del flujo causado por vientos del sur sobre Hong Kong, China.....	19
Figura 9: Detalle de la sección vertical central de las diferentes formas de cubierta	19
Figura 10: Estudio CFD de velocidad promedio del viento	20
Figura 11: Análisis del perfil vertical de viento	21
Figura 12: Mediciones de campo realizadas en este trabajo	22
Figura 13: Estación meteorológica (Laboratorio de energía FCEIA -UNR)	23
Figura 14: Anemómetro sónico tridimensional	24
Figura 15: Anemómetro láser doppler (LDA)	25
Figura 16: Termo anemómetros	25
Figura 17: Equipo LiDAR	26
Figura 18: Equipo SODAR	26
Figura 19: La torre de los ocho vientos, a los pies de la Acrópolis de Atenas	30
Figura 20: Planta de una ciudad resguardada de los vientos	31
Figura 21: Modelos arquitectónicos de corte en túneles de viento	36
Figura 22: Climograma de B. Givoni	37
Figura 23: El efecto del entorno urbano sobre el movimiento del viento	38
Figura 24: Representación del viento geostrófico	41
Figura 25: Representación del viento con rozamiento	42
Figura 26: Desarrollo de la capa límite y distribución de esfuerzos cortantes	43
Figura 27: Estructura vertical de la atmósfera	45
Figura 28: Efectos de la rugosidad del terreno sobre el perfil de velocidad	47
Figura 29: Estructura y evolución de la capa límite atmosférica	48
Figura 30: Perfiles típicos idealizados	49
Figura 31: Perfiles típicos durante la noche en la capa límite atmosférica	50
Figura 32: Velocidad media y turbulencia del viento	53
Figura 33: Estructura de la capa límite para condiciones neutras	56
Figura 34: Esquema complejo de la estructura de la capa límite urbana	57
Figura 35: Ciudad de Rosario	58
Figura 36: Formas de techo modeladas	59
Figura 37: Direcciones del viento investigadas	60
Figura 38: Ubicaciones de puntos de simulación superpuestos	60
Figura 39: Esquema típico de edificio de techo plano	61
Figura 40: Resultado de simulaciones computacionales del viento sobre techo plano	62
Figura 41: Flujo de viento sobre techos diferentes en túnel de viento	63
Figura 42: Distribución de velocidades sobre techos inclinados	63
Figura 43: Intensidad de turbulencia sobre techos inclinados	64
Figura 44: Edificios típicos de ciudades de Argentina	64
Figura 45: Ubicación del edificio bajo estudio de Lassig (EMA)	65
Figura 46: Curva de Weibull y Rosa de los Vientos sobre el techo escalonado	66
Figura 47: Izq. flujo de viento pasando sobre el tanque de agua	67
Figura 48: Patrón de flujo en el tanque de agua	67
Figura 49: Nivel de riesgo para ubicar aerogeneradores en el edificio	68
Figura 50: Vista axonométrica (izq) y superior (der) del anemómetro 3D	72
Figura 51: Esquema de medición múltiple en superficie de la velocidad 3D	73

Figura 52: Esquema hipotético de diferentes mediciones anemométricas 3D	73
Figura 53: Cada punto rojo representa a cada medición de velocidad 3D	74
Figura 54: Configuración propuesta en tres alturas	74
Figura 55: Medición en tres alturas de la velocidad 3D del viento	75
Figura 56: Planos de mediciones de velocidad 3D del viento	76
Figura 57: Carga de archivo STL con juego de coperolas en Repetier Software	81
Figura 58: Puesta a punto de la impresora 3D cartesiana	81
Figura 59: Panel de configuración impresora 3D	82
Figura 60: Muestras del avance de impresión 3D de coperolas	82
Figura 61: Detalle de la pieza terminada	83
Figura 62: Impresión 3D en coperolas de tamaño medio	83
Figura 63: Avance de impresión 3D de coperolas de menor tamaño	84
Figura 64: Detalle de la pieza terminada	84
Figura 65: Conjunto de piezas 3D para ensayos en túnel de viento	85
Figura 66: Familia de motores de drones	86
Figura 67: Modelos de motores disponibles	86
Figura 68: Motor seleccionado para este proyecto como transductor	87
Figura 69: Construcción del primer anemómetro del proyecto	87
Figura 70: Túnel de viento N°1 - Facultad de Ingeniería UNCo – Neuquén	88
Figura 71: Multímetro digital empleado en las mediciones en Neuquén	89
Figura 72: Anemómetro de hilo caliente	89
Figura 73: Esquema del circuito motor resistencia y su punto de medición	90
Figura 74: Primeros valores provenientes de las mediciones en túnel de viento	91
Figura 75: Tensión obtenida del anemómetros en [mV]	92
Figura 76: Tensión obtenida en el anemómetro [mV] zona 1	94
Figura 77: Tensión obtenida en el anemómetro [mV] zona 2	94
Figura 78: Tensión obtenida en el anemómetro [mV] zona 3	95
Figura 79: Representación vectorial de la velocidad del viento en un punto	96
Figura 80: Componentes ortogonales de un vector	98
Figura 81: Software FreeCad para diseño y modelado 3D	99
Figura 82: Software repetier para impresión 3D	100
Figura 83: Preparación de materiales para montaje del anemómetro 3D	100
Figura 84: Montaje mecánico del anemómetro 3D de coperolas	101
Figura 85: Ajuste de montaje mecánico del anemómetro 3D de coperolas	101
Figura 86: Kit de desarrollo ESP 32 Dev Kit v1	103
Figura 87: Características microcontrolador Xtensa dual-core, 32-bit LX6	103
Figura 88: Curva de funcionamiento del Converso ADC interno Esp32	105
Figura 89: Primer versión del hardware del anemómetro 3D	107
Figura 90: Detalle de la placa final del instrumento	108
Figura 91: Detalle de la conformación de los vectores de software	109
Figura 92: Fragmento de código fuente relacionado con la toma de muestras	109
Figura 93: Fragmento de código que interviene en la conversión	110
Figura 94: Detalle de conectores de los sensores a la placa de medición	111
Figura 95: Extracto de datos obtenidos por puerto USB de las mediciones	112
Figura 96: Esquema de carpetas de servicio cloud del sistema remoto IoT	112
Figura 97: Anemómetro 3D terminado, empleado para tomar muestras de campo	113
Figura 98: Resistencias ajustables trimpots multivueltas para cada eje (x,y,z)	114
Figura 99: Gráfico de residuos	116
Figura 100: Bandas de confianza	117
Figura 101: Bandas de incertidumbre (k=2)	118
Figura 102: Estación Meteorológica TFA	119

Figura 103: Etiquetas de calibración primaria	119
Figura 104: Vista del anemómetro 3D de coperolas	127
Figura 105: Detalle de la placa final del instrumento	127
Figura 106: Dirección del viento pronosticada para las 9 hs	130
Figura 107: Dirección del viento pronosticada para las 12 hs	130
Figura 108: Registro de las 3 componentes del viento durante 20 min	131

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos y características de los anemómetros	27
Tabla 2: Nuevo instrumento de anemometría producto de esta tesis	27
Tabla 3: Escala Beaufort	35
Tabla 4: Capas límites atmosféricas	47
Tabla 5: Características principales del motor seleccionado	87
Tabla 6: Primeros valores provenientes de las mediciones en túnel de viento	90
Tabla 7: Valores provenientes de las mediciones en túnel de viento	91
Tabla 8: Segmentación de los valores provenientes de las mediciones	93
Tabla 9: Características ESP32 Módulo ADC ESP32	102
Tabla 10: Módulo ADC ESP32	104
Tabla 11: Módulo ADC AS1115	106
Tabla 12: Muestra de valores obtenidos de las mediciones	115
Tabla 13: Aplicación del método de cuadrados mínimos	116
Tabla 14: Valores recta de calibración	117
Tabla 15: Valores recta de calibración (k=2)	118
Tabla 16: Caracterización sensor BME 280 – Temperatura	120
Tabla 17: Caracterización sensor BME 280 – Humedad Relativa	120
Tabla 18: Caracterización sensor BME 280 – Presión Barométrica	120
Tabla 19: Resultados obtenidos sobre el estudio de 1200 muestras	129
Tabla 20: Vector Velocidad en R2	129
Tabla 21: Vector Velocidad en R3	129

SIGLAS, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

CFD

(Computational Fluid Dynamics)

ANSYS CFD Fluent 12.1

Software para simulación computada.

EPE

Empresa Provincial de la Energía (Santa Fe)

FCEIA / UNR

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura / Universidad Nacional de Rosario

CIEMAT

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España.

INTI

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (Argentina)

NÚMERO DE REYNOLDS (Re)

Es un número adimensional utilizado en la mecánica de fluidos y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento del fluido. Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento.

MET OFFICE

Oficina Meteorológica Nacional de Gran Bretaña.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible resulta hoy más que un anhelo, una necesidad a la que debe atenderse. Las crecientes demandas de energía, el incremento progresivo de los precios, derivados de situaciones geopolíticas, junto con el deterioro progresivo del medio ambiente nos obligan, como ciudadanos, a repensar nuestro modo de vida y, como tecnólogos, a desarrollar nuevas soluciones para esos problemas. En este contexto, el crecimiento de la demanda energética no puede ser sostenido sin integrar las fuentes renovables y las redes distribuidas de energía.

Entre otras, la energía eólica es una de las energías renovables que se emplean en la matriz de diversificación de fuentes energéticas sustentables. El viento es un recurso natural que, bajo ciertas condiciones orográficas, podría aumentar sensiblemente su potencial energético. Asimismo, los denominados “efectos concentradores” incrementan la velocidad media del flujo del viento. Estos efectos no se dan sólo en la naturaleza, sino también en entornos urbanos, lo cual hace aconsejable su estudio como medio de optimización del recurso energético. Al respecto, los edificios producen cambios en la velocidad del viento, aumentando su velocidad en el entorno urbano [1], condición que a priori estimula para aprovecharlo como recurso energético.

La integración de turbinas eólicas en edificios se está transformando en una nueva posibilidad que ha comenzado a estudiarse en los centros de investigación universitarios en energía eólica -como la Universidad Técnica de Delft en Holanda- y comienza a explorarse a pequeña escala en varias ciudades holandesas, como Amsterdam, La Haya, Tilburg y Twente, y también en el Reino Unido [2].

Actualmente, es factible ubicar una turbina eólica sobre un edificio para obtener electricidad, aprovechando el efecto de aceleración del viento sobre el mismo [3]. Por su parte Grant y colaboradores [4] estudiaron ubicar turbinas de eje vertical y horizontal dentro de ductos ubicados en los bordes de las terrazas de edificios altos, haciendo uso de la succión que allí se produce con buenos resultados. Lu y Yan Ip [5] realizaron estudios de simulación en CFD (Computational Fluid Dynamics) con distintos conjuntos de edificios y valoraron que entre ellos se

puede incrementar entre 1,5 y 2 veces la velocidad media del viento, produciendo aumentos en la potencia eólica disponible entre 3 y 8 veces. Por otra parte, Mithraratne [6] evaluó la posibilidad de instalar pequeños aerogeneradores sobre los techos de casas en Nueva Zelanda, y llegaron a la conclusión que, con ello, podría reducirse entre el 26 y el 81% las emisiones de carbono en ese país.

Como ejemplos nacionales se menciona la torre Cefira en Mar del Plata, donde sobre la terraza del edificio se instaló una turbina eólica de eje horizontal de 4,5 kW de potencia, capaz de suministrar el 15% del consumo eléctrico del edificio [7], y el Pasaje 8 Bis en la ciudad de La Plata, donde se instalaron sobre el techo de dos edificios de 30 m de alto, dos aerogeneradores y paneles solares [8].

Vinculado con energía eólica, se ha realizado un estudio de vientos en el territorio provincial a través de un convenio denominado “Medición de vientos Provincia de Santa Fe”, celebrado entre la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación, el Ministerio de Aguas, Energía y Medio Ambiente, La Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe (EPE) y la Facultad Regional Rosario de la Universidad Tecnológica Nacional. Como destacan los informes de avance [9] y otros trabajos [10], la provincia de Santa Fe cuenta con un rico potencial eólico por explotar.

La única experiencia local en estudios de energía eólica urbana, fue realizada por el Ing. Federico Estabillo en su Tesis de Maestría en Energía para el Desarrollo Sostenible denominada “Determinación del aprovechamiento eólico para un edificio sustentable en la ciudad de Rosario”, en la que se relevó el recurso eólico en un edificio de treinta y cinco metros de altura. Como resultado, se informó que la energía eólica disponible en la azotea del mismo podría alimentar entre un 14 y 18% del consumo energético de los espacios comunes [11]. Asimismo, una nueva tesis, recientemente defendida de la citada Maestría denominada: “Determinación del potencial eólico en el edificio de la FCEIA / UNR, para la instalación de un pequeño aerogenerador con fines didácticos”, del Ing. Isidro Sansoni, estudió el comportamiento del viento sobre el Laboratorio de Energías Renovables de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA). La misma reveló concordancias y disidencias con la tesis de Estabillo, sumando datos provistos por diferentes sistemas y

servicios meteorológicos. Los resultados son típicos de la eólica urbana, donde los métodos usados para evaluar el recurso energético en parques eólicos son inadecuados en un ambiente urbano.

Para garantizar la conservación del ambiente resulta necesario disponer de un moderno sistema de monitoreo que permita resguardar los datos y brindar acceso de forma segura a los mismos, registros primarios fundamentales que brindan una retro alimentación para mejorar tanto las máquinas como los alternadores en pos de conseguir mayor eficiencia, mayor vida útil, y menor perturbación al medio ambiente.

En este contexto, la posibilidad de dotar a edificios de aerogeneradores que abastezcan un porcentaje del consumo energético se presenta como una alternativa real. Para optimizar diseños, incrementar rendimientos y conocer características de marcha se requiere realizar mediciones sobre el aerogenerador en situaciones de uso.

En este sentido, el Dr. Ignacio Cruz, destacado profesional dedicado al estudio e investigación de la energía eólica en ambientes urbanos en el centro Ciemat de España, declara que, basado en estudios preliminares, el potencial eólico sobre edificios puede convertirse en una importante fuente energética que ayude a satisfacer una demanda local y puntual, pero aún queda mucho camino por recorrer, tal como lo expresara en el Curso de “Principios de conversión de la Energía Eólica”, dictado en la ciudad de Getafe, España, en enero de 2012 en el capítulo sobre “La integración urbana de mini aerogeneradores” [12].

En la Figura 1 (extraída de su exposición), el Dr. Ignacio Cruz diagnostica el estado del arte y la ciencia de la energía urbana, que aún está en sus comienzos, por lo que se trata de un campo de investigación y desarrollo en crecimiento: desde el tipo de turbina hasta la metodología y los sistemas de medición del viento en dichos entornos. En estos últimos años, desde la presentación de Cruz, no se han registrado grandes avances en el estudio de estos temas.

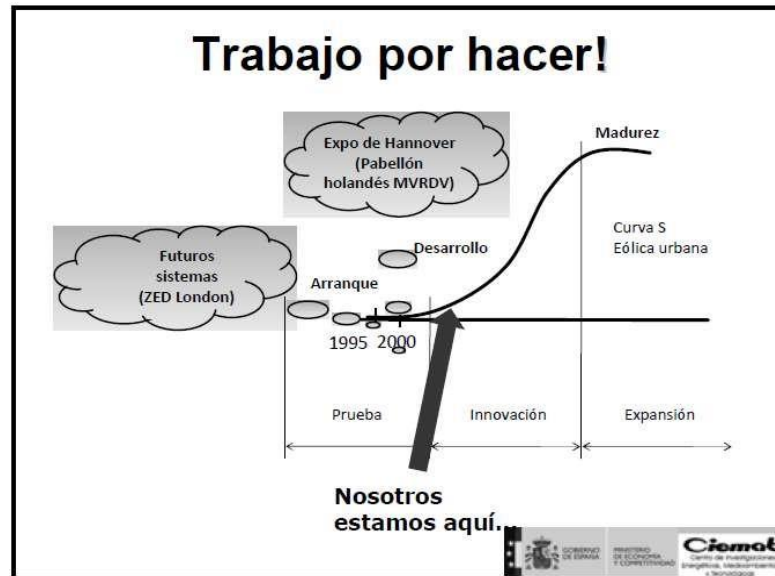


Figura 1: Diagnóstico de la Energía Urbana. Fuente: [12].

El interés por este tipo de estudios (eólicos urbanos) se centra no sólo en el vinculado al aprovechamiento energético de fuentes renovables, sino, además, en el hecho de que no existe en Argentina un sistema organizativo que administre la certificación y homologación de equipos eólicos para garantizar cualidades mínimas de calidad. Si bien el INTI Cutral Co ensaya pequeñas turbinas eólicas, las mismas son para ambientes rurales y no urbanos.

En la provincia de Santa Fe, se promueve desde el estado provincial la innovación en el área energética, impulsando el empleo de energías renovables que complementen fuentes tradicionales, compatibles con un desarrollo sustentable [13].

Desde el INTI, organismo en el que el doctorando se desempeña como Ingeniero, se ha detectado la necesidad de favorecer la articulación empresa - academia - sociedad desde un diálogo que posibilite el desarrollo y la innovación en la región, en pos de un entorno competitivo y sustentable. En el marco de una política de extensión e investigación universitaria, se procura sostener ese diálogo, interpretando las necesidades y demandas del medio socio – productivo.

El propósito de esta tesis es desarrollar un método de medición tridimensional del viento en ambientes urbanos complejos que permita caracterizar el recurso eólico en un volumen determinado sobre la azotea de un edificio, utilizando para esto instrumentos de medición de bajo costo con el fin de obtener información

útil para el desarrollo y mejora de las tecnologías de aprovechamiento del recurso eólico con fines energéticos. Para ello se propuso diseñar y construir un instrumento de bajo costo y con materiales fáciles de conseguir que permita realizar mediciones tridimensionales de la velocidad del viento.

En la Figura 2, se muestra un bosquejo de un anemómetro tridimensional de coperolas, propuesto en este trabajo.

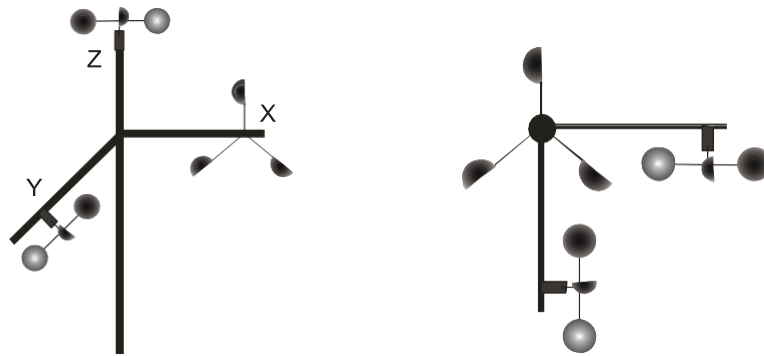


Figura 2: Vista axonométrica (izq) y superior (der) del anemómetro 3D. Elaboración propia.

Este dispositivo determina la velocidad del viento en las direcciones de los ejes x, y, z, pero necesita de un accesorio para poder determinar el sentido positivo o negativo de la componente del viento. Para esto, se propone acoplar un mecanismo que incluye una aleta que se desplaza por acción del viento (por ejemplo, para el caso vertical) según que la dirección de flujo de aire sea ascendente o descendente. En ambas situaciones se acciona un pequeño interruptor electromecánico, del tipo “Tact switch” (sw) que activa una señal para determinar el sentido vertical del viento, es decir si el flujo del viento es ascendente, se accionará el sw superior, y esto generará una señal al sistema indicando tal condición; por convención definimos al flujo ascendente como positivo (z +). En el caso en que el flujo del viento sea descendente, se activará el sensor sw inferior, generando la señal que indica al sistema que el flujo presenta esa característica lo que nuevamente por convención definimos como negativo (z -). Esto mismo propio del eje z, se realiza tanto con los ejes x e y; así se logra determinar no solo la rapidez del viento en cada eje, sino también conocer

si el desplazamiento es en un sentido o en el opuesto, como se muestra en la Figura 3.

Para el caso experimental y contando con el observador presente en la totalidad de los ensayos, se prescindirá de este accesorio utilizando para determinar los sentidos de desplazamiento del viento la veleta de la estación meteorológica del laboratorio de energía de la FCEIA – UNR para los escurrimientos horizontales y una varilla con una cinta plástica muy liviana en su extremo a modo de cataviento para determinar el sentido del escurrimiento vertical del viento.

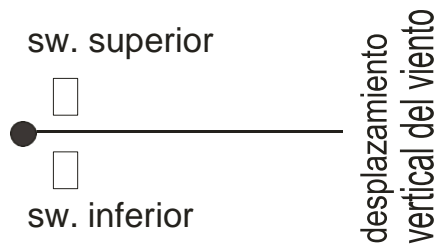


Figura 3: Dispositivo para determinar el sentido del viento, accesorio para el anemómetro 3D.

Elaboración propia.

Para caracterizar las condiciones de viento presentes en la azotea de un edificio y en diferentes subzonas de esta, es necesario realizar mediciones en diferentes puntos de la superficie bajo estudio, es por esto que se propone realizar estudios a lo largo y ancho de la superficie e incluso a diferentes alturas.

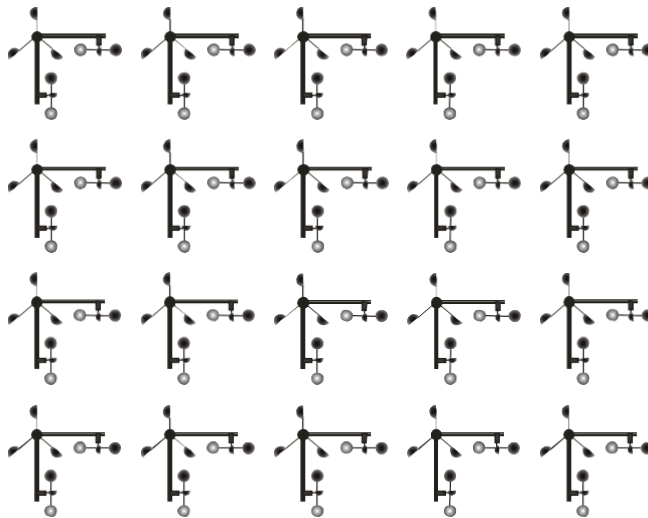


Figura 4: Vista en planta de diferentes anemómetros localizados en la azotea de un edificio.

Elaboración propia.

En la Figura 4 se representa una distribución posible de anemómetros a fin de obtener datos de velocidad del viento en un área determinada.

En la Figura 5 se muestra un caso hipotético de medición sobre un techo, los puntos rojos representan anemómetros 3D.



Figura 5: Estudio del viento urbano en la azotea de un edificio. Los puntos rojos muestran los diferentes puntos de medición con anemómetro 3D de coperolas. Elaboración propia.

Organización del trabajo

La tesis se organizó en ocho capítulos, conforme con el siguiente detalle

Organización de la tesis doctoral en capítulos:

Introducción: El primer capítulo presenta el tema de investigación, su relevancia y el problema abordado. Se exponen los objetivos, se ofrece una breve descripción de la metodología utilizada y un esquema general de la estructura.

Antecedentes: El segundo capítulo realiza una revisión de la literatura relevante al temade investigación, incluyendo estudios previos, teorías y conceptos clave. Se contextualiza la investigación dentro del campo de estudio y se expone el vacío de conocimiento que se ha identificado.

Marco teórico: En el tercer capítulo se desarrolla un marco teórico sólido que

sustenta la investigación. Se definen y explican los conceptos centrales del estudio, se presentan las diferentes perspectivas teóricas sobre el tema. Se aborda en este espacio un estudio sobre capa límite atmosférica, sus características y comportamientos y la caracterización del viento urbano.

Marco metodológico: El cuarto capítulo describe en detalle la metodología utilizada para realizar la investigación. Se explica el tipo de estudio, las mediciones/ muestras, los instrumentos de recolección de datos y las técnicas de análisis.

Resultados: El quinto capítulo presenta los resultados de la investigación. Se utilizan tablas, gráficos y figuras para facilitar la comprensión de los datos. Se analizan los resultados y se discuten sus implicaciones.

Conclusiones: El sexto capítulo sintetiza los principales hallazgos de la investigación y responde a las preguntas de investigación planteadas. Se discuten las contribuciones del estudio al campo de conocimiento y se proponen líneas de investigación futuras.

Publicaciones derivadas de la tesis: En el séptimo capítulo se presenta un listado de las publicaciones que se han derivado de la investigación doctoral.

Bibliografía: El octavo capítulo presenta la lista de las fuentes bibliográficas que se han utilizado en la elaboración de la tesis doctoral

Estudio Bibliográfico: El estudio bibliográfico consistió en búsqueda, lectura y análisis de bibliografía sobre temas relacionados con la energía eólica, la aerodinámica de edificios, tipos de instrumental existente para medir las características del viento, características y comportamientos de la capa límite atmosférica en distintos contextos, estudios previos relacionados con la caracterización del viento en el ambiente urbano.

Desarrollos teóricos: Esto comprendió el desarrollo de fórmulas, a partir de los datos obtenidos en la medición por el instrumento desarrollado, que cuantifiquen las tres componentes del viento (u horizontal, v transversal y w vertical).

También se determinaron las curvas de Viento Medido versus la señal eléctrica generada por el prototipo.

Objetivos

Se planteó un doble objetivo general de investigación y desarrollo. Se propone identificar y comparar variables físicas intervinientes en el desempeño de aerogeneradores operados en edificios dentro de ciudades y desarrollar un método de medición tridimensional del viento en ambientes urbanos complejos.

Para el logro de este objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

1. Identificar las variables relevantes del flujo de aire a partir de modelos establecidos.
2. Diseñar un sistema de medición del viento en ambiente urbano.
3. Desarrollar la solución prototipo.
4. Evaluar el desempeño del prototipo desarrollado contrastado con un ensayo empleando un modelo físico a escala.

ANTECEDENTES

La ubicación de una turbina eólica en un ambiente urbano debe ser objeto de análisis, porque en la ciudad los patrones de flujo son complejos y turbulentos, debido a la variada geometría y tamaño de los edificios.

En la Figura 6 se observa la distribución edilicia de una ciudad y un ensayo a escala en túnel de viento.



Figura 6: Izquierda: ejemplo de ciudad altamente edificada. Derecha: ensayo en túnel de viento de los flujos que se desarrollan en ella. Fuente: [14].

En la Figura 7, se representa el patrón de flujo que cambia con la dirección del viento.

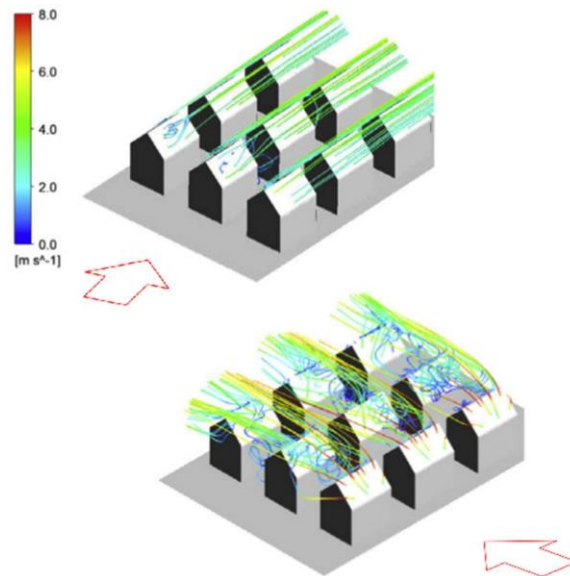


Figura 7: Patrón de flujo sobre edificios según la dirección del viento. Fuente: [15].

Lo que enseña la Mecánica de los Fluidos sobre la Capa Límite se desarrolla a continuación, pero eso no alcanza aún para definir la misma en un ambiente urbano (ver esquema de estructura de capa límite urbana en la Figura 34 al final del desarrollo teórico de capa límite).

Por lo que realizar mediciones de campo con detalles es importante no solo por razones prácticas para ubicar los aerogeneradores, sino también para validar los cálculos de las simulaciones de los softwares de CFD (Computational fluid Dynamics).

Métodos para evaluar la capa límite atmosférica en un ambiente urbano

Existen al menos tres métodos para evaluar la capa límite atmosférica en un ambiente urbano:

- 1) A través de un modelo físico, utilizando un túnel de viento con un modelo a escala y respetando las leyes de semejanza y análisis dimensional.
- 2) Uso de software de CFD (Computational Fluid Dynamics).
- 3) Medición en el sitio por medio de anemómetros u otros instrumentos de medición como los indicados en Tecnología de medición del viento.

El método del modelo físico es el más preciso y convalidado en la “ingeniería del viento” [16], [17] y [18] y se utiliza para calibrar los softwares de CFD. Implica disponer de un túnel de viento que pueda simular la capa límite atmosférica, y en el país solo existen tres: uno en la UNLP (Departamento de Aeronáutica), otro en la UNNE (Facultad de Ingeniería), y el tercero en la UNCo (Departamento de Mecánica Aplicada). Disponer de un túnel de viento no es simple y no está al alcance de cualquier actor de la energía eólica urbana, además de los costos que implica su funcionamiento. No obstante, su empleo posibilita simular el comportamiento del viento en relieves diversos, como se muestra en las Figuras 8 y 9.

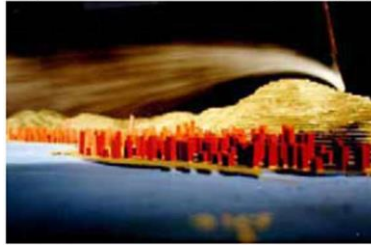


Figura 8: Estudio del flujo causado por vientos del sur sobre Victoria Peak en Hong Kong, China (1:4000). Fuente: [18].

Los modelos CFD tienen la limitación del modelo de turbulencia que se utilice, en el caso de modelar un ambiente urbano, lo más recomendable es usar un modelo LES (Large Eddy Simulation) o Modelo de Simulación de Grandes Vórtices, lo que requiere de ordenadores en paralelo y muchas horas de cómputo, lo que lo hace poco alcanzable a un diseñador de turbinas eólicas en entornos urbanos.

La Figura 9 muestra la sección vertical central de las diferentes formas de cubierta investigadas, mientras que la Figura 10 muestra un ejemplo de ensayo en túnel de viento empleando un software de CFD.

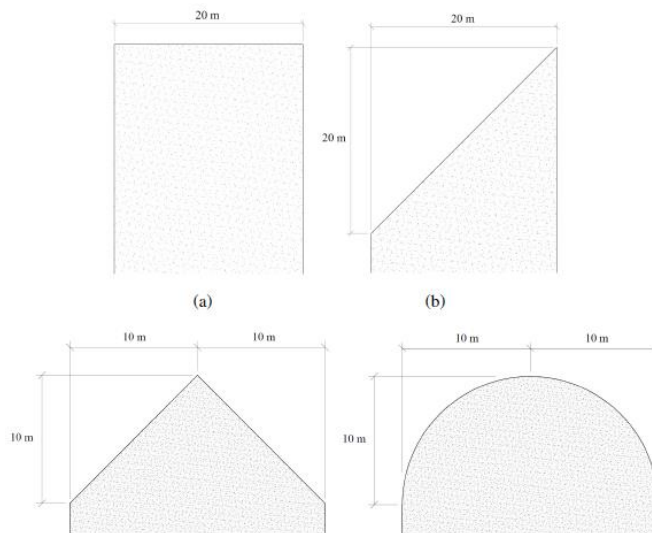


Figura 9. Detalle de la sección vertical central de las diferentes formas de cubierta investigadas. (a) techo plano; b) techo inclinado; c) techo a dos aguas; d) techo esférico/ abovedado.

Fuente: [19]

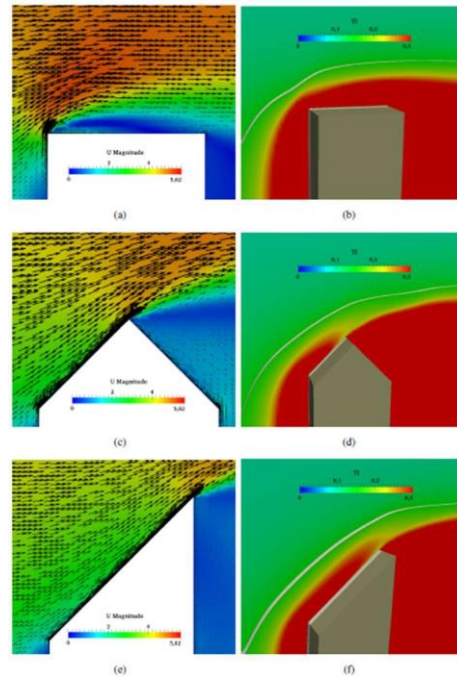


Figura 10: Estudio CFD de velocidad promedio del viento (izq) e intensidad de turbulencia (der) sobre techos de diferentes formas. Fuente: [19]

Con estas herramientas se pueden evaluar diferentes condiciones sobre múltiples variables, como, por ejemplo, estudiar los diferentes perfiles verticales de la velocidad del viento como se muestra en la Figura 11. En la misma se observa el análisis del perfil vertical del viento para diferentes tipos de techo (plano, inclinado, dos aguas, esférico, abovedado); las alturas H de cada edificio estudiado en el artículo son diferentes y varían entre 20 y 40 m, por ello se adimensionalizó z/H .

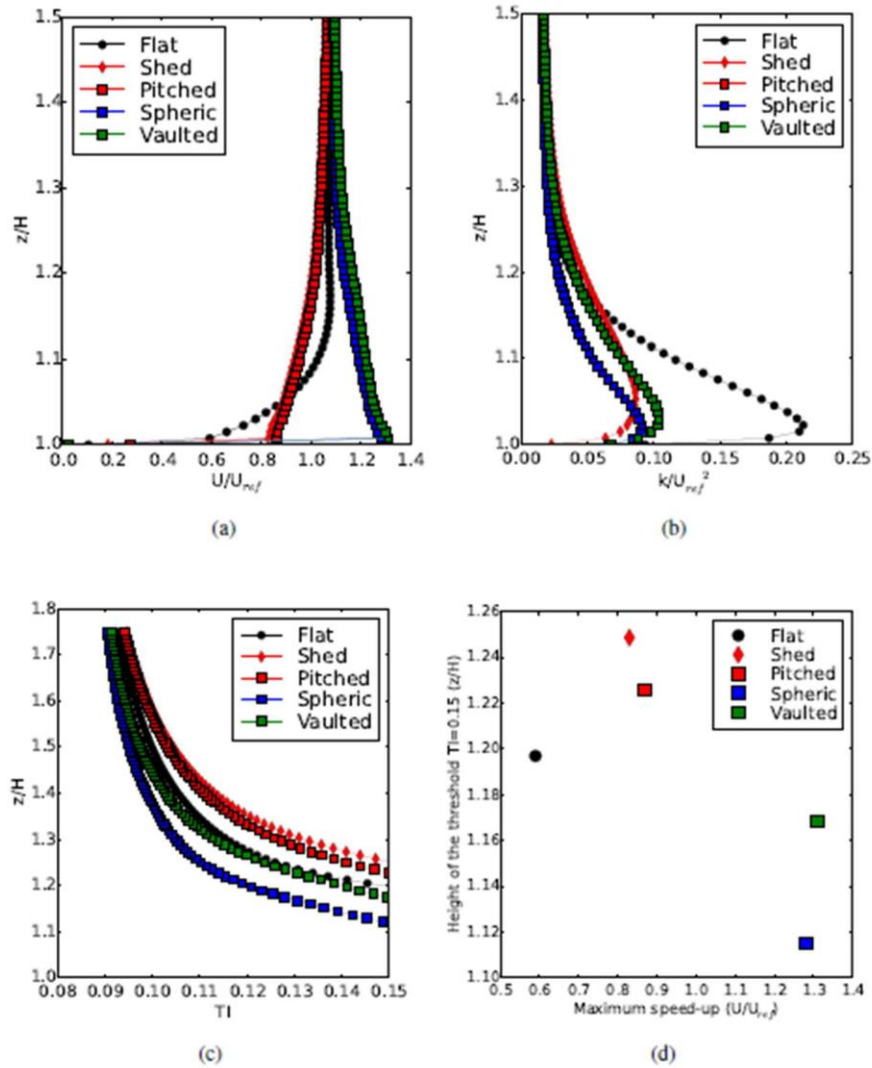


Figura 11: Análisis del perfil vertical de viento para los diferentes tipos de forma de techos donde intervienen la velocidad promedio del viento, la intensidad de turbulencia y la energía cinética turbulenta. Fuente: [19]

Por último, los métodos de mediciones en el lugar (mediciones de campo) tienen la limitación del instrumento que se utilice pues, como se describe en el apartado “Tecnología para la medición del viento”, los hay que miden en una, dos y tres direcciones; para el trabajo de esta tesis, lo indicado es medir en tres direcciones (3D), siendo estos los de mayor costo y la medición es generalmente puntual. De aquí la necesidad de desarrollar un método de bajo costo y con múltiples mediciones 3D, que pueda describir los flujos en la capa

límite urbana, que es el objeto de la presente tesis. Por otro lado, realizar mediciones de campo con detalles es importante no solo por razones prácticas para ubicar posterior los aerogeneradores, sino también para verificar (calibrar) los software de análisis CFD (Computational fluid Dynamics).

La Figura 12 muestra el anemómetro diseñado en este trabajo y el equipo experimental de adquisición de datos correspondiente.



Figura 12: Mediciones de campo realizadas en este trabajo. Elaboración propia.

Tecnologías para la medición del viento

Dado que el propósito de la tesis fue desarrollar un método para medir la velocidad del viento en tres direcciones asociadas a tres ejes coordenados (x, y, z), se investigó las diferentes tecnologías que permiten medir y caracterizar el viento.

Las distintas tecnologías para medir la velocidad del viento involucran diversos procedimientos e instrumentos:

- a) Estaciones meteorológicas con anemómetro de coperolas y veleta.
- b) Anemómetros ultra sónicos
- c) Anemómetros Laser Doppler
- d) Termoanemómetros.
- e) Sodar
- f) Lidar

Las estaciones meteorológicas automáticas permiten medir entre otras variables, la rapidez del viento con anemómetros de coperolas, y la dirección con veleta. No

obstante, al estar los ejes del anemómetro y de la veleta fijos en una vertical, lo que se mide con estos instrumentos es la rapidez y la dirección del viento en el plano perpendicular a ese eje, es decir, un plano horizontal ofreciendo una medición parcial. La Figura 13 muestra un equipo de este tipo.



*Figura 13: Estación meteorológica con anemómetro de coperolas y veleta (FCEIA – UNR).
Elaboración propia.*

Por su parte, los anemómetros ultra sónicos son dispositivos utilizados para medir la velocidad del viento utilizando ondas de sonido de alta frecuencia; se basan en el principio de que la velocidad del viento afecta la frecuencia del sonido que viaja a través del aire. Cuando un transductor emite una onda de sonido a una velocidad conocida, la onda de sonido rebotará en las partículas de aire en movimiento y la frecuencia de la onda de sonido reflejada será diferente. Esta diferencia en la frecuencia se utiliza para determinar la velocidad del viento.

Su funcionamiento se basa en la emisión y recepción de una onda de sonido a una frecuencia conocida, generalmente alrededor de 200 kHz. Esta onda de sonido se emite desde un transductor y viaja hacia el segundo transductor. Cuando la onda llega al segundo transductor, se recibe la onda de sonido y mide la diferencia de frecuencia entre la onda de sonido emitida y la onda de sonido recibida.

Esta diferencia de frecuencia se utiliza para calcular la velocidad del viento.

El anemómetro ultrasónico mide la velocidad del viento en un dado punto, en tres direcciones: en la dirección de la onda de sonido emitida, en la dirección perpendicular a ella y en la dirección vertical. La Figura 14 reproduce un anemómetro ultrasónico.

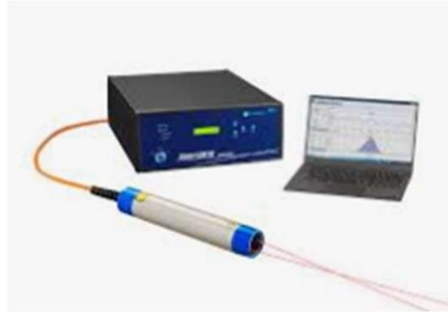
Si bien este tipo de instrumentos son los ideales para ser utilizados en esta tesis, su altocosto y baja disponibilidad de los mismos en el mercado local, hacen necesario elegir otra alternativa.



Figura 14: Anemómetro sónico tridimensional. Fuente: [20].

Por su parte, los anemómetros laser permiten medir velocidades de gases y líquidos. Su principio de funcionamiento se basa en el uso de dos haces láser que inciden sobre un punto de medida, creando una zona de medida formada por franjas de interferencia de alto contraste de separación conocida. Cuando una partícula pasa a través de dicha zona emitirá pulsos de luz al pasar por las franjas luminosas y a partir de la frecuencia Doppler es posible calcular la frecuencia de estas señales y, por lo tanto, la velocidad de la partícula obteniendo la velocidad del fluido. En la Figura 15 se muestra un anemómetro láser Doppler.

En el caso del viento urbano, las partículas suspendidas podrían o no estar, mientras que otros objetos (hojas, pájaros, etc.) podrían distorsionar la medición, por lo que la técnica no resulta la más adecuada.



15: Anemómetro láser doppler (LDA). Fuente: [21].

Por otro lado, los termo anemómetros (Ver Figura 16) se dividen en dos tipos: los anemómetros de hilo caliente y los de termopar.

Los anemómetros de hilo caliente miden la velocidad del aire leyendo el enfriamiento que ocurre en un hilo caliente expuesto al flujo de aire. A medida que aumenta la velocidad del aire, el hilo se enfría más rápidamente, lo que produce un cambio en la resistencia eléctrica del hilo. Los anemómetros de termopar obtienen la velocidad del viento midiendo la diferencia de temperatura entre dos termopares, que están expuestas a diferentes velocidades del viento.

Uno de los beneficios de los termo anemómetros es que son muy precisos en la medición obtenida. Los anemómetros de hilo caliente son particularmente precisos en mediciones de baja velocidad, mientras que los anemómetros de termopar son más adecuados para mediciones de alta velocidad. Estos instrumentos pueden medir la velocidad del viento hasta en tres dimensiones.



Figura 16: Termo anemómetros. Arriba unidireccional – abajo tridimensional Fuente: [20].

Otros sistemas de medición de velocidad de viento, como los LiDAR y SoDAR constituyen instrumentos para la medición del viento en la dirección vertical.

El LiDAR (Light Detection and Ranging) es un dispositivo que mide la velocidad y dirección del viento a distintas alturas mediante impulsos lumínicos, permitiendo la medición del perfil vertical de viento. En la Figura 17 se muestra un anemómetro LiDAR.



Figura 17: Equipo LiDAR. Fuente: [22].

El SoDAR (Sonic Detection and Ranging) (Ver Figura 18) es un dispositivo que mide la velocidad y dirección del viento a distintas alturas mediante impulsos acústicos, permitiendo la medición del perfil vertical de viento.



Figura 18: Equipo SODAR. Fuente: [22].

Las diferentes tecnologías descritas, así como los protocolos de medición del viento, se resumen en la Tabla 1.

TIPO DE ANEMÓMETRO	TIPO DE MEDICIÓN POR INSTRUMENTO	CANTIDAD DE DIRECCIONES
Coperolas	Unidireccional	1
Ultrasónicos	Tridimensionales	3
Laser Doppler	Multidimensional	2
Termo anemómetros	Tridimensional	3
SODAR	Unidireccional	1
LIDAR	Unidireccional	1

Tabla 1: Tipos y características de los anemómetros.

Visto los distintos tipos de anemómetros descritos, se selecciona para esta tesis, el anemómetro de coperolas, fundamentalmente porque es un equipo simple, adecuado para la medición de viento y por la facilidad para su construcción. No obstante ser un dispositivo que mide la velocidad del viento en un plano, a partir de un anemómetro de coperolas, se diseñó y desarrolló un anemómetro prototipo, que permite medir la velocidad del viento en sus tres direcciones.

Por lo dicho, contaremos con un nuevo modelo de anemómetro tridimensional de coperolas, como se resume en la Tabla 2.

TIPO DE ANEMÓMETRO	TIPO DE MEDICIÓN POR INSTRUMENTO	CANTIDAD DE DIRECCIONES
Coperolas 3D	Tridimensional	3

Tabla 2: Nuevo instrumento de anemometría producto de esta tesis.

El viento en el contexto urbano: una revisión histórica

A lo largo de la historia de las ciudades, el desarrollo de las mismas estuvo acompañado con la mejora de la calidad de vida de sus habitantes. En este proceso, el viento ha sido una variable importante. Si bien en la actualidad un número creciente de herramientas tecnológicas aporta significativas propuestas para el análisis y simulación de condiciones en el desarrollo urbano, este sería imposible sin la evolución que tuvo la sociedad a lo largo de la historia de la mano de pensadores e investigadores que han realizado significativos aportes; desde Aristóteles, que reconocía los beneficios de incorporar el viento entre los criterios de emplazamiento de una ciudad, hasta los profesionales de hoy en día, que desarrollan conocimientos en distintas disciplinas donde el interés es comprender de mejor manera el viento y su comportamiento dentro de las ciudades.

Dado que la presente tesis es en Ingeniería, y que esta actividad humana busca encontrarse soluciones a los problemas del ser humano y su entorno, se consideró pertinente indagar acerca de cómo se fue abordando el problema de la comprensión del viento y de su aprovechamiento útil para mejorar las condiciones de vida de las personas.

A continuación, se exponen los primeros antecedentes sobre estudios sobre el viento.

En la antigüedad Hipócrates, médico griego (460-370 a. C.) en sus *Aforismos* indicó de manera precisa la influencia del clima sobre el bienestar y la salud de los hombres. En su obra *De los aires, de las aguas y de los lugares*, declara que estos son los factores fundamentales para explicar la salud de los habitantes de una determinada ciudad [23].

En su *Política*, Aristóteles define como saludable el emplazamiento en relación al viento y al sol, incluso antes que el emplazamiento militar, que persigue la seguridad como el primer principio de diseño urbano [24].

Aristóteles aseguraba que “las ciudades más sanas son las construidas en una ladera hacia el este, puesto que el viento sopla desde el cuadrante de la salida del Sol” [25].

La capacidad de observación de Aristóteles le permite distinguir que las distintas orientaciones o emplazamientos de pueblos y casas (solanas o sotaventos, frente a umbrías o barloventos) serían causa y razón de una mayor confortabilidad.

Aristóteles reconoce, en base a la observación, cierto retardamiento del viento a medida que avanza, tema hoy ya entendido como efecto de la rugosidad. En el Libro II, Parte 4, afirma: “Los hechos confirman la opinión de que los vientos se forman por la unión gradual de muchas evaporaciones, igual que los ríos se derivan de sus fuentes de agua que brotan de la tierra. Cada viento se hace más débil a medida que avanza y abandona su fuente hasta reunirse nuevamente con sus fuerzas” [24].

Marco Vitruvio Polión fue un destacado de la arquitectura que trató el tema del viento con criterios de diseño urbano. Fue un arquitecto, ingeniero, escritor romano del siglo I a. C. Escribió un compendio de recomendaciones para emplazar ciudades en relación al viento, basadas en la observación de su comportamiento. En uno de sus libros, Vitrubio escribe un capítulo denominado “De la división y distribución de las obras dentro de las murallas”, en el que expresa:

“Siguiendo los ángulos intermedios entre dos direcciones de viento, parece que deben orientarse los trazados tanto de plazas públicas como de las calles, de manera que con esta disposición se alejará de las viviendas y de las calles la molesta violencia de los vientos. Pues, en efecto, si las calles estuvieran trazadas en la dirección de los vientos, entrando estos directamente del espacio abierto del cielo, su soplo e ímpetu constantes, comprimidos en lo angosto de las calles estrechas, se difundirán con mayor violencia. Las calles deben estar orientadas en el sentido opuesto a la dirección de los vientos, a fin de que cuando soplen se quiebre en los ángulos formados por las manzanas de las casas y, rebatidos se dispersen; a ellos pueden añadirse las brisas matinales que emergen excitadas por los rayos con que el sol, al levantarse, absorbe la humedad que la noche hadejado en el aire”.

Vitruvio consideraba que el viento es una ola de aire agitado, con movimiento fuerte y errante. Él sabía que los vientos afectaban de manera física la

estructura de las calles y de la ciudad en sí.

Vitruvio menciona a Andrónico de Cirrestres (Andronikos de Kyrrhos), un reconocido astrónomo macedonio quien en el año 50 a. C. construyó una torre de ocho lados en cercanía de la Acrópolis de Atenas, denominada La Torre de los ocho vientos (Ver Figura 19).

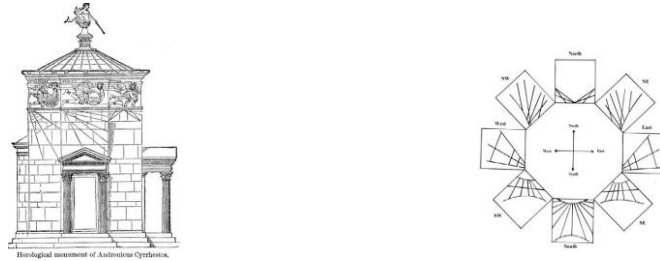


Figura 19: La torre de los ocho vientos, a los pies de la Acrópolis de Atenas. Fuente: [26]

Se trataba de una estructura de mármol con forma de octógono, en la que incorporó a cada lado imágenes en representación de cada uno de los vientos y frente a la dirección de cada uno de ellos. Actualmente la torre, que se mantiene en pie, tiene 12,8 metros de altura y un diámetro de 8 metros. Sus caras están orientadas a los ocho vientos enteros: N, NE, E, SE, S, SO, O. De acuerdo a Theodossiou y colaboradores [26], los vientos tallados corresponden a:

1. N, Boreas. Este viento frío y violento del norte que trae la azotadora brisa del invierno está representado por un anciano que sopla una caracola para producir el ruido característico.
2. NE, Kaikias. Es el viento dañino del noreste. En el friso aparece un hombre viejo con túnica y descalzo portando una cesta llena de granizo. El viejo derrama el hielo acumulado en su escudo.
3. E, Apeliotis. El impetuoso viento del otoño que trae las cosechas está caracterizado por un joven que acarrea frutos y trigo en su manto.
4. SE, Evros. El viento funesto del este que trae calor y lluvia está personificado por un hombre maduro cubriéndose con una capa que soporta una vasija invertida que derrama agua.
5. S, Notos. Es el viento caliente que trae tormentas al final del verano, con lo

cual podía conllevar la pérdida de las cosechas. Su símbolo es un joven vaciando una vasija para producir la lluvia.

6. SO, Lips. Es el viento que viene de África. El friso representa un muchacho alado empujando la proa de un barco y dirigiéndola hacia el chorro de aire.
7. O, Zephiros. La suave brisa fructificadora que anuncia la primavera es encarnada por un joven con poca ropa que reparte flores.
8. NO, Skirion. Este viento anuncia la llegada del invierno. Su símbolo es un hombre barbudo con una vasija de bronce repartiendo brasas de carbón.

Basándose en estos principios del viento de Andrónico, Vitruvio desarrolló un esquema para una ciudad de ocho lados con un plan de radiación. Pero esta concepción era muy utópica y, por lo tanto, no tuvo un impacto apreciable en la práctica urbanística del Imperio Romano.

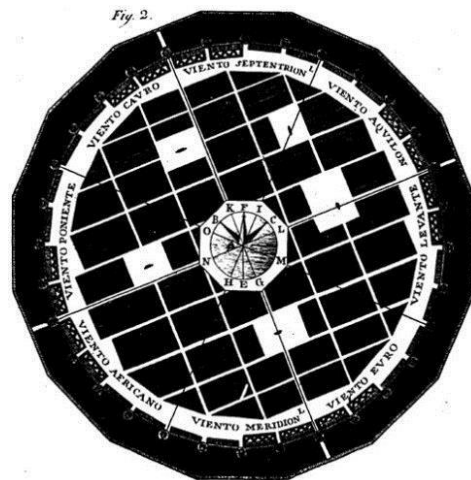


Figura 20: Planta de una ciudad resguardada de los vientos. Fuente: [27].

En la Figura 20 se reproduce el esquema de la ciudad de Vitruvio.

En 1413, los conceptos de Vitruvio fueron redescubiertos en la biblioteca del Convento de Saint Gall. Sus numerosas traducciones y ediciones difundieron el ideal de Vitruvio sobre las calles alineadas en relación a los vientos. Así, cuando en

1503 Leonardo da Vinci desarrolla un plan urbanístico de la ciudad de Imola, se basa en los trimestres de los vientos, estableciendo la rosa de los vientos como una característica regular de la representación de la cartografía urbana [27].

Leonardo da Vinci fue uno de los primeros en abordar varios de estos problemas de forma más científica. Realizó experimentos sobre diversos temas, desarrollando estudios metódicos sobre el flujo del aire y del agua alrededor de objetos y documentó sus descubrimientos con diagramas y dibujos propios. En sus estudios de los pájaros y la naturaleza, combina sus conocimientos de física y mecánica, lo que le permitió escribir sus tratados sobre el vuelo de las aves. En uno de ellos analiza los vientos, los efectos que genera la resistencia del aire, el movimiento de los fluidos, la estabilidad de las aves en el aire y la dirección que estas toman en sus vuelos: “El aire que por sí viste los cuerpos, se moverá junto con estos cuerpos; nos lo demuestra la experiencia cuando el caballo corre por caminos polvorientos. Tanto se mueve el objeto contra el aire, como el aire contra el objeto sin movimiento” (Bridges, 1968, citado por [28]). Y observando los pájaros escribió: “El pájaro batiendo las alas sobre el aire, viene a condensarlo y hacerlo resistente a su descenso. Pero si el aire se mueve contra las alas inmóviles, esas alas sostienen el peso del pájaro en el aire. Cuando la fuerza del movimiento del aire iguale la fuerza del descenso de un pájaro, este pájaro estará en el aire sin movimiento. Y si el movimiento del aire es más fuerte, vencerá y levantará al pájaro entre las altas nubes” (Bridges, 1968, citado por [28]).

Más allá de sus conclusiones, Leonardo no logró generar una máquina voladora, ya que aún no tenía conocimientos de aerodinámica. Pese a sus interesantes observaciones materializadas en sus dibujos, en la época de Leonardo aún no se había vinculado la física con las matemáticas (algo que comenzó a suceder prácticamente un siglo más tarde con Galileo Galilei), por lo tanto, una teoría de fluidos era aún imposible.

Daniel Bernoulli fue un matemático, estadístico, físico y médico suizo-holandés. En 1738 publicó su obra clave, *Hidrodinámica*, donde define lo que más tarde sería reconocido como el Principio de Bernoulli, que describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una corriente fluida. Bernoulli propuso que la energía que posee un fluido ideal (sin viscosidad ni

rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, permanece constante a lo largo de su recorrido. Sus experimentos lo llevaron a entender que "la presión interna de un fluido (líquido o gas) decrece en la medida que la velocidad del fluido se incrementa" [29].

Por su parte, Battista Venturi, un físico italiano, descubrió un efecto en la mecánica de los fluidos que luego tomó su nombre: comprobó experimentalmente que, al pasar por un estrechamiento, las partículas de un fluido aumentan su velocidad. Este efecto se explica por medio del principio de Bernoulli y el principio de continuidad (que expresa que, si un elemento pasa de una sección a otra, la masa se conserva), y solo es aplicable cuando el fluido se encuentra en movimiento.

Esto va a ser fundamental en los avances de la aeronáutica al aplicarse al diseño del perfil alar (cuando el viento pasa por un cuerpo fuselado como el perfil de un ala cuya cara superior es más curva que la inferior, tiene más superficie que recorrer en la cara superior que en la inferior). Esto generará un cambio de presión. Será precisamente este fenómeno lo que provocará la sustentación alar. Posteriormente será utilizado para el diseño de las palas en ciertos aerogeneradores.

Según información publicada por la Oficina Meteorológica Nacional de Gran Bretaña (MET Office), el mantenimiento de registros del clima se hizo cada vez más popular en diversos lugares del planeta a partir del año 1660 aproximadamente. En 1723, James Jurin (1684- 1750), secretario de la Royal Society, recomendó una escala para estimar y medir la fuerza del viento [30].

Según esa fuente, Francis Beaufort, hidrógrafo irlandés y miembro de la Marina Real Británica, fue el primero en diseñar una escala para medir la intensidad del viento hacia el comienzo del siglo XIX, denominada la escala Beaufort. La misma es una medida empírica basada principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento. No obstante, un relato de 1704 muestra que una escala similar ya estaba en uso aproximadamente un siglo antes. Daniel Defoe, en su narración de la terrible tempestad que asoló a las islas británicas entre el 26 y el 27 de noviembre de 1703 (titulado "La tormenta: una colección del mayor número de bajas notables y desastres que ocurrieron en la última

tempestad terrible, tanto por mar como en tierra"), hace referencia a una escala de 12 puntos denominada "Tabla de grados" [30].

Francis Beaufort diseñó su escala para medir la intensidad del viento en 1805. Primero la mencionó en su diario privado el 13 de enero de 1806, declarando: "de aquí en adelante estimaré la fuerza del viento de acuerdo a la siguiente escala" [30].

Beaufort introdujo cambios en 1807, cuando decidió combinar las categorías 1 y 2 y, luego, empleó una escala que se extiende entre 0 y 12. En otro momento del mismo año, agregó la descripción de la lona (o vela) que podría desplazar a una fragata en diferentes condiciones de viento [30].

La primera referencia publicada sobre la escala de Beaufort para medir la intensidad del viento se produjo en 1832, cuando la *Nautical Magazine* imprimió un artículo titulado *The Log Board*. En este artículo, la formulación de las escalas se atribuyó a Beaufort [30].

La escala Beaufort se amplió en 1944, cuando se agregaron cinco nuevos valores (de 13 a 17). Antes de eso, el valor 12 (huracán) había sido el punto más alto de la escala, en referencia a una velocidad sostenida del viento de 64 nudos o más, es decir, un promedio igual o superior a 32,7 metros por segundo durante 10 minutos. "Los cinco puntos adicionales ampliaron la escala a 118 nudos (61,2 metros por segundo), con la intensidad 12 referida solo a velocidades en el rango de 64 a 71 nudos (entre 32,7 y 36,9 metros por segundo). No obstante, los valores comprendidos entre 13 al 17 se aplicaban solo a casos especiales, como los ciclones tropicales; no estaban destinadas al uso ordinario en el mar —de hecho, es imposible evaluar esas intensidades por la apariencia del mar [30].

En los efectos normales, la escala Beaufort (Ver Tabla 3) se extiende desde la intensidad 0 (calma) a la 12 (huracán). Esta escala asumió su forma actual alrededor de 1960, cuando se añadieron la altura probable y máximas probables de las olas (esta última corresponde a la altura de la ola más alta esperada en un período de 10 minutos, y las alturas de olas se refieren a mar abierto, lejos de la tierra) [30].

Escala	Velocidad del viento (km/h)	Denominación	Aspecto de la mar	Efectos en tierra
0	0 a 1	Calma	Espejado	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	Ventolina	Pequeñas olas, pero sin espuma	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	Flojito (Brisa muy débil)	Crestas de apariencia vítrea, sin romper	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos
3	12 a 19	Flojo (Brisa débil)	Pequeñas olas, crestas rompientes.	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	Bonancible (Brisa moderada)	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	Fresquito (Brisa fresca)	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	Fresco (Brisa fuerte)	Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas
7	50 a 61	Frescachón (Viento fuerte)	Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento
8	62 a 74	Temporal (Viento duro)	Grandes olas rompientes, franjas de espuma	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas dificultosa
9	75 a 88	Temporal fuerte (Muy duro)	Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	89 a 102	Temporal duro (Temporal)	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca.	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones
11	103 a 117	Temporal muy duro (Borrasca)	Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles
12	118 y más	Temporal huracanado (Huracán)	El aire está lleno de espuma y rociones. Enorme oleaje. Visibilidad casi nula	Destrucción total

Tabla 3: Escala Beaufort. Fuente: www.vientosmaritimos.com

El arquitecto Victor Olgay, autor de *Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas* [31] (publicado en 1963 por Princeton University Press), es considerado un pionero en bio clima. Sus postulados son la base de muchas investigaciones posteriores y siguen vigentes hasta hoy. La preocupación principal de Olgay era encontrar qué variables condicionan el confort térmico.

“En la práctica, el problema consiste en lograr un índice que sea capaz de medir la “temperatura efectiva” de la superficie del cuerpo (sobre la piel), que es la sensación térmica que el cuerpo experimenta verdaderamente. Pero esa temperatura, según diferentes autores, es consecuencia no solo de la temperatura ambiente, sino también de la biológica y, sobre todo, de la intensidad de enfriamiento, en el que interviene la humedad y el viento que, al actuar sobre la evapotranspiración, modifican el proceso térmico” [23] (Págs. 149-150).

Olgay definió, con mucha precisión, el polígono de confort en su Carta Bioclimática, la cual se constituyó en la base para el estudio del confort en espacios abiertos de la ciudad. Además de desarrollar estudios sobre los efectos del viento en la arquitectura urbana, Olgay exploró conjuntos de edificios utilizando túneles de viento, como se reproduce en la Figura 21. De esta forma, descubre que, en la configuración de unidades paralelas, el viento tiende a “saltar” sobre los bloques de edificios. Al estar en fila, los edificios provocan una “sombra” eólica sobre las diferentes unidades de cada bloque, y el viento tiende a canalizarse a través de los espacios libres, sin pasar ni estancarse en las unidades posteriores [31].

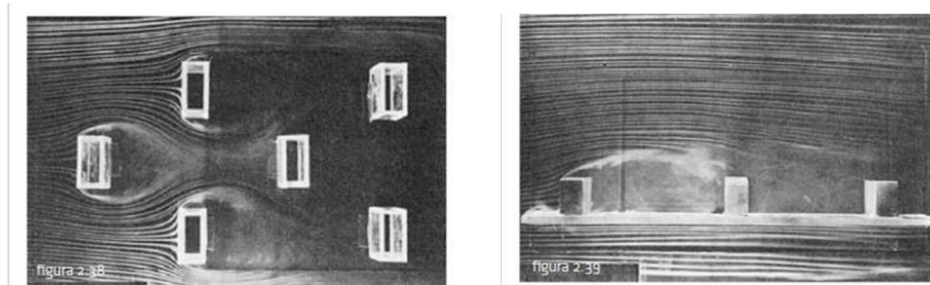


Figura 21: Modelos arquitectónicos de corte en túneles de viento. Fuente: [31].

De acuerdo con esos estudios, “En el caso de situar los bloques o unidades escalonadamente tiene la ventaja de que habrá fuertes patrones de viento desde las construcciones directas al flujo, hacia las subsecuentes unidades, por lo que el esquema de corrientes es mucho más uniforme, quedando casi eliminadas las zonas de aire estancado” [32].

Por su parte, el arquitecto israelí Baruch Givoni fue uno de los especialistas en arquitectura bioclimática más reconocidos a nivel internacional. Su publicación de 1969, *Hombre, clima y arquitectura* [33], ha sido un referente clave en todos los avances e investigaciones respecto al clima urbano. Magíster en Higiene y Ph.D en Salud Pública, Givoni se desempeñó como profesor e investigador de la Building Research Station en el Technion del Israel Institute of Technology.

Givoni investigó la relación entre el confort humano, el clima y la arquitectura. Su trabajo llega a la síntesis en un climograma reflejado en un diagrama

psicrométrico donde traza una zona de confort higrotérmico, tanto para el invierno como para el verano, como se muestra en la Figura 22. Fuera de esta zona de confort, Givoni plantea estrategias de diseño pasivo en la arquitectura o la envolvente.

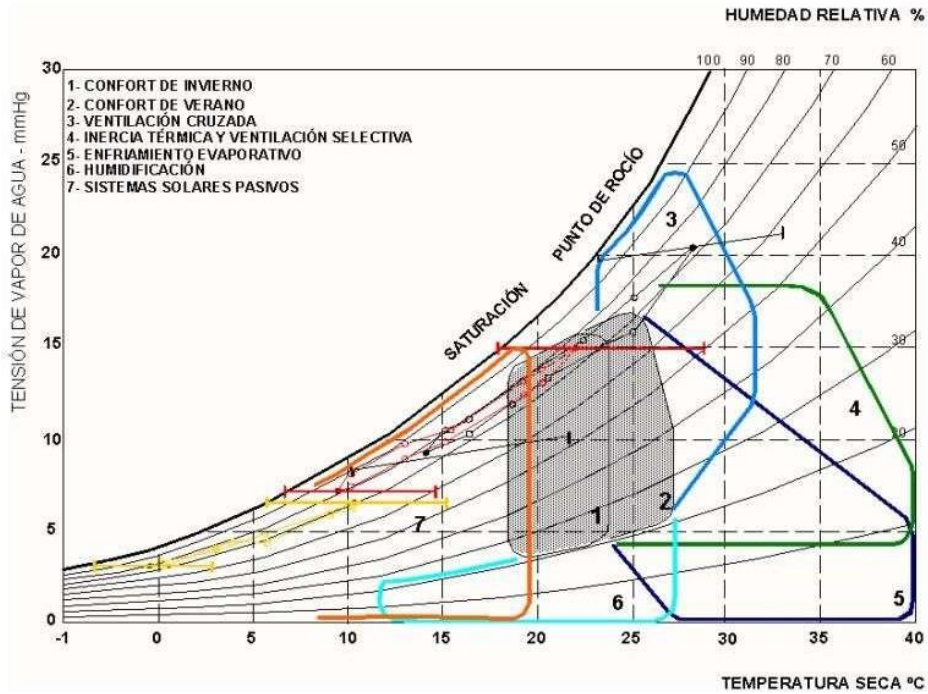


Figura 22: Climograma de B. Givoni. Fuente: [33].

Dentro de sus variables, el viento aparece como uno de los factores relevantes para alcanzar el confort térmico. Este climograma también puede ser aplicado en los espacios exteriores, siendo un gran avance en el tema de diagramas métricos para medir y diseñar diferentes espacios.

Allan Konya, autor de Diseño en climas cálidos [34], publicó por primera vez la imagen sobre los estudios del viento a escala urbana que se ha convertido en referente de muchas publicaciones, como puede verse en la Figura 23.

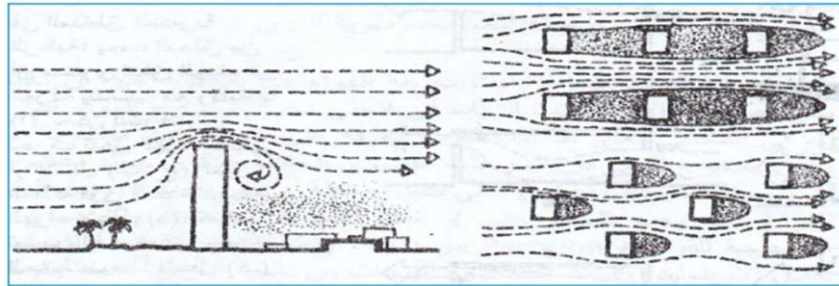


Figura 23: El efecto del entorno urbano sobre el movimiento del viento. Fuente: [35].

Por su parte, las investigaciones de Timothy Oke, Profesor Emérito del Departamento de Geografía y miembro del Programa de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de la Columbia Británica en Vancouver, Canadá, se centran en el clima urbano y los balances de energía y de agua de las ciudades.

Oke ha desarrollado una serie de investigaciones enfocadas en la temperatura de la superficie y teledetección, superficie y balance energético de las ciudades, parametrización de los flujos, evaporación urbana, islas de calor, entre otros. Uno de los temas de interés para esta investigación es el de la rugosidad urbana y sus turbulencias, este último en la micro escala urbana. Oke publicó junto a Grimmond, en 1999, una investigación sobre las propiedades aerodinámicas de las zonas urbanas derivadas del análisis de forma superficial, el más relevante y citado sobre este tema [36].

Sue Grimmond, del Departamento de Meteorología de la Universidad de Reading y ex profesora del King's College London y de la Universidad de Indiana en Bloomington, EE.UU., ha publicado más de 300 artículos en revistas científicas. Sus investigaciones le han permitido desarrollar varios métodos para determinar las características aerodinámicas de un sitio a través del análisis de su forma superficial (morfometría). Las medidas discutidas en el estudio realizado en colaboración con Oke incluyen la longitud de rugosidad, la profundidad de rugosidad de la subcapa y la conductancia aerodinámica.

Según estos autores, los sistemas de información geográfica desarrollados para once sitios en siete ciudades norteamericanas son utilizados para determinar las características de la morfometría: altura, forma, superficie en tres dimensiones y

la distribución espacial de sus elementos de rugosidad (edificios y árboles). La mayoría de los sitios están en los suburbios residenciales, pero uno es industrial y dos están cerca de los centros urbanos. Se utiliza este estudio descriptivo para derivar las características aerodinámicas aparentes de los sitios [36] (Pág. 1262).

Los entornos urbanos de fines del siglo XX fueron cambiando significativamente sin considerar las recomendaciones de los expertos en relación a sus diseños y su relación con el microclima. En este sentido, se ensancharon las calles, se eliminó una importante cantidad de árboles en función del tránsito y se rompió la continuidad de las fachadas con la aparición de estructuras independientes con su propio acceso al sol y al viento y sus propios sistemas de control climático [24].

Esto fue la tendencia mundial que reconocieron Clive Doucet en Ottawa, Peter Bosselmann en San Francisco y Silvia de Schiller en Buenos Aires. Los efectos fueron la generación de más viento en las calles y el aumento de las temperaturas externas, siendo finalmente menos cómodo para el ciudadano usar los espacios públicos, con lo cual las personas comenzaron a preferir vivir encapsulados, tanto en sus automóviles como en sus departamentos, muchos de ellos con aire acondicionado [24].

“El estudio del confort térmico en la ciudad ha sido una cuestión del máximo interés para numerosos científicos. Y es que, como dijo el geógrafo e investigador español Manuel de Terán, la ciudad representa la forma más radical de transformación del paisaje natural, pues su impacto no se limita a cambiar la morfología del terreno, nuevas construcciones, otro plano y disposición del territorio, ni tampoco la aglomeración humana o mecánica que determina, sino que todo ello modifica las mismas condiciones climáticas y ambientales, elevando la temperatura y afectando al régimen de precipitaciones y de vientos [23] (Págs. 150-151).

En España se reconoce lo desarrollado por José Fariña Tojo, autor de *La ciudad y el medio natural* (publicado en 1998 por Akal) [37] y de *Criterios ambientales en el diseño y la construcción de la ciudad* (publicado en 2003 por la Universidad Politécnica de Madrid) [38]; así mismo, se destaca el trabajo de Ester Higuera,

autora de *Urbanismo Bioclimático* (publicado en 2006 por Gustavo Gili) [39] a partir de su trabajo de tesis doctoral.

También han sido publicadas guías de sustentabilidad y diseño urbano en las que se hace mención al manejo y control del diseño en relación al viento. Durante el año 2013 aparece el “Manual de Diseño Bioclimático Urbano: Manual de recomendaciones para la elaboración de normativas urbanísticas [40]. En dicho manual se define cómo se deben incorporar criterios de viento en el diseño urbano con el objetivo de mejorar el confort en los espacios públicos.

Como fue descrito, el viento ha sido motivo de estudio a lo largo de la historia. Inicialmente la preocupación central tuvo que ver con el diseño urbano y el poder definir criterios de emplazamiento de edificios y demás construcciones tratando de aprovechar este recurso como parte de un fenómeno natural que convive con el hombre.

Con el correr del tiempo, diferentes personalidades de la ciencia han estudiado el comportamiento del viento y su relación con los seres vivos, y en particular la relación del viento y la salud de los seres humanos (higienismo). Al mismo tiempo, una serie de inventos permitió conocer mejor el recurso y comienza a cobrar relevancia en la meteorología primero y en la climatología después, en una nueva forma de poder evaluar la relación entre el recurso eólico y la interacción con las personas y el ambiente que las rodea. Ya sobre finales del siglo XX y comienzos del XXI, se profundizan estudios de ingeniería en relación al viento y su interacción con los edificios y lo que ocurre en estos fenómenos, cobrando interés posibles nuevos aprovechamientos como, por ejemplo, la explotación del mismo con fines energéticos.

En concordancia con este interés, el propósito de esta tesis es desarrollar un método de medición tridimensional del viento en ambientes urbanos complejos que permita caracterizar cuantitativamente el recurso eólico sobre la azotea de un edificio.

MARCO TEORICO

Características principales del recurso eólico

Los movimientos de aire en la atmósfera están relacionados principalmente con las fuerzas básicas derivadas del calentamiento producido por la radiación solar y de la gravedad que se modifican principalmente por la rotación terrestre. Aunque la transformación de la energía calórica en energía cinética puede producir el movimiento ascendente y descendente del aire, generalmente, la velocidad del viento horizontal suele ser centenares de veces mayor que los movimientos verticales [41].

El movimiento horizontal del aire está regido por las siguientes fuerzas:

- Fuerza del gradiente horizontal de presión.
- Fuerza de Coriolis.
- Fuerza de rozamiento.

El viento geostrófico tiene lugar en la atmósfera libre donde se puede considerar despreciable la fuerza de rozamiento (es decir fuera de la capa límite atmosférica) y, por tanto, se produce cuando la fuerza del gradiente de presión queda equilibrada por la fuerza de Coriolis (Figura 24).

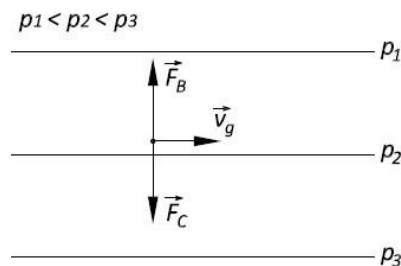


Figura 24: Representación del viento geostrófico. Elaboración propia.

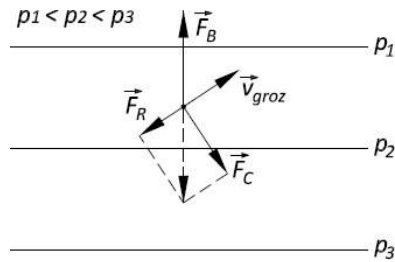


Figura 25: Representación del viento con rozamiento. Elaboración propia.

En la Figura 25 se representa vectorialmente el viento con rozamiento. Este se produce en la capa límite terrestre, donde el rozamiento hace que la velocidad del viento disminuya por debajo del valor geostrofico. Este efecto también influye en la fuerza de Coriolis, que depende de la velocidad y, por tanto, también disminuye. Este viento tiende a atravesar más oblicuamente las isobaras en la dirección y el sentido del gradiente de presión.

La variación de la rugosidad terrestre puede afectar al flujo de aire debido a los cambios en el campo de presiones, la absorción de la radiación solar y la cantidad de humedad disponible. Por otra parte, debido a que los océanos son grandes depósitos de energía, el flujo atmosférico también se encuentra afectado por la circulación oceánica.

Los efectos descritos conducen a una presión diferencial que afecta a los vientos globales y regionales. Además, el calentamiento o enfriamiento local pueden originar vientos locales persistentes, como las brisas marinas y los vientos de montañas.

Estudio sobre capa límite

Por lo general, cuando los fluidos se desplazan en el lecho de un río o en el interior de una tubería, el fluido que toca la superficie se detiene por el esfuerzo cortante en dicha pared. La zona o región donde el fluido se ajusta desde la velocidad cero en la pared hasta la máxima velocidad alcanzada en la corriente principal recibe el nombre de capa límite, particularmente importante en la mecánica de fluidos viscosos.

Dependiendo de ciertas condiciones, la capa límite puede caracterizarse como laminar o turbulenta. Para comprender mejor este fenómeno, podemos tomar

una placa plana muy delgada e introducirla en el seno de una corriente uniforme carente de efectos viscosos [1], como se representa en la Figura 26.

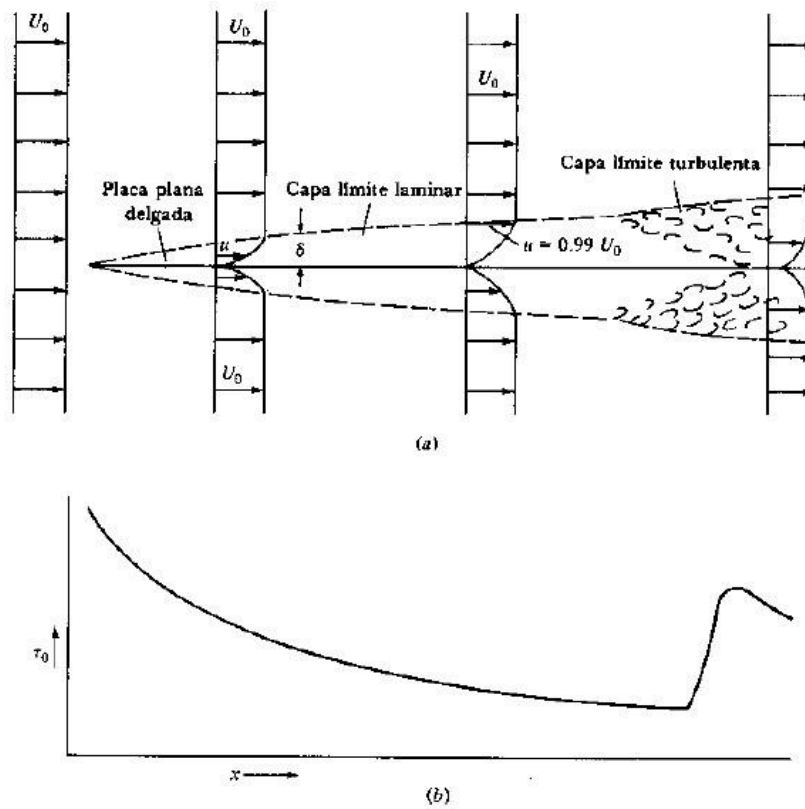


Figura 26: (a) Desarrollo de la capa límite y distribución de esfuerzos cortantes a lo largo de una placa plana, patrón de flujo en las capas límites sobre y bajo en placa delgada. (b) Distribución de esfuerzos cortantes en ambos lados de la placa. Fuente: [1]

A partir del extremo de la placa se generan fuertes perfiles de velocidad $\partial u_i / \partial x_j$, y a partir de una cierta altura δ , el flujo vuelve a tomar las propiedades de flujo uniforme; esta zona es la denominada capa límite y está delimitada por la pared sólida y el espesor δ , definido como el lugar donde la velocidad llega a ser del 99% de la corriente libre. Como se observa en la Figura 26.a, el espesor de la capa límite aumenta a medida que el fluido se mueve aguas abajo sobre la placa observando que $\partial u_i / \partial x_j$ se debilita, esto indica que la tensión de corte ($\tau = \mu \cdot \partial u_i / \partial x_j$, donde μ es la viscosidad dinámica del aire) a lo largo de la placa decae, como se representa en la Figura 26.b.

Puede evaluarse el perfil de velocidades como:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \approx \frac{\Delta U}{\Delta z} = \frac{U_{\infty(99\%)} - 0}{\delta} \approx \frac{U_{\infty}}{\delta} \quad (1)$$

Es decir, a medida que el espesor de capa límite (δ) aumenta, las tensiones de corte τ disminuyen. Pero en la Figura 26.b se observa que, abruptamente, las tensiones τ se vuelven a incrementar en la zona denominada capa límite turbulenta. Para explicar esto se debe describir la turbulencia y enunciar la longitud de mezcla de Prandtl y las tensiones de Reynolds.

Las capas límite pueden ser laminares o turbulentas dependiendo del valor del número de Reynolds, que permite conocer el tipo de escurrimiento con el que fluye un fluido. El número de Reynolds (Re) es la relación de fuerzas de inercia a fuerzas viscosas. Es un parámetro conveniente para predecir si una condición de flujo será laminar o turbulento. Se define como:

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu} \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del aire, μ la viscosidad dinámica del aire, V la velocidad y L una longitud característica del objeto sumergido en el aire.

Si el valor de Re es grande, el flujo será de tipo turbulento y si es lo suficientemente pequeño escurrirá en forma laminar.

Distintos investigadores ([42] y [43]) trataron de evaluar este número adimensional para la atmósfera; para ello, hicieron circular aire por una tubería que tenía las paredes recubiertas de arena con la finalidad de simular a escala la rugosidad de la superficie terrestre. Observaron que para un Re de 55 el flujo de aire escurría en forma laminar y que para Re de 750 el régimen era turbulento. Si la viscosidad cinemática del aire a una temperatura de 20°C es $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y se toma una velocidad de 1m/s, es decir, una suave brisa, resulta que la capa límite laminar tiene una extensión vertical de 0,83 mm y que a partir de una altura de 11,5 mm hay turbulencia. Es a partir de esta experiencia que se considera que la atmósfera fluye bajo régimen turbulento siempre.

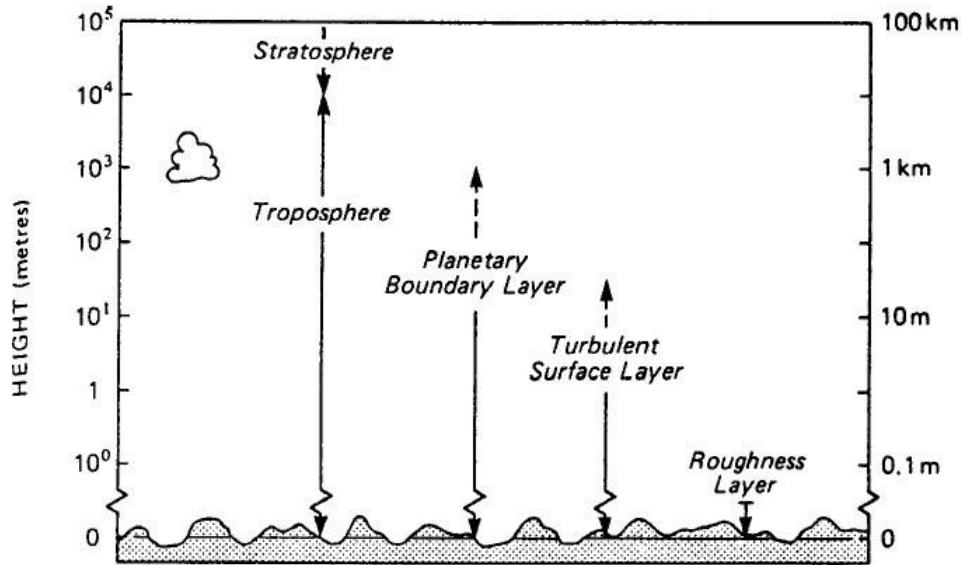


Figura 27: Estructura vertical de la atmósfera. Fuente: Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory

La capa límite es laminar y la velocidad de la corriente cambia uniformemente a medida que se aleja de la pared para números de Reynolds más bajos, como se muestra en el lado izquierdo de la Figura 27. A medida que aumenta el número de Reynolds el flujo se vuelve inestable y, finalmente, para los números de Reynolds más altos, la capa límite es turbulenta y la velocidad de la corriente se caracteriza por flujos de remolinos inestables que cambian con el tiempo dentro de la capa límite.

La transición de la capa límite laminar a turbulenta ocurre cuando el número de Reynolds es aproximadamente 500.000. La transición puede ocurrir antes, pero depende especialmente de la rugosidad de la superficie. La capa límite turbulenta se incrementa más rápidamente que la capa límite laminar como resultado del aumento de la tensión de corte en la superficie del cuerpo.

El flujo externo reacciona al borde de la capa límite como lo haría la superficie física de un objeto. Por lo tanto, la capa límite le da a cualquier objeto una forma “efectiva” que generalmente es ligeramente diferente de la forma física.

Definimos el grosor de la capa límite como la distancia desde la pared hasta el punto donde la velocidad es el 99% de la velocidad de “flujo libre” tal como enunciáramos más arriba [44].

Capa límite atmosférica

Existen distintas formas de nombrar a la capa límite atmosférica, tales como capa límite planetaria, capa límite convectiva, capa de mezcla, entre otras, pero todas ellas se refieren a la zona de la atmósfera en contacto con la superficie de la Tierra; la influencia del Sol, crea un calentamiento desigual de dicha superficie y junto a la disminución de la temperatura con la altura, se producen fenómenos convectivos importantes originando una intensificación de los movimientos caóticos del aire, conocidos como turbulencia atmosférica. Por encima de la capa límite el comportamiento de la atmósfera no está sujeto a dichos intercambios turbulentos.

La capa límite atmosférica es la sección de la tropósfera en contacto directo con la superficie terrestre y se define como la zona de la atmósfera en la que el efecto de la fricción es apreciable [45]. El espesor de esta capa varía espacial y temporalmente. La capa límite en terrenos planos tiene un ciclo diurno bien caracterizado que consiste en una capa de mezcla durante el día (en la que domina la convección) y una capa establemente estratificada durante la noche. En terrenos rodeados de montañas, presenta una estructura más complicada; ya que los mecanismos de mezcla no se limitan a movimientos solo convectivos debidos a la insolación, sino que incluyen también efectos locales por los flujos asociados a la topografía. Algo similar a este último fenómeno sucede en el ámbito urbano, donde la rugosidad del terreno ofrece una topografía irregular que incluso puede cambiar notablemente en el término de pocos metros y que responde al diseño urbano de las ciudades.

La densidad de los árboles, la ubicación y el tamaño de los lagos, ríos, colinas y edificios afectan en gran medida la distribución de la velocidad en la capa límite planetaria. El cambio en el espesor completo de la capa límite puede variar de unos cuantos cientos de metros hasta varios kilómetros y es más grande en condiciones inestables (por ejemplo, grandes urbes con fábricas) que en condiciones estables (zona rural).

La Figura 28 muestra el efecto general de la rugosidad del terreno en el perfil de la velocidad del viento. En este ejemplo, el cambio en el espesor completo de la capa límite va de unos 500 m hasta los 280 m, para rugosidad decreciente.

Debido a los cambios de velocidad con la altura, cualquier valor de velocidad del viento debe citarse en relación con la altura a la que se mide [46].

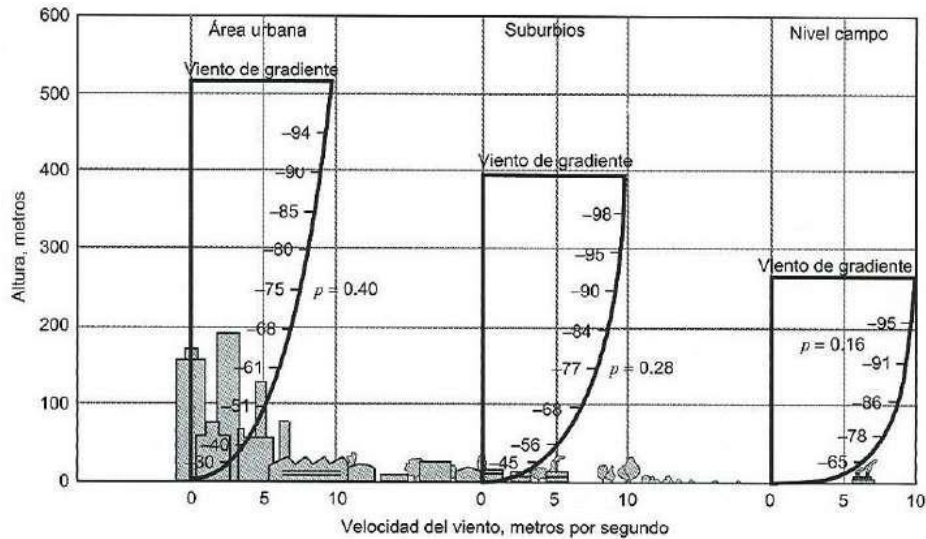


Figura 28: Efectos de la rugosidad del terreno sobre el perfil de velocidad de la capa límite atmosférica. Fuente: [46].

Dependiendo del tipo de superficie en contacto con la atmósfera se pueden distinguir a grandes rasgos: zonas marítimas (océanos, mares, grandes ríos y grandes lagos) y zonas terrestres, donde la influencia de estas determina distintas características de la capa límite. En la Tabla 4 se indican algunas de esas características, según las zonas consideradas.

TIPOS DE CAPAS LÍMITE ATMOSFÉRICAS	
ZONAS TERRESTRES	ZONAS MARÍTIMAS
Elevada variabilidad diurna	Reducida variabilidad diurna
Altura entre 1 y 3 km. En zonas desérticas hasta 5 km	Altura entre 1 y 2 km
Razón de Bowen alta, entre 0,5 y 5	Razón de Bowen baja, aprox 0,1
Influencia de la morfología de la superficie	Influencia del oleaje

Tabla 4: Capas límites atmosféricas. Fuente: desarrollo propio.

La razón de Bowen se define como la relación entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente sobre una superficie. En zonas terrestres húmedas dicho valor se encuentra por debajo de la unidad y en zonas terrestres áridas se encuentra por encima de la unidad.

En la Figura 29 se representa la estructura de la capa límite atmosférica sobre una zona terrestre y en una región de altas presiones que evoluciona en un ciclo diario. En general se distinguen: capa de mezcla convectiva, muy turbulenta, capa residual, menos turbulenta y capa estable nocturna, con turbulencia esporádica. El comportamiento dinámico y variable del espesor de la capa límite se inicia al amanecer, creciendo al mediodía y decreciendo al atardecer, estando condicionado por el proceso de convección. En cambio, durante la noche la temperatura baja por enfriamiento radiativo, quedando la capa límite definida por el estrato estable representado por la inversión radiativa superficial.

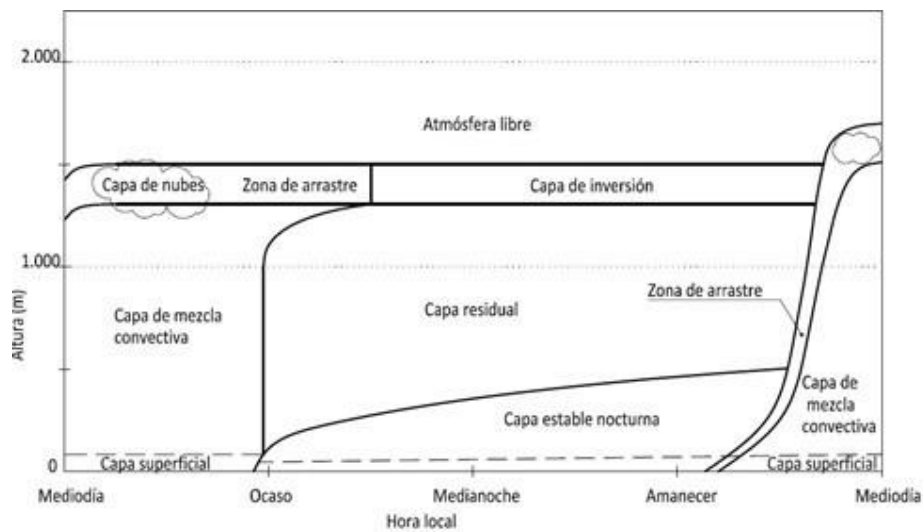


Figura 29: Estructura y evolución de la capa límite atmosférica. Fuente: [47].

La mayoría de los cambios en la profundidad de la capa límite sobre los océanos son causados por procesos sinópticos y de meso escala de movimiento vertical y la advección de diferentes masas de aire sobre la superficie del mar. Una masa de aire con una temperatura diferente que la del océano se someterá a una modificación hasta que su temperatura se equilibre con la de la superficie del mar.

La parte inferior de la capa límite atmosférica se denomina capa superficial y se suele considerar con un espesor sobre un 10% de la capa límite total. En ella, la resistencia de arrastre, la conducción de calor y la evaporación originan cambios importantes con la altura en la velocidad del viento, en la temperatura y en la humedad. Sin embargo, los flujos turbulentos son relativamente uniformes con la altura, por lo que se denomina también capa de flujo constante.

En la Figura 30 se representan los perfiles típicos idealizados, durante el día, de la temperatura, parte (a), y de la velocidad del viento, parte (b), en la capa límite atmosférica. En la gráfica de la temperatura, la capa superficial es inestable y el gradiente térmico en la capa de mezcla es casi adiabático. Las térmicas se elevan desde la capa superficial hasta la zona de arrastre y crean fuertes turbulencias en la vertical. Durante el día, la capa superficial, la capa de mezcla y la parte inferior de la zona de arrastre, son estáticamente inestables. Por otra parte, en la zona de arrastre, se incorpora aire nuevo desde la atmósfera libre hasta la capa de mezcla.

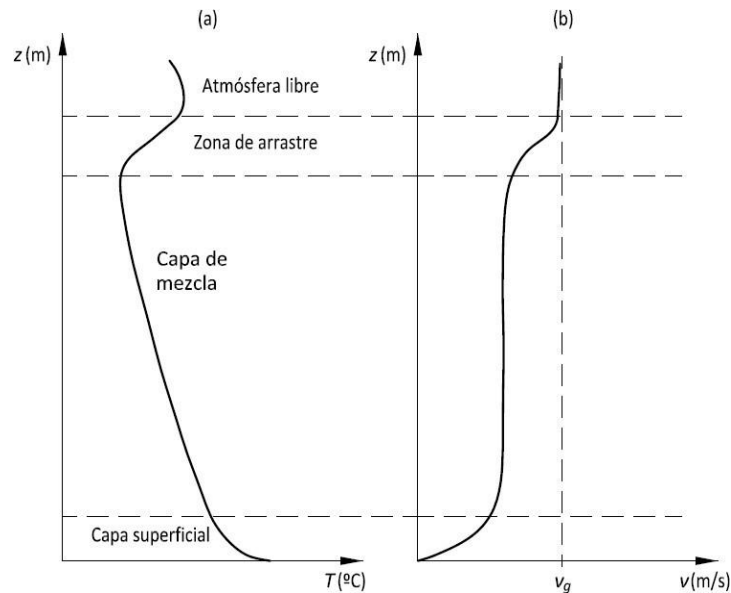


Figura 30: Perfiles típicos idealizados, durante el día, de la temperatura, parte (a), y de la velocidad del viento, parte (b). Fuente: [47].

En el caso de la velocidad del viento (Figura 30 b) se ha supuesto, en

condiciones anticiclónicas, sobre una superficie terrestre para una hora central del día, en donde aparece un perfil logarítmico del viento en la capa superficial, con un máximo de viento sub geostrófico en la capa de mezcla, seguido de un incremento en la zona de arrastre, hasta la velocidad del viento geostrófico, v_g , en la atmósfera libre.

En la Figura 31 se representan los perfiles típicos idealizados, durante la noche, de la temperatura (a), y de la velocidad del viento (b), en la capa límite atmosférica en condiciones anticiclónicas con cielos despejados.

En la gráfica de la temperatura en función de la altura (Figura 31 a), en la parte inferior se forma una capa superficial estable, que puede llegar a tener un espesor de hasta 20 m, con un calentamiento hasta la zona central debido al enfriamiento terrestre y un progresivo enfriamiento hasta la capa residual, que mantiene el gradiente adiabático constante del día anterior. En la parte superior se forma una inversión térmica radiativa que irá haciéndose mayor a lo largo de la noche.

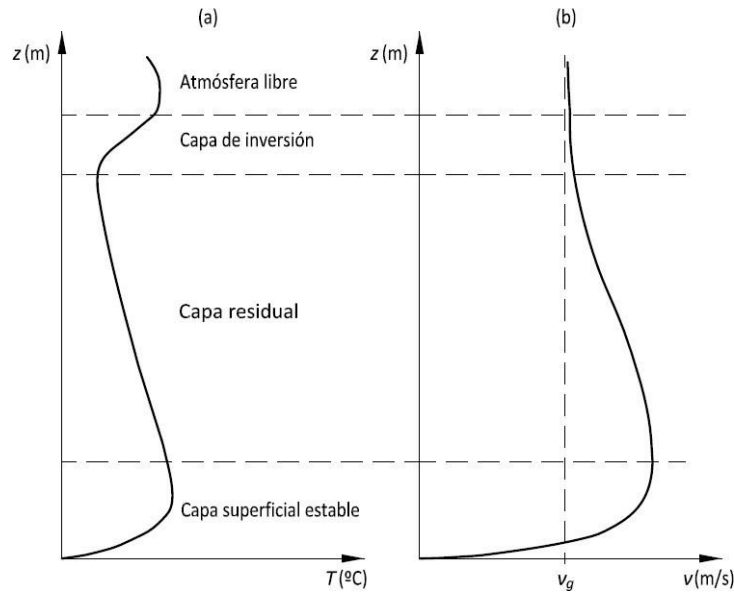


Figura 31: Perfiles típicos durante la noche en la capa límite atmosférica. Fuente: [47].

En la gráfica de la velocidad del viento en función de la altura (Figura 31 b), hay que destacar que, a unos cientos de metros, entre la capa superficial y la capa residual, el viento puede ser super geostrófico, a pesar de que los vientos cerca de la superficie del suelo podrían estar en calma. A medida que se incrementa la altura, el viento va disminuyendo hasta alcanzar el valor de viento geostrófico, v_g , en la atmósfera libre.

Estudio de la turbulencia del flujo atmosférico

La turbulencia es un régimen de flujo tridimensional, rotacional, disipativo, con cambios espacio temporales rápidos de presión y de velocidad.

Si bien existen casos en la naturaleza muy excepcionales en los que la mezcla se produce por difusión molecular en regímenes laminares, es usual que la mezcla, que se produce en las capas bajas de la atmósfera, tenga carácter turbulento, además de ser aleatoria e irregular y manifestar una gran variabilidad.

Por todo ello, se puede afirmar que el transporte turbulento es varios órdenes de magnitud más eficaz que la difusividad molecular [48].

Las escalas de tiempo de los movimientos turbulentos varían mayoritariamente desde unos pocos segundos, para los remolinos pequeños, hasta media hora los remolinos más grandes. La escala espacial cubre valores desde los milímetros, de las fluctuaciones disipativas, hasta algunos cientos de metros de los remolinos de la capa límite.

En el rango de la micro escala, la turbulencia del viento se define como la variación temporal y espacial de la velocidad del viento con variaciones temporales entre 0 y 10 minutos, y espaciales hasta decenas de metros. También, en general, se define como la fluctuación de la velocidad del viento en intervalos inferiores al periodo de cálculo de la velocidad media.

La turbulencia del flujo atmosférico está generada principalmente por dos causas: la fricción con la superficie terrestre o con la superficie del mar y los efectos térmicos que pueden causar el movimiento vertical de masas de aire, como resultado de las variaciones de la temperatura y la densidad del aire, siendo usual que estas dos causas se produzcan de forma simultánea.

La transferencia de cantidad de movimiento de la atmósfera al océano es significativa, ya que una parte de ella contribuye a la generación de oleaje, mientras que el resto influye en la generación de turbulencia y corrientes convectivas en las capas superficiales del océano. En la capa de la atmósfera en contacto directo con la superficie marina, la turbulencia se encuentra muy afectada por el oleaje, pero por encima de dicha capa, que puede ser de 2 a 4 veces la altura de la ola, el flujo atmosférico puede considerarse horizontal y unidireccional [49].

También, el perfil vertical de la velocidad de viento está influenciado por el nivel de turbulencia. Las variaciones diarias y estacionales del viento en un emplazamiento son determinantes para conocer la producción energética. En cambio las variaciones a corto plazo permiten conocer la turbulencia y las ráfagas del viento.

La fluctuación del viento está descrita de forma aproximada por la velocidad media, \bar{v} durante un tiempo determinado, siendo un valor típico diez minutos, y por la intensidad de turbulencia, I_t . La velocidad media del viento medida en el tiempo T viene dada por:

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (3)$$

La varianza da una estimación del carácter aleatorio de la velocidad del viento y viene dada por la siguiente expresión:

$$\bar{v}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (v(t) - \bar{v})^2 dt \quad (4)$$

$$\bar{v}^2 = \sigma^2 \quad (5)$$

resultando la desviación estándar la raíz cuadrada de la varianza.

El coeficiente de variación, que llamamos intensidad de turbulencia, es la razón entre la desviación estándar y la velocidad media del viento:

$$I_t = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (6)$$

La intensidad de turbulencia varía en un amplio rango entre 0,05 y 0,40, debido a las fluctuaciones naturales y a los diferentes periodos promedio de las mediciones [50].

En la Figura 32 a se representa un caso de la variación de la velocidad del viento urbanodurante un corto periodo, donde se aprecia su carácter aleatorio y se valoran los dos parámetros citados.

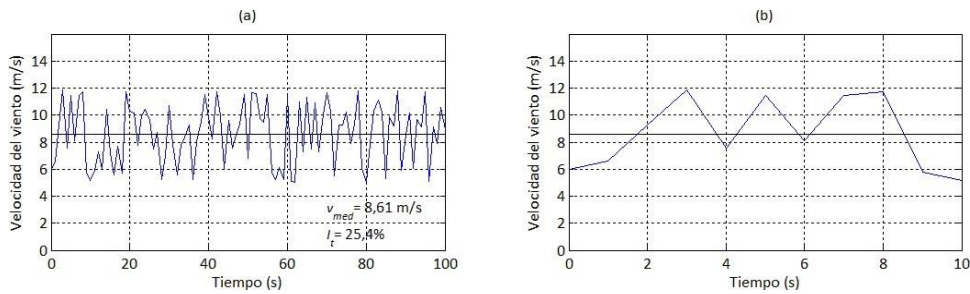


Figura 32: Velocidad media y turbulencia del viento. Fuente: [47].

En general, una ráfaga es un evento discreto dentro de un campo de viento turbulento. En el ámbito de la energía eólica y en relación con grandes aerogeneradores, se define ráfaga como la máxima velocidad del viento en un intervalo de segundos a minutos. En la Figura 32 b se ha extraído el detalle de la figura anterior con las variaciones de la velocidad del viento entre 0 y 10 s, donde se observan distintas ráfagas.

Una forma de caracterizar una ráfaga es mediante la amplitud, el tiempo de subida, la variación de la ráfaga máxima y el tiempo de variación de la ráfaga máxima [51].

Tipos de estabilidad

La estabilidad de flujo indica si la atmósfera desarrollará turbulencias u ondas de decrecimiento. De esta manera, el aire inestable se vuelve, o es, turbulento y el aire estable se vuelve, o es, laminar [47].

La estabilidad estática tiene en cuenta sólo la flotabilidad para estimar la estabilidad de flujo, y hace caso omiso de la cortadura del viento medio. En cambio, la estabilidad dinámica considera tanto la cortadura, o cizalladura del viento como la flotabilidad, siendo usual su determinación por el número de Richardson.

Para cualquier altura, la fuerza de flotabilidad se basa en la diferencia de temperatura entre una “parcela” de aire y el medio ambiente que le circunda. Cuando una parcela de aire separada verticalmente de su nivel inicial queda en la nueva posición a la que se lleva, sin volver a la posición de partida ni proseguir su movimiento, tenemos atmósfera neutra. En tal caso, los movimientos del aire ni son dificultados, ni se ven favorecidos. Asimismo, si la hipotética parcela de aire citada siguiese en movimiento, estaríamos en condiciones de atmósfera inestable, y si volviese a la posición de partida, estaríamos en condiciones de atmósfera estable.

La variación de la temperatura de la parcela de aire que se mueve verticalmente depende del tipo de evolución adiabática, ya sea seca o saturada. En el primer caso la partícula realiza el movimiento vertical sin condensar su vapor de agua y en el segundo caso condensando su vapor de agua.

Los cambios en la estabilidad también es una propiedad de la capa límite, ya que se encuentra afectada por la fricción y los intercambios energéticos con la superficie terrestre. Algunas consideraciones descriptivas tomando como base el ámbito terrestre, serían las siguientes:

Condiciones neutras: están asociadas una cierta actividad mecánica y reducida actividad térmica, como puede ser el caso de fuertes vientos con cielos cubiertos, existiendo poca mezcla vertical. Pueden ocurrir al atardecer, cuando el cese de la aportación energética del Sol provoca una disminución rápida de la capa de mezcla, lo que puede traducirse en una estratificación cercana a la neutralidad, dando lugar a la capa límite residual. Las condiciones atmosféricas neutras en el ámbito marino es una situación predominante [52].

Condiciones inestables: el calentamiento de la superficie al amanecer se transmite hacia la atmósfera y se destruye la inversión radiativa formada durante la noche. Ahora la capa límite presenta una agitación intensa lo que hace que

aumente el espesor de la columna de aire afectado, alcanzando su máximo al mediodía hasta una altura aproximada de 1.000 m sobre la superficie planetaria, aunque en condiciones de fuerte inestabilidad puede duplicar o triplicar dicho valor. El máximo se encuentra determinado por la presencia de una inversión térmica en altura, que es una discontinuidad que a veces también indican otras variables, como la humedad y la velocidad del aire.

Condiciones estables: la estabilidad se presenta, generalmente, durante la noche, debido a la ausencia energética del Sol y provoca inversiones térmicas en las proximidades de la superficie terrestre. La mezcla producida en estas condiciones es muy pequeña y no favorece el intercambio vertical entre distintos niveles, siendo la agitación turbulenta muy reducida. Este tipo de inversiones térmicas están asociadas a anticiclones con débiles velocidades de viento. En noches despejadas un valor típico de estas inversiones suele ser del orden de 100 m [47].

La fricción en la capa límite

La capa límite en condiciones neutras presenta dos regiones, como se indica en la Figura 33, una externa llamada capa de Ekman y otra interna, denominada capa superficial, o capa de Prandtl. En la capa externa el flujo no presenta ninguna dependencia con la naturaleza de la superficie, y la influencia de la fuerza de Coriolis debida a la rotación terrestre es importante. En la capa superficial, ocurre lo contrario, es decir, el flujo depende de la naturaleza de la superficie y la fuerza de Coriolis es despreciable.

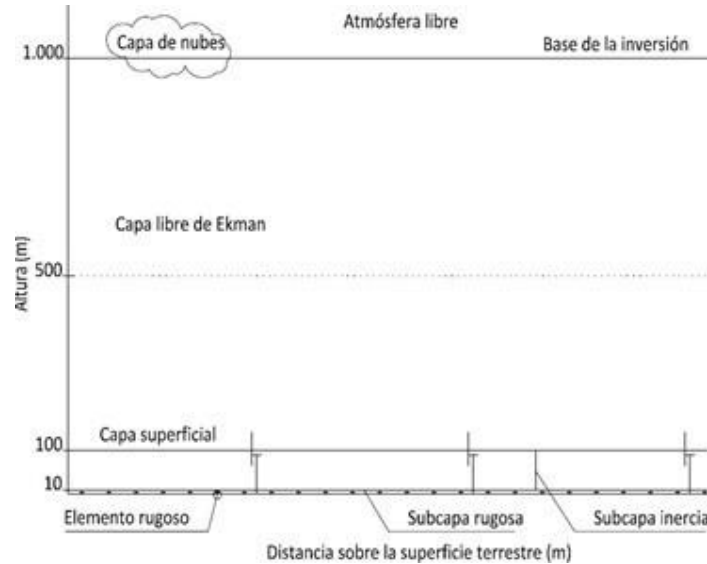


Figura 33: Estructura de la capa límite para condiciones neutras. Fuente: [48].

La capa superficial se puede subdividir en: subcapa rugosa y subcapa inercial. La primera presenta un espesor aproximado al parámetro de rugosidad z_0 , en ella la turbulencia y los perfiles promedio dependen directamente de la estructura de los elementos rugosos y el intercambio de materia y energía entre la superficie que viene dado por un proceso de difusión molecular. En la segunda, con un espesor del orden de varias decenas de metros por encima de la subcapa rugosa, los efectos de fricción se relacionan con el movimiento turbulento del aire y el viento aumenta su magnitud en forma logarítmica con la altura en condiciones neutras.

A medida que la altura aumenta, la fuerza de fricción disminuye permitiendo que el viento se aproxime cada vez más al viento geostrófico, acercándose a la dirección de las isobaras; este fenómeno se conoce como el efecto de la capa de Ekman. En condiciones ideales la variación del viento con la altura forma la espiral de Ekman en dicha capa [53].

Capa Límite Urbana

En la Figura 34, se esquematiza las diferentes partes de la capa límite atmosférica sobre un área urbana [54].

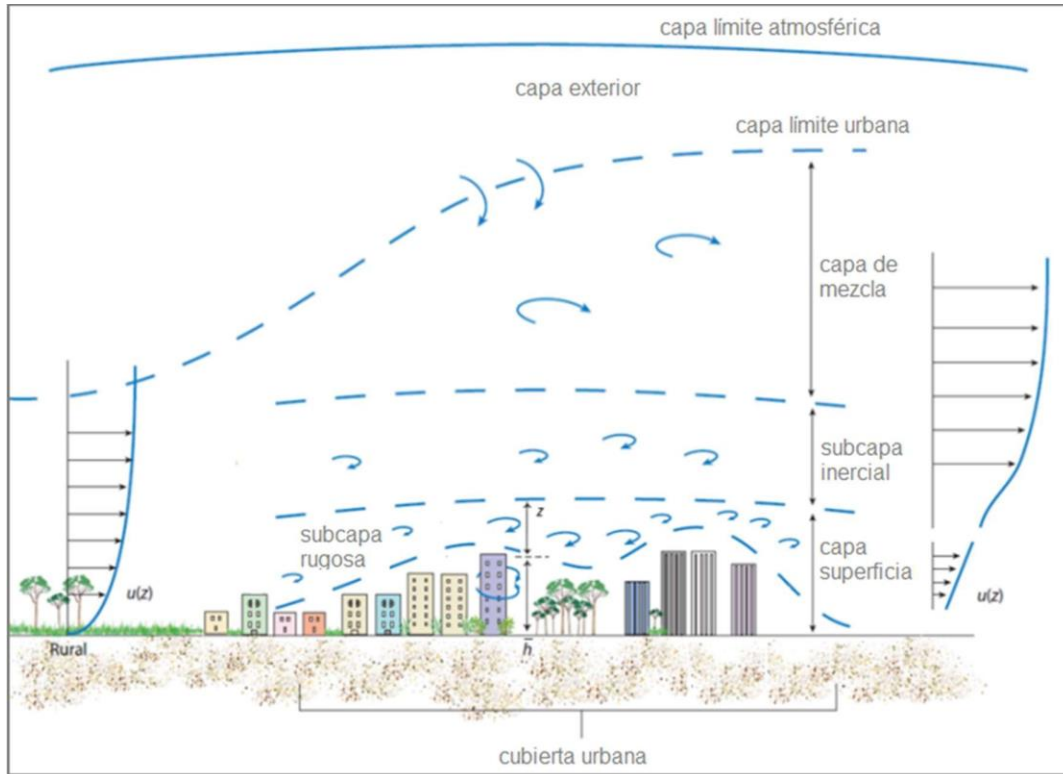


Figura 34: Esquema complejo de la estructura de la capa límite urbana. Fuente: [54].

La capa límite urbana se divide en una capa mixta, una subcapa inercial y una capa superficial, que a su vez se divide en una subcapa de rugosidad y una urbana, y su cubierta urbana. También se ilustran los perfiles verticales de velocidad del viento, diferencia entre zonas rurales y urbanas.

La capa límite tiene un espesor de entre 100 y 300 metros, el flujo del viento en la capa límite urbana es más turbulento y complejo que en una zona sin rugosidad. Los edificios y otras estructuras generan vórtices y patrones de flujo irregulares que afectan la dirección y la velocidad del viento.

Evaluación de edificios con diferentes formas de techos

Identificación de las variables relevantes

La explotación del recurso eólico en ambientes urbanos con fines energéticos involucra un conjunto de variables que deben ser estudiadas para que pueda ser caracterizado. La rugosidad presente en el territorio es determinante y al ser infinitamente variada, vuelve complejo el análisis necesitando realizar un estudio puntual para cada situación. No obstante, es factible comenzar a estudiar qué sucede con el viento a medida que éste va experimentando encuentros con “obstáculos” en medio de su camino.

Por otra parte, el medio urbano está caracterizado en las normas de acción del viento en edificios [55], limitadas a cuatro tipos de ambientes: rural, semi rural, urbano y urbano con edificios altos. La ciudad de Rosario presenta un ambiente urbano con edificios altos, como se ve en la Figura 35, por lo que el modelo de capa límite atmosférica está indicado en dichas normas y es el que se utilizó en los ensayos físicos.



Figura 35: Ciudad de Rosario – vista aérea. Fuente: Mag. Isidro Sansoni.

Debido a que el flujo del viento y la intensidad de la turbulencia a nivel del techo dependen en gran medida de la forma del techo, se han investigado varios aspectos relacionados con la ubicaciones de los efectos de aceleración sobre diferentes formas de techo para aprovechar la mayor velocidad del viento, lo que se traduce en más rendimiento energético.

Aunque se conoce la importancia de las formas de los techos en el rendimiento de los aerogeneradores montados en ellos, han sido limitados los estudios previos en el campo.

Por otro lado, el Dr. Lassig junto a su equipo de profesionales en Neuquén analizó el flujo sobre una superficie plana y estudió el flujo del viento alrededor de techos inclinados, piramidales y planos bajo tres direcciones de viento (0, 45 y 90 grados) para el montaje de aerogeneradores de techo. Concluyó que la densidad de potencia sobre el techo plano es mayor y más consistente que en otras configuraciones de techos y recomendó ampliar la investigación para incluir otras formas de techo. También investigó la ubicación de montaje para una sola dirección de viento para un techo a dos aguas y recomendó ampliar la investigación para incluir más tipos de techo y más ubicaciones con diferentes direcciones de viento.

Como estudio complementario, se revisó el trabajo realizado por el Dr. Jorge Lassig de la Universidad Nacional del Comahue, Argentina, en el año 2020 para especificar la forma óptima del techo para el montaje de turbinas eólicas con fines energéticos. Para llevar adelante esa tarea, se utilizó el software comercial de simulación computada específica ANSYS CFD Fluent 12.1 para simular el flujo del viento sobre seis formas diferentes de techo que cubren un edificio cúbico cuya altura de borde es de 6 m. Las formas de techo consideradas fueron: plana, semi esférica, a dos aguas, piramidal abovedado y con cuña que representan las formas de techo más utilizadas en zonas urbanas (Figura 36).

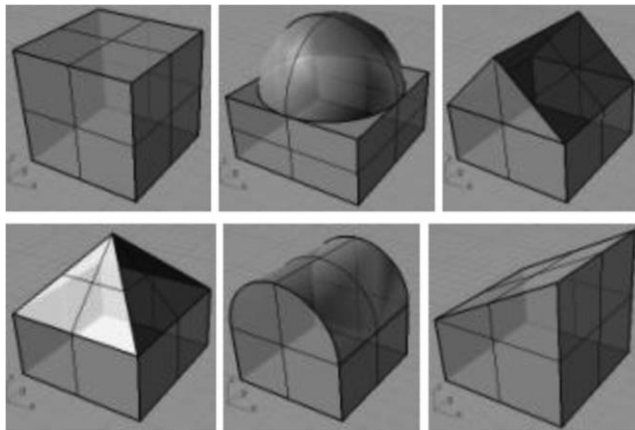


Figura 36: Formas de techo modeladas, desde la parte superior izquierda: plana, abovedada, ados aguas, piramidal, barril abovedado y acuñaado. Fuente: [56]

Para investigar el efecto de la dirección del viento, Lassig realizó simulaciones considerando diferentes direcciones de viento (Figura 37).

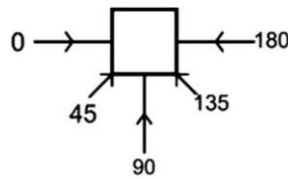


Figura 37: Direcciones del viento investigadas. Fuente: [56]

Para investigar el efecto de la altura del edificio en el flujo del viento sobre el mismo, este autor trabajó variando la altura en tres casos: 6, 12 y 24 metros y comparó los patrones de flujo y el efecto de la altura.

Para investigar el efecto de la configuración urbana, se ubicó a los edificios se en una disposición de cañón urbano y, en un segundo escenario, los edificios se ubicaron en disposición urbano escalonado.

Finalmente, comparó todos los resultados para identificar el efecto de la forma del techo, dirección del viento y altura del edificio dentro de esa configuración urbana (Figura 38).

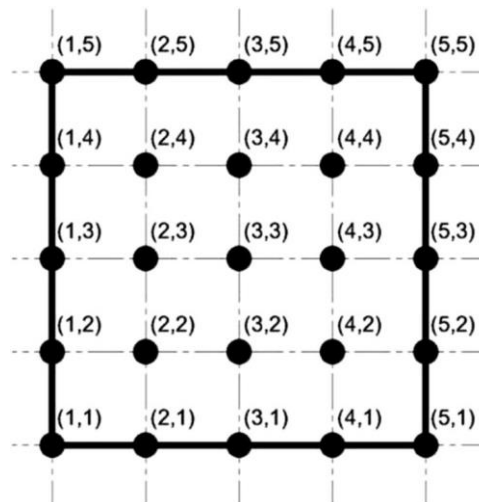


Figura 38: Ubicaciones de puntos de simulación superpuestos en el plano del techo.

Fuente: [56]

En Argentina los edificios en altura son mayoritariamente prismas de sección rectangular, y su techo mayormente es plano con obstrucciones como compartimientos para los tanques de agua, departamento del conserje, etc. (Figura 39).



Figura 39: Esquema típico de edificio de techo plano. Fuente: Imágenes libres de Internet.

Edificios con Techos Planos

Los edificios producen una aceleración de flujo libre del viento en ciertos lugares cercanos a cada edificio, a medida que el viento se aleja del edificio, se acelera y su velocidad se acerca a la velocidad del viento de la corriente libre. En un edificio con bordes afilados a barlovento del viento, la capa límite se separa en estos bordes formando burbujas de separación en los lados y en la parte superior del edificio. La corriente principal se desvía a su alrededor y se forma una gran estela a sotavento. La Figura 40 muestra un esquema parcial de la descripción anterior, ya que se trata de una salida CFD 2D que reproduce parcialmente lo que sucede. Los resultados de esta separación son una región con bajas velocidades, un alto nivel de turbulencia y la recirculación del flujo en el techo. La recirculación es un vórtice pegado a la superficie, en este caso al techo, muy turbulento y de baja velocidad. En consecuencia, esta región debe evitarse para la ubicación de aerogeneradores y de las torres de medición. Por lo tanto,

es importante conocer el tamaño de esta región de recirculación. Por otro lado, existe una zona de aceleración del viento en el techo, que en la Figura 40 (izquierda) se indica con los vectores de colores de amarillo a rojo. Esta sería la zona con mayor potencia eólica disponible.

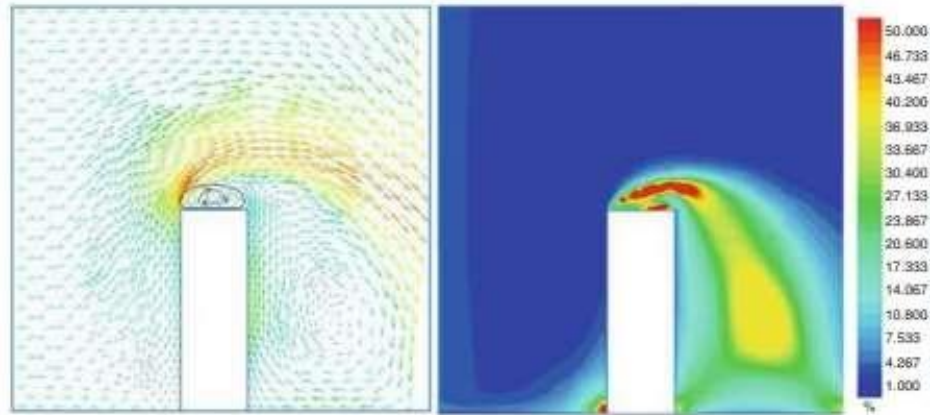


Figura 40: Resultado de simulaciones computacionales del viento sobre techo plano. Fuente: [57].

La determinación de las áreas aptas y no aptas para la instalación de aerogeneradores, puede establecerse a priori mediante simulaciones físicas (túneles de viento) y/o simulaciones computacionales (CFD).

Geometría del techo

La forma geométrica del techo cambia el patrón de flujo del viento sobre él. En la Figura 41, el patrón de flujo visualizado con humo de las pruebas del túnel de viento se ilustra con cuatro formas de techo plano. Se puede observar la zona de recirculación que marca el humo sobre el techo plano horizontal. Para cubiertas inclinadas y semi inclinadas prácticamente no existen zonas de recirculación, por lo que las velocidades máximas del viento están más cerca de la cubierta.

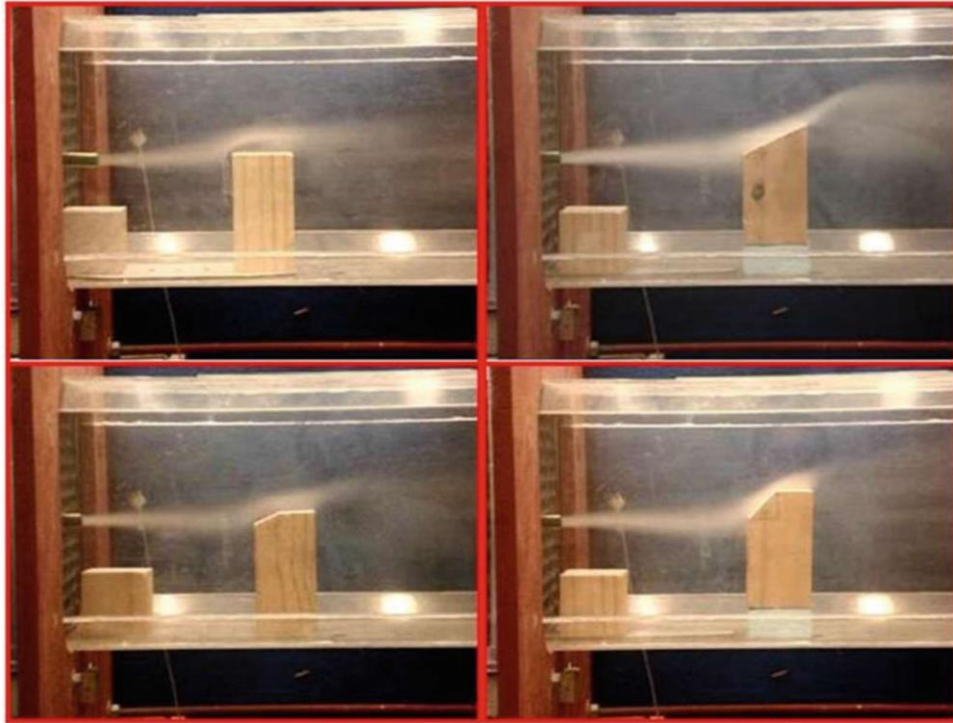


Figura 41: Flujo de viento sobre techos diferentes en túnel de viento. Fuente: [57].

La Figura 42 muestra la salida en 2D CFD para techo semi inclinado (izquierda) y techo inclinado 45° (derecha), donde se reproduce la calidad del flujo, indicando lo observado en las pruebas de túnel de viento. Teniendo en cuenta la intensidad de la turbulencia, en ambos casos es inferior al techo horizontal.

Si el viento impacta desde la dirección opuesta, los patrones de flujo son diferentes y más perjudiciales para ubicar los aerogeneradores, como se ve en la Figura 43.

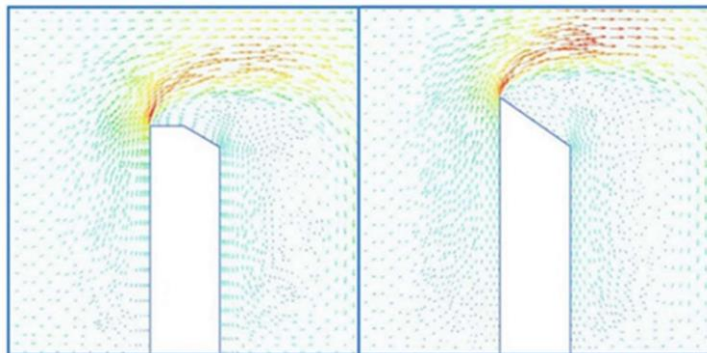


Figura 42: Distribución de velocidades sobre techos inclinados. Fuente: [57].

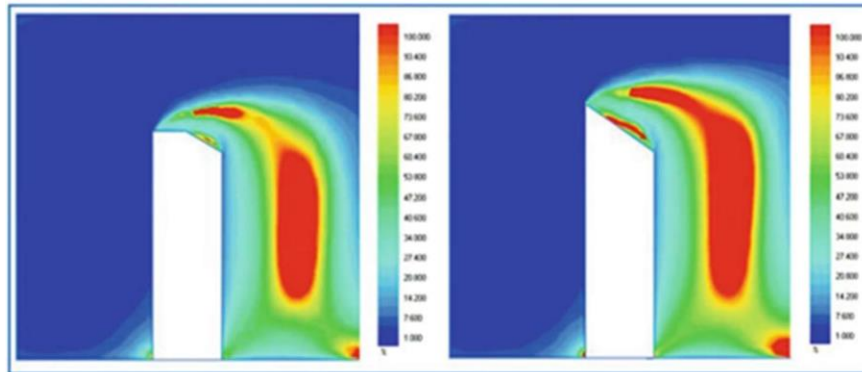


Figura 43: Intensidad de turbulencia sobre techos inclinados. Fuente: [57].

Por lo expuesto, se puede concluir que la geometría del techo y su ubicación con respecto al viento es relevante para la ubicación adecuada de los aerogeneradores sobre ellos. Lo mostrado hasta ahora corresponde a un edificio aislado. Si “sumergimos” este edificio dentro de una ciudad, el patrón del flujo incidente será más complejo debido a la interacción entre los edificios cercanos y al aumento de la intensidad de turbulencia en ese entorno.

Las viviendas con techos planos son muy comunes en los países de América Latina y Europa. En particular, los edificios altos dedican su techo para usarlo como terraza donde agregan construcciones adicionales como gimnasios, piscinas con solarium, tanques de agua, y cuartos de máquinas (como ascensores, y sistemas de aire acondicionado). Estos últimos son más voluminosos y pueden sobresalir del techo haciendo que pierda su forma “plana” y se convierta en el techo “escalonado”. Ejemplos de estos techos de edificios altos se indican en la Figura 44.



Figura 44: Edificios típicos de ciudades de Argentina. Fuente: [57].

En los casos en que las construcciones adicionales sobre el techo plano son bajas, el edificio se considera como de techo plano. Cuando las construcciones que sobresalen por encima de la cubierta son más importantes, deberá considerarse como plano escalonado.



Figura 45: Ubicación del edificio bajo estudio de Lassig (EMA), edificio objeto de esta tesis. Arriba georreferencia, abajo imagen del edificio. Fuente: Google Earth + google Street View

El edificio estudiado por Lassig presenta características similares al considerado en estasis. Ambos están ubicados en la misma zona próxima al río Paraná de la ciudad de Rosario (Argentina) (ver Figura 45), con una altura aproximada de 50 m en la terraza y 6 m más en los depósitos de agua y estructuras. Esa ubicación presenta una condición muy favorable para la explotación del recurso eólico, ya que los vientos provenientes de los cuadrantes Este y Norte no son afectados por grandes obstáculos generadores de turbulencia, dada la extensa zona de islas con vegetación de baja altitud y relieve llano que hay en esa

dirección.

Con la estación meteorológica instalada en la cubierta del edificio, Lassig determinó las características del viento. La Figura 46 indica la curva de Weibull y la Rosa de los Vientos obtenida; los vientos medios fueron de una intensidad de 3,5 m/s, y las direcciones más frecuentes fueron Este, Norte y, en menor grado, Sur.

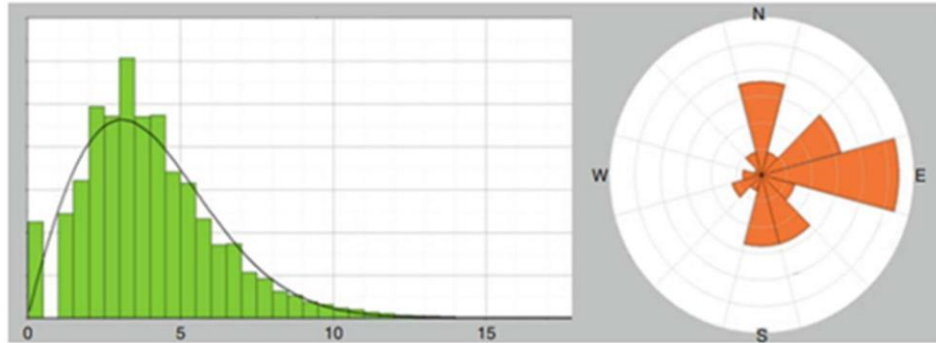


Figura 46: Curva de Weibull y Rosa de los Vientos sobre el techo escalonado a 50 m.

Fuente: [60].

En un túnel de viento, Lassig estudió el efecto del viento en esas tres direcciones sobre un modelo construido a escala de 1:100.

La figura 47 (izquierda) muestra que el viento a barlovento sube y acelera a una altura de 5 m por encima del depósito de agua, rodeándolo, pero, a sotavento del tanque de agua, la depresión creada produce vórtices reduciendo la intensidad del viento y aumentando la intensidad de la turbulencia. Por lo tanto, esta área no es adecuada para la instalación de aerogeneradores.

A barlovento del tanque de agua (Figura 47 centro) aparece un vórtice determinando otra zona de gran intensidad de turbulencia.

A ambos lados del tanque de agua el viento pasa y acelera sobre el techo del piso superior, y hay dos vórtices de barlovento y sotavento de esa estructura en la base de la terraza.

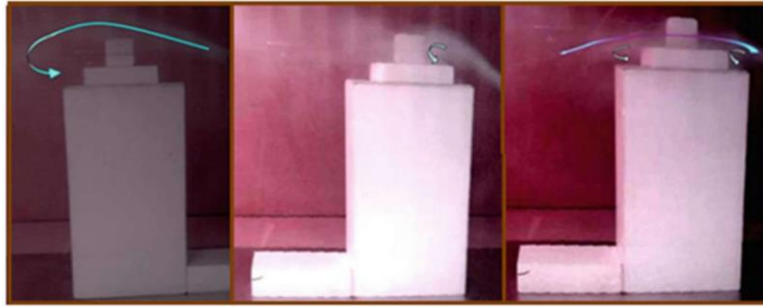


Figura 47: Izq. flujo de viento pasando sobre el tanque de agua. Centro: flujo de viento que ocurre en el paso formado por el techo del último piso y el tanque de agua. Derecha: flujo de viento atravesando los laterales del tanque de agua. Fuente: [60].

En la Figura 48, se observan las zonas de turbulencia por efecto de los vientos del Sur, menos intensos.

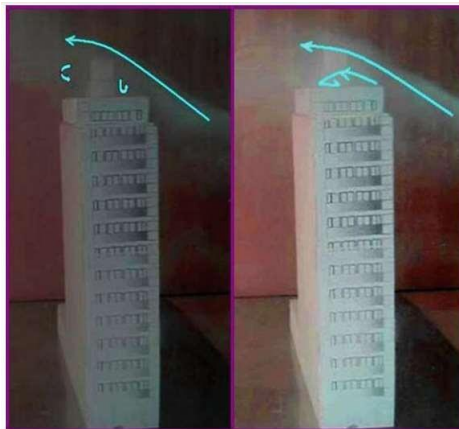


Figura 48: Patrón de flujo en el tanque de agua (izquierda) y en ambos lados (derecha) Fuente: [60].

A partir de las mediciones hechas en túnel de viento, Lassig determinó de manera cualitativa las áreas con mayor turbulencia. Los resultados fueron expuestos en tres niveles de riesgo: rojo, es muy peligroso ubicar aerogeneradores debido a la altísima intensidad de turbulencia, superior de 0,40; amarillo, es peligroso ubicar aerogeneradores ya que hay alta turbulencia (intensidad entre 0,30 y 0,40); y verde, es el lugar más adecuado para ubicar aerogeneradores, con intensidades de turbulencia inferiores a 0,30. La Figura 49 ilustra lo anterior.

Para el tipo de techos “planos escalonados”, las construcciones que se añaden en la terraza producen mucha turbulencia. Respecto de los análisis de altura, Lassig concluye que el aerogenerador debe estar a unos 10 m por encima del tanque de agua.

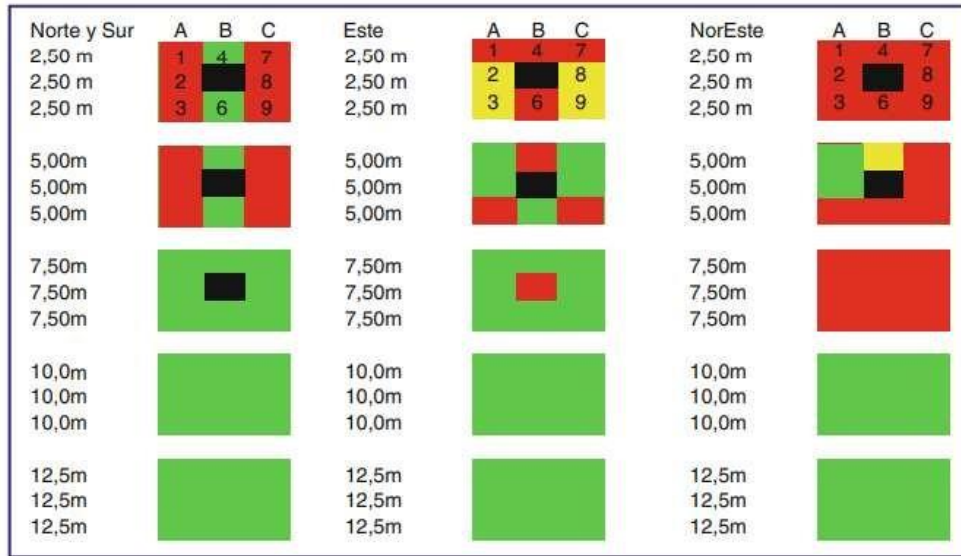


Figura 49: Nivel de riesgo para ubicar aerogeneradores en el edificio estudiado para tres direcciones de viento. Negro: indica la estructura sólida del tanque de agua. Rojo: turbulencia muy alta. Amarillo: gran turbulencia. Verde: turbulencia moderada. Fuente: [60].

De acuerdo con los estudios mencionados, dado un edificio, el viento urbano constituye el mayor problema a resolver, pues condiciona el tipo de aerogenerador a utilizar y el sitio de ubicación.

Como se mostró, en un edificio con bordes afilados a barlovento del viento, la capa límite se separa en los bordes y en el techo se forma una burbuja de recirculación, esta región debe evitarse para la ubicación de los aerogeneradores.

A su vez, dentro de una ciudad, el patrón de flujo incidente es aún más complejo debido a la interacción entre edificios cercanos y el aumento de la intensidad de la turbulencia.

Como un resultado del complejo entorno urbano, la determinación de espacios adecuados y las zonas no aptas para la instalación de aerogeneradores puede

establecerse, hasta el presente, mediante simulaciones físicas (túneles de viento) o simulaciones computacionales (CFD).

En esta tesis se propuso el desarrollo de un nuevo sistema de medición del viento, conformado por un conjunto de micro anemómetros y un sistema de toma y gestión de datos que permita obtener valores reales del viento en un ensayo a escala real.

METODOLOGIA

Metodología experimental

Metodología experimental a escala

Reproducción en túnel de viento de las características eólicas correspondientes a la terraza del edificio de la FCEIA, con perfiles de velocidades medias, y estructuras vorticosas con fluctuaciones de velocidades instantáneas y escalas espaciales y temporales similares a las imperantes en la región de estudio. Así mismo se construyó un modelo a escala 1:300 del emplazamiento de dicho edificio con las 9 manzanas circundantes del entorno de la ciudad. Los ensayos se realizaron en el túnel de viento N°2 de tipo Capa Límite Atmosférica, del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, sede de trabajo del codirector de estatus.

Metodología experimental de campo

Las mediciones experimentales previas para obtener las propiedades eólicas del lugar, como la rosa de vientos, la curva de Weibull y la Intensidad de turbulencia, fueron realizadas en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario. En particular, las mediciones de velocidad del viento se realizaron en el techo del edificio, y el registro y procesamiento de los datos fue llevado a cabo en el Laboratorio de Energía para el Desarrollo Sostenible de la FCEIA, que integra el autor de esta tesis.

Dicho Laboratorio cuenta con una estación meteorológica, equipamiento informático, conectividad y equipamiento de monitoreo remoto de variables físicas, desarrollado por el doctorando en conjunto con otros profesionales.

Por último, las mediciones de campo se realizaron sobre la citada azotea con el equipo prototipo desarrollado en la presente tesis.

Como ha sido expuesto en la sección anterior, hay al menos cinco factores principales que afectan la ubicación de aerogeneradores sobre el techo de un edificio en un ambiente urbano:

- i) forma del edificio.
- ii) forma del techo.
- iii) altura del edificio.
- iv) velocidad del viento (dirección y rapidez)
- v) configuración urbana.

Tanto la forma del techo/ edificio como la configuración urbana son infinitas, por lo que, a los efectos de esta tesis, se ha elegido un edificio en particular, el correspondiente a la sede central de la FCEIA, en cuyo último piso se encuentra el Laboratorio de Energía, con una forma de techo escalonado y una configuración urbana de edificios alrededor de alturas similares o más bajas.

Los datos de campo muestreados por el anemómetro 3D desarrollado en este trabajo están disponibles en el Anexo V.

Procesamiento de los datos de campo – obtención de información

La tabla de datos obtenida muestra un conjunto de mil doscientas filas que contienen las mediciones de viento y variables ambientales tomadas por el instrumento. Dado que el tiempo de muestreo se define en 10 minutos, se ajustó el equipo para emplee este tiempo tomando 2 muestras por segundo de cada variable.

De esta forma, obtenemos una tabla de 7200 valores.

Desarrollo de un método para la medición tridimensional del viento en ambientes urbanos empleando instrumentos de bajo costo y de materiales asequibles.

En este sentido, y basado en el principio de funcionamiento de los anemómetros de coprolas, se diseñó y construyó un anemómetro tridimensional empleando tres anemómetros de los citados ubicándolos en cada eje de un mástil tridimensional con ejes ortogonales construido con caños metálicos de 13 mm de espesor, tal como se muestra en la Figura 50 y conforme al desarrollo descrito en el apartado metodológico de este trabajo.

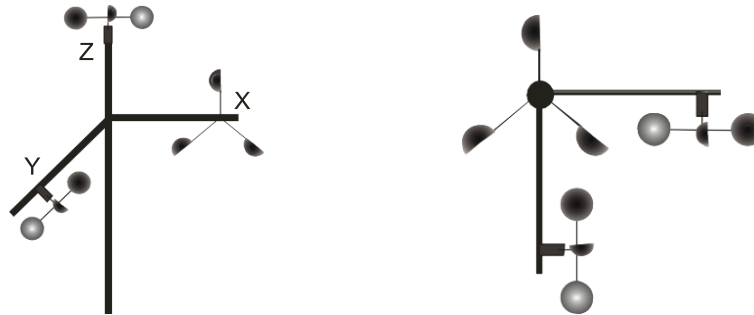


Figura 50: Vista axonométrica (izq) y superior (der) del anemómetro 3D. Elaboración propia.

Conforme a lo expuesto, el comportamiento del viento en un ambiente urbano sobre la azotea de un edificio es errático y complejo de determinar, con vórtices, ráfagas y turbulencias entre otras características, por lo tanto, con el objeto de conocer con más profundidad las características del mismo no alcanza con mediciones en una única locación, sino que es necesario explorar las diferentes ocurrencias a lo largo del volumen en estudio, distribuyendo los instrumentos de medición, como, por ejemplo, se muestra en la Figura 51.

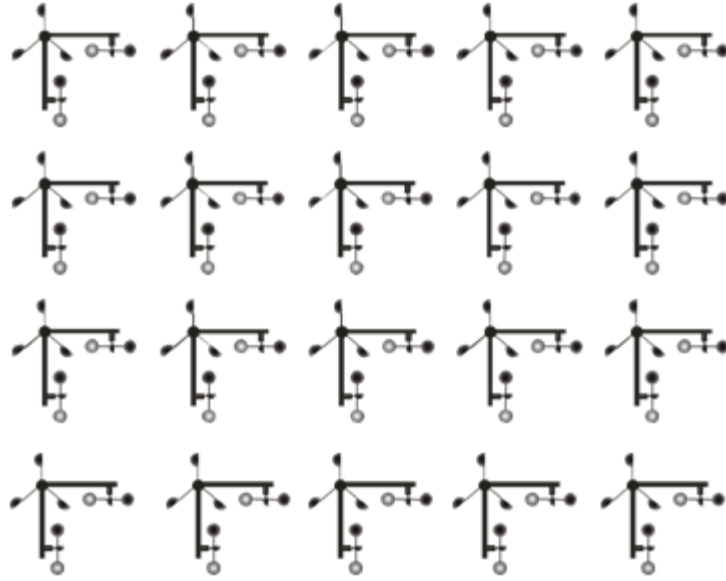


Figura 51: Esquema de medición múltiple en superficie de la velocidad 3D del viento. Elaboración propia.

En la Figura 52 se muestra una vista en planta que muestra la posición de cada medición, y en la Figura 53, la posición de los instrumentos sobre la azotea de un edificio.

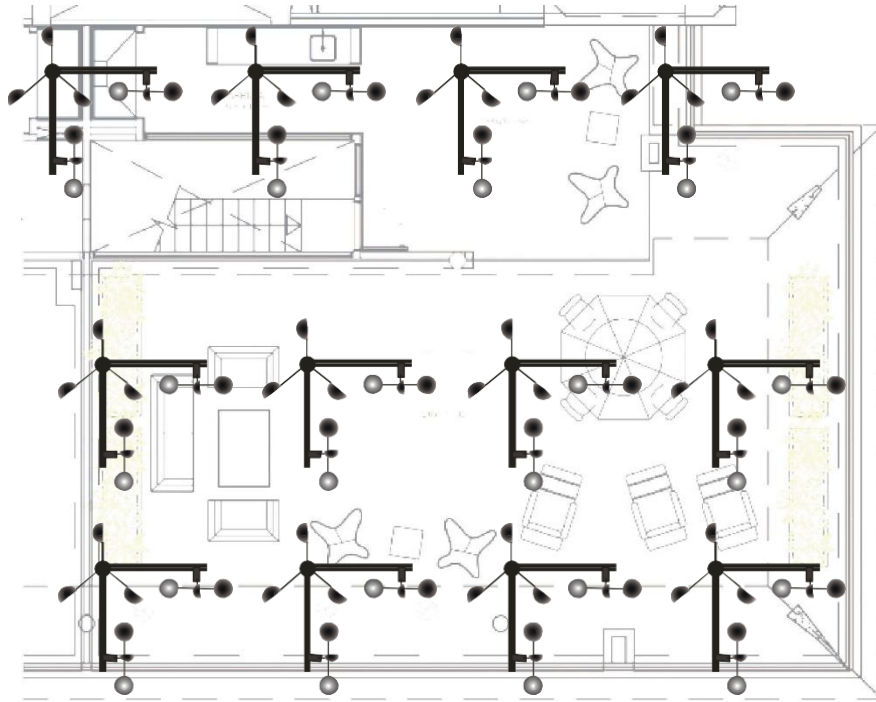


Figura 52: Esquema hipotético de diferentes mediciones anemométricas 3D sobre la azotea de un edificio. Elaboración propia.



Figura 53: Cada punto rojo representa a cada medición de velocidad 3D en la superficie de la azotea de un edificio. Elaboración propia.

Un punto destacado es el que de esta forma se cuenta con información sobre un plano sobre la superficie en estudio, pero la medición es mucho más completa si se realizan mediciones a diferentes alturas con respecto a la azotea del edificio. De esta forma se obtendrían perfiles de velocidades 3d del viento en diferentes alturas, como se menciona más arriba en un volumen.

En esta configuración, es importante conocer lo que ocurre con la variación de la velocidad del viento en la dirección vertical, por lo tanto, este método propone realizar mediciones en diferentes alturas, como mínimo medir en tres alturas diferentes por cada punto de la superficie a estudiar y determinar las intensidades de turbulencia, velocidades de ráfagas, dirección horizontal de los vectores velocidad, dirección espacial de los vectores de velocidad del viento.



Figura 54: Configuración propuesta en tres alturas. Elaboración propia.

Por lo dicho, las mediciones en la azotea propuestas por el método de medición se aproximan a los esquemas representados en la Figura 54 y 55, donde se observa que por cada punto elegido de la superficie se mide (como mínimo) en tres alturas.

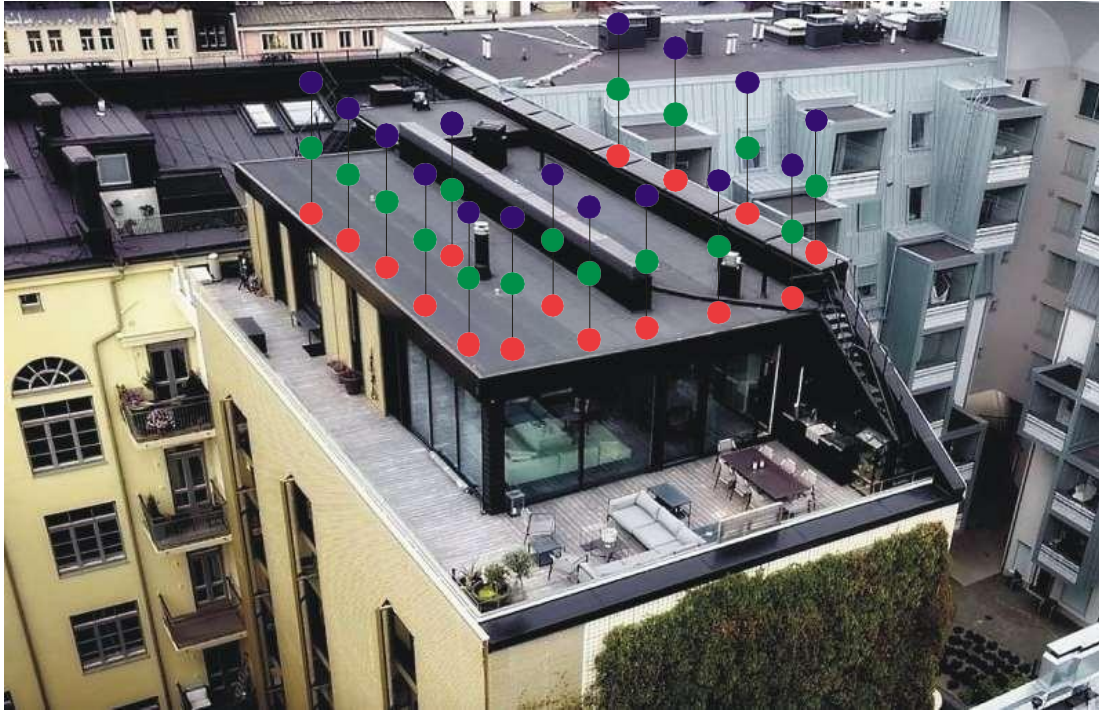


Figura 55: Medición en tres alturas de la velocidad 3D del viento. Elaboración propia.

De esta forma, se obtendrían muestras en diferentes planos del campo de vectores de velocidades del viento.

En la Figura 56 se observa cómo se relevan las características del viento urbano sobre la azotea de un edificio, en tres planos de altura, utilizando la medición de la velocidad 3D del viento propia del nuevo método de medición del viento urbano con instrumentos de bajo costo.

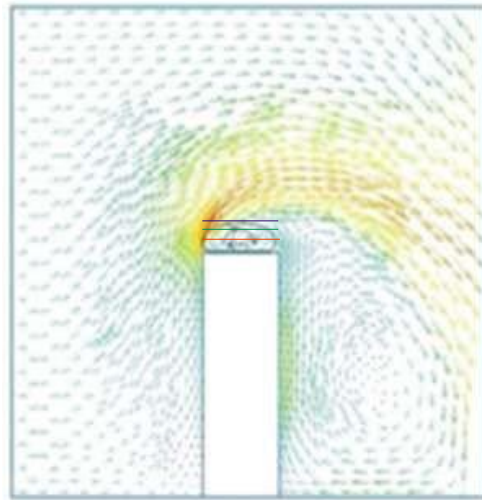


Figura 56: Las líneas horizontales marcan los planos de mediciones definidos en el nuevo método de medición, donde lo que interesa es estudiar la burbuja de recirculación sobre el techo plano.
Elaboración propia.

Obtención de las características del viento urbano a partir de las mediciones obtenidas

A partir de los valores de muestras de velocidad del viento en cada eje (x, y, z) obtenidos del anemómetro tridimensional de coperolas se construyen las características del viento urbano por medio de las siguientes variables.

Intensidad de turbulencia

Como ha sido ya expuesto, la intensidad de turbulencia se define como el cociente entre el desvío estándar de los valores medidos a lo largo de 10 minutos y el valor medio de las mediciones realizadas en ese intervalo de tiempo [58].

$$I_t = \frac{D_{std}}{V_{md}} \quad (7)$$

I_t = Intensidad de turbulencia.

D_{std} = Desvío estándar del intervalo.

V_{md} = Valor medio del intervalo.

Para el caso de este instrumento tendremos tres valores de intensidad de turbulencia en el intervalo de medición, correspondientes a las mediciones de cada uno de los ejes cartesianos (x, y, z), obteniendo así

$$I_{t_x}$$

$$I_{t_y}$$

$$I_{t_z}$$

Velocidad de Ráfaga

Se define como ráfaga al mayor valor de velocidad registrado en el intervalo de medición. [59], es decir, se calcula el valor máximo dentro del intervalo de medición representando este el valor de la ráfaga dentro del conjunto de valores. Para este estudio se identifican tres ráfagas diferentes dentro del intervalo, cada una de ellas correspondientes a los valores máximos para cada eje de coordenadas en R3 (x, y, z).

$$R_{x=\max_vel_x} \tag{8}$$

$$R_{y=\max_vel_y} \tag{9}$$

$$R_{z=\max_vel_z} \tag{10}$$

Posición del vector velocidad en el plano (x,y) - R2 - para conocer la dirección horizontal del viento

Trabajando con los promedios de las componentes x e y de las velocidades registradas podemos conocer el rumbo promedio del viento sobre el plano xy en el intervalo de medición.

Definimos que la orientación del anemómetro 3D debe ser tal que el eje x coincida con la dirección cardinal “norte” y la componente y en dirección “este”.

Apelando al álgebra vectorial podemos conocer el módulo y el ángulo que forma el vector promedio de velocidad (Raichman y Totter, 2016).

$$\text{Módulo} = \sqrt{vel_x^2 + vel_y^2} \quad (11)$$

$$\text{Ángulo con eje x} = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \quad (12)$$

Posición del vector velocidad en el espacio – R3 –

De una forma similar al apartado anterior, podemos calcular al vector resultante en el espacio de las velocidades de viento medidas– R3; conociendo su módulo y por medio de sus cosenos directores los ángulos que éste posee con cada uno de los tres ejes cartesianos (Raichman y Totter, 2016).

Se define como módulo de un vector en el espacio como

$$\text{Módulo} = \sqrt{vel_x^2 + vel_y^2 + vel_z^2} \quad (13)$$

Definimos al ángulo “alfa” al formado entre el vector velocidad y el eje “x”, al ángulo “beta” como al formado entre el vector velocidad y el eje “y”, y finalmente al ángulo “gama” como aquel formado entre el vector velocidad y el eje “z”.

De forma tal que

$$\text{Cos } \alpha = \frac{vel_x}{\text{Módulo}} \quad (14)$$

$$\text{Cos } \beta = \frac{vel_y}{\text{Módulo}} \quad (15)$$

$$\text{Cos } \gamma = \frac{vel_z}{\text{Módulo}} \quad (16)$$

Estos tres cosenos, permiten obtener los tres ángulos que forma el vector velocidad con los tres ejes coordenados conforme a lo planteado.

Diseño y construcción del prototipo funcional del anemómetro 3D de coperolas

Ya fue determinado que, para caracterizar el viento en el ambiente urbano, es necesario conocer su comportamiento en relación a un conjunto de factores. Su interacción con la rugosidad presente en la locación de estudio con respecto a los tres ejes cartesianos, es decir la medición tridimensional del viento, permite descifrar la interacción que el mismo posee con la rugosidad presente y nos entrega información para determinar la intensidad de turbulencia, la presencia de vórtices, las aceleraciones puntuales del viento y los cambios repentinos que pueden ocurrir instante a instante.

Para conocer estas características y con la intención de obtener mayor detalle, los instrumentos de medición deben ser suficientemente pequeños para lograr una sensibilidad que permita conocer con riqueza las variaciones de velocidad en zonas rugosas reducidas.

Desarrollo de un anemómetro 3D de coperolas con elementos de bajo costo.

En este trabajo se propuso diseñar, construir y ensayar un dispositivo para realizar las mediciones, desarrollado con fines académicos y experimentales dentro de la FCEIA, el INTI y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue (Neuquén).

Este dispositivo no posee la jerarquía metrológica para considerarlo un instrumento de laboratorio ni lo pretende, si bien se han completado fases de calibración y cálculo de incertidumbre en el campo de las velocidades con instrumentos previamente calibrados, dichas tareas han sido hechas con la intención de conocer y acotar los márgenes de errores propios del dispositivo. En el apartado “calibración e incertidumbre” presente en esta sección, se encuentra detallado el proceso realizado.

Para tal fin, se realizó el diseño de un dispositivo con tres coperolas vinculadas entre sí por un núcleo común y desfasadas una de otra concordante con los tres ejes cartesianos (x, y,z).

Como ha sido expuesto, para caracterizar el viento urbano con mayor precisión el instrumento de medición debe ser lo más pequeño posible, de esta forma fenómenos de muy corta duración y que ocurren en volúmenes como vórtices pueden ser caracterizados con mayor exactitud, es por esto que en las pruebas de túnel de viento se ensayaron tres tamaños de coperolas para determinar cuál es el que mejor se ajusta al nuevo instrumento bajo diseño. Estas, se fabricaron por medio de manufactura aditiva empleando una impresora 3D cartesiana y utilizando PLA (ácido poliláctico) como material.

Características de la impresora 3D utilizada

- Volumen máximo de impresión: 200x200x200 mm
- Diámetro de la boquilla de extrusión: 0,2 mm
- Cuna calefaccionada: Si
- Material utilizado: PLA

Las piezas fueron impresas en tres colores, cada uno representando a los tres tamaños definidos para los ensayos posteriores según el siguiente detalle:

- Grandes - Coperolas impresas en color rojo, largo del brazo: 52 mm.
- Medianas - Coperolas impresas en color amarillo, largo del brazo: 40 mm.
- Pequeñas - Coperolas impresas en color negro, largo del brazo: 15 mm.

Se comenzó con la impresión de un único juego de coperolas para lo cual se hizo la carga del archivo STL específico en la plataforma virtual para la primera prueba de impresión, como se muestra en la Figura 57.

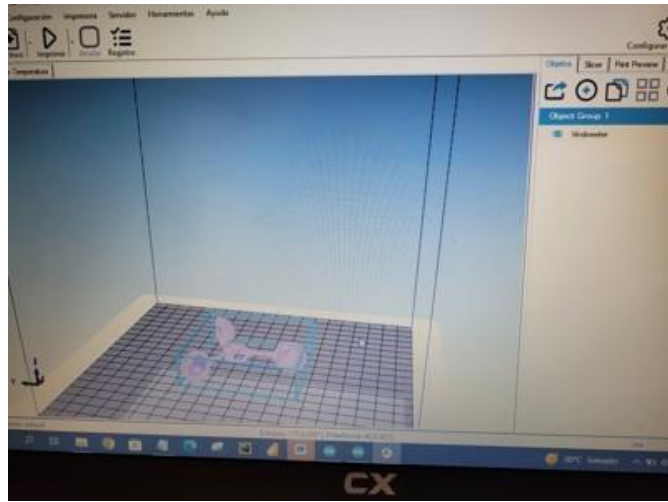


Figura 57: Carga de archivo STL con juego de coperolas en Repetier Software. Elaboración propia.

A continuación, se configuró la impresora 3D, se cargó el filamento PLA y se configuró el extrusor a la temperatura de fusión del material y de la cuna de impresión a la temperatura óptima de adherencia de la pieza impresa.

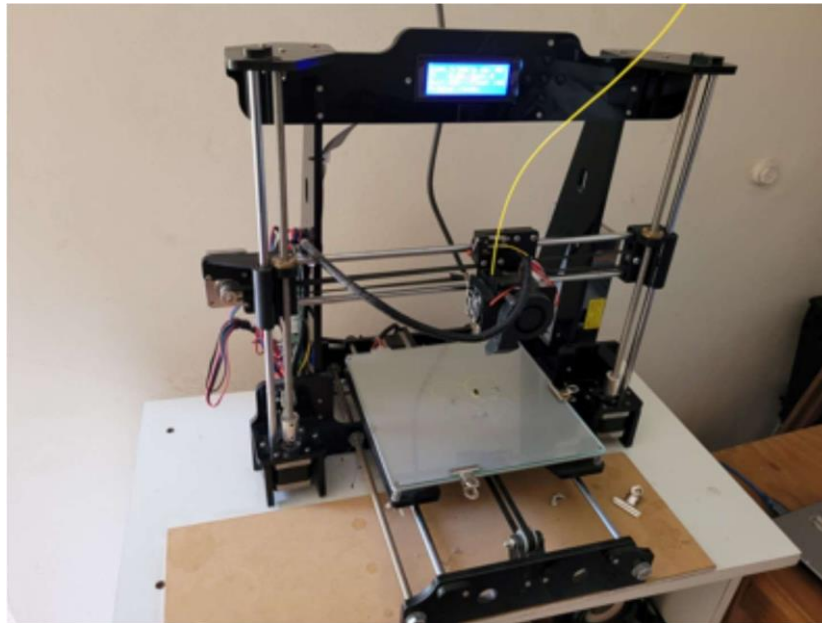


Figura 58: Puesta a punto de la impresora 3D cartesiana. Elaboración propia.



Figura 59: Panel de configuración impresora 3D. Elaboración propia.

Una vez que se cargó el archivo con el modelo digital a imprimir en el software de la impresora 3d (repetier), se configuró el tamaño del objeto, se ajustaron los parámetros de impresión, se cargó el filamento de PLA en la misma, y se procedió a realizar la primera impresión 3d de las coperolas, según se muestra en las Figuras 58 y 59.

Impresión de coperolas de mayor tamaño

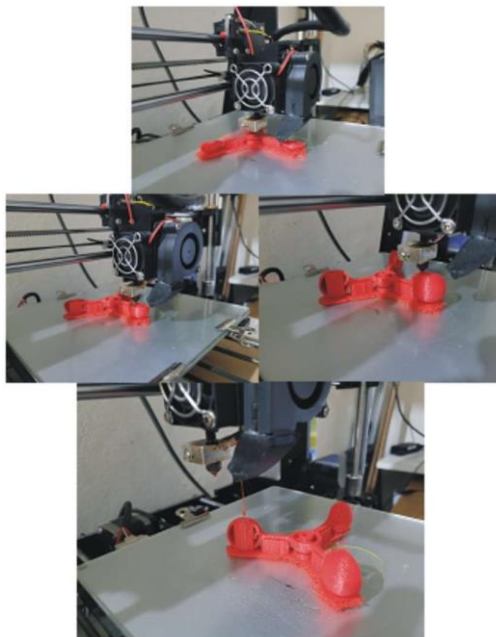


Figura 60: Muestras del avance de impresión 3D de coperolas. Elaboración propia.

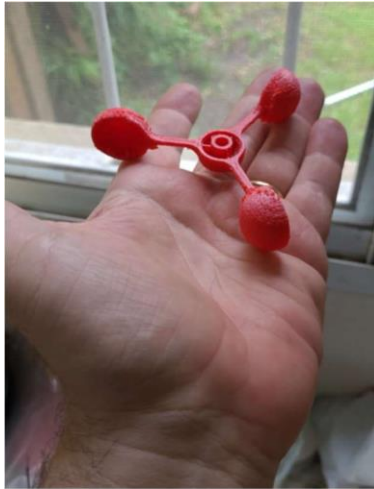


Figura 61: Detalle de la pieza terminada. Elaboración propia.

Como se observa en las Figuras 60 y 61, se debió sumar material de soporte a la estructura de la pieza debido a su geometría, y también se sumó una superficie de apoyo en la base para mejorar la adherencia de la pieza en la cuna de impresión. Este procedimiento se llevó a cabo en todas las piezas impresas sin importar el tamaño de las mismas.

Impresión de coperolas de tamaño medio

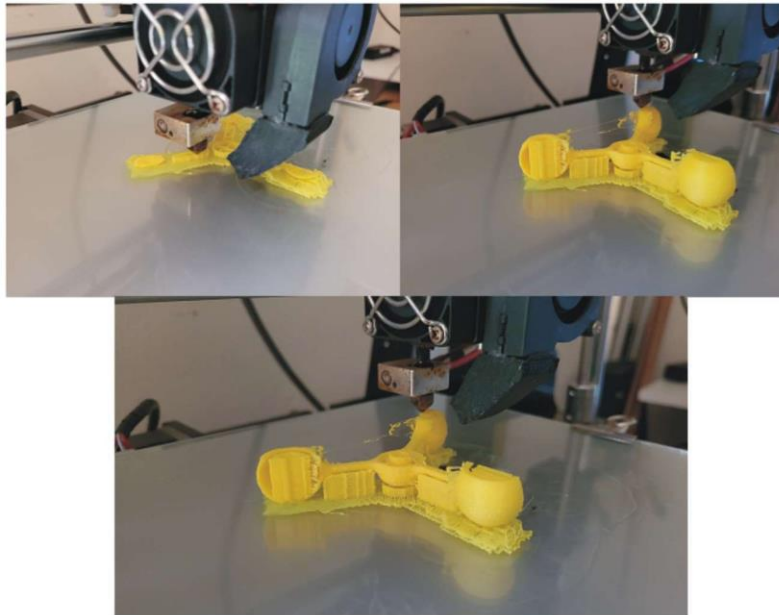


Figura 62: Impresión 3D en coperolas de tamaño medio. Elaboración propia.

En la Figura 62 y 63 se muestran las fotografías de las coperolas de tamaño medio y pequeño, respectivamente, en proceso de fabricación.

Impresión de coperolas de tamaño pequeño

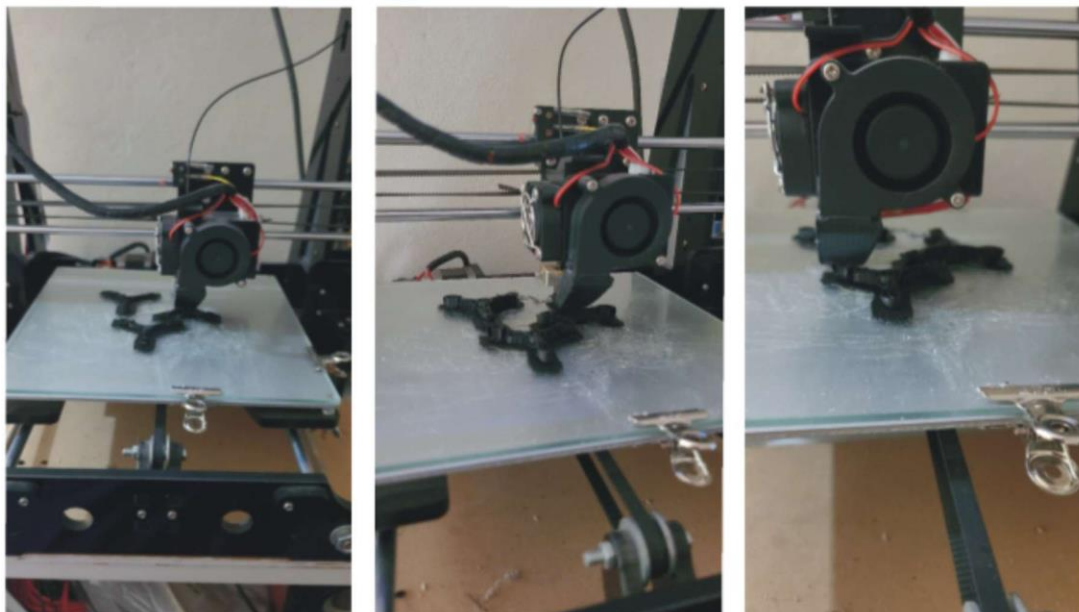


Figura 63: Avance de impresión 3D de coperolas de menor tamaño. Elaboración propia.



Figura 64: Detalle de la pieza terminada. Elaboración propia.

En la Figura 64 se muestra la coperola de tamaño pequeño terminada. En la Figura 65 se muestran los tres juegos de coperolas construidas.



Figura 65: Conjunto de piezas 3D para ensayos en túnel de viento antes de su limpieza final (Se aprecia la diferencia de tamaño entre los diferentes juegos impresos). Elaboración propia.

Elemento activo para la medición de la velocidad del viento

Como transductor dentro del sensor propuesto se ha utilizado un micro motor eléctrico, del tipo empleado en drones de muy bajo porte. Se seleccionó este tipo de motores debido a su menor rozamiento mecánico y su bajo (casi nulo) mantenimiento.

Este motor se lo hizo funcionar de forma inversa, es decir en lugar de generar un trabajo mecánico al suministrarle energía eléctrica, se le entrega energía mecánica en su eje de rotación proveniente del juego de coperolas impulsadas por el viento y se recoge energía eléctrica en sus bornes eléctricos. Dicha energía que está en relación con el desplazamiento del viento es la que se utiliza finalmente para medir dicha variable.

Características del tipo motores utilizados en este proyecto en modo generador

En la Figura 66 se muestran los códigos de motores de drones disponibles. Se trata de un motor sin núcleo de alta velocidad para Dron RC, hélice CW CCW, DC3V, 3,7 V, 0408,412,610,612,615,617.716, 720.816, 8520,1020,8523

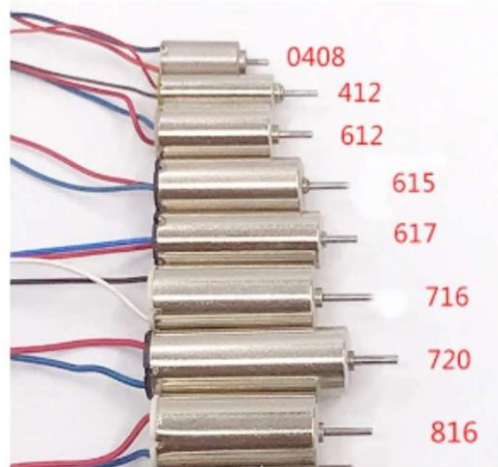


Figura 66: Familia de motores de drones. Fuente: ELEC & lifes Store

Algunos modelos disponibles se transcriben en la Figura 67.

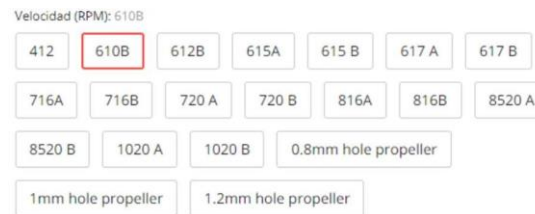


Figura 67: Modelos de motores disponibles. Fuente: ELEC & lifes Store

Motor elegido, Modelo: 610

El motor elegido fue el Micro Motor de alta velocidad DC 1,5 V, 3V, 3,7 V, 610, 612, 614, 716, 720, Motor de Hobby, juguete eléctrico DIY, Motor DC, indicado en la Figura 68 y Tabla 5.





Figura 68: Motor seleccionado para este proyecto como transductor. Fuente: ELEC & lifes Store

Eje de salida: 0,8 MM
Longitud del eje de salida: 5,5 MM
Peso: 1,4G
Voltaje: 3,7 V
Velocidad: Aproximadamente 50000 RPM

Tabla 5: Características principales del motor seleccionado como transductor para este proyecto.

Elaboración propia.

Montaje del anemómetro para mediciones de velocidades del viento en el plano xy.

Para el armado del primer anemómetro, se colocó un juego de coperolas sobre el eje del motor y se lo fijó a un sistema de anclaje con el generador en sentido vertical (dirección del eje z), de forma que las coperolas puedan ser movidas por viento proveniente del plano xy.



Figura 69: Construcción del primer anemómetro del proyecto. Elaboración propia.

Se realizaron a continuación la instalación de conexiones eléctricas en los bornes y se acopló al sistema a un soporte, como se muestra en la Figura 69. para ser ensayado posteriormente en el túnel de viento instalado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue – Neuquén.

Ensayos, modificaciones y ajustes

Se dispuso del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue en la ciudad de Neuquén. Este dispositivo, inserto dentro de un laboratorio de ensayos, posee una serie de instrumentos calibrados y trazados que permitió caracterizar y ajustar el anemómetro construido.

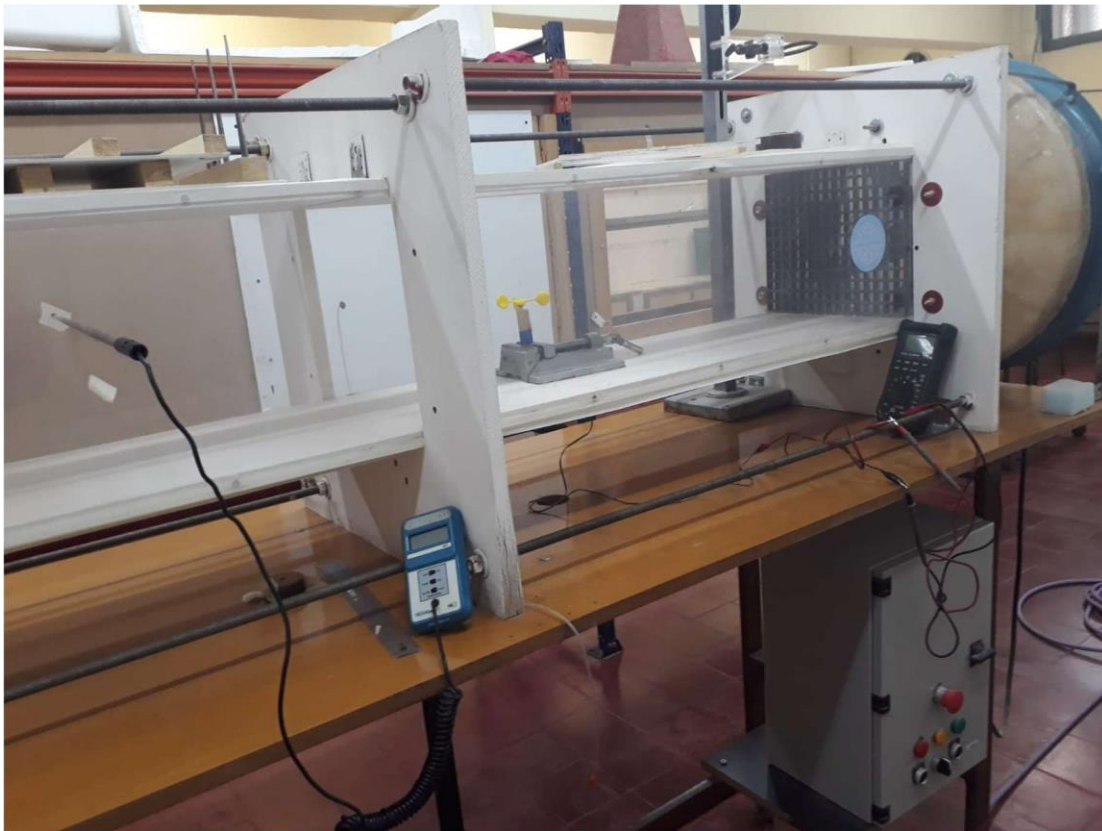


Figura 70: Túnel de viento N°1 - Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue.

Fuente: Universidad Nacional del Comahue.

Se puede observar en la Figura 70, el anemómetro instalado en el interior del túnel de viento listo para ser ensayado. Se observa también sobre la margen

izquierda de la foto que se ha colocado un anemómetro de hilo caliente calibrado como patrón de medición de velocidad del viento y sobre la margen derecha de la foto se observa un multímetro calibrado para poder trazar la tensión generada en el anemómetro bajo ensayo en cada una de las diferentes velocidades de viento definidas para las pruebas. Más detalles de los túneles de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue en anexo I.

Instrumentos

A continuación, se presentan los instrumentos utilizados para medir la tensión generada y la velocidad del viento dentro del túnel.

En la Figura 71 se muestra el multímetro seleccionado, Marca Mastech, Modelo MS8229.



Figura 71: Multímetro digital empleado en las mediciones en Neuquén. Fuente: Universidad Nacional del Comahue.

En la Figura 72 se muestra el anemómetro seleccionado, Marca TSI, modelo 8330-M.



Figura 72: Anemómetro de hilo caliente empleado en las mediciones en Neuquén. Fuente: Universidad Nacional del Comahue.

Ensayos realizados en túnel de viento

Las primeras mediciones se realizaron con el anemómetro en vacío, es decir sin aplicar ninguna carga entre los bornes de su generador. En estas condiciones arrojó mediciones inestables, donde no presentaba una alta repetitividad de las mediciones; es decir, al variar la velocidad del viento y regresando a valores anteriores, las tensiones medidas en sus bornes eran dispares. Por lo dicho, se fueron colocando diferentes resistencias de carga para ver cual se adaptaba mejor en el rango de velocidades definidas para el instrumento que es de 2 m/s hasta 18 m/s. Se incorporó como carga una resistencia que midiéndola con un multímetro de laboratorio a una temperatura de 25 grados Celsius registró un valor de: 8,2 Ohm, de esta forma, el anemómetro entregó mediciones estables por lo que se decidió implementar dicho componente en el instrumento.

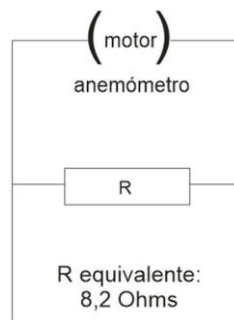


Figura 73: Esquema del circuito motor resistencia y su punto de medición. Elaboración propia.

En la Figura 73 se muestra el esquema de medición y en la Tabla 6 se presentan los valores obtenidos en la prueba.

V	T
[m/s]	[mV]
0,0	0,0
2,7	16,8
3,1	20,1
3,7	26,1
4,2	30,2
5,2	39,4
5,5	43,8
6,6	52,8
7,5	59,0
8,0	63,2

Tabla 6: Primeros valores provenientes de las mediciones en túnel de viento. Elaboración propia.

La gráfica de dichos valores evidencia un comportamiento lineal del instrumento dentro del rango de trabajo definido y ensayado, como se muestra en la Figura 74.

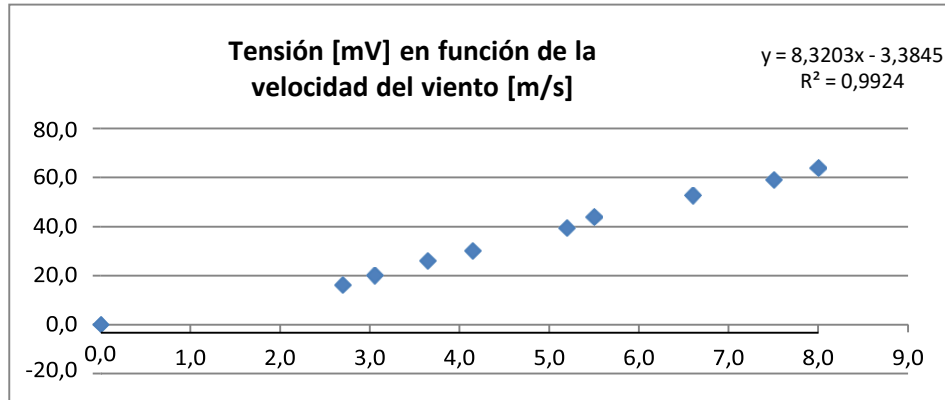


Figura 74: Primeros valores provenientes de las mediciones en túnel de viento. Elaboración propia.

A continuación, se siguieron registrando valores a medida que la velocidad del viento dentro del túnel crecía con el objeto de llegar a un máximo de 31m/s simulando vientos que superan los 100 Km/h. La Tabla 7 presenta la lista completa de valores registrados con un rango definido de trabajo entre los 0 m/s hasta los 31 m/s.

V [m/s]	[mV]
0	0
2,7	16,4
3,1	20,1
3,7	26,1
4,2	30,2
5,2	39,4
5,5	43,8
6,6	52,8
7,5	59,0
8,0	64,0
8,4	89,5
11,0	129,0
12,7	148,3
14,6	176,0
16,9	200,3
19,0	224,0
21,0	264,7
25,0	332,2
31,0	441,0

Tabla 7: Valores provenientes de las mediciones en túnel de viento hasta 31 m/s.

Elaboración propia.

De esta forma se realizaron un total de veinte muestras. La gráfica de los valores se reproduce en la Figura 75.

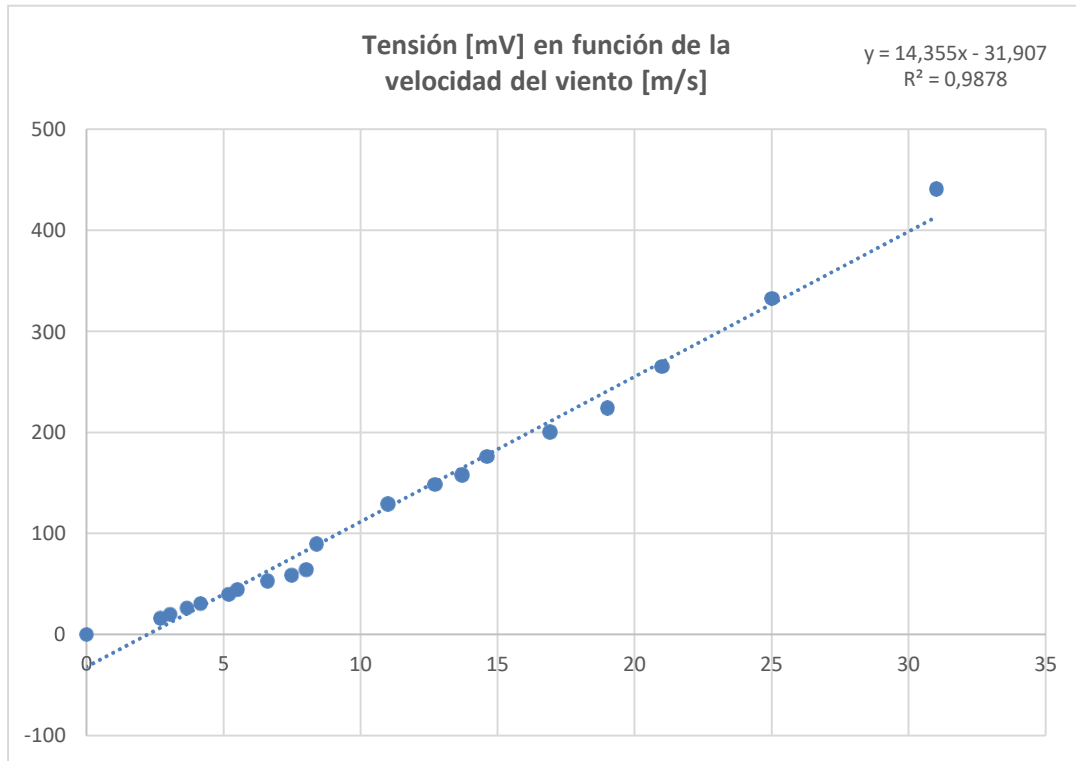


Figura 75: Tensión obtenida del anemómetro en [mV] a diferentes velocidades de viento.

Elaboración propia.

En la gráfica podemos observar tres zonas de comportamiento lineal con pendientes levemente diferentes, por lo que se decidió segmentar el conjunto de valores registrados en tres rangos para tener mayor precisión en las mediciones. En la Tabla 8 se reproducen los valores de tensión en función de la velocidad del viento, segmentados en tres rangos.

	V [m/s]	T [mV]
Zona 1	0,0	0,0
	2,7	16,4
	3,1	20,1
	3,7	26,1
	4,2	30,2
	5,2	39,4
	5,5	43,8
	6,6	52,8
	7,5	59,0
Zona 2	8,0	64,0
	8,4	89,5
	11,0	129,0
	12,7	148,3
	13,7	158,0
	14,6	176,0
	16,9	200,3
Zona 3	19,0	224,0
	21,0	264,7
	25,0	332,2
	31,0	441,0

Tabla 8: Segmentación de los valores provenientes de las mediciones en túnel de viento hasta 31 m/s en tres zonas. Elaboración propia.

Mediciones zona 1

En la Figura 76 se muestra la distribución de los valores obtenidos comprendidos en la identificada zona 1. La pendiente de la curva obtenida para este rango de valores es 8,32, y el índice de linealidad para este tramo de valores es $R^2 = 0,9924$ que es mejor que el obtenido en el ajuste de una única curva correspondiente a la totalidad de los valores, siendo este último de $R^2 = 0,9878$.

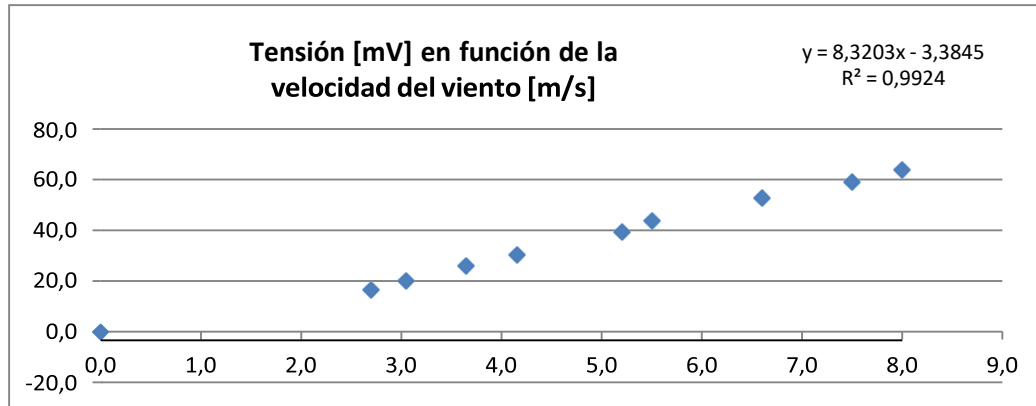


Figura 76: Tensión obtenida en el anemómetro [mV] a diferentes velocidades de viento en zona 1.
Elaboración propia.

Mediciones zona 2

Los valores obtenidos comprendidos en la identificada zona 2 se presentan en la Figura 77. La pendiente de la curva obtenida para este rango de valores es 12,60, y el índice de linealidad para este tramo de valores es $R^2 = 0,9952$ que nuevamente es mejor que el correspondiente al ajuste de todos los valores ($R^2 = 0,9878$).

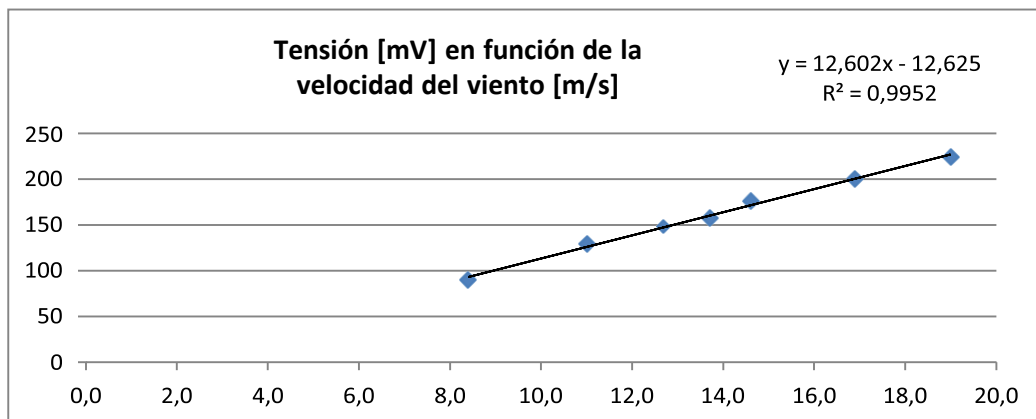


Figura 77: Tensión obtenida en el anemómetro [mV] a diferentes velocidades de viento en zona 2.
Elaboración propia.

Mediciones zona 3

Los valores obtenidos comprendidos en la identificada zona 3 se presentan en la Figura 78. La pendiente de la curva obtenida para este rango de valores es

17,67, y el índice delinealidad para este tramo de valores es $R^2 = 0,9923$ que una vez más es mejor que el obtenido para una única curva ($R^2 = 0,9878$).

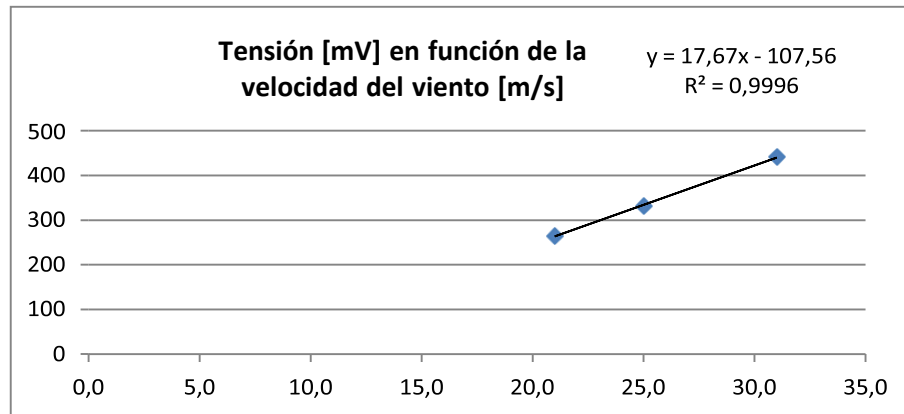


Figura 78: Tensión obtenida en el anemómetro [mV] a diferentes velocidades de viento en zona 3.
Elaboración propia.

Como se ha expuesto, dividir en tres zonas el rango de medición, mejora la calidad y precisión de los valores obtenidos relacionados con las mediciones de calibración realizadas en el túnel de viento. Por esto, para obtener las mediciones en campo se tendrá en cuenta esta característica, afectando a cada medición con los parámetros definidos conforme a la zona donde se encuentre.

Desarrollo del dispositivo para medición tridimensional del viento – Anemómetro 3D

Para medir la velocidad del viento en tres dimensiones, es necesario contar con tres anemómetros de los diseñados y ensayados más arriba, ubicados cada uno en cada eje ortogonal X, Y, Z. de esta forma, cada uno medirá la velocidad del viento en cada plano.

Planos de medición de velocidad del viento

- XY
- YZ
- XZ

Sistema de ecuaciones para obtener la velocidad en cada eje a partir de las velocidades en los planos

Según las consideraciones de la trigonometría 3D), podemos obtener las velocidad en cada uno de los tres ejes cartesianos, por medio de las mediciones de las velocidad de viento en los planos (xy, xz, yz).

Sistema de ecuaciones para determinación de velocidad 3D

En la Figura 79 se representa la velocidad del viento en sus tres componentes cartesianas, relacionadas con las componentes de la velocidad en cada plano, como se indica en las ecuaciones del siguiente análisis.

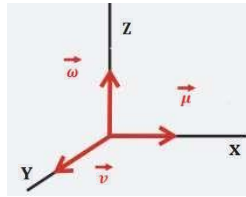


Figura 79: Representación vectorial de la velocidad del viento en un punto. Elaboración propia.

Sistema de ecuaciones

Las variables medibles son la tres velocidades obtenidas por el anemómetro 3D y estas corresponden a las velocidades del viento en cada plano: xz, xy, yz; mientras que las variables incógnitas a determinar son las velocidades de cada de los ejes x, y, z. Se plantea el siguiente sistema de ecuaciones para poder determinar a partir de las variables medibles el valor de las incógnitas

$$\begin{cases} V_{xz}^2 = \mu^2 + \omega^2 \\ V_{xy}^2 = \nu^2 + \mu^2 \\ V_{yz}^2 = \nu^2 + \omega^2 \end{cases} \quad (17)$$

Este sistema de ecuaciones relaciona las velocidades planares con las

velocidades ortogonales en cada eje del espacio.

Resolviendo el sistema de ecuaciones obtenemos las velocidades en cada eje a partir de las velocidades en cada plano.

A continuación, se presenta la resolución del sistema de ecuaciones para obtener las velocidades del viento en cada eje cartesiano a partir de las velocidades medidas del viento en cada plano.

μ

$$V_{xz}^2 - \mu^2 = \omega^2 = V_{yz}^2 - v^2$$

$$V_{xz}^2 - V_{yz}^2 = \mu^2 - v^2$$

$$+ \quad V_{xy}^2 = v^2 + \mu^2$$

$$\text{Operando: } V_{xz}^2 + V_{xy}^2 - V_{yz}^2 = 2\mu^2$$

$$\mu = \sqrt{\frac{V_{xz}^2 + V_{xy}^2 - V_{yz}^2}{2}}$$

(18)

v

$$V_{yz}^2 = v^2 + \omega^2$$

$$V_{xz}^2 = \mu^2 + \omega^2 \rightarrow V_{xz}^2 - \mu^2 = \omega^2$$

$$V_{yz}^2 = v^2 + V_{xz}^2 - \mu^2$$

$$V_{xz}^2 - V_{xz}^2 = v^2 - \mu^2$$

$$+ \quad V_{xy}^2 = v^2 + \mu^2$$

$$\text{Operando: } V_{yz}^2 + V_{xy}^2 - V_{xz}^2 = 2v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{V_{yz}^2 + V_{xy}^2 - V_{xz}^2}{2}}$$

(19)

ω

$$V_{xz}^2 - \omega^2 = \mu^2 = V_{xy}^2 - v^2$$

$$V_{xz}^2 - V_{xy}^2 = \omega^2 - v^2$$

$$+ \quad V_{yz}^2 = v^2 + \omega^2$$

$$\text{Operando: } V_{xz}^2 + V_{yz}^2 - V_{xy}^2 = 2\omega^2$$

$$\omega = \sqrt{\frac{V_{xz}^2 + V_{yz}^2 - V_{xy}^2}{2}} \quad (20)$$

Las ecuaciones (18), (19) y (20), representan las componentes cartesianas de las velocidades del viento medido con el anemómetro 3D de copérolas. Donde μ representa la velocidad sobre el eje X, v a la velocidad sobre el eje Y, y ω representa a la velocidad sobre el eje Z. En adelante y como simplificación llamaremos vel_x , vel_y , vel_z a las componentes de las velocidades correspondientes a cada eje.

Ángulos del vector resultante que forman con cada plano

Para cualquier vector F, en la Figura 80 se representan las componentes ortogonales en función de los ángulos que forma con cada eje.

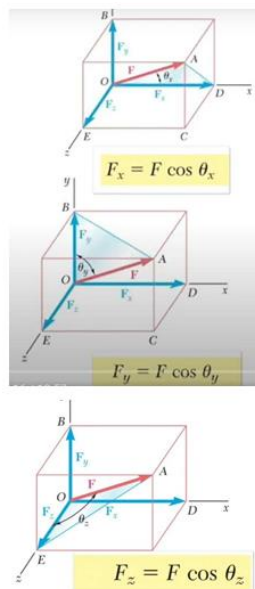


Figura 80: Componentes ortogonales de un vector en función de los ángulos que forma con cada eje.

De tal forma se debe cumplir con la ecuación

$$1 = \cos^2 \theta_x + \cos^2 \theta_y + \cos^2 \theta_z \quad (21)$$

Diseño y construcción del dispositivo para medición tridimensional del viento – Anemómetro 3D

Se consideraron cinco aspectos para la construcción del instrumento

- Diseño mecánico
- Esquema eléctrico y circuitería electrónica
- Desarrollo de software.
- Protocolo de medición
- Ensayos.

Diseño mecánico

Se diseñó un soporte para fijar los tres anemómetros de forma ortogonal que permite medir las velocidades del viento en los tres planos descritos, el dispositivo cuenta con un compartimiento para instalar la placa electrónica de control y medición incluyendo su batería).

Un anclaje fue incluido también para facilitar la instalación del instrumento en el lugar de medición.

Utilizando el software libre FreeCad, se diseñaron los soportes para instalar los anemómetros, tampones y piezas para unir las partes constructivas del instrumento, como se muestra en la Figura 81.

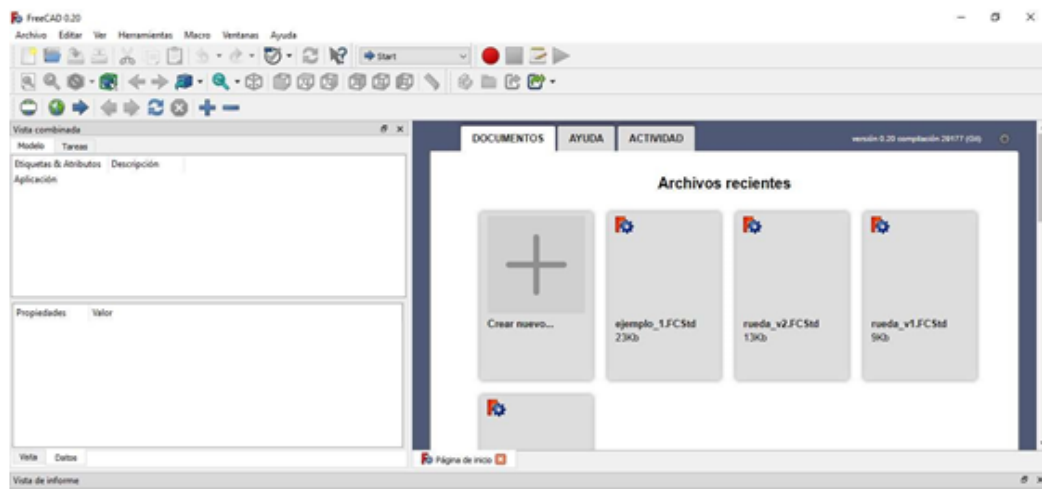


Figura 81: Software FreeCad para diseño y modelado 3D. Elaboración propia.

Una vez finalizado, se exportaron los archivos al formato apropiado para imprimir las piezas en una impresora 3D, de la misma forma que se realizaron las coperolas, según se muestra en la Figura 82.

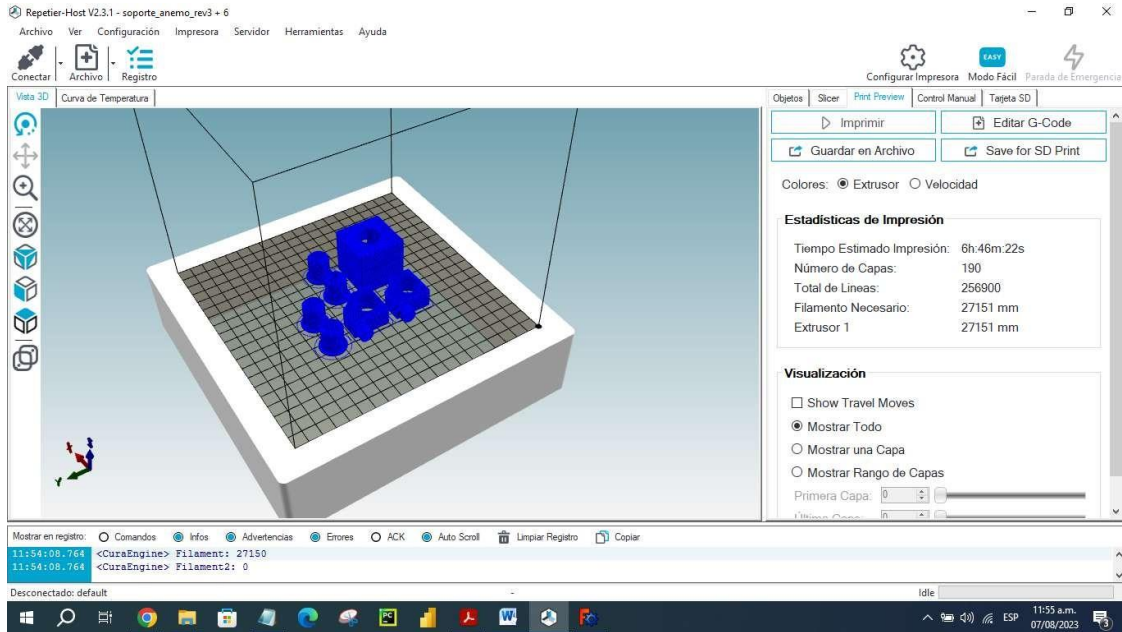


Figura 82: Software repetier para impresión 3D. Elaboración propia.

Montaje y armado del anemómetro 3D de coperolas

En las Figuras 83, 84 y 85 se observa el montaje de los tres anemómetros de coperolas, cada uno en un eje cartesiano y separados de forma equidistante.



Figura 83: Preparación de materiales para montaje del anemómetro 3D. Elaboración propia.



Figura 84: Montaje mecánico del anemómetro 3D de coperolas. Elaboración propia.

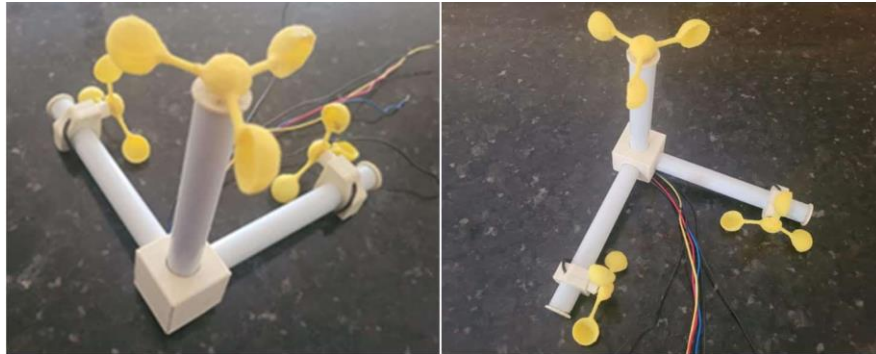


Figura 85: Ajuste de montaje mecánico del anemómetro 3D de coperolas. Elaboración propia.

Sistema de control y lectura del anemómetro 3D de coperolas

Los tres anemómetros que conforman el instrumento, entregan señales analógicas conforme a los ensayos realizados en el túnel de viento de Neuquén. Dichas señales deben ser procesadas para obtener las velocidades vectoriales en cada eje cartesiano. Las tareas necesarias para obtener dichas velocidades son:

- Digitalizar las señales entregadas por los instrumentos.
- Aplicar las curvas de calibración definidas experimentalmente en la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional del Comahue (Neuquén) para obtener valores de velocidades de los planos xy , yz , xz .
- Aplicar las ecuaciones (18), (19) y (20) para obtener las velocidades

vectoriales correspondiente a cada eje cartesiano (x, y, z).

- Tomar muestras periódicas por un lapso de tiempo definido y persistirlas.
- Procesar los valores de campo obtenidos para inferir conclusiones.

Para el desarrollo de la solución electrónica se eligió utilizar el kit de desarrollo Dev Kit v1 que emplea como core un microcontrolador Xtensa dual-core, 32-bit LX6 microprocessor, operando entre 160 y 240 MHz.

La Tabla 9 y la Figura 86 muestran las características generales de este módulo.

Característica	Descripción
Arquitectura	Dual-core Tensilica Xtensa LX6
Velocidad de CPU	Hasta 240 MHz
Memoria Flash	4 MB
Memoria RAM	520 KB SRAM
Wi-Fi	802.11b/g/n (2.4 GHz), soporte para 802.11ac
Bluetooth	Bluetooth Classic (BR/EDR) y BLE (Bluetooth LowEnergy)
GPIO Pins	Hasta 36 pines GPIO programables
Periféricos	SPI, I2C, I2S, UART, PWM, ADC, DAC y más
Puertos analógicos	Hasta 18 canales ADC
Interfaces de comunicación	SPI, I2C, UART, CAN, Ethernet (a través de módulo externos)
Pantalla	Soporte para pantallas OLED y TFT
Almacenamiento externo	Soporte para tarjetas microSD
Consumo de energía	Modos de bajo consumo para ahorro de energía
Sistema Operativo	FreeRTOS
Seguridad	Soporte para criptografía y TLS/SSL
Voltaje de funcionamiento	3.3 V (puede ser alimentado por batería)
Conectividad	Wi-Fi y Bluetooth integrados

Tabla 9: Características esp32 Módulo ADC ESP 32. Fuente: hoja de datos ESP32 Espressif. Elaboración propia.

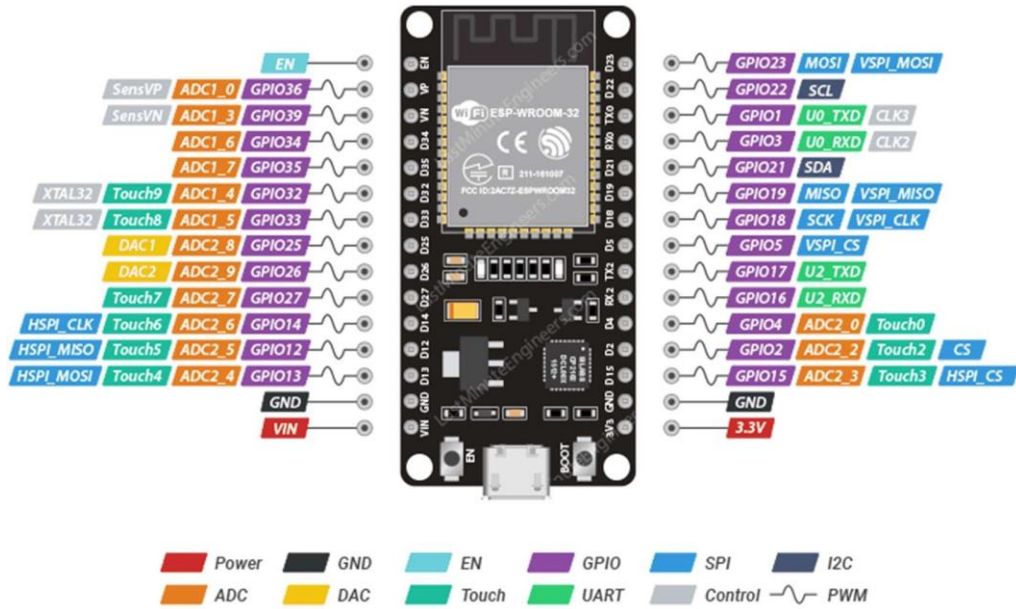


Figura 86: Kit de desarrollo ESP 32 Dev Kit v1.

Fuente: <https://naylampmechatronics.com/espessif-esp/384-esp32-devkit-v1-nodemcu-32-30-pin-esp32-wifi-micro-usb.html>

12 de febrero de 2024

Las características principales del procesador Xtensa del ESP 32 se encuentran detalladas en la Figura 87.

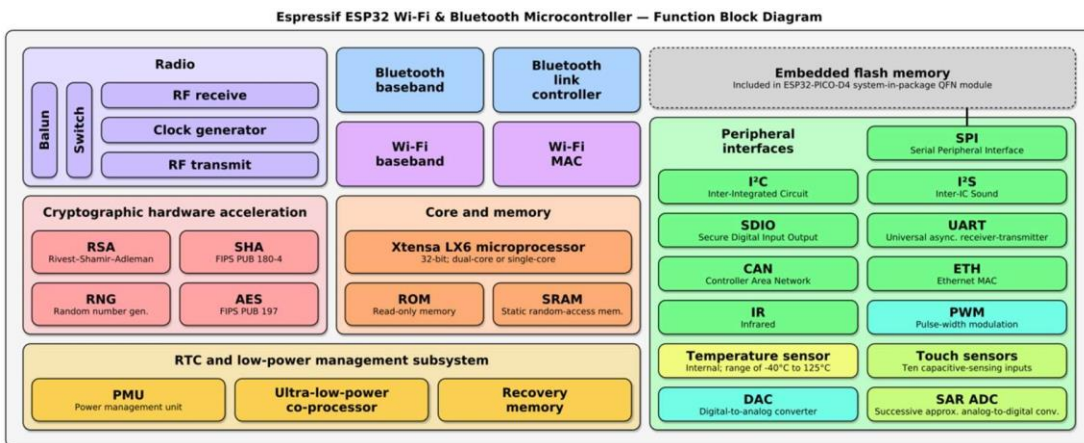


Figura 87: Características internas microcontrolador Xtensa dual-core, 32-bit LX6.

Fuente: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Espressif_ESP32_Chip_Function_Block_Diagram.svg

12 de febrero de 2024

Sobre el extremo inferior derecho de la Figura 87 se describe al módulo “SAR

ADC”, correspondiente a un sistema de conversión analógico a digital del tipo aproximaciones sucesivas.

En la Tabla 10 se consignan características específicas del módulo SAR ADC del ESP 32.

Característica	Descripción
Resolución ADC	12 bits (0-4095)
Canales ADC	Hasta 18 canales (dependiendo de la variante)
Rango de Voltaje de Referencia	0-3.3 V (configurable)
Precisión	+/- 2 LSB (Linearity)
Velocidad de Muestreo Máxima	Hasta 2 Msps (millones de muestras por segundo)
Compensación de Ganancia yOffset	Sí (Permite calibración)
Filtro de Hardware	Sí (Configurable para reducir el ruido)
Entradas Diferenciales	Sí (Permite medir diferencias de voltaje)
Modos de Muestreo	Continuo o por disparo (Síncrono/Asíncrono)
Voltaje de Referencia Interno	1100 mV (1.1 V)
Corriente de Referencia	2.5 μ A (Aproximadamente)
Interfaz de Comunicación	SPI, I2S, UART (para lectura de valores)
Modo de Conversión en Lote	Sí (Permite la conversión de varios canales en unasecuencia)
Buffer de Lectura	Sí (Almacena los valores convertidos)
Consumo de Energía	Bajo consumo en modo de espera
Efecto de Ruido	Depende de la calidad de la fuente de alimentación y el diseño de la PCB
Calibración en Fábrica	Sí (Para una mayor precisión)
Modo de Sueño Profundo	Sí (Consumo ultra bajo en modo de suspensión)

Tabla 10: Módulo ADC ESP32. Fuente: hoja de datos ESP32 Espressif

En el Anexo II hay más información referida a este microcontrolador.

A continuación, se analiza el comportamiento del conversor ADC en función de los valores obtenidos de las conversiones presentados en la Figura 88.

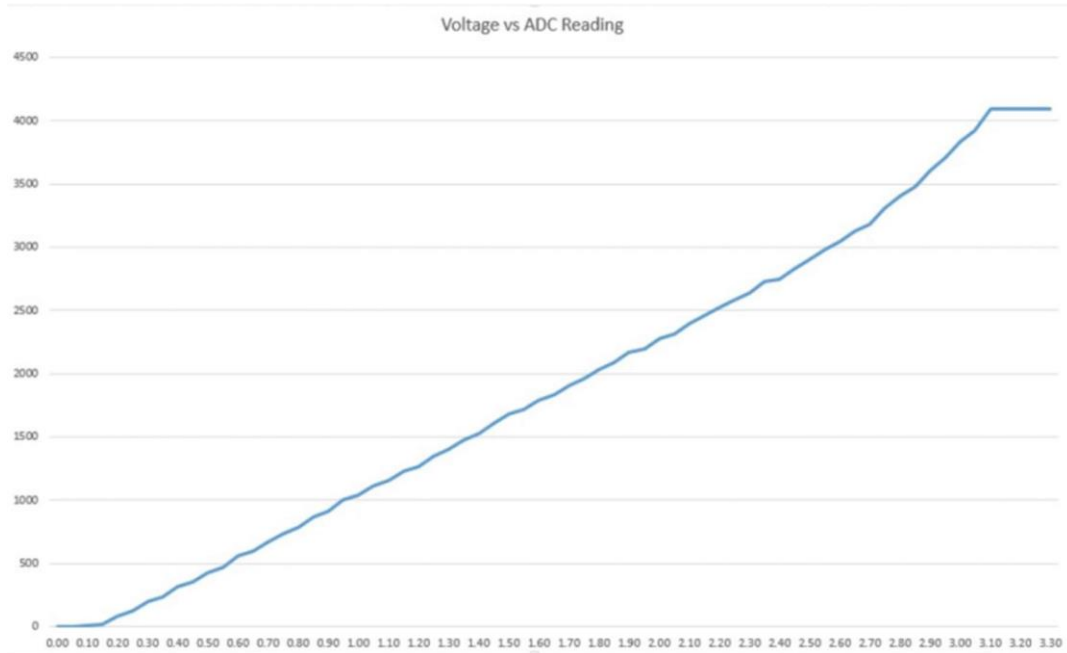


Figura 88: Curva de funcionamiento del Conversor ADC interno Esp32. Fuente: Datasheet Espressif para esp32

El análisis realizado permite arribar a varias conclusiones respecto del instrumento de medición desarrollado, que se exponen a continuación.

Los valores de tensiones obtenidas en la calibración del anemómetro en el túnel de viento, presentados en la Figura 75 y la Tabla 8, muestran que los mismos definen un intervalo que va desde los 0 [V] para una velocidad de viento de 0 [m/s] hasta 441 [mV] para una velocidad de 31 [m/s]. Es decir, que las mediciones se encuentran agrupadas dentro del primer octavo de valores dados por el fabricante, presentados en la Figura 88. No obstante, el fabricante expone que el ADC no posee un comportamiento lineal a lo largo de excursión, declarando que para valores comprendidos entre 0 y 150 [mV] los valores arrojados son 0. Esto inhabilita el empleo de este módulo para realizar las conversiones, debido a que un porcentaje de mediciones correspondientes a velocidades de viento relativamente bajas no serán leídas, reduciendo drásticamente la apreciación del instrumento, haciendo inútil su aplicación.

Como consecuencia, se decidió evaluar otro ADC externo, conectado al ESP32 y que garantice las lecturas de los tres ejes del anemómetro 3D.

Se analizó el convertor A/D ADS1115 de la firma Texas Instruments (ver Anexo III), el que posee las características presentadas en la Tabla 11, y que fue incluido al hardware del instrumento.

Característica	Descripción
Fabricante	Texas Instruments
Resolución	16 bits
Canales de entrada	4 canales analógicos diferenciales o 2 canales analógicos simples
Tensión de referencia	Seleccionable: 2.048V, 4.096V, o 6.144V
Tasa de datos	Hasta 860 muestras por segundo (SPS)
Interfaz de comunicación	Interfaz serie de 2 hilos (I2C)
Amplificador de ganancia programable	Ganancias programables: 2/3x, 1x, 2x, 4x, 8x, 16x
Funciones adicionales	- Comparadores programables - Detector de eventos de alta y baja - Temporizador programable
Temperatura de funcionamiento	-40°C a +125°C (rango industrial)
Aplicaciones típicas	- Monitoreo de sensores - Instrumentación de precisión - Sistemas de control

Tabla 11: Módulo ADC ADS1115. Fuente: Texas Instruments

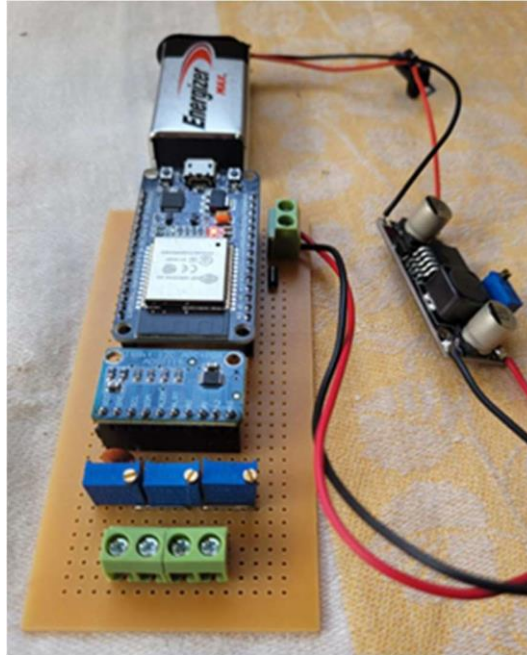


Figura 89: Primer versión del hardware asociado al anemómetro 3D. Elaboración propia.

En la Figura 89 se pueden ver las borneras de conexión con los micro generadores solidarios a las coperolas, las resistencias trimpotmulti vueltas para ajustar cada paralelo generador // resistencia ajustada a 8.2 Ohm conforme a lo resuelto en los ajustes del túnel de viento en Neuquén.

Detrás se ve la placa del conversor A/D (analógico – digital) y el microcontrolador ESP 32. A la derecha y por fuera de la placa se observa el módulo DC/DC que ajusta la tensión de batería a lo requerido por el sistema.

Módulo BME 280

Como sensor de temperatura, humedad y presión atmosférica se eligió el sensor de la firma Bosch BME 280. En el Anexo IV se encuentran detalles sobre este componente.

Firmware

Se han desarrollado diferentes módulos de software para la arquitectura del ESP 32, programado en el lenguaje C++, que permite obtener las velocidades del viento en tres ejes según las siguientes consignas

- Realizar mediciones por el lapso de 10 minutos.
- Expresar las mediciones de velocidad del viento en [m/s].
- Registrar dos muestras por segundo, lo que define un total de mil doscientas muestras a lo largo de 10 minutos por cada variable a medir.
- Almacenar los datos y extraerlos del instrumento para posteriormente analizarlos.
- Obtener muestras de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en el mismo instrumento.
- Establecer compatibilidad con sistemas IoT (Internet of things) para conexión remota y persistencia de datos on cloud.

Detalle de diseño

El diseño del software es modular, donde un script principal va llamando a diferentes rutinas y artefactos de software conforme a una secuencia lógica que permite después de una serie de pasos intermedios contar con las mediciones definidas.

Una vez validados, los datos se enviarán por una conexión wifi a un servicio de persistencia de datos alojado en la FCEIA – UNR, y desarrollado especialmente para este trabajo. Asimismo, un sistema local, provisto por un módulo para leer y grabar tarjetas MicroSD puede permitir alojar datos en la misma placa de mediciones del instrumento, mostrada en la Figura 90.

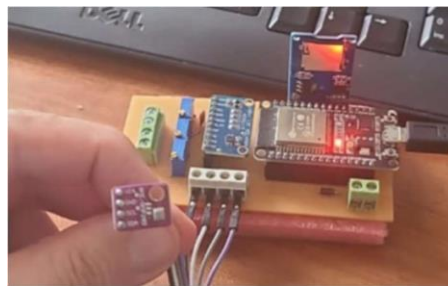


Figura 90: Detalle de la placa final del instrumento. Elaboración propia.

El software comienza definiendo un conjunto de vectores de mil doscientas posiciones cada uno para alojar en ellos los valores leídos.

En la Figura 91 se reproduce el detalle de la conformación de los vectores de software para obtener las mediciones del anemómetro 3D.

```
float vector_xy[1200];
float vector_xz[1200];
float vector_yz[1200];

float vector_x[1200];
float vector_y[1200];
float vector_z[1200];

float vel_x[1200];
float vel_y[1200];
float vel_z[1200];

float temperatura[1200];
float humedad[1200];
float presion[1200];
```

Figura 91: Detalle de la conformación de los vectores de software para obtener las mediciones del anemómetro 3D. Elaboración propia.

Posteriormente el sistema queda abocado exclusivamente a la toma de muestras en los intervalos definidos de tiempo. De los cuatro canales analógicos que posee el conversor ADS1115 (ver Anexo III) se utilizan solo tres, que corresponden a cada uno de los planos xy, xz, yz, según se muestra en la Figura 92.

```
for (int value = 0; value <= 1199; value++) {

    vector_xy[value] = abs(ads.readADC_SingleEnded(0));
    vector_xz[value] = abs(ads.readADC_SingleEnded(1));
    vector_yz[value] = abs(ads.readADC_SingleEnded(2));

    temperatura[value] = bme.readTemperature();
    humedad[value] = bme.readHumidity();
    presion[value] = bme.readPressure() / 100.0F;
    delay(5);
}
```

Figura 92: Fragmento de código fuente relacionado con la toma de muestras. Elaboración propia.

Una vez que se adquirieron, los datos son procesados empleando el sistema de ecuaciones resuelto para este caso, que resulta en tres vectores con mil doscientas posiciones conteniendo tensiones referidas a las componentes de la velocidad en los tres ejes cartesianos (x, y, z) a lo largo del tiempo de muestra.

A continuación, se utilizan los modelos matemáticos provenientes de la calibración de los anemómetros en el túnel de viento en Neuquén para ajustar la velocidad final según las tres zonas de valores detectadas a lo largo de las mil doscientas muestras en [m/s].

Como primera aproximación para el prototipo se realiza la calibración de uno de los anemómetros y se extiende la misma a los otros dos. Finalmente, esto se transforma en un script dentro del firmware de la ESP 32, como se presenta en la Figura 93.

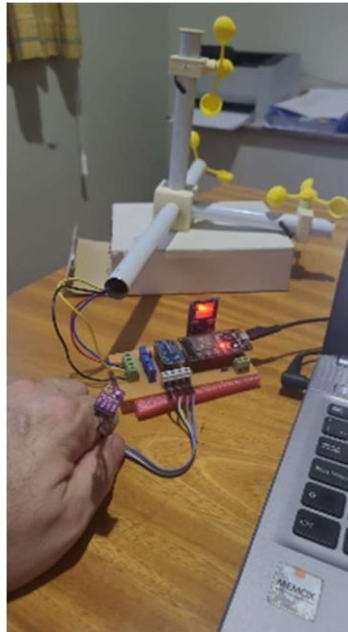
```
//CONVERSION DE TENSION EN VELOCIDADES POR EJE - datos de la calibración en tunel de viento en NQN
for (int value = 0; value <= 1199; value++)
{
  //EJE X
  if (vector_x[value]<89.5) //zona 1
    vel_x[value] = (vector_x[value] + 3.3845)/8.3203;
  else if (vector_x[value]>=89,5 and vector_x[value]<264.7) //zona 2
    vel_x[value] = (vector_x[value] + 12.625)/12.602;
  else if (vector_x[value]>=264,7) //zona 3
    vel_x[value] = (vector_x[value] + 107.56)/17.67;

  //EJE Y
```

Figura 93: Fragmento de código que interviene en la conversión de tensión a velocidad en m/s.

Elaboración propia.

En la Figura 94, se ve la placa definitiva que incluye un adaptador para colocar tarjetas de memoria Micro SD para contar con la posibilidad de guardar mediciones directamente en la placa.



*Figura 94: Detalle de conectores de los sensores a la placa de medición
Elaboración propia.*

Obtención de los datos del anemómetro 3D para su procesamiento

Con el propósito de contar con la información proveniente de las mediciones en campo de forma segura, se diseñó un doble sistema redundante.

- Conexión local por USB para lectura de datos.
- Comunicación wifi conectado con un sistema de base de datos IoT on cloud desarrollado para este proyecto.

El sistema de acceso local por medio de conexión USB, permite obtener la trama de datos y llevarlos a un archivo de texto del tipo CSV el que se importa directamente a un software de planilla de cálculo del tipo Microsoft Excel, o la planilla de cálculo de Open Office entre otras.

En la figura 95 se observan valores definidos en las muestras para las velocidades de los diferentes planos y a continuación las tramas de valores de las velocidades de los ejes x,y,z, temperatura ambiente, humedad relativa y presión barométrica. Esto se logra con la lectura multiplexada del anemómetro 3D sumado al sensor BME 280.

```
Vector xy= 75.00
Vector xz= 45.00
Vector yz= 58.00

Vector xy= 71.00
Vector xz= 47.00
Vector yz= 59.00

Vector xy= 66.00
Vector xz= 46.00
Vector yz= 58.00

Valores de ejes
0.49,0.49,0.49,25.27,48.00,1011.60
0.49,0.49,0.49,25.27,48.00,1011.60
0.49,0.49,0.49,25.26,47.90,1011.60
0.49,0.49,0.49,25.26,47.90,1011.60
0.49,0.49,0.49,25.26,47.90,1011.60
0.49,0.49,0.49,25.26,47.94,1011.58
0.49,0.49,0.49,25.26,47.94,1011.58
0.49,0.49,0.49,25.26,47.94,1011.58
0.49,0.49,0.49,25.26,48.06,1011.58
```

Figura 95: Extracto de datos obtenidos por puerto USB de las mediciones. Elaboración propia.

Por otro lado, a través de la conexión wifi que posee el procesador ESP32, se establece un vínculo con un servicio cloud de base de datos alojado en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de UNR, donde se persisten los datos de campo y se tiene la posibilidad de exportarlos en formato CSV para continuar con el procesamiento de los mismos de la misma forma que se explicó anteriormente por medio de una hoja de cálculo, como se muestra en la Figura 96.



Figura 96: Esquema de carpetas de servicio cloud del sistema remoto IoT. Elaboración propia.

En la Figura 97 se reproduce el anemómetro construido en su versión final.



Figura 97: Anemómetro 3D terminado. Elaboración propia.

Calibración del instrumento desarrollado y cálculo de la incertidumbre de medición

En el proceso de calibración se encuentran afectadas las seis variables que arroja el instrumento desarrollado:

- Velocidad del viento en eje x
- Velocidad del viento en eje y
- Velocidad del viento en eje z
- Temperatura ambiente
- Humedad relativa
- Presión atmosférica

El proceso de calibración referido a las tres velocidades del viento se realizó en el

túnel de viento N°1 tipo aerodinámico (con perfil de viento uniforme), del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue (ver Anexo I). La calibración la velocidad del viento se realizó empleando un anemómetro de hilo caliente TSI modelo 8330-M, cuya curva de calibración se tomó como patrón. Las mediciones de tensión y corriente se realizaron con un Multímetro Digital marca Sinumiter Modelo MS8229.

Los resultados de la calibración fueron empleados para la construcción de las curvas aplicadas en el firmware para la obtención de los valores de velocidad del viento medido. Para normalizar el modo de funcionamiento en los tres ejes cartesianos, se utilizaron resistencias variables del tipo trimpot multi vueltas con el objetivo de ajustar la resistencia eléctrica del paralelo motor//resistencia de carga a 8,2 Ohm. La placa de procesamiento de datos del anemómetro incluye tres resistencias variables de las descritas según muestra la Figura 98.

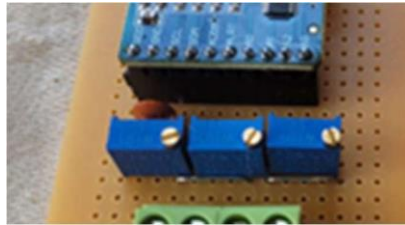


Figura 98: Resistencias ajustables trimpots multivueeltas para cada eje (x, y, z). Elaboración propia.

Cálculo de la incertidumbre de medición en la velocidad del viento

Calcular la incertidumbre de un instrumento de medición es esencial para garantizar la calidad y la confiabilidad de las mediciones, facilitar la toma de decisiones informadas y cumplir con estándares y normativas en diversos campos [62]. Este proceso se realizó con la colaboración de profesionales en el área de metrología del INTI.

Con el universo de datos obtenidos en las mediciones realizadas en el túnel de viento, se confeccionó una tabla con pares de valores relativos a cada uno de los puntos del rango analizados. Es decir, una correlación entre la velocidad aplicada en el túnel de viento a cada una de las turbinas (en m/s) y la tensión

entregada por el micro motor de la misma, leída en un multímetro (en mV/V) como se indica a continuación, a modo de ejemplo, considerando las mediciones obtenidas para la primera de las tres curvas que definen el alcance del equipo.

número de medición	velocidad entúnnel de viento (m/s)	Uv (k=2) en túnel de viento (mV)	tensiones obtenidas del micromotor (mV)			promedio de mediciones (mV)	desvío std. de mediciones (mV)	Um (k=2) del multímetro (mV)
			1ª medición	2ª medición	3ª medición			
1	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00
2	2,70	0,08	17,2	16,4		16,8	0,57	0,03
3	3,05	0,10	19,7	20,5		20,1	0,57	0,04
4	3,65	0,13	25,4	26,7		26,1	0,92	0,05
5	4,15	0,15	29,9	30,4		30,2	0,35	0,06
6	5,20	0,20	38,6	39,5	40,0	39,4	0,71	0,08
7	5,50	0,22	42,2	44,5	45,0	43,9	1,49	0,09
8	6,60	0,26	52,6	53,0		52,8	0,28	0,11
9	7,50	0,30	58,0	59,6	60,1	59,2	1,10	0,12
10	8,00	0,32	62,4	63,4	64,0	63,3	0,81	0,13

Tabla 12: Muestra de valores obtenidos de las mediciones. Elaboración propia.

Posteriormente, estos datos son evaluados o tratados por el método de cuadrados mínimos para obtener un polinomio o recta de mejor ajuste de los datos, como se describe a continuación.

	instrument ovalores indicados	patrones valores certificados	incertidumbre e local	LINEA RECTA	$y = a + bx$	
nº punto de recta	x (mV)	y (m/s)	$U_y - k=2$ (m/s)	x^2	x.y	residuos (mV)
						$e_i=(y_i-a-b.x_i)$
1	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0000	-0,415
2	16,800	2,700	0,084	282,2400	45,3600	0,269
3	20,100	3,050	0,101	404,0100	61,3050	0,223
4	26,050	3,650	0,130	678,6025	95,0825	0,109
5	30,150	4,150	0,151	909,0225	125,1225	0,117
6	39,367	5,200	0,197	1549,7344	204,7067	0,061
7	43,900	5,500	0,220	1927,2100	241,4500	-0,183
8	52,800	6,600	0,264	2787,8400	348,4800	-0,151
9	59,233	7,500	0,296	3508,5878	444,2500	-0,023
10	63,267	8,000	0,316	4002,6711	506,1333	-0,007
a (μm) :	0,41540	b =	0,11999		s (y,x) (mV):	0,21808

Tabla 13: Aplicación del método de cuadrados mínimos. Elaboración propia.

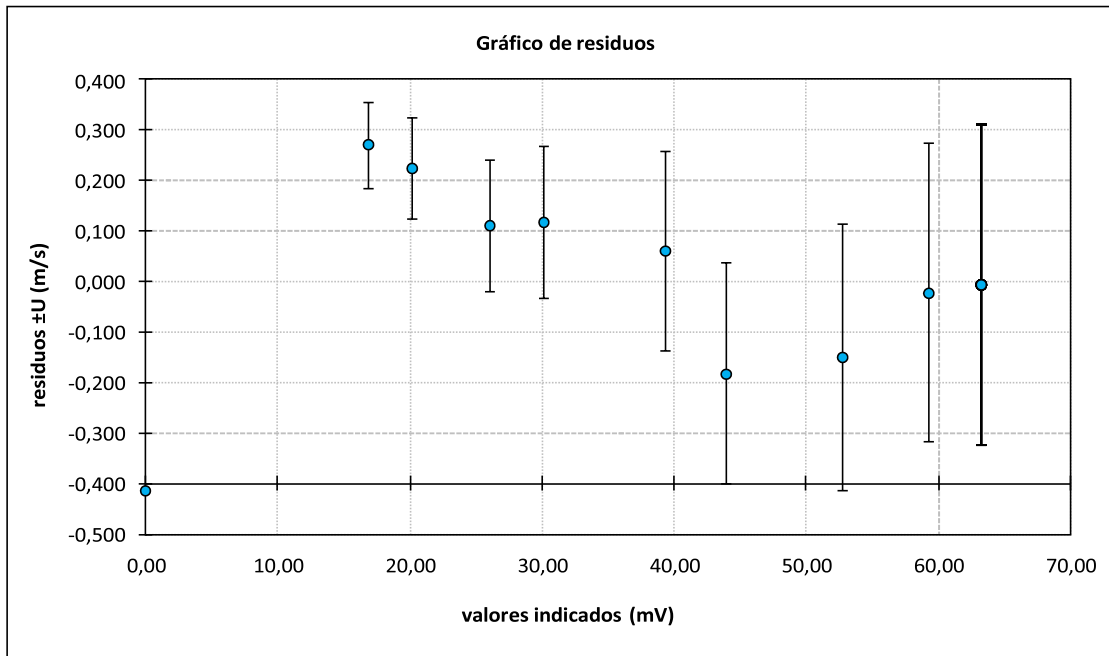


Figura 99: Gráfico de residuos. Elaboración propia.

recta de ajuste (mV)	banda inferior (mV)	banda superior (mV)	U (k=2) (°)	U (k=2) (%)	predicción inferior (mV)	predicción superior (mV)
0,415	0,197	0,633	0,436	105,0	-0,021	0,852
2,431	2,213	2,649	0,444	18,3	1,987	2,875
2,827	2,609	3,045	0,448	15,8	2,380	3,275
3,541	3,323	3,759	0,455	12,9	3,086	3,996
4,033	3,815	4,251	0,461	11,4	3,572	4,495
5,139	4,921	5,357	0,479	9,3	4,660	5,617
5,683	5,465	5,901	0,488	8,6	5,195	6,171
6,751	6,533	6,969	0,510	7,6	6,241	7,261
7,523	7,305	7,741	0,527	7,0	6,996	8,050
8,007	7,789	8,225	0,539	6,7	7,468	8,545

Tabla 14: Valores recta de calibración. Elaboración propia.

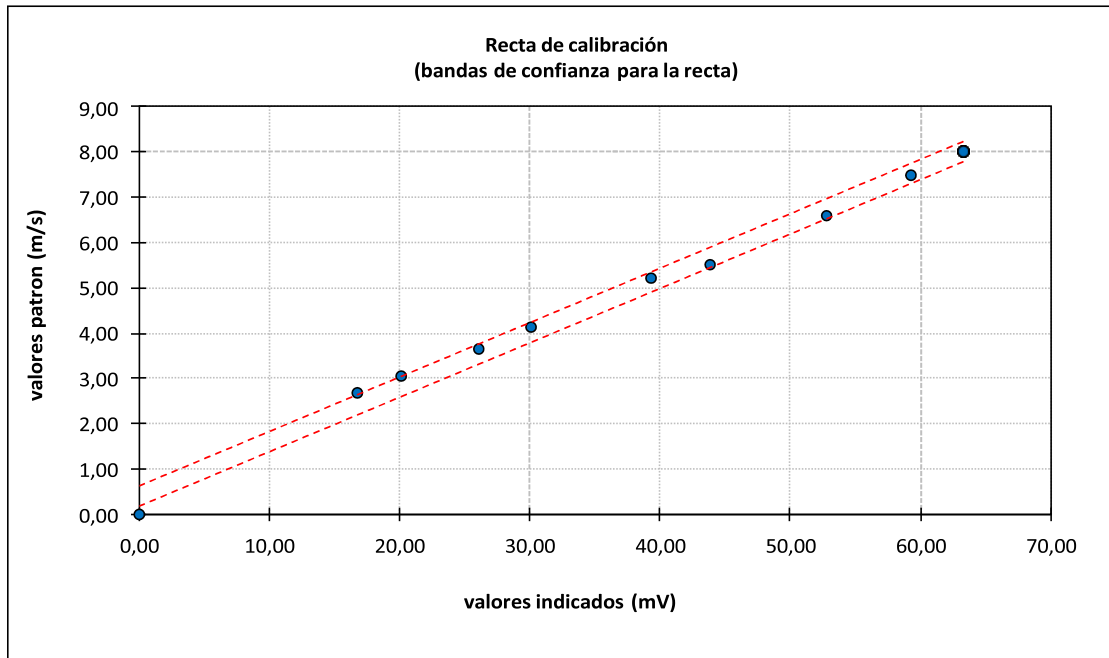


Figura 100: Bandas de confianza. Elaboración propia.

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

x (mV)	y (m/s)	Uy - k=2 (m/s)	residuos (m/s)	ajuste (m/s)	b.i. (m/s)	b.s. (m/s)		ajuste (m/s)	U (m/s)
0,000	0,000	0,000	-0,415	0,415	0,197	0,633		0,415	0,436
16,800	2,700	0,084	0,269	2,431	2,213	2,649		2,431	0,444
20,100	3,050	0,101	0,223	2,827	2,609	3,045		2,827	0,448
26,050	3,650	0,130	0,109	3,541	3,323	3,759		3,541	0,455
30,150	4,150	0,151	0,117	4,033	3,815	4,251		4,033	0,461
39,367	5,200	0,197	0,061	5,139	4,921	5,357		5,139	0,479
43,900	5,500	0,220	-0,183	5,683	5,465	5,901		5,683	0,488
52,800	6,600	0,264	-0,151	6,751	6,533	6,969		6,751	0,510
59,233	7,500	0,296	-0,023	7,523	7,305	7,741		7,523	0,527
63,267	8,000	0,316	-0,007	8,007	7,789	8,225		8,007	0,539

Tabla 15: Valores recta de calibración (k=2). Elaboración propia.

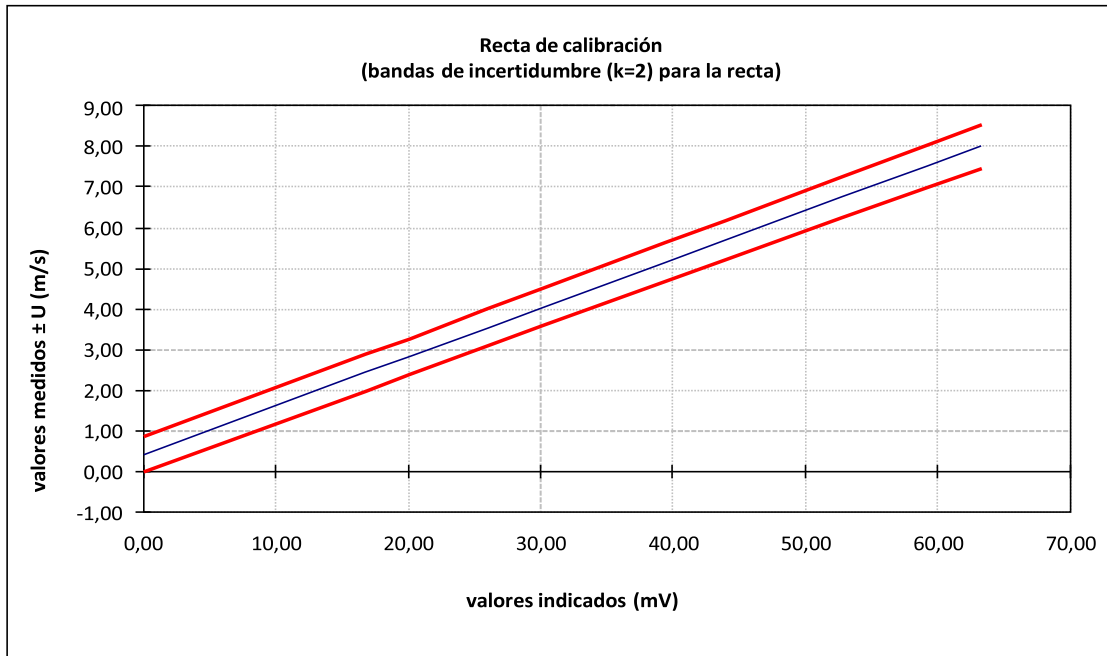


Figura 101: Bandas de incertidumbre (k=2). Elaboración propia.

Variables ambientales

Para caracterizar el sensor de temperatura, humedad relativa y presión

atmosférica se utilizó una estación meteorológica perteneciente a los laboratorios de metrología del INTI en la ciudad de Rosario.



Figura 102: Estación Meteorológica TFA (Origen Alemania). Fuente: INTI.



Figura 103: Estación Meteorológica TFA (Origen Alemania) Etiquetas de calibración primaria. Fuente: INTI.

Durante los ensayos para la caracterización del sensor BME 280 las condiciones ambientales se mantuvieron dentro de los siguientes intervalos de temperatura ambiente (Tabla 16).

ESTACIÓN METEOROLÓGICA CA [°C]	SENSOR BME 280 [°C]
2 2, 3	2 1. 6
2 6, 7	2 5, 6
3 0, 2	2 9, 1
3 3, 4	3 2, 6

Tabla 16: Caracterización sensor BME 280 – Temperatura. Elaboración propia.

Humedad Relativa

ESTACIÓN METEOROLÓGICA A [%]	SENSOR BME 280 [%]
2 7	29
6 2	66
8 9	96

Tabla 17: Caracterización sensor BME 280 – Humedad Relativa. Elaboración propia.

Presión barométrica

ESTACIÓN METEOROLÓGICA [HP]	SENSOR BME 280 [HP]
996	999
1002	1004
1008	1010
1010	1014

Tabla 18: Caracterización sensor BME 280 – Presión Barométrica. Elaboración propia.

Si bien dentro del alcance de este trabajo las tres variables ambientales forman parte del contexto de la medición, se propone a futuro calcular la densidad del aire como un parámetro más de gran relevancia para la explotación eólica con fines energéticos.

Metodología experimental

Metodología experimental a escala

Se reprodujeron en un túnel de viento las características eólicas correspondientes a la terraza del edificio de la FCEIA, con perfiles de velocidades medias, y estructuras vorticosas con fluctuaciones de velocidades instantáneas y escalas espaciales y temporales similares a las imperantes en la región de estudio. Así mismo se construyó un modelo a escala 1:300 del emplazamiento de dicho edificio con las 9 manzanas circundantes del entorno de la ciudad. Los ensayos se realizaron en el túnel de viento N°2 de tipo Capa Límite Atmosférica, del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Ambientales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, sede de trabajo del codirector de esta tesis.

Las características del túnel de viento empleado se presentan en el Anexo I.

Metodología experimental de campo

Las mediciones experimentales previas para obtener las propiedades eólicas del lugar, como la rosas de vientos, la curva de Weibull y la Intensidad de turbulencia, fueron realizadas en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario. En particular, las mediciones de velocidad del viento se realizaron en el techo del edificio, y el registro y procesamiento de los datos fue llevado a cabo en el Laboratorio de Energía para el Desarrollo Sostenible de la FCEIA, que integra el autor de esta tesis.

Dicho Laboratorio cuenta entre su propio equipamiento con una estación meteorológica Fine Offset WS (figura 13), equipamiento informático,

conectividad y equipamiento de monitoreo remoto de variables físicas, desarrollado por el doctorando en conjunto con otros profesionales, osciloscopios, multímetros, entre otros.

Por último, las mediciones de campo se realizaron sobre la citada azotea con el equipo prototipo desarrollado en la presente tesis.

Como ha sido expuesto en la sección anterior, hay al menos cinco factores principales que afectan la ubicación de aerogeneradores sobre el techo de un edificio en un ambiente urbano:

- vi) forma del edificio.
- vii) forma del techo.
- viii) altura del edificio.
- ix) velocidad del viento (dirección y rapidez)
- x) configuración urbana.

Tanto la forma del techo/ edificio como la configuración urbana son infinitas, por lo que, a los efectos de esta tesis, se ha elegido un edificio en particular, el correspondiente a la sede central de la FCEIA, en cuyo último piso se encuentra el Laboratorio de Energía, con una forma de techo escalonado y una configuración urbana de edificios alrededor de alturas similares o más bajos.

Los datos de campo muestreados por el anemómetro 3D desarrollado en este trabajo están disponibles en el Anexo V.

Procesamiento de los datos de campo – obtención de información

La tabla de datos obtenida muestra un conjunto de mil doscientas filas que contienen las mediciones de viento y variables ambientales tomadas por el instrumento. Dado que el tiempo de muestreo se define en 10 minutos, se ajustó el equipo para que emplee este tiempo tomando 2 muestras por segundo de cada variable.

De esta forma, obtenemos una tabla de 7200 valores.

Construcción de información a partir de los valores obtenidos de campo para caracterizar el viento en el ambiente urbano, método con anemómetro 3d de bajo costo

Intensidad de turbulencia

Como hemos visto en este trabajo, la intensidad de turbulencia se define como el cociente entre el desvío estándar de los valores medidos a lo largo de 10 minutos y el valor medido de las mediciones realizadas en ese intervalo de tiempo [58].

$$I_t = \frac{D_{std}}{V_{md}} \quad (21)$$

I_t = Intensidad de turbulencia.

D_{std} = Desvío estándar del intervalo.

V_{md} = Valor medio del intervalo.

Para el caso de este instrumento tendremos tres valores de intensidad de turbulencia en el intervalo de medición, correspondientes a las mediciones de cada uno de los ejes cartesianos (x,y,z), obteniendo así

$$I_{t_x} \quad (22)$$

$$I_{t_y} \quad (23)$$

$$I_{t_z} \quad (24)$$

Velocidad de Ráfaga

Se define como ráfaga al mayor valor de velocidad registrado en el intervalo de medición [59]. Es decir, el valor máximo dentro del intervalo de medición representando este el valor de la ráfaga dentro del conjunto de valores. Para este estudio encontraremos tres ráfagas diferentes dentro del intervalo, cada una de ellas correspondientes a los valores máximos para cada eje de coordenadas en

R3 (x, y, z).

$$R_{x=\max_vel_x} \quad (25)$$

$$R_{y=\max_vel_y} \quad (26)$$

$$R_{z=\max_vel_z} \quad (27)$$

Posición del vector velocidad en el plano (x,y) - R2 – para conocer la dirección horizontal del viento

Trabajando con los promedios de las componentes x e y de las velocidades registradas podemos conocer el rumbo promedio del viento sobre el plano xy en el intervalo de medición.

Definimos que la orientación del anemómetro 3D debe ser tal que el eje “x” coincida con la dirección cardinal “norte” y la componente “y” en dirección “este”.

Apelando al álgebra vectorial podemos conocer el módulo y el ángulo que forma el vector promedio de velocidad (Raichman y Totter, 2016).

$$\text{Módulo} = \sqrt{vel_x^2 + vel_y^2} \quad (28)$$

$$\text{Angulo con eje x} = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \quad (29)$$

Posición del vector velocidad en el espacio – R3 –

De una forma similar al apartado anterior, podemos calcular al vector resultante en el espacio de las velocidades de viento medidas– R3; conociendo su módulo y por medio de sus cosenos directores los ángulos que éste posee con cada uno de los tres ejes cartesianos (Raichman y Totter, 2016).

Se define como módulo de un vector en el espacio como

$$\text{Módulo} = \sqrt{vel_x^2 + vel_y^2 + vel_z^2} \quad (30)$$

Definimos al ángulo “alfa” al formado entre el vector velocidad y el eje “x”, al ángulo “beta” como al formado entre el vector velocidad y el eje “y”, y finalmente al ángulo “gama” como aquel formado entre el vector velocidad y el eje “z”.

De forma tal que

$$\text{Cos } \alpha = \frac{vel_x}{\text{Módulo}} \quad (31)$$

$$\text{Cos } \beta = \frac{vel_y}{\text{Módulo}} \quad (32)$$

$$\text{Cos } \gamma = \frac{vel_z}{\text{Módulo}} \quad (33)$$

Estos tres cosenos, permiten obtener los tres ángulos que forma el vector velocidad con los tres ejes coordenados conforme a lo planteado.

RESULTADOS

Como resultado del procedimiento descrito en apartados anteriores, se han determinado las principales variables relacionadas con la caracterización del viento urbano para fines energéticos; estas fueron incluidas no solo en el método de medición propuesto, sino que fue necesario considerarlas para obtener los datos con el instrumento de medición diseñado y construido en el marco de este trabajo en las experiencias en campo y que fueron expuestas en diferentes secciones de este documento; a raíz de esto, se ha obtenido un conjunto de valores de las variables de interés que permiten por medio del análisis de las mismas poder determinar a través del método aquí desarrollado, el comportamiento del viento en una locación puntual dentro del ámbito urbano.

Adicionalmente, y en principio no proyectado en este trabajo, se desarrolló una Propuesta didáctica para la formación de posgrado, a partir del método de medición desarrollado para la medición del viento urbano.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de esta tesis de investigación y desarrollo, siguiendo los siguientes apartados: Método de medición desarrollado, Valores obtenidos y Propuesta didáctica.

Método de medición desarrollado

El método propuesto para la medición del viento en un ambiente urbano de rugosidad variada, incluyó el diseño, desarrollo, calibración y testeado del instrumento de medición: un conjunto de tres anemómetros acoplados en un soporte (Figura 104). La propuesta es disponer de un conjunto de estos instrumentos distribuidos en tres alturas diferentes sobre el techo del edificio en cuestión. Cada anemómetro individual se conecta a un microcontrolador que lee el movimiento del dispositivo por medio de una señal de tensión eléctrica convertida a un valor digital que puede ser detectado, medido y almacenado a través de un hardware (Figura 105) y de un software, desarrollados al efecto.

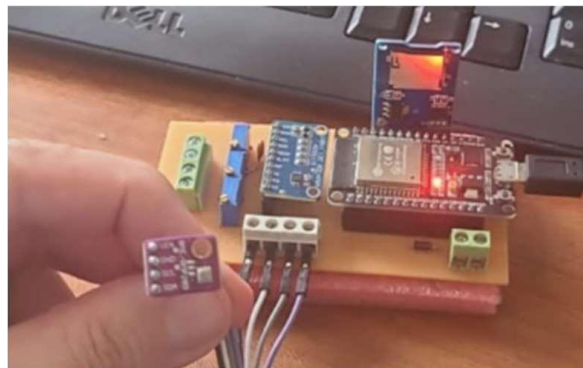
A partir de la calibración de los instrumentos, y según la metodología desarrollada, se determina el campo vectorial de velocidad y valores de intensidad de turbulencia.

Con el procedimiento descrito, el sistema permite tomar 1200 valores en diez minutos concada anemómetro.

El procedimiento incluye la medición de parámetros ambientales en el contexto de las mediciones como ser la temperatura ambiente, la humedad relativa del ambiente y la presión atmosférica *in situ*.



*Figura 104: Vista del anemómetro 3D de coperoles diseñado, desarrollado y testado.
Elaboración propia.*



*Figura 105: Detalle de la placa final del instrumento.
Elaboración propia.*

Dentro de este desarrollo, se incluyó:

- El diseño y construcción de la electrónica que lleva adelante la interpretación de los sensores
- El firmware que ejecuta los algoritmos de medición
- Un sistema *on cloud* en los servidores de la FCEA que incluye un motor de base de datos que persiste los datos de campo.
- Un sistema web para revisar la información recibida y exportarla en formato CSV.
- Un mecanismo redundante para obtener los datos de campo directamente desde la placa del anemómetro por medio de USB.
- Un sistema de interpretación de variables, procesamiento y análisis de la información recibida.
- La descripción del procedimiento a seguir.

Mediciones obtenidas

Las mediciones tuvieron lugar en dos ámbitos diferentes, en fase laboratorio y en campo. Las mediciones en laboratorio fueron realizadas en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, y las mediciones en campo, fueron llevadas a cabo en la azotea del Laboratorio de Energías Renovables de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario.

El registro en campo se llevó a cabo el día sábado 6 de abril del corriente año, a las 10:10hs, tomando datos de las variables meteorológicas cada 1 segundo, durante 10 minutos.

En la Tabla del Anexo V, se reproducen los 1200 registros obtenidos.

Como resultado de estas mediciones, se obtuvo una secuencia de valores que fueron analizados con las herramientas y procedimientos desarrollados y expuestos en el apartado anterior. En la Tabla 19 se exponen los resultados obtenidos de las 1200 mediciones realizadas por cada componente de velocidad en cada plano.

Los valores de velocidad media, intensidad de turbulencia y ráfaga indicados son coherentes con los valores correspondientes del viento en la zona.

Concepto	Unidad	Eje X	Eje Y	Eje Z
Devío standard	[m/s]	3,07	2,56	0,78
Velocidad Media	[m/s]	6,50	5,21	1,46
Int. de Turbulencia		0,47	0,49	0,53
Ráfaga	[m/s]	11,48	11,29	10,71

Tabla 19: Resultados obtenidos sobre el estudio de 1200 muestras. Elaboración propia.

Magnitud y dirección del vector en el plano (x,y) R2			
Módulo		8,33	[m/s]
Angulo		51,29	[°]

Tabla 20: Vector Velocidad en R2. Elaboración propia.

El ángulo especificado en la Tabla 20 corresponde al que se forma entre el eje x y el eje y indicado 51,29° desde la posición norte hacia el este (Según la convención elegida de colocación del instrumento apuntando al norte con el eje x y quedando el eje y orientado al este). Esto indica un predominio del viento en la dirección Noreste. Lo mismo puede inferirse de los valores de los ángulos indicados en la Tabla 21.

Magnitud y dirección del vector en el espacio (x,y,z) R3			
Módulo		8,46	[m/s]
Angulo alfa		39,78	[°]
Angulo beta		51,98	[°]
Angulo gama		80,03	[°]

Tabla 21: Vector Velocidad en R3. Elaboración propia.

La altura a la que fue colocado el anemómetro prototipo está instalado el anemómetro de la estación meteorológica, donde se registraron vientos solo de componente norte y sur, anulando las mediciones de los vientos del este debido al efecto barrera que el techo efectúa sobre el mismo (ver Anexo I).

Los vientos pronosticados para el día de la medición, entre las 9 y 12 hs, en la ciudad de Rosario fueron con componente Noreste (45°), según puede observarse en las Figuras 106 y 107.

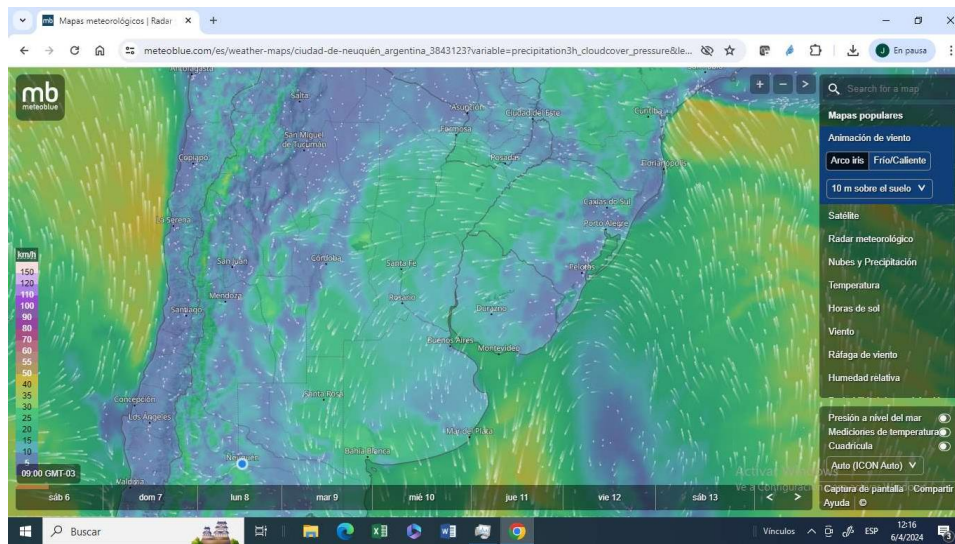


Figura 106: dirección del viento pronosticada para las 9 hs, para el día de la medición de campo.

Fuente: Meteoblue.

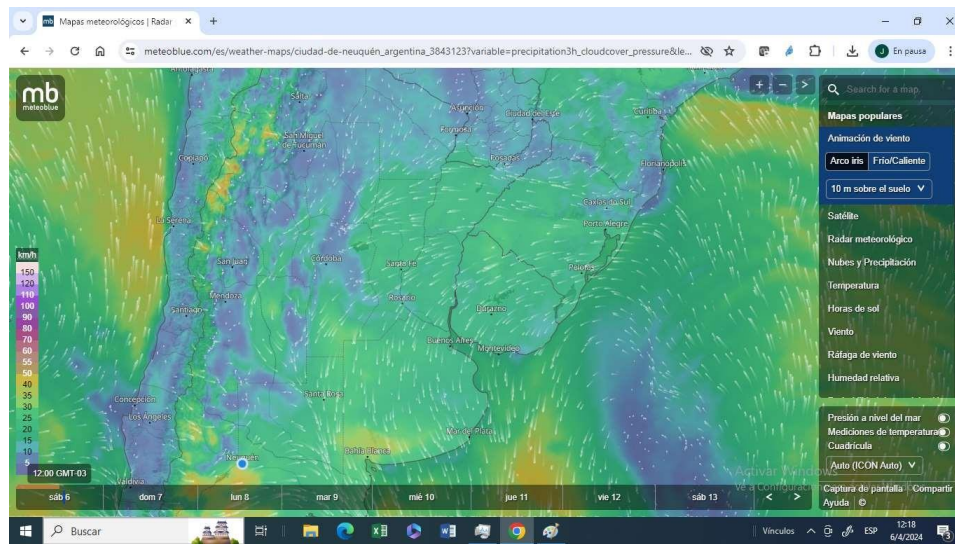


Figura 107: dirección del viento pronosticada para las 12 hs, para el día de la medición de campo.

Fuente: Meteoblue.

En la Figura 108 se graficaron las tres componentes obtenidas de la velocidad del viento, la dirección X representa el norte-sur, la dirección Y representa el este-oeste, y la dirección Z la componente vertical.



Figura 108: Registro de las 3 componentes del viento durante 20 minutos. Fuente propia, construida con los datos obtenidos del anemómetro 3D desarrollado en esta tesis.

La superposición de las curvas X (verde) e Y (azul) indican que la dirección del viento es en 45° , es decir dirección NorEste.

Cuando dichas curvas se separan indican otro ángulo, en el caso del óvalo marcado en amarillo, la componente horizontal del viento rota hacia casi el norte (20°), registrando el efecto "Barrera" indicado en el Anexo I, que ocurre a esa altura debido a la forma y ubicación del techo.

Por lo tanto, los resultados de este ensayo de campo, se corroboran con los obtenidos en el ensayo en el túnel de viento con el modelo físico descrito en el Anexo I. Esto da cuenta de que el instrumento es adecuado para el fin propuesto.

Propuesta didáctica

La Maestría en Energía para el Desarrollo Sostenible de la Facultad de Ciencias exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario (UNR) es una carrera semipresencial que prepara profesionales para producir, gestionar y administrar energías renovables de manera eficiente.

Dentro del currículo, la asignatura obligatoria Laboratorio de Energías Renovables tiene como objetivo ofrecer a los alumnos formación de laboratorio en áreas de las energías renovables, a través de la realización de actividades experimentales empleando equipamiento propio del Laboratorio de Energía de la FCEIA. Se pretende en ese contexto, que los estudiantes transfieran los conocimientos construidos en otras asignaturas para resolver nuevos problemas prácticos.

El objetivo didáctico que se persigue es enfrentar al estudiante a actividades que competen a su futuro desempeño profesional, tales como el diseño, el análisis crítico de resultados experimentales y la modelización.

Siendo este doctorando, docente de dicha asignatura, se realizó una propuesta didáctica sobre la base del método de medición desarrollado en esta tesis. Este no fue un objetivo original de la tesis. No obstante, se considera como una transferencia valiosa a la formación profesional de los estudiantes de la maestría.

La actividad se plantea a través del siguiente esquema, respondiendo a las características de un trabajo práctico semi-estructurado, de modo que los estudiantes diseñen su propio camino de resolución del problema planteado.

La consigna a dar a los estudiantes se formula como: “Se desea instalar un aerogenerador en el techo del edificio de la FCEIA para cubrir sus requerimientos energéticos (datos disponibles). Diseñe una estrategia para evaluar la factibilidad y la ubicación más adecuada para el montaje del aerogenerador. Discuta con sus compañeros las alternativas consideradas. En cualquier momento, puede solicitar a la cátedra la información que considere necesaria. Así mismo, puede utilizar todo el equipamiento que conoce, disponible en este laboratorio.” La tarea se plantea como un trabajo colaborativo en grupos

de tres estudiantes, a ser desarrollado, en principio, durante tres clases de seis horas cada una.

Se espera que, a partir de las propuestas de cada estudiante y el posterior consenso alcanzado y, en función de las necesidades para resolver el problema, la actividad se realice a través de una secuencia conforme a la siguiente:

1. La observación del montaje y la conexión del anemómetro 3D al microprocesador.
2. El análisis crítico de los resultados de las simulaciones para proponer la ubicación de los anemómetros 3D sobre la terraza del Laboratorio de Energía Renovable de la FCEIA-UNR.
3. La ejecución del trabajo de campo realizando mediciones del flujo tridimensional de viento sobre esa terraza.
4. La aplicación de la curva de calibración obtenida en túnel de viento.
5. El modelado de los resultados experimentales.
6. La predicción de las posibilidades de montaje de aerogeneradores en el sitio conforma los valores obtenidos que caracterizan el flujo de viento en el lugar.

Esta propuesta ha sido comunicada en la XV Conferencia Interamericana de Educación en Física (CIAEF) y III Encontro Nacional do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) y publicada con referato en la Revista Experiências em Ensino de Ciências.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Esta tesis se planteó con un doble objetivo general de investigación y desarrollo. Se propuso identificar y comparar variables físicas intervinientes en el desempeño de aerogeneradores operados en edificios dentro de ciudades y desarrollar un método de medición tridimensional del viento en ambientes urbanos complejos.

Para el logro de este objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

1. Identificar las variables relevantes del flujo de aire a partir de modelos establecidos.
2. Diseñar un sistema de medición del viento en ambiente urbano.
3. Desarrollar la solución prototipo.
4. Evaluar el desempeño del prototipo desarrollado contrastado con un ensayo empleando un modelo físico a escala.

Se ha presentado el proceso de investigación realizado y el método de medición propuesto para caracterizar el viento sobre el techo de un edificio en un ambiente urbano, así como la actividad de aprendizaje destinada a estudiantes de la carrera de Maestría en Energía para el Desarrollo Sostenible.

A partir del análisis realizado a lo largo de este trabajo, se puede concluir que es determinante conocer la velocidad tridimensional del viento en ambientes urbanos para poder construir información útil para la toma de decisiones.

El relevamiento realizado de instrumentos de medición capaces de aportar datos en este sentido mostró las dificultades para adquirir equipamientos en nuestro país, tanto por un costo elevado como por las restricciones de importación que hacen poco viable contar con ellos. En consecuencia se logró desarrollar un sistema de medición tridimensional del viento de carácter didáctico, que permitió realizar mediciones de campo.

Los valores obtenidos a la fecha son coherentes tanto obtenidos en los ensayos en túnel de viento como las mediciones sobre la azotea del edificio objeto de estudio.

A partir de este trabajo, se puede contar con un nuevo método para caracterizar el viento en ambientes urbanos, donde la complejidad de su desplazamiento debido a la rugosidad presente en el terreno hace difícil su análisis. A su vez, este desarrollo está aportando un nuevo instrumento de medición que permitirá tomar datos in situ para realizar los análisis de caracterización del viento urbano.

Los resultados de la tesis, tanto relativos al estudio teórico como los derivados del desarrollo realizado, son útiles para establecer las características requeridas para la ubicación, instalación y uso de los aerogeneradores en ambientes urbanos.

Un modelo de desarrollo energético sostenible, que persiga la reducción de los impactos ambientales de la actividad humana y también, que permita una adecuada generación de riqueza y un desarrollo social y cultural acordes, requieren aportes de diversos tipos. Esta tesis constituye un pequeño aporte en esa dirección.

Los resultados obtenidos aportan también a la profundización del conocimiento de la temática del uso eficiente de recursos renovables y proveen información relevante para decisores gubernamentales vinculados al área y a científicos y tecnólogos del ámbito académico.

La energía eólica urbana tiene un sin número de aportes que ofrecer en un mundo cada vez más demandante de energía, pero para poder llevar adelante estos proyectos es imperioso conocer el recurso eólico en el lugar de emplazamiento con el objetivo de conocer el mejor lugar para anclar los aerogeneradores y ayudar a definir las características y requisitos que estos deben cumplir no solo desde el punto de vista energético sino aún más importante, aspectos referidos a la seguridad física de las cosas y las personas.

Este trabajo se constituye además en una herramienta fundamental en el ámbito de la enseñanza en el marco de la FCEIA, apoyando la formación de estudiantes de grado y posgrado y fortaleciendo el Laboratorio de Energías Renovables de la FCEIA permitiendo constituir nuevas herramientas didácticas teórico-prácticas.

En el año en curso se planea implementar la propuesta didáctica desarrollada

destinada a estudiantes de la carrera de Maestría en Energía para el Desarrollo Sostenible. En el nivel de posgrado de una carrera con perfil tecnológico en temas de energía, es importante ofrecer actividades de aprendizaje que acerquen al estudiante a problemas reales a los que podrán enfrentarse una vez egresados. A través de la actividad propuesta, se pretende enfrentar a los estudiantes a situaciones que promoverían el desarrollo de habilidades experimentales (conexión eléctrico, montaje mecánico, etc.), de diseño, de análisis crítico y de modelado, fundamentales para su futuro desempeño profesional.

Adicionalmente, a futuro, se propone optimizar el diseño del anemómetro 3D desarrollado para mejorar las mediciones, incluyendo el mecanismo para detectar las direcciones del viento (positivo y negativo), reduciendo el diámetro de los tubos que soportan las coperolas, y realizando un estudio de su interferencia en relación con los datos medibles. Incluir nuevos sensores que den más precisión a la medición del viento, y mejorando el sistema en la nube de la facultad para llevar adelante diferentes ensayos de manera automática.

PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS

G. Saez de Arregui, M. A. Plano, F. Lerro, J. M. Márquez, J. L. Lassig, S. B. Concari and S. T. Marchisio, Remote sensors for monitoring generation and use of renewable energy, In: *Proceedings 2020 XIV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAAE)*, Ed.: IEEE. Porto, Portugal, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/TAAE46915.2020.9163741. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9163741>

1

G. Saez de Arregui, S. B. Concari y J. L. Lassig, Caracterización del viento en ambientes urbanos complejos: propuesta de una actividad didáctica de posgrado. *Revista Experiências em Ensino de Ciências*, 2023, V18, N4. <https://fisica.ufmt.br/eenciojs/index.php/eenci/article/view/1333>

REFERENCIAS

- [1] J. Lassig, C. Palese, y A. Apcarian, *Viento, ciudad y edificios*; Editores Particulares 2009, Kluwer Academic Publishers, ISBN 978-987-05-6325-9.
- [2] J. Cace, E. Ter Horst, K. Syngellakis, M. Niel, P. Clement, R. Heppener and E. Peirano, *Urban wind turbines. Guidelines for small wind turbines in the built environment*. Wind Energy Integration in the Urban Environment (WINEUR); February 2007; http://www.urbanwind.net/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf (Consulta 15/04/24).
- [3] F. Wang, L. Bai, J. Fletcher, J. Whiteford and D. Cullen, The methodology for aerodynamic study on a small domestic wind turbine with scoop. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, **96**, 1–24, Ed. Elsevier. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.03.004
- [4] A. Grant, C., Johnstone and N. Kelly, Urban wind energy conversion: the potential of ducted turbines. *Renewable Energy*, 2008, **33**(6), 1157-1163.
- [5] L. Lu and K. Yan Ip, Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, **13**(2), 450–461.
- [6] N. Mithraratne, Roof-top wind turbines for microgeneration in urban houses in New Zealand. *Energy and Buildings*, 2009, **41**, 1013–1018.
- [7] La Nación, Mar del Plata ya tiene su edificio ecológico. *La Nación*, lunes 21 de enero de 2008. <https://www.lanacion.com.ar/economia/mar-del-plata-ya-tiene-su-edificio-ecologico-nid980582/> (Consulta 15/04/24).
- [8] Pasaje 8 Bis, 2016. <http://www.pasaje8bis.com.ar/> (Consulta 10/05/17).
- [9] G. Fenes, Santa Fe ya piensa en profundizar sus estudios de medición de vientos para desarrollar energía eólica. *Energía Estratégica*, 28 de mayo de 2015. <http://www.energiaestrategica.com/santa-fe-ya-piensa-en-profundizar-sus-estudios-de-medicion-de-vientos-para-desarrollar-energia-eolica/> (Consulta 15/04/24).
- [10] E. Luccini y J. Pomarj, Caracterización de vientos en Rosario, Argentina, a partir de mediciones 2008-2011. *ASADES*, 2012, **11**, 19-22 <https://www.semanticscholar.org/paper/CARACTERIZACION-DE-VIENTOS-EN-ROSARIO%2C-ARGENTINA%2C-A-Luccini->

[Pomar/c78a28bf90bc652dc99b599a08309b93c5fd9810](https://pomar.com/c78a28bf90bc652dc99b599a08309b93c5fd9810) (Consulta 15/04/24).

[11] F. Estabillo, Determinación del aprovechamiento eólico para un edificio sustentable en la ciudad de Rosario. Tesis de Maestría en Energía para el Desarrollo Sostenible, UNR, agosto 2015.

[12] I. Cruz, La integración urbana de los miniaerogeneradores. CIEMAT, 2012
https://o2o3.files.wordpress.com/2012/03/cruz_ciemat_2012-01-26_getafe_minieolica-entorno-urbano.pdf (Consulta 15/04/24).

[13] Gobierno de Santa Fe, Ley Provincial N° 12692. 2006.
<https://www.santafe.gov.ar/normativa/getFile.php?id=224203&item=109160&cod=bc6b4e2daacb9b11ad5d08f712c96d60> (Consulta 15/04/24).

[14] A. Llombart Estopiñan, Aprovechamiento del Recurso Eólico en Ciudades. Universidad de Zaragoza, Marzo 2010.

[15] L. Ledo, P. B. Kosasih and P. Cooper, Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. 2010 University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia

[16] A. G. Davenport, The Dependence of Wind Loads on Meteorological Parameters, In *Proc. Int. Res. Sem. On Wind Effects on Buildings and Structures*, 1967, Vol. 1. Ottawa: Univ. of Toronto Press, pp. 19-82.

[17] A. G. Davenport, *Wind Tunnel Testing: A General Outline*; The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Science London, Ontario, Canada, May 2007.

[18] J. E. Cermak and K. Takeda, Physical modeling of urban air-pollutant transport, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1985, **21**, 51-67.

[19] F. Toja-Silva, C. Peralta, O. Lopez-Garcia, J. Navarro, I. Cruz, On Roof Geometry for Urban Wind Energy Exploitation in High-Rise Buildings, 2015, 12, 14-16.

[20] Anemómetros Online, <https://anemometros.online/> (Consulta 15/04/24).

[21] Ep Ehrler Prüftechnik Engineering, Wilhelm-Hachtel-Str. 8 97996 Niederstetten.
<https://www.ep-e.com/> (Consulta 15/04/24).

[22] Measwind, Calle Hermana Matilde 37, Cariñena 50400 Zaragoza – España +34 658 311 207 <https://measwind.com/> (Consulta 15/04/24).

[23] J. Tornero, A. Cueva Pérez y F. Gómez, Ciudad y confort ambiental. *Cuadernos de Geografía*, 2006, **80**, 147-182.

- [24] M. Hebbert and V. Jankovic, Street Canyons and Canyon Streets: the strangely separate histories of urban climatology and urban design. s.l. : *Climate Science in Urban Design*, 2011, Working Paper 1. The University of Manchester.
- [25] F. Chueca Goitia, *Breve historia del urbanismo*. 1970. Madrid: Alianza.
- [26] E. Theodossiou, V. N. Kanimanis y E. M. Katsiotis, La Torre dels Vents, Atenes (La Torre de los vientos de Atenas). *Revista de la Societat Catalana de Gnomonica*, mayo-agosto de 2005, **52**, 11-19.
- [27] S. Kostof, *The City Shaped - Urban Patterns and Meanings through History*. 1991, Londres: Thames & Hudson.
- [28] C. B. Oleart, La historia del viento en las ciudades, *Cuaderno de Investigación Urbanística* N 132, Setiembre-Octubre 2020, <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7743605.pdf> (Consulta 15/04/24).
- [29] C. Blanco, Quién es quién, Daniel Bernoulli. *Revista Índice* 19, 2006.
- [30] Met Office: National Meteorological Library and Archive. *Fact sheet 6 — The Beaufort Scale*, 2010. http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/b/7/Fact_sheet_No.6.pdf (Consulta 15/04/24).
- [31] V. Olgyay. *Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Editorial Gili. 1998.
- [32] V. Rodríguez, *Introducción a la arquitectura bioclimática*. 2001, México, D.F.: Limusa.
- [33] B. Givoni. *Man, Climate and Architecture*. Architectural Science Services. Publishers Ltd. London
- [34] A. Konya, *Diseño en climas cálidos*, 1981. H. Blume Ediciones Rosario, Madrid. https://www.academia.edu/37241630/Dise%C3%B1o_en_climas_c%C3%A1lidos_Alan_Konya_ARQUILIBROS_AL (Consulta 15/04/24).
- [35] R. Qaoud and A. Djamel, The impact of constructivism density of the urban tissue in improving the physical urban ambience of the free space - The street- for Saharian cities. The study of the case city of Biskra, *Energy Procedia*, July 2017 **119**:201-213 DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.070 https://www.researchgate.net/figure/the-effect-of-the-urban-environment-of-wind-movement-Source-Allan-konya2011_fig3_319475260 (Consulta 15/04/24).
- [36] T. R. Oke and C. S. B Grimmond, Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **38** (9), pp. 1262-

1292.

[37] J. Fariña Tojo, *La ciudad y el medio natural*, 1998, Akal.

[38] J. Fariña Tojo, *Criterios ambientales en el diseño y la construcción de la ciudad*, 2003 Universidad Politécnica de Madrid.

[39] E. Higuera, *Urbanismo Bioclimático*, 2006, Ed. Gustavo Gili.

[40] A. Hernández (Coord.), *Manual de Diseño Bioclimático Urbano: Manual de recomendaciones para la elaboración de normativas urbanísticas*. 2013, Braganza: Instituto Politécnico de Bragança.

[41] M. del C. Casas y M. Alarcón, *Meteorología y clima*. Barcelona, 1999. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. ISBN: 84-8301-355-X.

[42] L. Schiller, Über den Strömungswiderstand von Rohren verschiedenen Querschnitts- und Rauigkeitsgraden, *ZAMM*, 1923, 3, 2-13.

Schiller (1923) y

[43] J. Nikuradse, Strömungsgesetze in rauhen Rohren, VDI-Forschungsheft, 1933, 361.

[44] H. Schlichting y K. Gersten, *Teoría de la capa límite*, 2000, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-66270-9

[45] R. B. Stull, An introduction to boundary layer meteorology. *Atmospheric Sciences Library*, 2009

[46] K. Wark, C. F. Warner and W. T. Davis, *Air pollution: Its origin and control* (3ra. Ed.). 1998. Boston: Addison-Wesley.

[47] R. B. Stull, *Meteorology for scientists and engineers*, 3rd Edition. 2011. Univ. of British Columbia. ISBN 978-0-88865-178-5

[48] J. R. Garratt, *The atmospheric boundary layer*. 1992, Cambridge University Press. ISBN: 0-521-46745-4.

[49] M. CASTRO, R. GONZÁLEZ y A. PORTELA, Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico meteorológico. *Física de la Tierra* 1991; **3**: 103-138. Ed. Universidad Complutense. Madrid.

[50] R. Gasch and J. Tvele, *Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation*. 2ª edición. Berlín: Springer, 2012. 548 pp. ISBN: 978-3-642-22937-4.

[51] J. Manwell, J. Mcgowan and A. Rogers, *Wind energy explained: Theory, design and*

application. 2ª edición. Chichester (West Sussex): John Wiley & Sons Ltd, 2009. 689 pp. ISBN: 978-0-470-01500-1.

[52] J. A. Businger, *The marine boundary layer, from air-sea interphase to inversion*. 1985. University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D6PC30BJ

[53] V. W. Ekman, On the influence of the earth's rotation on ocean-currents, *Arkiv for Matematik, Astronomi Och Fysik*, 1905, V 2, **11**, 1-52.

[54] J. Fernando, Fluid Dynamics of Urban Atmospheres in Complex Terrain. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, V42, s 365-389).

[55] CIRSOC: Centro de Investigación de los Reglamentos de Seguridad de las Obras Civiles. CIRSOC 102: Acción del viento en las construcciones. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial. 2005.

[56] I. Abohela, S. Dudek and N. Hamza, Roof Mounted Wind Turbines: The influence of roof shape, building height and urban location on wind speed. PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture Lima, Perú 7-9 November 2012

[57] A. Sayigh and D. Milborrow (eds.). *The Age of Wind Energy: Progress and Future Directions from a Global Perspective*, Springer, ISSN 2522-8927 ISSN 2522-8935 (electronic) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26446-8>

[58] J. Medrano Hernández y C. Moreno Figueredo, *Análisis sobre la influencia de la turbulencia en la producción energética de las turbinas eólicas*. 2018. Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

[59] D. Johanning Cordero y R. Castillo Barahona, Programa de Ingeniería Estructural N° 2, Volumen 1, Año 2016 - Universidad de Costa Rica.

[60] J. Lassig, U. Jara, J. J. Valle Sosa, and C. Palese, Urban Environment: Characterization of the Wind in Flat Roofs (Chapter 12), In: *The Age of Wind Energy, Progress and Future Directions from a Global Perspective*. Springer, 2020, 205-218; ISSN 2522-8927; <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26446-8>

[61] S. R. Raichman y E. Totter, *Geometría analítica para ciencias e ingenierías*. 1a Ed. ilustrada. Mendoza, Universidad Nacional de Cuyo, 2016. ISBN 978-987-575-125-5

[62] M. Evans y J. Rosenthal, *Probabilidad y Estadística: La Ciencia de la Incertidumbre*. 2005. Reverte – Barcelona.

ANEXOS

ANEXO I

(a)

Detalle de los dos túneles de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue en Neuquén.

Para este proyecto solo se utilizó en túnel número 1.

TÚNEL DE VIENTO N°1 (DIDÁCTICO) FACULTAD DE INGENIERÍA – UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

Posee las siguientes características:

- Sección de pruebas 0,30 x 0,30 cm
- Largo de la cámara de ensayos 3,00 m
- Motor eléctrico monofásico de 1HP
- Control de velocidad electrónico
- Velocidad máxima del viento en la sección de pruebas de 12 m/s
- Números de Reynolds a desarrollar entre 10^4 y 5×10^4

Túnel de Viento Didáctico



Control de Velocidad

Motor Eléctrico con Hélice

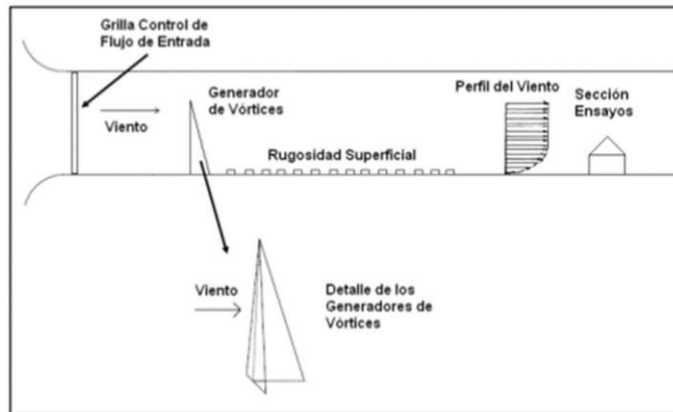


Sección de prueba 30 x 28 cm
Motor eléctrico de 1 HP

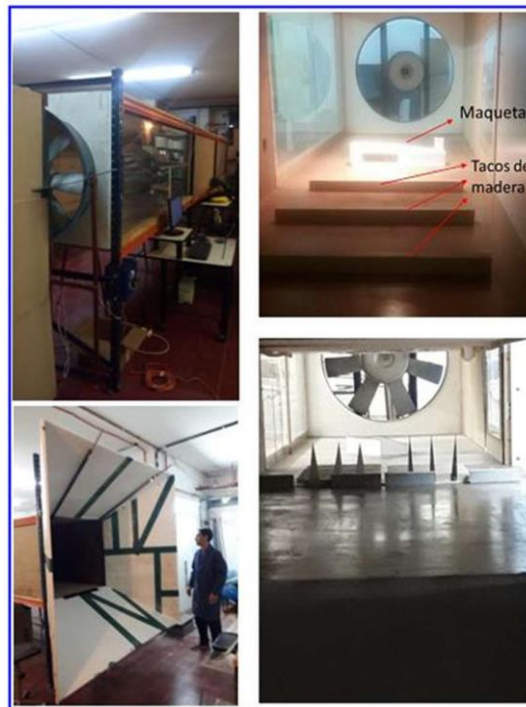
TÚNEL DE VIENTO N°2 (CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA) FACULTAD DE INGENIERÍA – UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

Posee las siguientes características:

- Sección de pruebas 0,90 x 0,90 cm
- Largo de la cámara de ensayos 7,00 m
- Motor eléctrico monofásico de 6 CV
- Control de velocidad electrónico
- Velocidad máxima del viento en la sección de pruebas de 10 m/s
- Números de Reynolds a desarrollar entre 10^4 y 5×10^5



Esquema de un túnel de viento de capa límites donde los generadores de vórtices y la rugosidad se ajustan para reproducir la capa límite atmosférica.



Imágenes del túnel de viento N°2.

(b)

PLANTEO DE LAS SEMEJANZAS ENTRE PROTOTIPO Y MODELO

La simulación física que se realizó en el túnel de viento nos lleva a plantear dos semejanzas básicas de la Mecánica de los Fluidos: geométrica y cinemática, por lo que deberemos definir una escala de longitudes, y una escala de velocidades.

En Ingeniería del Viento, se debe mantener la escala de longitud de turbulencia del viento incidente entre el prototipo y el modelo. Ello se logra manteniendo el mismo número de Jensen (Je) [1], el cual se define como:

$$Je = L / Z_0 \quad (1)$$

Donde L es la altura del objeto, y Z_0 es el coeficiente de rugosidad aerodinámica del suelo.

Los subíndices P y M representan al prototipo y al modelo respectivamente.

Por lo tanto $Je_P = Je_M$ lo que nos dá: $L_P / Z_{0P} = L_M / Z_{0M}$

Luego
$$L_P / L_M = Z_{0P} / Z_{0M} \quad (2)$$

Lo que significa que la escala de longitudes $L_P / L_M = Z_{0P} / Z_{0M}$ debe ser igual a la relación de rugosidad aerodinámica entre prototipo (viento real) y modelo (dentro del túnel de viento). Para lograr esto se colocan en el piso del túnel, tacos de madera para obtener la adecuada rugosidad aerodinámica (Z_0) dentro del túnel, como se refleja en la Figura.

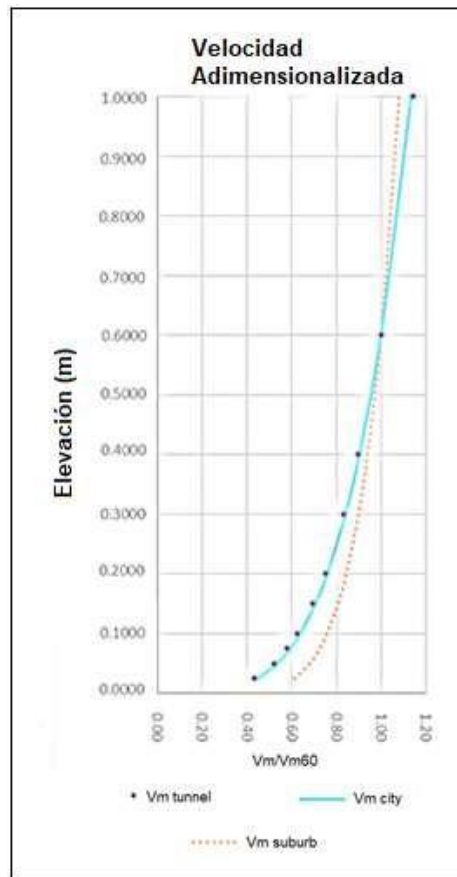


Ubicación de tacos para lograr el Z_0 necesario dentro del túnel de viento.

Por otra parte, el túnel de viento tiene límites de tamaño, por lo que primero se debe definir la escala de longitudes en virtud de la sección de prueba del túnel de viento, teniendo en cuenta los efectos de bloqueo, donde según el reglamento CIRSOC 102 se recomienda que el área del objeto no supere el 8% del área de la sección de prueba [2]. Teniendo en cuenta esto se define una escala de longitudes igual a 300.

La ciudad de Rosario es una de las más grandes del país, cuyo valor típico de Z_0 es del orden de de 1,00 m, por lo que el Z_0 del modelo debe ser: $Z_{0M} = 1/300 = 0,0033$. Esto se logró colocándole tacos de sección cuadrada de 7,5 cm espaciados cada 50 cm sobre el piso del túnel de viento, aguas arriba de la sección de prueba (como se ilustra en la Figura).

El resultado de la calibración del túnel de viento, derivó en un perfil de velocidades para un suelo de ciudad con exponente $P = 0,40$, y una intensidad de turbulencia de 0,15. La Figura 4 representa dicho perfil de velocidades.



Perfil de velocidades generado dentro del túnel de viento (puntos negros), para una rugosidad de ciudad (línea celeste), (los puntos rojos corresponden a una rugosidad suburbana).

El paso siguiente es definir la escala de velocidades, para ello se debe elegir un número adimensional que represente el fenómeno físico [3].

El número de Froude es uno de los números adimensionales utilizado en Mecánica de los Fluidos. Este número expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad actuantes en un flujo.

Es aplicado en particular para el caso en que existe una superficie libre de fluido (como puede ocurrir en un río), en la que, al formarse ondas, éstas se amortiguarán por acción de la gravedad.

A pesar de ello, cabe decir que esto responde a un fenómeno más general, que es la aparición de una onda de gravedad externa luego de que el flujo se encuentra con un obstáculo.

La partícula de aire es desplazada (en dirección vertical) desde su posición inicial, debido a un obstáculo mecánico como una montaña o un edificio (en nuestro caso los edificios dentro de la ciudad), luego la gravedad hace de fuerza restauradora logrando que vuelva a su posición inicial, como se ilustra en la Figura.

Similitud del viento pasando sobre una montaña y un vehículo en reposo.

El número de Froude se expresa como:



$$Fr = V / (g \cdot H)^{1/2} \quad (3)$$

Donde V es la velocidad del viento, g la gravedad y H la altura del objeto.

La condición es igualdad del número de Froude en el prototipo y el modelo,

$$Fr_p = Fr_m$$

$$V_p / (g \cdot H_p)^{1/2} = V_m / (g \cdot H_m)^{1/2}$$

Despejando:

$$V_p / V_m = (H_p / H_m)^{1/2} \quad (4)$$

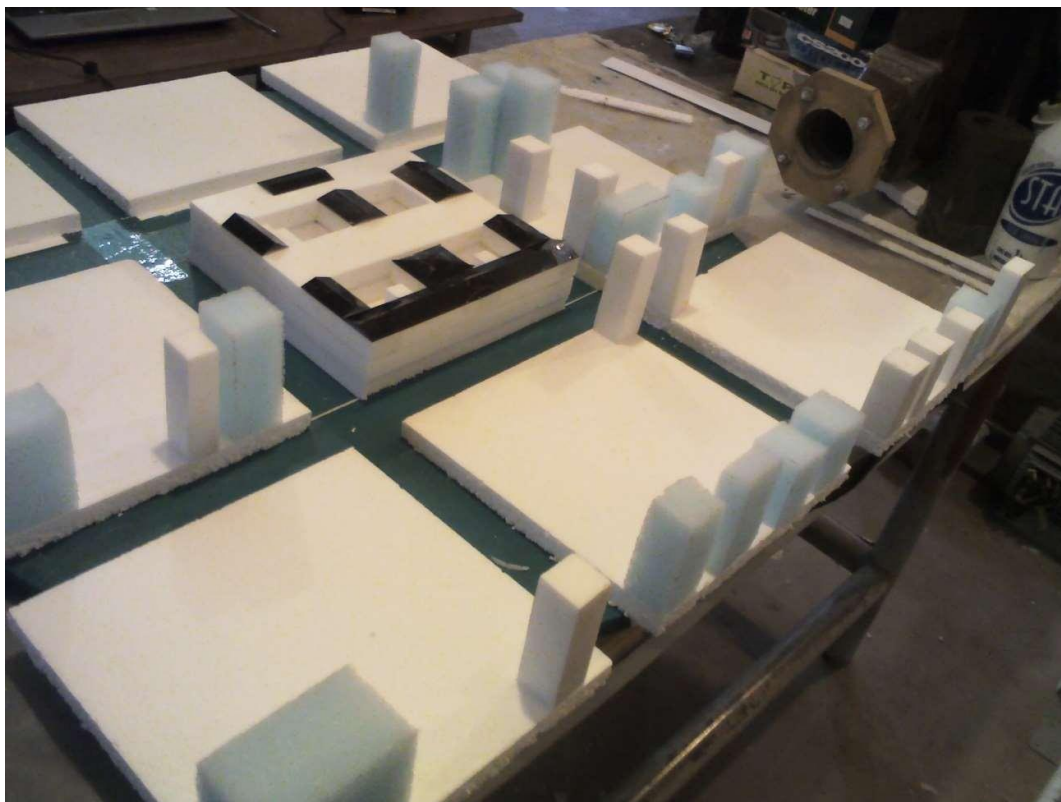
Luego queda definida la escala de velocidades β como:

$$\beta = (\alpha)^{-1/2} \quad (5)$$

Entonces $\beta = 17,321$

EL MODELO FÍSICO

Se reprodujo la manzana donde se encuentra la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la UNR, y sus ocho manzanas circundantes a una escala 1:300, como se muestra en la figura del modelo.



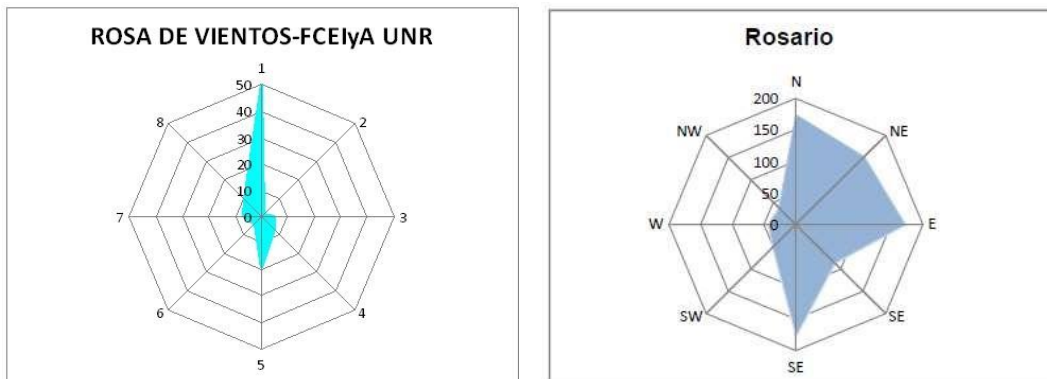
Modelo a ensayar, en la manzana central se simula el edificio de la FCElyA.

El lugar de estudio es la azotea del laboratorio de Energías Renovables de la UNR. En la foto se indica con un círculo la ubicación del anemómetro de la estación meteorológica.



Azotea del Laboratorio de Energías Renovables de la UNR, donde en el círculo rojo se indica la veleta y el anemómetro de la estación meteorológica. [4]

Sansoni [4] al evaluar el potencial eólico sobre el techo del Laboratorio de Energías Renovables de la FCEIA-UNR, sobre la base de mediciones in situ, observó que la Rosa de Vientos obtenidas en las mediciones, distaba mucho de los datos climatológicos del aeropuerto internacional de la ciudad de Rosario pertenecientes al SMN.



Derecha: Rosa de Vientos del aeropuerto de Rosario periodo 2004-2013 datos del SMN; Izquierda: Rosa de Vientos obtenida sobre el techa de la FCEIYA de la UNR durante el año 2012 [4].

Como se puede observar en la figura, en las mediciones de la FCEIyA prácticamente han desaparecido los vientos del Este, esto se debe al efecto “barrera”.

El efecto barrera se crea cuando un objeto largo comparado con su altura, es investido por un flujo casi perpendicular al mismo, entonces a sotavento del objeto (barrera) el flujo tiende a alinearse paralelo a la barrera. Esto se debe a que detrás del objeto se produce una depresión que reorienta al flujo “pegándolo” hacia la pared. Por otra parte, la intensidad de turbulencia es muy elevada.

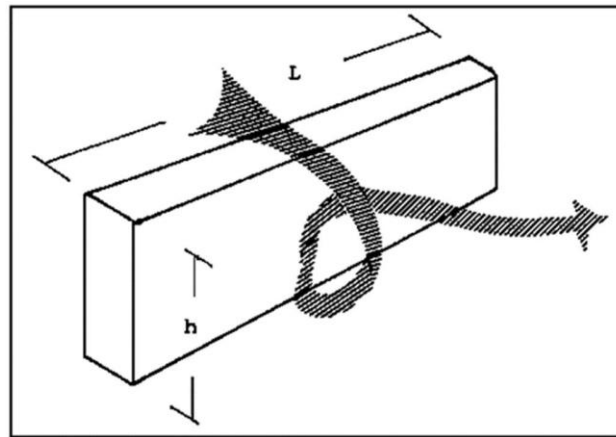


Ilustración del efecto barrera extraído del libro “Fluido dinámica del ambiente Morosi julio, Boldes Ulsilas, Colman Jorge – La Plata 1984.

EL ENSAYO FÍSICO

El ensayo consistió en analizar el viento de dirección Este sobre el techo del laboratorio.

Se realizaron dos tipos de mediciones: una cualitativa con cata vientos para observar la zona donde el viento cambiaba de dirección (de Este pasaba a Norte y/o Sur); y otra cualitativa consistente en medir la intensidad del viento con un anemómetro de film caliente.

En la figura 10 se observa detrás del techo a dos agua de color negro, el cata viento que está a 90° (dirección Norte) con respecto a la dirección del viento que es del Este. En un video se puede ver como el mismo oscila cambiando de Norte a Sur en forma aleatoria, indicando el efecto barrera antes mencionado.

Al medir la intensidad del viento con el anemómetro de film caliente, este se lo direccionó en los tres ejes ortogonales, indicando el eje X como la dirección del viento a lo largo del túnel, cuya componente de velocidad se denomina “u”; la componente lateral corresponde al eje Y y la componente de velocidad es “v”, por último la componente vertical es en el eje Z y la denominaremos “w”.



Detrás del techo a dos aguas de color negro, se observa el cata viento que está a 90° (dirección Norte) con respecto a la dirección del viento (del Este).

En la Tabla I se indican los valores obtenidos, con las velocidades adimensionales U, V, W, de la siguiente forma:

$$U = u / V_{\text{Túnel}}$$

$$V = v / V_{\text{Túnel}}$$

$$W = w / V_{\text{Túnel}}$$

Donde $V_{\text{Túnel}}$ es la velocidad dentro del túnel de viento.

Tabla: Intensidad del viento medida en la zona de interés

	U	V	W
	0,1	0,5	0,01
IT (%)	12	18	10

REFERENCIAS DE ESTE ANEXO

- [1] J. Lassig, Determinación de la escala de longitudes, para túneles de viento atmosférico; Nota Técnica N° 1 LaDiFA, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Comahue. Octubre 2019.
- [2] CIRSOC: Centro de Investigación de los Reglamentos de Seguridad de las Obras Civiles. CIRSOC 102: Acción del viento en las construcciones. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial. 2005.
- [3] A. G. Davenport, *Wind Tunnel Testing: A General Outline*; The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, The University of Western Ontario, Faculty of Engineering Science London, Ontario, Canada, May 2007.
- [4] I. Sansoni, Determinación del potencial eólico en el edificio de la FCEIA / UNR, para la instalación de un pequeño aerogenerador con fines didácticos. Tesis de Maestría en Energía para el Desarrollo Sostenible, FCEIA-UNR, 2020.
- [5] J. Lassig, C. Palese y A. Apcarian, *Viento, ciudad y edificios*, 2009. Editores Particulares, ISBN 978-987-05-6325-9.

ANEXO II

Hoja de datos del microcontrolador Espressif ESP32

The ESP32 is a popular microcontroller and wireless system-on-chip (SoC) developed by Espressif Systems. It is widely used in IoT (Internet of Things) applications and various embedded systems. The ESP32 is the successor to the ESP8266 and offers significant improvements in terms of processing power, connectivity options, and versatility. Here are some key features and specifications of the ESP32:

Dual-Core Processor: The ESP32 features a dual-core Xtensa LX6 microcontroller, which provides better performance and multitasking capabilities compared to single-core microcontrollers.

CPU Speed: Each core can run at up to 240 MHz, making it suitable for a wide range of applications.

Wireless Connectivity: The ESP32 offers multiple wireless communication options, including Wi-Fi (802.11 b/g/n), Bluetooth (BLE and Classic), and support for both client and access point modes.

Memory: The ESP32 typically includes 520KB of SRAM and 4MB of flash memory, providing ample storage for program code and data.

GPIO Pins: The ESP32 provides a significant number of GPIO (General-Purpose Input/Output) pins, allowing it to interface with a variety of sensors, displays, and external devices.

Analog-to-Digital Conversion (ADC): It has a 12-bit SAR ADC with multiple channels for analog sensor interfacing.

Digital-to-Analog Conversion (DAC): The ESP32 includes two 8-bit DAC channels.

Peripherals: It features a wide range of peripherals, including UART, I2C, SPI, PWM, and more, making it suitable for various interfacing requirements.

Integrated Sensors: Some ESP32 modules come with integrated sensors, such as temperature and humidity sensors.

Low-Power Modes: The ESP32 offers various low-power modes to reduce power consumption in battery-powered applications.

Development Environment: The ESP32 can be programmed using the Arduino IDE, PlatformIO, and the Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF).

Application Areas: The ESP32 is used in a broad spectrum of applications, including IoT devices, home automation, wearables, wireless communication modules, smart appliances, and more.

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

ANEXO III

Hoja de datos del conversor analógico/ digital Texas Instruments ADS 1115



ADS1113, ADS1114, ADS1115

SBAS444D – MAY 2009 – REVISED JANUARY 2018

ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator

1 Features

- Ultra-Small X2QFN Package:
2 mm × 1.5 mm × 0.4 mm
- Wide Supply Range: 2.0 V to 5.5 V
- Low Current Consumption: 150 μ A
(Continuous-Conversion Mode)
- Programmable Data Rate:
8 SPS to 860 SPS
- Single-Cycle Settling
- Internal Low-Drift Voltage Reference
- Internal Oscillator
- I²C Interface: Four Pin-Selectable Addresses
- Four Single-Ended or Two Differential Inputs
(ADS1115)
- Programmable Comparator (ADS1114 and
ADS1115)
- Operating Temperature Range:
–40°C to +125°C

2 Applications

- Portable Instrumentation
- Battery Voltage and Current Monitoring
- Temperature Measurement Systems
- Consumer Electronics
- Factory Automation and Process Control

3 Description

The ADS1113, ADS1114, and ADS1115 devices (ADS111x) are precision, low-power, 16-bit, I²C-compatible, analog-to-digital converters (ADCs) offered in an ultra-small, leadless, X2QFN-10 package, and a VSSOP-10 package. The ADS111x devices incorporate a low-drift voltage reference and an oscillator. The ADS1114 and ADS1115 also incorporate a programmable gain amplifier (PGA) and a digital comparator. These features, along with a wide operating supply range, make the ADS111x well suited for power- and space-constrained, sensor measurement applications.

The ADS111x perform conversions at data rates up to 860 samples per second (SPS). The PGA offers input ranges from ± 256 mV to ± 6.144 V, allowing precise large- and small-signal measurements. The ADS1115 features an input multiplexer (MUX) that allows two differential or four single-ended input measurements. Use the digital comparator in the ADS1114 and ADS1115 for under- and overvoltage detection.

The ADS111x operate in either continuous-conversion mode or single-shot mode. The devices are automatically powered down after one conversion in single-shot mode; therefore, power consumption is significantly reduced during idle periods.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
ADS111x	X2QFN (10)	1.50 mm × 2.00 mm
	VSSOP (10)	3.00 mm × 3.00 mm

(1) For all available packages, see the package option addendum at the end of the data sheet.

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1114.pdf>

ANEXO IV

Hoja de datos del sensor Bosch BME 280

Bosch Sensortec



BME280

Integrated Environmental Unit

GENERAL DESCRIPTION

The BME280 is an integrated environmental sensor developed specifically for mobile applications where size and low power consumption are key design constraints. The unit combines individual high linearity, and high accuracy sensors for pressure, humidity and temperature in an 8-pin metal-lid 2.5 x 2.5 x 0.93 mm³ LGA package. The BME280 designed for low current consumption (3.6 µA @1Hz), long term stability, and high EMC robustness. The humidity sensor features an extremely fast response time which supports performance requirements for emerging applications such as: context awareness, and high accuracy over a wide temperature range. The pressure sensor is an absolute barometric pressure sensor which features exceptionally high accuracy and resolution at very low noise. The integrated temperature sensor has been optimized for very low noise and high resolution. It is primarily used for temperature compensation of the pressure and humidity sensors, and can also be used for estimating ambient temperature. The BME280 supports a full suite of operating modes which provides the flexibility to optimize the device for power consumption, resolution, and filter performance.

BME280 TARGET APPLICATIONS

- ▶ Context awareness, e.g. skin detection, room change detection
- ▶ Fitness monitoring/well-being
 - Warning regarding dryness or high temperatures
 - Measurement of volume and air flow
- ▶ Home automation control
 - Control heating, ventilation, air conditioning (HVAC)
- ▶ Internet of things
- ▶ GPS enhancement (e.g. time-to-first-fix improvement, dead reckoning, slope detection)
- ▶ Indoor navigation (change of floor detection, elevator detection)
- ▶ Outdoor navigation, leisure and sports applications
- ▶ Weather forecast
- ▶ Vertical velocity indication (rise/sink speed)

TECHNICAL SPECIFICATIONS

BME280 (preliminary) Technical data	
Package dimensions	8-Pin LGA with metal 2.5 x 2.5 x 0.93 mm ³
Operation range (full accuracy)	Pressure: 300 ... 1100 hPa Temperature: -40 ... +85 °C
Supply voltage V _{DDIO}	1.2 ... 3.6 V
Supply voltage V _{DD}	1.71 ... 3.6 V
Interface	I ² C and SPI
Average current consumption (typ.) (1Hz data refresh rate)	1.8 µA @ 1 Hz (H, T) 2.8 µA @ 1 Hz (P, T) 3.6 µA @ 1 Hz (H, P, T) T = temperature
Average current consumption in sleep mode	0.1 µA
Humidity sensor	
Response time (τ _{63%})	1 s
Accuracy tolerance	±3 % relative humidity
Hysteresis	±2 % relative humidity
Pressure sensor	
RMS Noise	0.2 Pa (equiv. to 1.7 cm)
Sensitivity Error	±0.25 % (equiv. to 1 m at 400 m height change)
Temperature coefficient offset	±1.5 Pa/K (equiv. to ±12.6 cm at 1 °C temperature change)
RoHS compliant, halogen-free, MSL1	

https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bme280-f1000.pdf

ANEXO V

Valores obtenidos por el anemómetro 3D en prueba de campo.

Nro de Orden	Vel_x [m/s]	Vel_y [m/s]	Vel_z [m/s]	T [°C]	H [%]	P [hPa]
1	5,21	5,12	0,63	26,62	46,62	1011,66
2	5	5,2	0,7	26,68	46,59	1011,63
3	4,86	5,13	0,71	26,68	46,59	1011,63
4	4,48	5,14	0,79	26,73	46,67	1011,64
5	3,5	5,27	0,78	26,77	46,68	1011,61
6	3,19	5,18	0,86	26,8	46,65	1011,64
7	3,18	5,19	0,92	26,82	46,69	1011,6
8	1,82	6,23	1	26,83	46,83	1011,64
9	1,57	6,29	1,02	26,83	46,83	1011,64
10	1,2	5,75	1,1	26,85	46,74	1011,63
11	1,5	5,34	1,13	26,86	47,01	1011,65
12	1,53	5,57	1,21	26,87	47,01	1011,66
13	1,91	4,97	1,29	26,88	47,13	1011,65
14	2,49	4,87	1,29	26,88	47,34	1011,68
15	2,74	4,47	1,29	26,88	47,34	1011,68
16	4,34	5,14	1,24	26,89	47,51	1011,66
17	3,39	5,27	1,24	26,9	47,82	1011,65
18	3,06	5,18	1,24	26,9	48,07	1011,67
19	3,08	5,19	1,2	26,91	48,37	1011,67
20	1,9	6,23	1,82	26,91	48,37	1011,67
21	1,62	6,29	1,57	26,91	48,61	1011,64
22	1,21	5,75	1,2	26,92	48,99	1011,66
23	1,49	5,34	1,5	26,93	49,19	1011,66
24	1,51	5,57	1,53	26,93	49,32	1011,65
25	1,87	4,97	1,91	26,93	49,27	1011,67
26	2,46	4,87	2,49	26,93	49,27	1011,67
27	2,69	4,47	2,74	26,93	49,28	1011,65
28	2,64	4,35	2,72	26,94	49,28	1011,68
29	3,15	4,06	3,15	26,95	49,28	1011,67
30	3,34	4,06	3,54	26,95	49,26	1011,68
31	4,6	1,6	1,6	26,95	49,13	1011,67
32	2,5	2,41	1,39	26,95	49,13	1011,67
33	3,52	3,5	1,82	26,95	49,22	1011,67
34	2,58	2,58	0,53	26,96	49,12	1011,67
35	0,68	0,65	0,65	26,97	49,16	1011,68

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

36	0,84	0,82	0,82	26,97	49,11	1011,68
37	0,92	0,91	0,91	26,97	49,11	1011,68
38	1,09	1,09	1,08	26,97	49,04	1011,7
39	1,17	1,17	1,16	26,97	48,88	1011,66
40	1,09	1,09	1,08	26,98	48,82	1011,65
41	1,11	1,07	1,07	26,98	48,61	1011,68
42	0,98	0,85	0,85	26,97	48,28	1011,64
43	0,65	0,41	0,41	26,97	48,28	1011,64
44	0,55	0,55	0,6	26,98	48,21	1011,67
45	0,7	0,58	0,61	26,98	47,88	1011,64
46	0,82	0,65	0,61	26,97	47,62	1011,66
47	0,97	0,86	0,84	26,97	47,32	1011,64
48	1,05	0,94	0,94	26,97	47,05	1011,66
49	1,13	1,04	1,03	26,97	47,05	1011,66
50	0,97	0,86	0,84	26,97	46,84	1011,67
51	0,94	0,89	0,88	26,97	46,8	1011,66
52	0,86	0,81	0,79	26,97	46,76	1011,68
53	0,7	0,61	0,58	26,97	46,68	1011,65
54	2,67	4,92	0,58	26,97	46,68	1011,65
55	1,97	4,18	0,63	26,98	46,66	1011,67
56	1,66	3,88	0,58	26,98	46,49	1011,66
57	2,11	3,55	0,58	26,98	46,54	1011,64
58	1,34	3,1	0,6	26,98	46,42	1011,67
59	2,06	2,52	0,58	26,98	46,37	1011,68
60	2,33	2,36	0,53	26,98	46,37	1011,68
61	2,18	2,28	0,53	26,98	46,12	1011,66
62	1,72	2,36	0,49	26,98	45,98	1011,68
63	1,78	2,94	0,58	26,98	45,91	1011,66
64	2,32	2,88	0,55	26,98	45,75	1011,65
65	2,65	3,23	0,53	26,98	45,69	1011,67
66	2,51	3,49	0,58	26,98	45,69	1011,67
67	3,19	4,18	0,58	26,98	45,59	1011,66
68	3,58	4,48	0,58	26,98	45,39	1011,67
69	3,18	4,48	0,63	26,97	45,26	1011,63
70	2,2	3,94	0,7	26,97	45,24	1011,64
71	1,85	3,97	0,71	26,97	45,24	1011,64
72	1,77	4	0,79	26,97	45,42	1011,65
73	1,86	4,23	0,78	26,98	45,48	1011,65
74	2,16	4,1	0,86	26,98	45,58	1011,67
75	3,5	4,84	0,92	26,98	45,74	1011,67

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

76	4,37	5,39	1	26,98	45,82	1011,68
77	4,63	5,95	1,02	26,98	45,82	1011,68
78	4,37	5,85	1,1	26,98	46,14	1011,69
79	4,25	5,78	1,13	26,98	45,91	1011,66
80	4,07	5,47	1,21	26,98	45,75	1011,65
81	2,79	4,44	1,29	26,98	45,69	1011,67
82	2,69	4,36	1,29	26,98	45,69	1011,67
83	1,68	3,91	1,29	26,98	45,59	1011,66
84	1,89	3,13	1,24	26,98	45,39	1011,67
85	2,21	2,72	1,24	26,97	45,26	1011,63
86	2,42	2,42	1,24	26,97	45,24	1011,64
87	2,1	2,48	1,16	26,97	45,24	1011,64
88	0,76	3,15	1,05	26,97	45,42	1011,65
89	3	4,17	1,05	26,98	45,48	1011,65
90	3,5	4,55	0,98	26,98	45,58	1011,67
91	4,47	5,15	0,89	26,98	45,74	1011,67
92	5,41	5,93	0,82	26,68	46,59	1011,63
93	0,49	0,49	0,76	26,73	46,67	1011,64
94	0,61	0,58	0,7	26,99	45,02	1011,68
95	0,66	0,63	0,66	26,99	44,9	1011,67
96	0,55	0,55	0,65	26,68	46,59	1011,63
97	0,6	0,55	0,66	26,73	46,67	1011,64
98	0,55	0,55	0,7	26,77	46,68	1011,61
99	0,49	0,49	0,7	26,8	46,65	1011,64
100	0,58	0,58	0,76	26,82	46,69	1011,6
101	0,68	0,65	0,82	26,83	46,83	1011,64
102	0,84	0,82	0,82	26,83	46,83	1011,64
103	0,92	0,91	0,82	26,85	46,74	1011,63
104	1,09	1,09	0,82	26,86	47,01	1011,65
105	1,17	1,17	0,82	26,87	47,01	1011,66
106	1,09	1,09	0,82	26,88	47,13	1011,65
107	1,11	1,07	0,76	26,88	47,34	1011,68
108	0,98	0,85	0,76	26,88	47,34	1011,68
109	0,65	0,41	0,7	26,89	47,51	1011,66
110	0,55	0,55	0,63	26,9	47,82	1011,65
111	0,7	0,58	0,63	26,9	48,07	1011,67
112	0,82	0,65	0,58	26,91	48,37	1011,67
113	0,97	0,86	0,55	26,91	48,37	1011,67
114	1,05	0,94	0,55	26,91	48,61	1011,64
115	1,13	1,04	0,58	26,92	48,99	1011,66

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

116	0,97	0,86	0,58	26,93	49,19	1011,66
117	0,94	0,89	0,63	26,93	49,32	1011,65
118	0,86	0,81	0,58	26,93	49,27	1011,67
119	0,7	0,61	0,58	26,93	49,27	1011,67
120	0,49	0,49	0,58	26,98	44,07	1011,72
121	0,41	0,41	0,66	26,98	44,13	1011,69
122	0,58	0,58	0,58	26,98	44,09	1011,7
123	0,58	0,58	0,58	26,98	44,07	1011,68
124	0,58	0,58	0,58	26,98	44,07	1011,68
125	0,58	0,58	0,66	26,98	44,05	1011,67
126	0,53	0,41	0,6	26,98	43,83	1011,66
127	0,49	0,49	0,66	26,97	43,99	1011,69
128	0,53	0,58	0,58	26,98	43,96	1011,7
129	0,49	0,49	0,58	26,97	43,96	1011,68
130	0,53	0,41	0,58	26,97	43,96	1011,68
131	0,68	0,65	0,58	26,97	44,02	1011,68
132	0,49	0,49	0,58	26,97	43,81	1011,7
133	0,95	0,94	0,58	26,96	43,87	1011,69
134	1,13	1,12	0,49	26,96	43,85	1011,69
135	1,09	1,04	0,49	26,96	43,81	1011,69
136	1,06	1,01	0,49	26,96	43,81	1011,69
137	2,52	2,51	0,49	26,96	43,85	1011,71
138	3,55	3,54	0,58	26,96	43,79	1011,68
139	4,91	4,91	0,53	26,96	43,74	1011,7
140	6,18	6,18	0,49	26,96	43,71	1011,67
141	7,63	7,63	0,53	26,96	43,71	1011,67
142	7,63	7,63	0,49	26,95	43,77	1011,69
143	7,3	7,28	0,49	26,96	43,63	1011,67
144	6,96	6,95	0,49	26,95	43,63	1011,67
145	6,79	6,78	0,49	26,95	43,63	1011,67
146	6,87	6,86	0,49	26,95	43,57	1011,67
147	6,95	6,95	0,49	26,95	43,57	1011,67
148	6,65	6,57	0,53	26,95	43,64	1011,66
149	6,02	5,84	0,49	26,95	43,66	1011,69
150	6,29	6,08	0,49	26,95	43,5	1011,7
151	5,87	5,64	0,53	26,95	43,5	1011,69
152	6,05	5,62	0,58	26,95	43,45	1011,68
153	5,83	5,14	0,83	26,95	43,45	1011,68
154	6,23	5,24	1,09	26,95	43,38	1011,7
155	6,35	4,06	1,26	26,95	43,45	1011,71

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

156	6,2	2,76	1,34	26,95	43,45	1011,69
157	6,6	2,33	1,26	26,95	43,46	1011,69
158	7,14	0,58	1	26,95	43,46	1011,69
159	7,15	2,97	0,41	26,95	43,47	1011,7
160	7,47	3,74	1,09	26,95	43,33	1011,7
161	7,41	3,58	1,85	26,95	43,42	1011,71
162	7,5	4,7	2,53	26,95	43,46	1011,7
163	7,96	4,87	1,57	26,95	43,38	1011,72
164	7,79	2,95	1,2	26,95	43,38	1011,72
165	8,33	2,85	1,5	26,95	43,38	1011,7
166	8,74	2,04	1,53	26,95	43,4	1011,67
167	9,12	4,93	1,91	26,95	43,41	1011,68
168	9,94	6,64	2,49	26,95	43,4	1011,67
169	10,83	8,05	2,74	26,95	43,42	1011,71
170	10,67	7,83	2,72	26,95	43,42	1011,71
171	10,54	8,19	3,15	26,94	43,28	1011,68
172	11,06	9,28	3,54	26,94	43,38	1011,69
173	10,83	8,92	1,6	26,94	43,37	1011,67
174	8,49	10,11	1,39	26,94	43,32	1011,69
175	8,32	10,02	1,82	26,94	43,32	1011,69
176	10,32	8,38	1	26,94	43,43	1011,69
177	9,63	7,51	1,02	26,94	43,39	1011,71
178	9,16	7,64	1,1	26,94	43,34	1011,69
179	9,35	7,79	1,13	26,93	43,33	1011,69
180	9,55	7,95	1,21	26,93	43,29	1011,69
181	9,74	8,33	1,29	26,93	43,29	1011,69
182	9,57	7,8	1,29	26,93	43,47	1011,68
183	9,09	6,56	1,29	26,93	43,23	1011,66
184	8,89	6,14	1,24	26,94	43,3	1011,68
185	8,69	6,68	1,24	26,94	43,29	1011,68
186	8,4	6,7	1,24	26,94	43,29	1011,69
187	7,43	6,12	1,16	26,93	43,29	1011,69
188	6,72	6,02	1,05	26,93	43,48	1011,68
189	5,9	5,51	1,05	26,93	43,28	1011,68
190	5,71	5,7	0,98	26,93	43,28	1011,67
191	6,98	4,76	0,89	26,92	43,26	1011,66
192	6,74	4,79	0,82	26,92	43,26	1011,66
193	6,32	4,17	0,76	26,92	43,31	1011,67
194	6,76	2,8	0,7	26,92	43,23	1011,69
195	7,2	1,31	0,66	26,92	43,23	1011,66

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

196	6,38	1,95	0,65	26,91	43,19	1011,68
197	5,7	3,28	0,66	26,91	43,21	1011,68
198	6,3	4,54	0,7	26,91	43,21	1011,68
199	6,27	5,12	0,7	26,91	43,09	1011,69
200	6,25	5,35	0,76	26,91	43,23	1011,68
201	6,86	6,18	0,82	26,91	43,18	1011,67
202	7,52	6,79	0,82	26,91	43,17	1011,68
203	7,69	6,93	0,82	26,9	43,21	1011,68
204	7,41	6,73	0,82	26,9	43,21	1011,68
205	6,96	6,4	0,82	26,91	43,19	1011,71
206	6,74	6,44	0,82	26,9	43,17	1011,67
207	6,62	6,45	0,76	26,91	43,16	1011,68
208	6,67	6,53	0,76	26,9	43,14	1011,7
209	6,62	6,5	1,2	26,9	43,14	1011,7
210	6,47	6,47	1,5	26,9	43,04	1011,68
211	6,55	6,5	1,53	26,9	43,14	1011,68
212	6,31	6,21	1,91	26,9	43,15	1011,69
213	6,03	5,95	2,49	26,9	43,18	1011,69
214	5,96	5,91	2,74	26,9	43,17	1011,67
215	6,29	6,24	2,72	26,9	43,17	1011,67
216	6,22	6,07	3,15	26,9	43,21	1011,66
217	5,9	5,35	3,54	26,89	43,07	1011,66
218	6,28	5,13	1,6	26,9	43,14	1011,66
219	6,48	4,9	1,39	26,89	43,14	1011,68
220	6,28	4,38	1,82	26,89	43,08	1011,66
221	6	4,35	1	26,89	43,08	1011,66
222	6,17	4,08	1,02	26,89	43,09	1011,68
223	6,18	2,43	1,1	26,89	43,09	1011,69
224	6,59	1,34	1,13	26,89	43,1	1011,7
225	7,02	1,65	2,6	26,89	43,15	1011,69
226	7,11	3,06	2,1	26,89	43,15	1011,69
227	6,91	2,14	0,82	26,89	43,27	1011,69
228	7,12	3,35	2,53	26,88	43,03	1011,69
229	7,02	3,84	3,17	26,88	43,06	1011,67
230	6,37	2,65	1,33	26,88	43,07	1011,68
231	6,11	2,65	1,27	26,88	43,1	1011,67
232	5,53	3,07	1,25	26,88	43,1	1011,67
233	5,13	1,28	2,78	26,87	43,1	1011,66
234	5,06	2,12	3,16	26,87	43,08	1011,67
235	4,64	2,43	1,2	26,87	43	1011,67

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

236	4,1	1,62	1,5	26,87	42,99	1011,69
237	3,57	3,52	1,53	26,86	42,95	1011,66
238	3,25	3,25	1,91	26,86	42,95	1011,66
239	3,31	3,3	2,49	26,86	43,02	1011,67
240	2,92	2,89	2,74	26,86	42,94	1011,67
241	3,31	3,28	2,72	26,86	42,93	1011,68
242	2,87	2,85	3,15	26,86	42,88	1011,66
243	3,23	2,96	3,54	26,86	42,88	1011,66
244	4,13	1,38	1,6	26,86	42,88	1011,65
245	4,7	3,28	1,39	26,86	42,97	1011,65
246	5,31	3,88	1,82	26,86	42,88	1011,68
247	5,86	4,56	1	26,85	42,86	1011,68
248	5,86	5,13	1,02	26,85	42,9	1011,69
249	5,6	5,06	1,1	26,85	42,9	1011,69
250	5,07	4,39	1,13	26,85	42,77	1011,64
251	4	3,23	1,66	26,85	42,87	1011,65
252	3,64	2,71	1,71	26,85	42,84	1011,65
253	2,63	2,05	1,09	26,85	42,86	1011,66
254	1	1	1,26	26,84	42,76	1011,65
255	1,18	1,39	1,34	26,84	42,76	1011,65
256	1,92	1,15	1,26	26,84	42,83	1011,67
257	2,62	1,61	1	26,84	42,82	1011,67
258	2,02	2,02	0,41	26,85	42,8	1011,65
259	2,42	2,13	1,09	26,84	42,86	1011,66
260	2,97	2,77	1,85	26,84	42,86	1011,66
261	3,73	4,05	2,53	26,84	42,96	1011,67
262	3,84	4,27	1,57	26,84	42,73	1011,66
263	3,59	4,33	1,2	26,84	42,78	1011,68
264	2,72	3,33	1,5	26,84	42,78	1011,67
265	3,04	3,99	1,53	26,84	42,71	1011,68
266	3,59	4,33	1,91	26,84	42,71	1011,68
267	4,35	4,94	2,49	26,84	42,82	1011,68
268	3,4	4,91	2,74	26,84	42,78	1011,67
269	3,31	4,39	2,72	26,84	42,76	1011,7
270	3,22	4,45	3,15	26,83	42,76	1011,69
271	3,15	3,9	3,54	26,83	42,69	1011,67
272	3	4,02	1,6	26,83	42,69	1011,67
273	2,28	4,18	1,39	26,83	42,76	1011,65
274	2,8	4,29	1,82	26,83	42,74	1011,67
275	2,58	3,87	1	26,82	42,74	1011,64

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

276	1,04	3,71	1,02	26,82	42,76	1011,65
277	0,81	3,44	1,1	26,82	42,76	1011,65
278	0,92	3,1	1,13	26,82	42,69	1011,65
279	2,06	2,77	1,21	26,82	42,74	1011,65
280	2,27	2,91	1,29	26,82	42,72	1011,64
281	2,6	3,17	1,29	26,82	42,72	1011,64
282	2,8	3,08	1,29	26,81	42,68	1011,64
283	2,61	2,81	1,24	26,81	42,68	1011,64
284	2,37	2,46	1,24	26,81	42,7	1011,67
285	2,51	2,52	1,24	26,81	42,73	1011,63
286	2,86	2,86	1,16	26,81	42,71	1011,65
287	3,28	3,28	1,05	26,81	42,7	1011,66
288	3,07	3,08	0,82	26,81	42,76	1011,64
289	3,18	3,22	0,82	26,81	42,76	1011,64
290	3,31	3,38	0,82	26,8	42,79	1011,62
291	3,24	3,36	0,76	26,81	42,72	1011,66
292	3,75	3,92	0,76	26,8	42,7	1011,64
293	3,64	3,9	0,7	26,8	42,74	1011,67
294	4,18	4,21	0,63	26,8	42,74	1011,67
295	4,63	4,63	0,63	26,8	42,74	1011,65
296	4,78	4,79	0,58	26,8	42,59	1011,64
297	4,61	4,64	0,55	26,79	42,71	1011,64
298	4,78	4,79	0,55	26,79	42,71	1011,67
299	5,12	5,12	0,58	26,79	42,82	1011,66
300	4,89	5	0,58	26,79	42,82	1011,66
301	4,72	5,13	0,63	26,78	42,64	1011,64
302	4,34	5,14	0,58	26,79	42,7	1011,64
303	3,39	5,27	0,58	26,79	42,72	1011,64
304	3,06	5,18	0,58	26,79	42,78	1011,66
305	3,08	5,19	0,66	26,78	42,69	1011,67
306	1,9	6,23	0,58	26,78	42,69	1011,67
307	1,62	6,29	0,58	26,78	42,69	1011,66
308	1,21	5,75	0,58	26,78	42,71	1011,64
309	1,49	5,34	0,66	26,78	42,71	1011,62
310	1,51	5,57	0,6	26,78	42,79	1011,65
311	1,87	4,97	0,66	26,78	42,79	1011,65
312	2,46	4,87	0,58	26,78	42,71	1011,66
313	2,69	4,47	0,58	26,78	42,7	1011,64
314	2,64	4,35	0,58	26,78	42,69	1011,65
315	3,15	4,06	0,58	26,62	46,62	1011,66

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

316	3,34	4,06	0,58	26,68	46,59	1011,63
317	1,6	1,6	0,58	26,68	46,59	1011,63
318	2,5	2,41	0,49	26,73	46,67	1011,64
319	3,52	3,5	0,49	26,77	46,68	1011,61
320	5,06	4,83	0,49	26,8	46,65	1011,64
321	5,24	4,6	0,49	26,82	46,69	1011,6
322	6,03	5,23	0,58	26,83	46,83	1011,64
323	5,59	3,88	0,53	26,83	46,83	1011,64
324	5,94	3,7	0,49	26,85	46,74	1011,63
325	5,98	3,01	0,53	26,86	47,01	1011,65
326	6,21	1,97	0,49	26,87	47,01	1011,66
327	6,87	2,3	0,49	26,88	47,13	1011,65
328	6,99	3,36	0,49	26,88	47,34	1011,68
329	7,21	3,73	0,49	26,88	47,34	1011,68
330	7,34	4,51	0,49	26,89	47,51	1011,66
331	7,56	5,27	0,49	26,9	47,82	1011,65
332	8,06	5,82	0,53	26,9	48,07	1011,67
333	8,33	6,06	0,49	26,91	48,37	1011,67
334	9,09	7,25	0,49	26,91	48,37	1011,67
335	8,89	7,32	0,53	26,91	48,61	1011,64
336	9,73	8,55	0,58	26,92	48,99	1011,66
337	10,18	9,13	0,83	26,93	49,19	1011,66
338	10,14	8,81	1,09	26,93	49,32	1011,65
339	10,19	8,57	1,26	26,93	49,27	1011,67
340	10,19	8,94	1,34	26,93	49,27	1011,67
341	10,04	8,92	1,26	26,93	49,28	1011,65
342	10,16	8,98	1	26,94	49,28	1011,68
343	10,18	8,77	0,41	26,95	49,28	1011,67
344	9,67	7,08	1,09	26,95	49,26	1011,68
345	8,75	7,1	1,85	26,95	49,13	1011,67
346	8,62	7,45	2,53	26,95	49,13	1011,67
347	8,26	7,49	1,57	26,95	49,22	1011,67
348	7,82	7,08	1,2	26,96	49,12	1011,67
349	6,24	5,61	1,5	26,97	49,16	1011,68
350	5,61	4,49	1,53	26,97	49,11	1011,68
351	4,69	3,71	1,91	26,97	49,11	1011,68
352	3,33	2,07	2,49	26,97	49,04	1011,7
353	2,36	2,3	2,74	26,97	48,88	1011,66
354	2,91	2,26	2,72	26,98	48,82	1011,65
355	2,9	1,06	3,15	26,98	48,61	1011,68

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

356	3,62	2,73	3,54	26,97	48,28	1011,64
357	4,62	3,99	1,6	26,97	48,28	1011,64
358	5,37	4,77	1,39	26,98	48,21	1011,67
359	5,76	5,06	1,82	26,98	47,88	1011,64
360	6,44	5,92	1	26,97	47,62	1011,66
361	5,35	5,66	1,02	26,97	47,32	1011,64
362	4,57	5,23	1,1	26,97	47,05	1011,66
363	2,67	4,92	1,13	26,97	47,05	1011,66
364	1,97	4,18	1,21	26,97	46,84	1011,67
365	1,66	3,88	1,29	26,97	46,8	1011,66
366	2,11	3,55	1,29	26,97	46,76	1011,68
367	1,34	3,1	1,29	26,97	46,68	1011,65
368	2,06	2,52	1,24	26,97	46,68	1011,65
369	2,33	2,36	1,24	26,98	46,66	1011,67
370	2,18	2,28	1,24	26,98	46,49	1011,66
371	1,72	2,36	1,16	26,98	46,54	1011,64
372	1,78	2,94	1,05	26,98	46,42	1011,67
373	2,32	2,88	1,05	26,98	46,37	1011,68
374	2,65	3,23	0,98	26,98	46,37	1011,68
375	2,51	3,49	0,89	26,98	46,12	1011,66
376	3,19	4,18	0,82	26,98	45,98	1011,68
377	3,58	4,48	0,76	26,98	45,91	1011,66
378	3,18	4,48	0,7	26,98	45,75	1011,65
379	2,2	3,94	0,66	26,98	45,69	1011,67
380	1,85	3,97	0,65	26,98	45,69	1011,67
381	1,77	4	0,66	26,98	45,59	1011,66
382	1,86	4,23	0,7	26,98	45,39	1011,67
383	2,16	4,1	0,7	26,97	45,26	1011,63
384	3,5	4,84	0,76	26,97	45,24	1011,64
385	4,37	5,39	0,82	26,97	45,24	1011,64
386	4,63	5,95	0,82	26,97	45,42	1011,65
387	4,37	5,85	0,82	26,98	45,48	1011,65
388	4,25	5,78	0,82	26,98	45,58	1011,67
389	4,07	5,47	0,82	26,98	45,74	1011,67
390	2,79	4,44	0,82	26,98	45,82	1011,68
391	2,69	4,36	0,76	26,98	45,82	1011,68
392	1,68	3,91	0,76	26,98	46,14	1011,69
393	1,89	3,13	1,2	26,98	45,91	1011,66
394	2,21	2,72	1,5	26,98	45,75	1011,65
395	2,42	2,42	1,53	26,98	45,69	1011,67

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

396	2,1	2,48	1,91	26,98	45,69	1011,67
397	0,76	3,15	2,49	26,98	45,59	1011,66
398	3	4,17	2,74	26,98	45,39	1011,67
399	3,5	4,55	2,72	26,97	45,26	1011,63
400	4,47	5,15	3,15	26,97	45,24	1011,64
401	5,41	5,93	3,54	26,97	45,24	1011,64
402	5,58	6,1	1,6	26,97	45,42	1011,65
403	5,51	6	1,39	26,98	45,48	1011,65
404	5,76	6,1	1,82	26,98	45,58	1011,67
405	5,12	5,54	1	26,98	45,74	1011,67
406	5,27	5,73	1,02	26,68	46,59	1011,63
407	4,89	5,27	1,1	26,73	46,67	1011,64
408	4,5	5,13	1,13	26,99	45,02	1011,68
409	3,56	4,35	2,6	26,99	44,9	1011,67
410	2,84	3,69	2,1	26,68	46,59	1011,63
411	1,72	2,97	0,82	26,73	46,67	1011,64
412	0,99	2,53	2,53	26,77	46,68	1011,61
413	1,84	1,92	3,17	26,8	46,65	1011,64
414	1,2	2,05	1,33	26,82	46,69	1011,6
415	1,95	3,12	1,27	26,83	46,83	1011,64
416	1,81	3,47	1,25	26,83	46,83	1011,64
417	2,6	4,41	2,78	26,85	46,74	1011,63
418	3,56	5,38	3,16	26,86	47,01	1011,65
419	3,78	5,52	1,2	26,87	47,01	1011,66
420	4,63	5,96	1,5	26,88	47,13	1011,65
421	5,11	6,34	1,53	26,88	47,34	1011,68
422	4,62	6,11	1,91	26,88	47,34	1011,68
423	5,22	6,71	2,49	26,89	47,51	1011,66
424	4,93	6,33	2,74	26,9	47,82	1011,65
425	4,43	5,8	2,72	26,9	48,07	1011,67
426	5,07	6,22	3,15	26,91	48,37	1011,67
427	4,92	6,18	3,54	26,91	48,37	1011,67
428	4,51	6,19	1,6	26,91	48,61	1011,64
429	5,07	6,52	1,39	26,92	48,99	1011,66
430	5,85	5,85	1,82	26,93	49,19	1011,66
431	5,75	5,25	1	26,93	49,32	1011,65
432	6,61	5,15	1,02	26,93	49,27	1011,67
433	6,7	4,62	1,1	26,93	49,27	1011,67
434	6,78	4,26	1,13	26,98	44,07	1011,72
435	6,73	4,79	1,66	26,98	44,13	1011,69

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

436	6,55	4,83	1,71	26,98	44,09	1011,7
437	6,95	5,69	1,09	26,98	44,07	1011,68
438	7	5,82	1,26	26,98	44,07	1011,68
439	7,06	5,35	1,34	26,98	44,05	1011,67
440	7,56	6,28	1,26	26,98	43,83	1011,66
441	7,87	6,28	1	26,97	43,99	1011,69
442	8,34	6,26	0,41	26,98	43,96	1011,7
443	8,07	6,22	1,09	26,97	43,96	1011,68
444	8,42	6,54	1,85	26,97	43,96	1011,68
445	8,95	7,04	2,53	26,97	44,02	1011,68
446	8,84	6,39	1,57	26,97	43,81	1011,7
447	9,48	6,72	1,2	26,96	43,87	1011,69
448	9,36	6,89	1,5	26,96	43,85	1011,69
449	9,92	6,28	1,53	26,96	43,81	1011,69
450	9,83	5,96	1,91	26,96	43,81	1011,69
451	9,89	4,22	2,49	26,96	43,85	1011,71
452	10,47	3,25	2,74	26,96	43,79	1011,68
453	10,71	2,49	2,72	26,96	43,74	1011,7
454	11,1	5,33	3,15	26,96	43,71	1011,67
455	8,32	6,33	3,54	26,96	43,71	1011,67
456	8,39	6,87	1,6	26,95	43,77	1011,69
457	8,28	6,38	1,39	26,96	43,63	1011,67
458	8,6	8,12	1,82	26,95	43,63	1011,67
459	8,36	7,98	1	26,95	43,63	1011,67
460	8,74	8,32	1,02	26,95	43,57	1011,67
461	9,12	9,71	1,1	26,95	43,57	1011,67
462	9,09	9,63	1,13	26,95	43,64	1011,66
463	9,09	10,13	1,21	26,95	43,66	1011,69
464	9,15	10,07	1,29	26,95	43,5	1011,7
465	8,77	9,98	0,7	26,95	43,5	1011,69
466	8,6	9,75	0,7	26,95	43,45	1011,68
467	8,77	9,88	0,76	26,95	43,45	1011,68
468	9,16	10,85	0,82	26,95	43,38	1011,7
469	8,81	10,13	0,82	26,95	43,45	1011,71
470	8,46	9,58	0,82	26,95	43,45	1011,69
471	8,87	10,63	0,82	26,95	43,46	1011,69
472	9,03	11,04	0,82	26,95	43,46	1011,69
473	8,52	10,29	0,82	26,95	43,47	1011,7
474	9,04	8,25	0,76	26,95	43,33	1011,7
475	8,96	11,12	0,76	26,95	43,42	1011,71

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

476	9,2	8,38	1,2	26,95	43,46	1011,7
477	9,48	8,79	1,5	26,95	43,38	1011,72
478	9,8	9,18	3,54	26,95	43,38	1011,72
479	10,22	9,74	1,6	26,95	43,38	1011,7
480	10,37	9,76	1,39	26,95	43,4	1011,67
481	10,49	10,03	1,82	26,95	43,41	1011,68
482	10,73	10,3	1	26,95	43,4	1011,67
483	10,86	10,46	1,02	26,95	43,42	1011,71
484	11	10,65	1,1	26,95	43,42	1011,71
485	10,97	10,55	1,13	26,94	43,28	1011,68
486	10,68	10,3	1,66	26,94	43,38	1011,69
487	10,91	10,64	1,71	26,94	43,37	1011,67
488	11,1	10,85	1,09	26,94	43,32	1011,69
489	10,86	10,59	1,26	26,94	43,32	1011,69
490	11	10,74	1,34	26,94	43,43	1011,69
491	10,78	10,52	1,26	26,94	43,39	1011,71
492	11,36	11,18	1	26,94	43,34	1011,69
493	11,12	10,98	0,41	26,93	43,33	1011,69
494	11,15	11	1,09	26,93	43,29	1011,69
495	11,33	11,14	1,85	26,93	43,29	1011,69
496	11,09	10,87	2,53	26,93	43,47	1011,68
497	11,48	11,29	1,57	26,93	43,23	1011,66
498	11,07	10,91	1,2	26,94	43,3	1011,68
499	11,06	10,97	1,5	26,94	43,29	1011,68
500	10,46	10,37	1,53	26,94	43,29	1011,69
501	10,38	10,31	1,91	26,93	43,29	1011,69
502	9,44	9,35	2,49	26,93	43,48	1011,68
503	9,04	8,94	2,74	26,93	43,28	1011,68
504	8,61	8,49	2,72	26,93	43,28	1011,67
505	8,27	8,11	3,15	26,92	43,26	1011,66
506	10,33	10,09	3,54	26,92	43,26	1011,66
507	9,6	9,37	1,6	26,92	43,31	1011,67
508	9,47	9,29	1,39	26,92	43,23	1011,69
509	9,19	9,09	1,82	26,92	43,23	1011,66
510	8,91	8,87	1	26,91	43,19	1011,68
511	7,93	7,9	1,02	26,91	43,21	1011,68
512	7,77	7,76	1,1	26,91	43,21	1011,68
513	7,62	7,62	1,13	26,91	43,09	1011,69
514	7,57	7,57	1,21	26,91	43,23	1011,68
515	7,38	7,37	1,29	26,91	43,18	1011,67

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

516	6,46	6,45	1,29	26,91	43,17	1011,68
517	6,83	6,81	1,29	26,9	43,21	1011,68
518	7,09	7,06	1,24	26,9	43,21	1011,68
519	6,47	6,4	1,24	26,91	43,19	1011,71
520	6,2	6,08	1,24	26,9	43,17	1011,67
521	6,08	5,92	1,16	26,91	43,16	1011,68
522	5,81	5,65	1,79	26,9	43,14	1011,7
523	6,06	5,93	1,35	26,9	43,14	1011,7
524	5,31	5,22	0,89	26,9	43,04	1011,68
525	4,12	4,08	1,39	26,9	43,14	1011,68
526	4,54	4,53	1,38	26,9	43,15	1011,69
527	4,66	4,52	1,32	26,9	43,18	1011,69
528	4,22	3,98	2,07	26,9	43,17	1011,67
529	4,25	4,06	0,82	26,9	43,17	1011,67
530	4,67	4,5	0,9	26,9	43,21	1011,66
531	3,66	3,51	1,85	26,89	43,07	1011,66
532	3,69	3,64	2,06	26,9	43,14	1011,66
533	3,37	3,33	1,79	26,89	43,14	1011,68
534	3,75	3,75	1,55	26,89	43,08	1011,66
535	3,58	3,58	2,1	26,89	43,08	1011,66
536	3,26	3,24	2,11	26,89	43,09	1011,68
537	4,06	4,05	1,32	26,89	43,09	1011,69
538	3,95	3,95	1,65	26,89	43,1	1011,7
539	4,3	4,27	1,81	26,89	43,15	1011,69
540	4,6	4,56	0,96	26,89	43,15	1011,69
541	4,3	4,27	1,65	26,89	43,27	1011,69
542	3,92	3,75	1,51	26,88	43,03	1011,69
543	4,89	4,51	1,11	26,88	43,06	1011,67
544	4,35	3,09	0,7	26,88	43,07	1011,68
545	5,01	3,54	0,94	26,88	43,1	1011,67
546	5,1	1,49	1,75	26,88	43,1	1011,67
547	5,62	1,71	1,04	26,87	43,1	1011,66
548	5,72	2,33	0,97	26,87	43,08	1011,67
549	6,11	2,95	1,17	26,87	43	1011,67
550	6,1	4	2,03	26,87	42,99	1011,69
551	5,95	4,01	1,34	26,86	42,95	1011,66
552	5,61	4,49	1,51	26,86	42,95	1011,66
553	6,77	5,15	1,19	26,86	43,02	1011,67
554	6,51	5,28	1,08	26,86	42,94	1011,67
555	7,24	6,47	1,78	26,86	42,93	1011,68

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

556	7,99	6,7	1,11	26,86	42,88	1011,66
557	8,25	7,32	1,77	26,86	42,88	1011,66
558	8,44	7,65	0,61	26,86	42,88	1011,65
559	8,94	8,53	1,88	26,86	42,97	1011,65
560	9,58	9,25	2,19	26,86	42,88	1011,68
561	9,62	9,03	2,31	26,85	42,86	1011,68
562	9,61	9,39	2,44	26,85	42,9	1011,69
563	9,96	9,72	2,31	26,85	42,9	1011,69
564	10,18	10,01	2,33	26,85	42,77	1011,64
565	10,1	9,75	2,28	26,85	42,87	1011,65
566	9,13	9,19	2,33	26,85	42,84	1011,65
567	9,2	8,95	2,78	26,85	42,86	1011,66
568	9,05	8,93	2,43	26,84	42,76	1011,65
569	9,06	8,92	2,97	26,84	42,76	1011,65
570	9,01	9,31	0,71	26,84	42,83	1011,67
571	9,08	9,08	1,51	26,84	42,82	1011,67
572	8,86	9,12	1,06	26,85	42,8	1011,65
573	9,07	9,25	2,64	26,84	42,86	1011,66
574	9,08	9,41	2,69	26,84	42,86	1011,66
575	9,67	9,84	1,85	26,84	42,96	1011,67
576	9,85	10,34	2,36	26,84	42,73	1011,66
577	9,45	9,72	2,45	26,84	42,78	1011,68
578	9,55	9,62	2,28	26,84	42,78	1011,67
579	9,39	9,61	3,11	26,84	42,71	1011,68
580	8,82	8,99	3,65	26,84	42,71	1011,68
581	8,41	8,21	3,71	26,84	42,82	1011,68
582	9,1	7,62	2,22	26,84	42,78	1011,67
583	9,11	7,61	3,99	26,84	42,76	1011,7
584	9,21	6,9	1,67	26,83	42,76	1011,69
585	8,9	5,17	1,74	26,83	42,69	1011,67
586	9,12	5,51	2,29	26,83	42,69	1011,67
587	9,31	4,63	2,11	26,83	42,76	1011,65
588	10,11	1,17	1,51	26,83	42,74	1011,67
589	10,45	4	2,9	26,82	42,74	1011,64
590	10,2	3,61	1,05	26,82	42,76	1011,65
591	10,14	4,62	0,75	26,82	42,76	1011,65
592	9,87	3,64	1,89	26,82	42,69	1011,65
593	9,69	3,44	1,87	26,82	42,74	1011,65
594	9,64	1,76	1,45	26,82	42,72	1011,64
595	9,49	1,42	1,59	26,82	42,72	1011,64

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

596	10,15	2	2,39	26,81	42,68	1011,64
597	10,83	3	2,01	26,81	42,68	1011,64
598	10,61	2,69	0,97	26,81	42,7	1011,67
599	10,35	2,14	1,85	26,81	42,73	1011,63
600	10,54	3,23	0,41	26,81	42,71	1011,65
601	10,94	1,67	1,25	26,81	42,7	1011,66
602	8,45	3,6	0,85	26,81	42,76	1011,64
603	11,15	4,08	1,51	26,81	42,76	1011,64
604	8,26	2,46	1,15	26,8	42,79	1011,62
605	8,2	2,26	0,66	26,81	42,72	1011,66
606	11,14	3,08	1,58	26,8	42,7	1011,64
607	8,25	1,42	2,15	26,8	42,74	1011,67
608	8,5	2,45	0,98	26,8	42,74	1011,67
609	8,37	2,63	0,86	26,8	42,74	1011,65
610	8,91	1,83	1,4	26,8	42,59	1011,64
611	8,57	3,45	0,49	26,79	42,71	1011,64
612	8,36	1,77	1,9	26,79	42,71	1011,67
613	8,97	4,97	1,81	26,79	42,82	1011,66
614	9,11	6,22	2,93	26,79	42,82	1011,66
615	9,03	5,96	2,11	26,78	42,64	1011,64
616	9,58	7,42	2,45	26,79	42,7	1011,64
617	9,77	9,17	2,51	26,79	42,72	1011,64
618	9,63	8,55	1,95	26,79	42,78	1011,66
619	9,93	8,99	2,14	26,78	42,69	1011,67
620	9,66	9,06	2,76	26,78	42,69	1011,67
621	9,99	10,17	2,76	26,78	42,69	1011,66
622	9,68	9,85	1,66	26,78	42,71	1011,64
623	9,78	9,72	1,17	26,78	42,71	1011,62
624	10,28	10,54	1,74	26,78	42,79	1011,65
625	10,1	9,65	1,1	26,78	42,79	1011,65
626	9,78	9,06	0,82	26,78	42,71	1011,66
627	10,08	9,48	1,96	26,78	42,7	1011,64
628	9,59	8,9	1,45	26,78	42,69	1011,65
629	10	10,06	1,78	26,62	46,62	1011,66
630	9,53	9,04	1,47	26,68	46,59	1011,63
631	10,07	9,3	1,77	26,68	46,59	1011,63
632	9,71	7,96	1,32	26,73	46,67	1011,64
633	9,38	7,78	1,5	26,77	46,68	1011,61
634	9,51	8,71	0,66	26,8	46,65	1011,64
635	10	8,99	1,35	26,82	46,69	1011,6

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

636	9,58	7,95	1,19	26,83	46,83	1011,64
637	9,12	7,75	1,41	26,83	46,83	1011,64
638	9,56	6,97	1,96	26,85	46,74	1011,63
639	9,41	7,67	1,96	26,86	47,01	1011,65
640	9,71	7,4	2,32	26,87	47,01	1011,66
641	9,8	7,67	1,82	26,88	47,13	1011,65
642	9,83	8,74	2,22	26,88	47,34	1011,68
643	9,63	7,38	0,97	26,88	47,34	1011,68
644	9,34	7,99	1,24	26,89	47,51	1011,66
645	9,64	7	1,26	26,9	47,82	1011,65
646	9,24	7,39	0,89	26,9	48,07	1011,67
647	9,39	6,66	1,57	26,91	48,37	1011,67
648	9,52	7,04	1,41	26,91	48,37	1011,67
649	9,31	8,23	1,76	26,91	48,61	1011,64
650	9,13	7,1	1,35	26,92	48,99	1011,66
651	9,05	6,68	0,95	26,93	49,19	1011,66
652	8,73	6,54	1,24	26,93	49,32	1011,65
653	8,79	7,71	1,34	26,93	49,27	1011,67
654	9,04	8,33	1,41	26,93	49,27	1011,67
655	8,28	6,39	0,96	26,93	49,28	1011,65
656	8,76	7	1,55	26,94	49,28	1011,68
657	8,27	5,29	1,23	26,95	49,28	1011,67
658	8,77	5,57	0,58	26,95	49,26	1011,68
659	8,52	5,19	1,58	26,95	49,13	1011,67
660	8,16	4,01	0,92	26,95	49,13	1011,67
661	8,56	2,9	1,54	26,95	49,22	1011,67
662	8,3	2,68	1,4	26,96	49,12	1011,67
663	11,12	1,88	1,78	26,97	49,16	1011,68
664	10,92	2,97	2,46	26,97	49,11	1011,68
665	10,63	2,6	2,13	26,97	49,11	1011,68
666	11,11	2,64	2,77	26,97	49,04	1011,7
667	10,61	2,08	2,62	26,97	48,88	1011,66
668	10,95	2,84	2,91	26,98	48,82	1011,65
669	8,14	2,1	2,83	26,98	48,61	1011,68
670	10,77	2,72	3	26,97	48,28	1011,64
671	10,97	1,92	2,69	26,97	48,28	1011,64
672	8,31	3,66	2,65	26,98	48,21	1011,67
673	10,64	3,91	2,26	26,98	47,88	1011,64
674	10,76	3,57	2,41	26,97	47,62	1011,66
675	10,99	3,95	2,11	26,97	47,32	1011,64

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

676	8,21	4,28	2,45	26,97	47,05	1011,66
677	8,37	5,87	2,35	26,97	47,05	1011,66
678	8,25	5,49	2,46	26,97	46,84	1011,67
679	10,79	4,86	2,09	26,97	46,8	1011,66
680	11,01	5,58	2,35	26,97	46,76	1011,68
681	10,93	6,57	2,04	26,8	42,59	1011,64
682	10,99	6,82	1,56	26,79	42,71	1011,64
683	10,77	6,12	1,96	26,79	42,71	1011,67
684	10,48	4,9	1,09	26,79	42,82	1011,66
685	10,48	5,36	1,99	26,79	42,82	1011,66
686	10,04	5,31	1,42	26,78	42,64	1011,64
687	9,76	4,48	1,83	26,79	42,7	1011,64
688	10,5	4,69	1,67	26,79	42,72	1011,64
689	10,16	3,83	1,52	26,79	42,78	1011,66
690	9,15	2,3	1,78	26,78	42,69	1011,67
691	9,51	3,58	0,75	26,78	42,69	1011,67
692	8,86	2,77	0,66	26,78	42,69	1011,66
693	9,21	3,27	1,57	26,78	42,71	1011,64
694	8,91	2,55	0,99	26,78	42,71	1011,62
695	8,69	2,46	0,49	26,78	42,79	1011,65
696	8,46	2,38	1,24	26,78	42,79	1011,65
697	8,7	3,94	1,42	26,78	42,71	1011,66
698	8,42	4,53	0,97	26,78	42,7	1011,64
699	8,19	5,41	1,55	26,78	42,69	1011,65
700	7,74	5,22	1,82	26,62	46,62	1011,66
701	7,35	4,71	1,72	26,68	46,59	1011,63
702	7,16	5,63	1,83	26,68	46,59	1011,63
703	7,62	5,82	1,68	26,73	46,67	1011,64
704	6,84	6,02	1,72	26,77	46,68	1011,61
705	6,88	5,2	1,85	26,8	46,65	1011,64
706	6,72	6,32	1,58	26,82	46,69	1011,6
707	5,9	5,45	1,73	26,83	46,83	1011,64
708	6,85	5,44	1,1	26,83	46,83	1011,64
709	6,38	4,86	1,25	26,85	46,74	1011,63
710	6,68	5,64	1,3	26,86	47,01	1011,65
711	5,86	5,3	1,45	26,87	47,01	1011,66
712	5,88	5,46	1,25	26,88	47,13	1011,65
713	5,68	5,68	1,3	26,88	47,34	1011,68
714	4,58	5,53	1,23	26,88	47,34	1011,68
715	4,94	5,55	1,58	26,89	47,51	1011,66

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

716	4,96	5,84	0,75	26,9	47,82	1011,65
717	4,33	5,73	0,83	26,98	45,48	1011,65
718	4,85	5,46	0,94	26,98	45,58	1011,67
719	4,76	5,38	0,55	26,98	45,74	1011,67
720	4,3	4,98	1,35	26,68	46,59	1011,63
721	4,32	4,81	1,35	26,73	46,67	1011,64
722	3,68	4,87	1,04	26,99	45,02	1011,68
723	3,85	4,58	1,82	26,99	44,9	1011,67
724	3,66	4,88	2,1	26,68	46,59	1011,63
725	3,55	5,25	2,42	26,73	46,67	1011,64
726	3,93	4,83	1,96	26,77	46,68	1011,61
727	4,41	4,22	2,43	26,8	46,65	1011,64
728	5,27	4,33	2,34	26,82	46,69	1011,6
729	5,44	4,5	2,4	26,83	46,83	1011,64
730	6,66	1,64	1,96	26,83	46,83	1011,64
731	7,78	3,67	2,2	26,85	46,74	1011,63
732	9,38	6,33	2,19	26,86	47,01	1011,65
733	9,76	7,48	2,59	26,87	47,01	1011,66
734	10,74	8,81	2,37	26,88	47,13	1011,65
735	11,15	9,4	2,22	26,88	47,34	1011,68
736	8,72	10,94	1,35	26,88	47,34	1011,68
737	8,86	10,82	0,95	26,89	47,51	1011,66
738	9,01	11,13	1,88	26,9	47,82	1011,65
739	9,27	8,67	0,83	26,9	48,07	1011,67
740	9,6	8,92	2,25	26,91	48,37	1011,67
741	9,81	9,22	2,19	26,91	48,37	1011,67
742	9,46	8,81	2,06	26,91	48,61	1011,64
743	9,17	8,62	2,76	26,92	48,99	1011,66
744	8,82	8,25	2,76	26,93	49,19	1011,66
745	8,54	10,97	1,66	26,93	49,32	1011,65
746	8,35	10,55	1,17	26,93	49,27	1011,67
747	8,25	10,55	1,74	26,93	49,27	1011,67
748	11,03	10,44	1,1	26,98	44,07	1011,72
749	9,71	8,98	0,82	26,98	44,13	1011,69
750	10,04	9,19	2,43	26,98	44,09	1011,7
751	9,13	8,18	1,51	26,98	44,07	1011,68
752	9,41	8,66	1,11	26,98	44,07	1011,68
753	8,79	8,18	0,7	26,98	44,05	1011,67
754	8,36	7,72	0,94	26,98	43,83	1011,66
755	7,97	7,12	1,75	26,97	43,99	1011,69

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

756	7,96	7,04	1,04	26,98	43,96	1011,7
757	7,67	6,64	0,97	26,97	43,96	1011,68
758	7,52	6,6	1,17	26,97	43,96	1011,68
759	7,09	5,6	2,03	26,97	44,02	1011,68
760	7,88	5,57	1,34	26,97	43,81	1011,7
761	7,86	4,97	1,51	26,96	43,87	1011,69
762	7,89	5,32	1,19	26,96	43,85	1011,69
763	8,64	6,16	1,08	26,96	43,81	1011,69
764	8,18	4,07	1,78	26,96	43,81	1011,69
765	9,03	4,54	1,11	26,96	43,85	1011,71
766	8,73	3,27	1,77	26,96	43,79	1011,68
767	8,53	3,02	0,61	26,96	43,74	1011,7
768	8,73	3,28	1,88	26,96	43,71	1011,67
769	9,27	1,66	2,19	26,96	43,71	1011,67
770	8,68	2,48	2,31	26,95	43,77	1011,69
771	8,78	2,68	1,5	26,96	43,63	1011,67
772	9,21	3,37	1,53	26,95	43,63	1011,67
773	9,39	2,81	1,91	26,95	43,63	1011,67
774	8,95	3,86	2,49	26,95	43,57	1011,67
775	9,44	3,36	2,74	26,95	43,57	1011,67
776	9,18	2,44	2,72	26,95	43,64	1011,66
777	9,24	4,75	3,15	26,95	43,66	1011,69
778	9,29	2,86	3,54	26,95	43,5	1011,7
779	9,25	5,17	1,6	26,95	43,5	1011,69
780	9,5	4,13	1,39	26,95	43,45	1011,68
781	9,54	5,33	1,82	26,95	43,45	1011,68
782	9,24	3,46	1	26,95	43,38	1011,7
783	9,56	4,52	1,02	26,95	43,45	1011,71
784	9,11	3,98	1,1	26,95	43,45	1011,69
785	9,88	5,2	1,13	26,95	43,46	1011,69
786	9,16	4,59	1,21	26,95	43,46	1011,69
787	9,41	4,66	1,29	26,95	43,47	1011,7
788	8,83	3,55	1,29	26,95	43,33	1011,7
789	9,35	4,29	1,29	26,95	43,42	1011,71
790	8,82	3,21	1,24	26,95	43,46	1011,7
791	9,43	5,32	1,24	26,95	43,38	1011,72
792	9,2	4,44	1,24	26,95	43,38	1011,72
793	8,9	4,7	1,16	26,95	43,38	1011,7
794	9,32	4,48	1,05	26,95	43,4	1011,67
795	8,41	3,87	0,82	26,95	43,41	1011,68

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

796	8,26	3,52	0,82	26,95	43,4	1011,67
797	8,51	3,29	0,82	26,95	43,42	1011,71
798	8,51	4,54	0,76	26,95	43,42	1011,71
799	8,3	3,88	0,76	26,94	43,28	1011,68
800	8,55	3,41	0,7	26,94	43,38	1011,69
801	7,99	3,4	0,63	26,94	43,37	1011,67
802	7,94	3,79	0,63	26,94	43,32	1011,69
803	7,48	2,15	0,58	26,94	43,32	1011,69
804	7,38	2,24	0,55	26,94	43,43	1011,69
805	7,77	2,37	0,55	26,94	43,39	1011,71
806	7,74	2,68	0,58	26,94	43,34	1011,69
807	7,21	2,02	0,58	26,93	43,33	1011,69
808	7,63	3,32	0,63	26,93	43,29	1011,69
809	7,38	3,5	0,58	26,93	43,29	1011,69
810	6,9	2,56	0,58	26,93	43,47	1011,68
811	7,35	3,44	0,58	26,93	43,23	1011,66
812	6,85	1,39	0,66	26,94	43,3	1011,68
813	7,65	1,88	0,58	26,94	43,29	1011,68
814	7,79	2,56	0,58	26,94	43,29	1011,69
815	7,58	1,51	0,58	26,93	43,29	1011,69
816	7,76	1,6	0,66	26,93	43,48	1011,68
817	7,73	3,75	0,6	26,93	43,28	1011,68
818	7,96	1	0,66	26,93	43,28	1011,67
819	7,99	4,05	0,58	26,92	43,26	1011,66
820	8,19	1,94	0,58	26,92	43,26	1011,66
821	8,11	2,75	0,58	26,92	43,31	1011,67
822	8,49	2,76	0,58	26,92	43,23	1011,69
823	8,34	0,66	0,58	26,92	43,23	1011,66
824	8,49	3,15	0,58	26,91	43,19	1011,68
825	8,53	3,39	0,49	26,91	43,21	1011,68
826	8,58	2,39	0,49	26,91	43,21	1011,68
827	9,02	2,73	0,49	26,91	43,09	1011,69
828	8,98	3,66	0,49	26,91	43,23	1011,68
829	8,88	3,7	0,58	26,91	43,18	1011,67
830	9,09	4,87	0,53	26,91	43,17	1011,68
831	9,89	5,61	0,49	26,9	43,21	1011,68
832	9,31	5,94	0,53	26,9	43,21	1011,68
833	9,65	5,87	0,49	26,91	43,19	1011,71
834	9,92	6,61	0,49	26,9	43,17	1011,67
835	9,68	6,39	0,49	26,91	43,16	1011,68

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

836	9,33	6,53	0,49	26,9	43,14	1011,7
837	9,45	6,95	0,49	26,9	43,14	1011,7
838	9,43	6,67	0,49	26,9	43,04	1011,68
839	9,2	6,34	0,53	26,9	43,14	1011,68
840	9,39	7,2	0,49	26,9	43,15	1011,69
841	9,53	7,58	0,49	26,9	43,18	1011,69
842	9,62	7,77	0,53	26,9	43,17	1011,67
843	9,5	7,72	0,58	26,9	43,17	1011,67
844	9,33	7,22	0,83	26,9	43,21	1011,66
845	9,18	7,22	1,09	26,89	43,07	1011,66
846	9,06	7,52	1,26	26,9	43,14	1011,66
847	9,54	8,02	1,34	26,89	43,14	1011,68
848	9,09	7,72	1,26	26,89	43,08	1011,66
849	8,56	6,71	1,3	26,89	43,08	1011,66
850	8,5	7,32	1,45	26,89	43,09	1011,68
851	9,23	8,09	1,25	26,89	43,09	1011,69
852	8,62	7,32	1,3	26,89	43,1	1011,7
853	8,69	7,47	1,23	26,89	43,15	1011,69
854	8,85	7,66	1,58	26,89	43,15	1011,69
855	8,53	7,62	0,75	26,89	43,27	1011,69
856	8,77	7,95	0,83	26,88	43,03	1011,69
857	9,08	8,3	0,94	26,88	43,06	1011,67
858	9,44	8,59	0,55	26,88	43,07	1011,68
859	10,05	9,3	1,35	26,88	43,1	1011,67
860	9,5	8,75	1,35	26,88	43,1	1011,67
861	9,38	8,62	1,04	26,87	43,1	1011,66
862	10	9,03	1,82	26,87	43,08	1011,67
863	10,22	9,38	2,1	26,87	43	1011,67
864	10,15	9,01	2,42	26,87	42,99	1011,69
865	10,73	9,73	1,96	26,86	42,95	1011,66
866	10,78	9,6	2,43	26,86	42,95	1011,66
867	10,64	9,38	2,34	26,86	43,02	1011,67
868	8,32	10,08	2,4	26,86	42,94	1011,67
869	8,34	10,42	1,96	26,86	42,93	1011,68
870	8,37	10,09	2,2	26,86	42,88	1011,66
871	8,51	10,21	2,19	26,86	42,88	1011,66
872	8,74	10,99	2,59	26,86	42,88	1011,65
873	8,5	10,46	1,75	26,86	42,97	1011,65
874	8,86	10,88	2,94	26,86	42,88	1011,68
875	8,79	10,77	1,12	26,85	42,86	1011,68

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

876	8,2	10,14	3,47	26,85	42,9	1011,69
877	8,44	10,01	10,71	26,85	42,9	1011,69
878	8,48	9,85	3,79	26,85	42,77	1011,64
879	8,33	9,67	2,74	26,85	42,87	1011,65
880	10,95	8,71	2,1	26,85	42,84	1011,65
881	8,42	9,02	2,43	26,85	42,86	1011,66
882	8,37	8,93	1,43	26,84	42,76	1011,65
883	8,3	8,68	1,75	26,84	42,76	1011,65
884	11,12	7,99	2,94	26,84	42,83	1011,67
885	8,5	8,54	1,12	26,84	42,82	1011,67
886	8,2	8,02	2,51	26,85	42,8	1011,65
887	8,27	7,64	2,62	26,84	42,86	1011,66
888	8,51	7,63	2,67	26,84	42,86	1011,66
889	8,28	7,38	2,17	26,84	42,96	1011,67
890	8,35	7,54	2,17	26,84	42,73	1011,66
891	8,32	7,03	2,06	26,84	42,78	1011,68
892	8,47	6,56	1,73	26,84	42,78	1011,67
893	8,57	6,82	2,25	26,84	42,71	1011,68
894	8,21	5,34	1,96	26,84	42,71	1011,68
895	8,29	6,23	1,75	26,84	42,82	1011,68
896	8,34	6,38	1,42	26,84	42,78	1011,67
897	11,15	5,87	0,92	26,84	42,76	1011,7
898	8,44	6,08	1,24	26,83	42,76	1011,69
899	8,71	6,28	2,03	26,83	42,69	1011,67
900	8,22	3,95	2,86	26,83	42,69	1011,67
901	8,41	5,55	2,99	26,83	42,76	1011,65
902	8,32	5,92	2,59	26,83	42,74	1011,67
903	8,23	4,66	2,86	26,82	42,74	1011,64
904	8,55	4,43	3,15	26,82	42,76	1011,65
905	8,5	5,59	2,74	26,82	42,76	1011,65
906	8,33	5,94	2,58	26,82	42,69	1011,65
907	10,56	4,29	2,09	26,82	42,74	1011,65
908	8,49	6,02	1,76	26,82	42,72	1011,64
909	8,31	5,45	1,84	26,82	42,72	1011,64
910	11,1	4,24	2,51	26,81	42,68	1011,64
911	8,13	4,55	2,11	26,81	42,68	1011,64
912	8,28	5,36	2,55	26,81	42,7	1011,67
913	8,49	6,41	2,77	26,81	42,73	1011,63
914	11,1	5,76	2,66	26,81	42,71	1011,65
915	10,38	5,77	2,83	26,81	42,7	1011,66

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

916	10,8	6,51	2,93	26,81	42,76	1011,64
917	10,91	6,52	2,91	26,81	42,76	1011,64
918	11,05	7,5	2,75	26,8	42,79	1011,62
919	10,5	6,94	1,15	26,81	42,72	1011,66
920	11,06	8,36	1,34	26,8	42,7	1011,64
921	10,93	7,59	0,75	26,8	42,74	1011,67
922	10,07	6,97	1,22	26,8	42,74	1011,67
923	10,41	7,81	1,38	26,8	42,74	1011,65
924	10,43	8,33	1,85	26,8	42,59	1011,64
925	10,34	8,41	2,07	26,79	42,71	1011,64
926	10,12	8,13	2,07	26,79	42,71	1011,67
927	10,83	9,08	2,07	26,79	42,82	1011,66
928	10,19	8,3	2,07	26,79	42,82	1011,66
929	9,67	7,55	1,79	26,78	42,64	1011,64
930	9,85	7,98	1,35	26,79	42,7	1011,64
931	9,34	8,01	0,89	26,79	42,72	1011,64
932	10,04	8,46	1,39	26,79	42,78	1011,66
933	9,58	8,14	1,38	26,78	42,69	1011,67
934	8,94	7,37	1,32	26,78	42,69	1011,67
935	8,87	7,75	2,07	26,78	42,69	1011,66
936	8,83	7,41	0,82	26,78	42,71	1011,64
937	8,84	7,64	0,9	26,78	42,71	1011,62
938	8,8	7,53	1,85	26,78	42,79	1011,65
939	8,17	7,07	2,06	26,78	42,79	1011,65
940	8,61	7,65	1,79	26,78	42,71	1011,66
941	8,07	7,1	1,55	26,98	47,88	1011,64
942	8,42	7,3	2,1	26,97	47,62	1011,66
943	8,2	7,18	2,11	26,97	47,32	1011,64
944	7,57	6,73	1,32	26,97	47,05	1011,66
945	8,4	7,66	1,65	26,97	47,05	1011,66
946	9,11	8,15	1,81	26,97	46,84	1011,67
947	8,71	7,76	0,96	26,97	46,8	1011,66
948	8,9	7,57	1,65	26,97	46,76	1011,68
949	9,22	7,87	1,51	26,8	42,59	1011,64
950	9,75	8,49	1,11	26,79	42,71	1011,64
951	9,83	8,29	0,7	26,79	42,71	1011,67
952	9,62	7,96	0,94	26,79	42,82	1011,66
953	9,69	8,35	1,75	26,79	42,82	1011,66
954	10,36	8,52	1,04	26,78	42,64	1011,64
955	10,83	9,08	0,97	26,79	42,7	1011,64

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

956	9,46	7,92	1,17	26,79	42,72	1011,64
957	10,86	9,43	2,03	26,79	42,78	1011,66
958	10,44	8,53	1,34	26,91	43,21	1011,68
959	8,12	9,36	1,51	26,91	43,09	1011,69
960	10,2	8,41	1,19	26,91	43,23	1011,68
961	10,8	8,97	1,08	26,91	43,18	1011,67
962	10,96	8,91	1,78	26,91	43,17	1011,68
963	10,58	8,43	1,11	26,9	43,21	1011,68
964	10,92	8,27	1,77	26,9	43,21	1011,68
965	10,78	7,37	0,61	26,91	43,19	1011,71
966	10,77	7,97	1,88	26,9	43,17	1011,67
967	11,08	7,13	2,19	26,91	43,16	1011,68
968	9,86	6,06	2,31	26,9	43,14	1011,7
969	8,13	6,86	2,44	26,9	43,14	1011,7
970	10,88	6,12	2,31	26,9	43,04	1011,68
971	10,46	5,91	2,33	26,9	43,14	1011,68
972	10,64	6,05	2,28	26,9	43,15	1011,69
973	10,58	4,63	2,33	26,9	43,18	1011,69
974	10,77	4,82	2,78	26,9	43,17	1011,67
975	11	5,1	2,43	26,9	43,17	1011,67
976	11,03	6,04	2,97	26,9	43,21	1011,66
977	10,64	6,87	0,71	26,89	43,07	1011,66
978	10,73	6,4	1,51	26,9	43,14	1011,66
979	10,06	6,54	1,06	26,89	43,14	1011,68
980	10,44	6,7	2,64	26,89	43,08	1011,66
981	10,1	7,27	2,69	26,89	43,08	1011,66
982	10,05	7,07	2,47	26,89	43,09	1011,68
983	10,07	6,97	1,74	26,89	43,09	1011,69
984	9,63	6,84	2,29	26,89	43,1	1011,7
985	9,47	6,48	2,11	26,73	46,67	1011,64
986	9,39	6,5	1,51	26,77	46,68	1011,61
987	9,71	7,61	2,9	26,8	46,65	1011,64
988	9,38	7,27	1,05	26,82	46,69	1011,6
989	8,54	6,58	0,75	26,83	46,83	1011,64
990	8,61	6,58	1,89	26,83	46,83	1011,64
991	9,22	7,46	1,87	26,85	46,74	1011,63
992	8,35	6,73	1,45	26,86	47,01	1011,65
993	8,61	6,68	1,59	26,87	47,01	1011,66
994	8,11	6,61	2,39	26,88	47,13	1011,65
995	7,75	6,06	2,01	26,88	47,34	1011,68

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

996	7,41	5,91	0,97	26,88	47,34	1011,68
997	8,1	6,42	1,85	26,89	47,51	1011,66
998	7,59	6,31	0,41	26,9	47,82	1011,65
999	7,52	6,39	1,25	26,9	48,07	1011,67
1000	7,5	6,11	0,85	26,91	48,37	1011,67
1001	7,48	6,09	1,51	26,91	48,37	1011,67
1002	7,08	5,95	1,15	26,91	48,61	1011,64
1003	7,03	6,04	0,66	26,92	48,99	1011,66
1004	6,36	5,32	1,58	26,93	49,19	1011,66
1005	6,82	5,71	2,15	26,93	49,32	1011,65
1006	6,79	5,59	0,98	26,93	49,27	1011,67
1007	6,73	5,52	0,86	26,93	49,27	1011,67
1008	6,54	5,53	1,4	26,93	49,28	1011,65
1009	6,66	5,95	0,49	26,94	49,28	1011,68
1010	5,67	4,88	1,9	26,95	49,28	1011,67
1011	6,23	5,47	1,81	26,95	49,26	1011,68
1012	5,91	5,1	2,93	26,95	49,13	1011,67
1013	6,19	5,41	2,11	26,95	49,13	1011,67
1014	5,73	5,02	2,45	26,95	49,22	1011,67
1015	6,07	5,54	2,51	26,96	49,12	1011,67
1016	5,71	5,24	1,95	26,97	49,16	1011,68
1017	5,46	5,13	3,2	26,97	49,11	1011,68
1018	5,76	5,36	3,05	26,97	49,11	1011,68
1019	5,66	5,13	2,84	26,97	49,04	1011,7
1020	5,4	4,91	1,66	26,97	48,88	1011,66
1021	5,46	4,85	1,17	26,98	48,82	1011,65
1022	5,62	5,03	1,74	26,98	48,61	1011,68
1023	5,46	5,03	1,1	26,97	48,28	1011,64
1024	4,98	4,66	0,82	26,97	48,28	1011,64
1025	4,99	4,8	2,43	26,98	48,21	1011,67
1026	5,2	5,08	1,96	26,98	47,88	1011,64
1027	5,18	5,1	1,45	26,97	47,62	1011,66
1028	5,09	5,03	1,78	26,97	47,32	1011,64
1029	4,76	4,7	1,47	26,97	47,05	1011,66
1030	5,1	5,05	1,77	26,97	47,05	1011,66
1031	4,95	4,87	1,32	26,97	46,84	1011,67
1032	4,78	4,7	1,5	26,97	46,8	1011,66
1033	5,06	4,93	0,66	26,97	46,76	1011,68
1034	4,86	4,62	1,35	26,97	46,68	1011,65
1035	4,88	4,6	1,19	26,97	46,68	1011,65

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

1036	5,17	4,81	1,41	26,98	46,66	1011,67
1037	4,98	4,66	1,96	26,98	46,49	1011,66
1038	4,82	4,49	1,96	26,98	46,54	1011,64
1039	4,99	4,83	2,32	26,98	46,42	1011,67
1040	4,88	4,77	1,82	26,98	46,37	1011,68
1041	4,59	4,55	2,22	26,98	46,37	1011,68
1042	4,83	4,82	0,97	26,98	46,12	1011,66
1043	4,74	4,74	1,24	26,98	45,98	1011,68
1044	4,67	4,64	1,26	26,98	45,91	1011,66
1045	4,43	4,37	0,89	26,98	45,75	1011,65
1046	4,19	4,09	1,57	26,98	45,69	1011,67
1047	4,39	4,24	1,41	26,98	45,69	1011,67
1048	4,31	4,15	1,76	26,98	45,59	1011,66
1049	4,26	4,2	1,35	26,98	45,39	1011,67
1050	3,9	3,89	0,95	26,97	45,26	1011,63
1051	3,97	3,81	1,24	26,97	45,24	1011,64
1052	4,06	4,06	1,34	26,97	45,24	1011,64
1053	4,16	3,19	1,41	26,97	45,42	1011,65
1054	4,6	3,2	0,96	26,98	45,48	1011,65
1055	4,19	1,88	1,55	26,98	45,58	1011,67
1056	4,33	2,78	1,23	26,98	45,74	1011,67
1057	3,94	2,45	0,58	26,98	45,82	1011,68
1058	3,94	2,76	1,58	26,98	45,82	1011,68
1059	3,73	2,25	0,92	26,98	46,14	1011,69
1060	3,29	2,31	1,54	26,98	45,91	1011,66
1061	3,57	2,14	1,4	26,98	45,75	1011,65
1062	3,26	2,11	1,78	26,98	45,69	1011,67
1063	2,73	1,87	2,04	26,98	45,69	1011,67
1064	2,33	0,49	1,56	26,98	45,59	1011,66
1065	2,92	1,15	1,96	26,98	45,39	1011,67
1066	3,33	1,09	1,09	26,97	45,26	1011,63
1067	3,3	1,6	1,99	26,97	45,24	1011,64
1068	3,06	1,53	1,42	26,97	45,24	1011,64
1069	2,53	2,18	1,83	26,97	45,42	1011,65
1070	2,18	2,37	1,67	26,98	45,48	1011,65
1071	3,52	3,41	1,52	26,98	45,58	1011,67
1072	3,77	3,67	1,78	26,98	45,74	1011,67
1073	3,99	3,79	0,75	26,68	46,59	1011,63
1074	3,63	3,11	0,66	26,73	46,67	1011,64
1075	3,93	4,02	1,57	26,99	45,02	1011,68

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

1076	4,32	4,32	0,99	26,99	44,9	1011,67
1077	3,88	4,07	0,49	26,68	46,59	1011,63
1078	3,93	4,02	1,24	26,73	46,67	1011,64
1079	4,11	4,02	1,42	26,77	46,68	1011,61
1080	4,19	2,75	0,97	26,8	46,65	1011,64
1081	4,23	2,9	1,55	26,82	46,69	1011,6
1082	4,26	2,1	0,6	26,83	46,83	1011,64
1083	4,55	2,01	1,11	26,83	46,83	1011,64
1084	4,61	0,41	1,85	26,85	46,74	1011,63
1085	4,23	2,44	1,82	26,86	47,01	1011,65
1086	3,6	2,36	1,72	26,87	47,01	1011,66
1087	3,95	3,64	1,83	26,88	47,13	1011,65
1088	4,09	4,09	1,68	26,88	47,34	1011,68
1089	3,98	3,94	1,72	26,88	47,34	1011,68
1090	4,02	3,77	1,85	26,89	47,51	1011,66
1091	4,4	4,08	1,58	26,9	47,82	1011,65
1092	4,41	3,92	1,73	26,9	48,07	1011,67
1093	4,02	3,3	1,1	26,91	48,37	1011,67
1094	4,28	3,77	1,25	26,91	48,37	1011,67
1095	4,27	3,6	1,3	26,91	48,61	1011,64
1096	4,03	3,32	1,45	26,92	48,99	1011,66
1097	3,75	3,48	1,25	26,93	49,19	1011,66
1098	3,36	3,34	1,3	26,93	49,32	1011,65
1099	3,71	3,7	1,23	26,93	49,27	1011,67
1100	3,55	3,54	1,58	26,93	49,27	1011,67
1101	3,47	3,38	0,75	26,98	44,07	1011,72
1102	3,98	3,85	0,83	26,98	44,13	1011,69
1103	3,97	3,66	0,94	26,98	44,09	1011,7
1104	4,06	3,7	0,55	26,98	44,07	1011,68
1105	4,1	3,75	1,35	26,98	44,07	1011,68
1106	3,87	3,37	1,35	26,98	44,05	1011,67
1107	4,12	3,42	1,04	26,98	43,83	1011,66
1108	4,18	2,97	1,82	26,97	43,99	1011,69
1109	4,33	2,42	2,1	26,98	43,96	1011,7
1110	4,81	1,05	2,42	26,97	43,96	1011,68
1111	4,97	1,47	1,96	26,97	43,96	1011,68
1112	4,69	2,6	2,43	26,97	44,02	1011,68
1113	5,11	2,83	2,34	26,97	43,81	1011,7
1114	5,28	3,93	2,4	26,96	43,87	1011,69
1115	5,33	3,63	1,96	26,96	43,85	1011,69

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

1116	5,35	4,03	2,2	26,96	43,81	1011,69
1117	5,34	4,05	2,19	26,96	43,81	1011,69
1118	5,39	3,77	1,9	26,96	43,85	1011,71
1119	5,33	4,06	1,81	26,96	43,79	1011,68
1120	5,17	4,45	2,93	26,96	43,74	1011,7
1121	4,99	3,71	2,11	26,96	43,71	1011,67
1122	4,63	3,18	2,45	26,96	43,71	1011,67
1123	3,92	2,73	2,51	26,95	43,77	1011,69
1124	3,98	2,38	1,95	26,96	43,63	1011,67
1125	3,67	2,44	1,35	26,95	43,63	1011,67
1126	3,21	3,88	2,04	26,95	43,63	1011,67
1127	3,36	3,42	1,75	26,95	43,57	1011,67
1128	3,17	3,53	2,33	26,95	43,57	1011,67
1129	3,22	1,38	2,25	26,95	43,64	1011,66
1130	2,89	1,01	2,31	26,95	43,66	1011,69
1131	2,11	2,58	1,62	26,95	43,5	1011,7
1132	2,07	2,76	1,77	26,95	43,5	1011,69
1133	2,1	2,59	1,8	26,95	43,45	1011,68
1134	2,01	2,66	1,9	26,95	43,45	1011,68
1135	2,03	2,5	2,03	26,95	43,38	1011,7
1136	1,99	2,38	1,87	26,95	43,45	1011,71
1137	2,04	2,17	1,8	26,95	43,45	1011,69
1138	2,06	1,98	1,66	26,95	43,46	1011,69
1139	2,69	1,49	0,49	26,95	43,46	1011,69
1140	3,3	2,56	1,23	26,95	43,47	1011,7
1141	4,09	3,49	1,58	26,95	43,33	1011,7
1142	5,2	4,79	0,75	26,95	43,42	1011,71
1143	6,77	6,45	0,83	26,95	43,46	1011,7
1144	7,28	7,13	0,94	26,95	43,38	1011,72
1145	8,12	7,99	0,55	26,95	43,38	1011,72
1146	9,2	9,12	1,35	26,95	43,38	1011,7
1147	9,28	9,21	1,35	26,95	43,4	1011,67
1148	9,64	9,53	1,04	26,95	43,41	1011,68
1149	10,04	9,98	1,82	26,95	43,4	1011,67
1150	9,4	9,26	2,1	26,95	43,42	1011,71
1151	8,97	8,84	2,42	26,95	43,42	1011,71
1152	8,74	8,56	1,96	26,94	43,28	1011,68
1153	8,4	8,22	2,43	26,94	43,38	1011,69
1154	8,12	7,99	2,34	26,94	43,37	1011,67
1155	7,44	7,31	2,4	26,94	43,32	1011,69

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

1156	6,83	6,74	1,96	26,94	43,32	1011,69
1157	6,38	6,33	2,2	26,94	43,43	1011,69
1158	5,37	5,3	2,19	26,94	43,39	1011,71
1159	4,85	4,8	2,59	26,94	43,34	1011,69
1160	3,65	3,62	2,37	26,93	43,33	1011,69
1161	2,9	2,84	2,22	26,93	43,29	1011,69
1162	1,01	0,78	1,35	26,93	43,29	1011,69
1163	1,78	1,16	0,95	26,93	43,47	1011,68
1164	3	2,15	1,88	26,93	43,23	1011,66
1165	3,32	2,53	0,83	26,94	43,3	1011,68
1166	4,03	3,38	2,25	26,94	43,29	1011,68
1167	4,75	4,2	2,19	26,94	43,29	1011,69
1168	5,42	5,25	2,06	26,93	43,29	1011,69
1169	6,21	6,16	2,76	26,93	43,48	1011,68
1170	6,62	6,43	2,76	26,93	43,28	1011,68
1171	6,51	6,02	1,66	26,93	43,28	1011,67
1172	6,8	6,06	0,82	26,92	43,26	1011,66
1173	7,6	5,84	0,76	26,92	43,26	1011,66
1174	7,97	6,15	0,76	26,92	43,31	1011,67
1175	7,86	5,89	1,2	26,92	43,23	1011,69
1176	8,38	6,4	1,5	26,92	43,23	1011,66
1177	9,31	6,76	3,54	26,91	43,19	1011,68
1178	9,34	6,06	1,6	26,91	43,21	1011,68
1179	10,73	6,08	1,39	26,91	43,21	1011,68
1180	10,52	4,57	1,82	26,91	43,09	1011,69
1181	11,15	4,28	1	26,91	43,23	1011,68
1182	8,71	4,16	1,02	26,91	43,18	1011,67
1183	8,84	5,66	1,1	26,91	43,17	1011,68
1184	8,69	5,85	1,13	26,9	43,21	1011,68
1185	8,98	5,16	1,66	26,9	43,21	1011,68
1186	9,5	2,11	1,71	26,91	43,19	1011,71
1187	9,19	1,04	1,09	26,9	43,17	1011,67
1188	9,19	3,82	1,26	26,91	43,16	1011,68
1189	9,76	3,83	1,34	26,9	43,14	1011,7
1190	9,43	5,39	1,26	26,9	43,14	1011,7
1191	9,27	5,65	1	26,9	43,04	1011,68
1192	9,6	5,71	0,41	26,9	43,14	1011,68
1193	9,35	5,02	1,09	26,9	43,15	1011,69
1194	10,23	3,94	1,85	26,9	43,18	1011,69
1195	9,74	2,11	2,53	26,9	43,17	1011,67

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE MEDICIÓN TRIDIMENSIONAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO EN AMBIENTES URBANOS COMPLEJOS

1196	10,03	4,17	1,57	26,9	43,17	1011,67
1197	9,83	3,64	1,2	26,9	43,21	1011,66
1198	10,1	5,36	1,5	26,89	43,07	1011,66
1199	10,09	3,27	1,53	26,9	43,14	1011,66
1200	9,9	3,54	1,91	26,89	43,14	1011,68

ANEXO VI

Definiciones de conceptos y términos incluidos en este trabajo. Este apartado contiene el conjunto de términos y conceptos principales utilizados a lo largo de este trabajo. Es objeto de este anexo, saldar dudas puntuales que atenten con el entendimiento de este documento o parte del mismo.

ARCHIVO DE TEXTO DEL TIPO CSV

CSV son las siglas de "Comma-Separated Values" en inglés, que traducido al español significa "Valores Separados por Comas". Es un formato de archivo utilizado para representar datos tabulares, como hojas de cálculo o bases de datos, de manera sencilla y legible por máquinas.

ATMÓSFERA LIBRE

La "atmósfera libre" se refiere a las capas superiores de la atmósfera terrestre. Estas capas están por encima de la troposfera y la estratosfera. La mesosfera tiene temperaturas decrecientes con la altitud, mientras que en la termosfera, la temperatura aumenta. La exósfera marca la transición al espacio exterior. En estas capas, la densidad de partículas es baja y están más alejadas entre sí.

ATMÓSFERA NEUTRA

La atmósfera neutra es la parte de la atmósfera donde las partículas no están ionizadas, lo que significa que no hay una presencia significativa de iones positivos (cationes) ni de iones negativos (aniones). La ionización se vuelve más pronunciada en las capas superiores de la atmósfera, como la mesosfera y la termosfera, donde ocurren fenómenos como las auroras y la propagación de ondas ionosféricas.

BARLOVENTO

Es un término utilizado en meteorología para referirse a la dirección desde la cual proviene el viento. En un contexto más general, se utiliza para indicar la dirección contraria al viento. Por ejemplo, si el viento está soplando desde el norte hacia el sur, la dirección norte sería la de barlovento.

CAPA LIMITE

Es la región próxima a la superficie de un objeto en la que el fluido sufre cambios en su velocidad por efecto de la resistencia de corte debida a la superficie y la viscosidad del fluido, haciendo que la velocidad del fluido respecto al sólido, varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada.

CAPA LÍMITE TURBULENTA

Es la porción de la capa límite atmosférica donde la turbulencia es prominente. En esta región, el movimiento del aire es más irregular y caótico, con fluctuaciones rápidas en la velocidad y dirección del viento. La turbulencia en la capa límite es esencial para procesos atmosféricos como la mezcla de aire, la dispersión de contaminantes y la transferencia de calor entre la superficie terrestre y la atmósfera.

CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA

Es la región más próxima a la superficie terrestre donde las propiedades atmosféricas, como la temperatura, la humedad y la velocidad del viento, son significativamente influenciadas por la interacción con la superficie subyacente. En esta capa, que generalmente se extiende hasta varios kilómetros de altura, los efectos de la topografía, la vegetación y las condiciones superficiales son más prominentes.

CAPA LÍMITE LAMINAR

Es cuando el flujo en ella se desarrolla en capas paralelas, donde no existe intercambio de partículas entre las capas, siendo las fuerzas viscosas las dominadoras del patrón de flujo.

CLIMOGRAMA

Es un tipo de gráfico que muestra tanto la temperatura como la precipitación para un lugar específico a lo largo de un período de tiempo, comúnmente un año. Es una herramienta visual que combina dos conjuntos de datos climáticos importantes en un solo gráfico, facilitando la comprensión de las condiciones climáticas de un área.

CONFORT HIGROTÉRMICO

Se refiere a la condición en la que un individuo se siente cómodo en relación con la temperatura del aire y la humedad en su entorno. Este concepto está relacionado con la percepción subjetiva de las condiciones ambientales y cómo estas afectan el bienestar térmico de una persona. El confort higrotérmico depende de varios factores, incluyendo la

temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento entre otras variables.

CORTADURA O CIZALLADURA DEL VIENTO

La cizalladura del viento se puede definir como “ capas o columnas de aire que fluyen con diferentes velocidades (es decir, velocidad y/o dirección) hacia capas o columnas adyacentes “ Copyright © 2020 Organización Meteorológica Mundial (OMM)

<https://community.wmo.int/en/activity-areas/aviation/hazards/turbulence>

En energía eólica se utiliza para indicar la variación de velocidad vertical entre dos alturas distintas.

DESARROLLO SOSTENIBLE

Es un enfoque que busca satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Fue definido por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas en 1987 como "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades

DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

Es una representación gráfica de las propiedades del aire húmedo en relación con su temperatura, humedad y presión. Este tipo de diagrama es utilizado en ingeniería, climatización, meteorología y otras disciplinas relacionadas con las propiedades termodinámicas del aire.

EFFECTOS CONCENTRADORES

En el contexto del análisis de viento urbano, el término "efectos concentradores" se refiere a áreas donde el viento tiende a concentrarse o acelerarse debido a la configuración de edificios u otros obstáculos urbanos. Estos efectos son el resultado de la interacción compleja entre el viento y las estructuras en un entorno urbano.

Los efectos concentradores pueden tener varias manifestaciones, como:

Cañón urbano: Son áreas entre edificios donde el viento se canaliza y acelera. Dependiendo de la disposición de los edificios, el viento puede desarrollar velocidades significativamente más altas que en áreas circundantes.

Efectos de Esquina: Las esquinas de los edificios pueden generar concentraciones de viento, ya que el flujo de aire tiende a desprenderse alrededor de las mismas, creando zonas de alta velocidad.

Efectos de Perfil: La forma, altura y separación de los edificios modifica abruptamente la variación del viento con la altura. En un ambiente urbano, en primera medida este efecto se asocia a la rugosidad del terreno, con el coeficiente Z_0 (o rugosidad aerodinámica). Propuestas más recientes dividen la capa límite urbana en una subcapa mixta, subcapa inercial y subcapa superficial, con distintos perfiles de viento en cada una de ellas. Referencia: Fernando, J. (2010). Fluid Dynamics of Urban Atmospheres in Complex Terrain. Annual Review of Fluid Mechanics , Vol 42, s 365- 389.

EFFECTOS VISCOSOS

La viscosidad es una propiedad física que describe la resistencia de un fluido a fluir. En el contexto del viento, los efectos viscosos son especialmente importantes en la capa límite atmosférica, que es la región más cercana a la superficie de la Tierra.

Algunos de los efectos viscosos más relevantes incluyen:

Arrastre Viscoso: El viento experimenta resistencia al pasar sobre la superficie de objetos sólidos. Este efecto de arrastre viscoso es responsable de la pérdida de energía del viento cerca de la superficie y es un factor importante en la resistencia aerodinámica.

Generación de Capa Límite: La viscosidad del fluido y la condición de no deslizamiento sólido-fluido, contribuye a la formación de la capa límite, donde la velocidad del fluido aumenta rápidamente desde ser nula en la superficie, hasta alcanzar el 99% de la velocidad de la corriente libre. En meteorología, este fenómeno es crucial en el transporte de momento y energía en la atmósfera cercana a la superficie.

Desarrollo de Torbellinos y Turbulencia: La viscosidad juega un papel en la generación de turbulencia y torbellinos en la capa límite. Estos fenómenos pueden afectar la dispersión de contaminantes y la calidad del aire en entornos urbanos.

En resumen, los efectos viscosos son consideraciones importantes en el análisis del viento, especialmente en la capa límite atmosférica, y afectan aspectos como la resistencia aerodinámica, la formación de capa límite y la generación de turbulencia.

FIRMWARE

El firmware es un tipo de software que proporciona instrucciones específicas para el funcionamiento de dispositivos electrónicos. A diferencia del software tradicional que se ejecuta en un sistema operativo, el firmware está integrado directamente en el hardware del dispositivo.

FLUIDOS VISCOSOS

Un fluido viscoso es un tipo de fluido que exhibe tensiones de corte, siendo las responsables de la resistencia al flujo. La viscosidad es una propiedad física que describe la capacidad de un fluido para deformarse frente a las tensiones de corte.

FREECAD

FreeCAD es un software de diseño asistido por computadora (CAD) de código abierto y gratuito. Se utiliza para la modelización paramétrica en 3D de objetos y diseños. Este programa es especialmente útil para ingenieros, arquitectos, diseñadores de productos y otras disciplinas que requieren herramientas de diseño tridimensional.

FUERZA DE CORIOLIS

La fuerza de Coriolis es un fenómeno que aparece debido a la rotación de la Tierra y tiene un impacto en el desplazamiento de objetos en movimiento en la atmósfera o en cuerpos de agua a gran escala, como océanos. Esta fuerza es responsable de la desviación de la trayectoria de los objetos en movimiento en la superficie de la Tierra.

FUERZA DEL GRADIENTE HORIZONTAL DE PRESIÓN

Es una fuerza que actúa sobre el aire en la atmósfera debido a las diferencias de presión en la superficie de la Tierra. Esta fuerza está relacionada con la variación espacial de la presión atmosférica y juega un papel crucial en la generación del viento.

Cuando hay una diferencia de presión entre dos puntos en la atmósfera, el aire tiende a fluir desde áreas de alta presión hacia áreas de baja presión. La fuerza del gradiente

horizontal de presión es perpendicular a las isobaras (líneas de igual presión) y apunta desde la alta presión hacia la baja presión.

HIGIENISMO

El término "higienismo" ha sido utilizado para describir un movimiento histórico que tuvo lugar en el siglo XIX, conocido como el movimiento higienista. Este movimiento estaba influenciado por las ideas y principios de la higiene y abogaba por prácticas y medidas que promovieran la salud y la prevención de enfermedades.

Durante el siglo XIX, especialmente en Europa y América del Norte, el movimiento higienista se centró en la importancia de las condiciones sanitarias adecuadas para prevenir enfermedades y mejorar la calidad de vida. Los higienistas abogaban por medidas como el saneamiento público, el suministro de agua limpia, la eliminación de desechos de manera segura, la ventilación adecuada y otras prácticas que se consideraban esenciales para mantener la salud de la población.

Este movimiento también influyó en la arquitectura y el urbanismo, promoviendo la planificación de ciudades con espacios verdes, áreas recreativas y diseño urbano que favoreciera la salud de los habitantes

IoT (INTERNET OF THINGS)

IoT son las siglas de "Internet de las cosas" (en inglés, Internet of Things). El Internet de las cosas se refiere a la interconexión de dispositivos físicos, objetos y sistemas a través de internet. Estos dispositivos, también conocidos como "cosas", están equipados con sensores, software y otros componentes que les permiten recopilar y compartir datos.

El objetivo del IoT es permitir que estas cosas se comuniquen entre sí y con sistemas en la nube, generando así información valiosa y facilitando la toma de decisiones inteligentes. A través de la conectividad de estos dispositivos, se busca mejorar la eficiencia, la productividad y crear experiencias más inteligentes para los usuarios en diversos ámbitos, como el hogar, la industria, la salud, el transporte y más.

ISOBARAS

Las isobaras son líneas imaginarias en un mapa que conectan puntos de igual presión atmosférica. Estas líneas son un componente fundamental de los mapas meteorológicos y son utilizadas para representar de manera visual las variaciones en la presión atmosférica en una región determinada.

Viento y Dirección: El viento tiende a soplar perpendicularmente a las isobaras desde áreas de alta presión hacia áreas de baja presión. En el hemisferio norte, el viento se desvía hacia la derecha debido al efecto Coriolis, y en el hemisferio sur, se desvía hacia la izquierda.

El estudio de las isobaras en los mapas meteorológicos es esencial para comprender y prever el clima, ya que proporciona información sobre los sistemas de presión y los patrones de viento en una determinada región.

LONGITUD DE MEZCLA DE PRANDTL

La longitud de mezcla de Prandtl es un parámetro utilizado en la meteorología y la oceanografía para caracterizar la profundidad a la cual se mezclan las propiedades del fluido, como la temperatura o la salinidad. Este concepto es particularmente relevante en la capa límite atmosférica y la capa de mezcla oceánica.

La longitud de mezcla de Prandtl se define como la distancia vertical sobre la cual las propiedades del fluido se mezclan en un gradiente estable de velocidad. Específicamente, se relaciona con el perfil vertical de velocidad y la velocidad de mezcla del fluido.

MORFOLOGÍA

La morfología es una rama de la biología que se ocupa del estudio de la forma y la estructura de los organismos y sus partes. También se puede aplicar en otros campos para describir la forma y estructura de objetos, terrenos, o cualquier entidad con características físicas distintivas.

MORFOMETRÍA

La morfometría es una disciplina que se centra en la medición y análisis cuantitativo de la forma y la estructura de organismos, objetos o cualquier entidad con características físicas distintivas. Puede aplicarse en diversas áreas, incluyendo biología, antropología, geología, paleontología, entre otras.

En general, la morfometría utiliza herramientas matemáticas y estadísticas para analizar y cuantificar las variaciones en la forma y estructura de entidades en diferentes campos

científicos. La aplicación específica de la morfometría dependerá del objeto de estudio y los objetivos de la investigación en cuestión.

NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds (Re) es una cantidad adimensional que se utiliza en la mecánica de fluidos para caracterizar el flujo de un fluido. Este número lleva el nombre del ingeniero británico Osborne Reynolds, quien introdujo el concepto en la década de 1880 [ref.]. El número de Reynolds relaciona fuerzas inerciales con fuerzas viscosas:

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{Inercia}}{\mathbf{Viscosidad}}$$

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{L}}{\mu}$$

donde ρ es la densidad del fluido, μ la viscosidad dinámica del fluido, \mathbf{V} la velocidad del fluido, y \mathbf{L} una longitud característica del objeto; es crucial para comprender el comportamiento de los flujos y determinar si el flujo es laminar o turbulento.

ref.: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1883.0029>

NÚMERO DE RICHARDSON

El número de Richardson (también conocido como Ri o Ri*), denominado en honor al meteorólogo británico Lewis Fry Richardson, es un parámetro adimensional utilizado en meteorología y oceanografía para evaluar la estabilidad atmosférica y predecir la posibilidad de convección.

El número de Richardson es particularmente relevante en la atmósfera y los océanos, donde las variaciones en la temperatura y la velocidad del viento vertical pueden influir en la formación de nubes, la dinámica atmosférica y la circulación oceánica.

En mecánica de fluidos, el número de Richardson (Ri) es un número adimensional que expresa la relación entre la energía potencial y la energía cinética de un fluido.

$$Ri = \frac{\text{Energía potencial}}{\text{Energía cinética}}$$

$$Ri = \frac{g h}{u^2}$$

En meteorología el número adimensional de Richardson se define como la relación entre la turbulencia térmica y la turbulencia mecánica.

$$Ri_g = \frac{g}{\bar{T}} \frac{(\partial T / \partial z)}{(\partial u / \partial z)^2} = \frac{\text{turbulencia térmica}}{\text{turbulencia mecánica}}$$

ef.: Roland B. Stull; An Introduction to Boundary Layer Meteorology; Kluwer Academic Publisher (1988); ISBN 978-90-277-2768-8.

PERSISTENCIA DE DATOS ON CLOUD

La persistencia de datos en la nube se refiere a la durabilidad y disponibilidad a largo plazo de la información almacenada en servicios de computación en la nube. Cuando los datos se almacenan en la nube, es crucial asegurar que la información persista y esté disponible de manera confiable incluso en situaciones de falla o pérdida de recursos.

La persistencia de datos en la nube es un aspecto crítico de la gestión de la información y requiere estrategias cuidadosas para garantizar la confiabilidad y disponibilidad continua de los datos almacenados en entornos en la nube.

RÁFAGA

Es un evento discreto dentro de un campo de viento turbulento. En el ámbito de la energía eólica, se define ráfaga como la máxima velocidad del viento en un intervalo de segundos a minutos.

RAZÓN DE BOWEN

La razón de Bowen es un concepto en meteorología que se utiliza para describir la relación entre la cantidad de calor sensible y el calor latente en la atmósfera. Es un parámetro importante para entender las condiciones de humedad y la evaporación en la atmósfera. Es una herramienta importante para comprender las interacciones entre la superficie terrestre y la atmósfera, especialmente en términos de transferencia de calor y humedad.

SOTAVENTO

Sotavento es el lado de un objeto que está en la dirección hacia la cual sopla el viento.

TECNÓLOGO

Un tecnólogo es un profesional que se especializa en la aplicación práctica de conocimientos y técnicas en un campo técnico o tecnológico específico. Los tecnólogos suelen tener una formación educativa que les proporciona habilidades prácticas y aplicadas en lugar de un enfoque más teórico.

TOPOGRAFÍA

La topografía se refiere al estudio y la representación detallada de la superficie de la Tierra, incluyendo las características naturales y artificiales del terreno. Estas características pueden abarcar desde montañas, valles y cuerpos de agua hasta rutas, edificios y otros elementos construidos por el ser humano.

TRANSDUCTOR

Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. En otras palabras, un transductor toma una señal o energía en un formato y la transforma en otra. Este proceso de conversión puede ocurrir en ambas direcciones, dependiendo del tipo de transductor y de sus aplicaciones.

TRIMPOT MULTIVUELTAS

Un "trimpot multivoltas" se refiere a un potenciómetro ajustable de precisión que puede girar a través de múltiples vueltas completas. Un potenciómetro, también conocido como "potenciómetro variable" o simplemente "potenciómetro", es un componente electrónico que proporciona resistencia variable y se utiliza comúnmente para ajustar niveles de voltaje, corriente o señales analógicas en circuitos electrónicos.

La característica clave de un trimpot multivoltas es que ofrece más resolución en la ajustabilidad en comparación con un potenciómetro estándar de una sola vuelta. Mientras que un potenciómetro de una sola vuelta permite ajustes a lo largo de un rango completo

con solo un giro, un trimpot multivuelatas permite múltiples giros para recorrer todo el rango de resistencia.

VALOR GEOSTRÓFICO

El término "valor geostrófico" generalmente se refiere al equilibrio geostrófico en meteorología y oceanografía. El equilibrio geostrófico es un concepto fundamental utilizado para describir el equilibrio entre la fuerza de Coriolis y la gradiente de presión en la atmósfera o el océano.

Cuando un fluido, como la atmósfera o el océano, se encuentra en equilibrio geostrófico, las fuerzas de Coriolis y la gradiente de presión están equilibradas y no hay aceleración resultante. Este equilibrio se basa en el efecto de la rotación de la Tierra y la variación en la presión atmosférica o en la altura del océano.

El valor geostrófico específico se refiere a la velocidad geostrófica, que es la velocidad a la que se movería una partícula de fluido en equilibrio geostrófico. En el equilibrio geostrófico, la fuerza de Coriolis es igual y opuesta a la gradiente de presión, y la partícula se mueve a lo largo de las llamadas "trayectorias geostróficas".

VIENTO GEOSTRÓFICO

El viento geostrófico es un concepto meteorológico que describe la dirección y velocidad del viento en la atmósfera cuando esta se encuentra en equilibrio geostrófico. Este equilibrio se establece entre la fuerza de Coriolis, que es causada por la rotación de la Tierra, y el gradiente de presión, que está asociado con las diferencias de presión atmosférica.

VÓRTICE

En meteorología y dinámica de fluidos, un vórtice es un patrón de circulación en un fluido, ya sea en la atmósfera, océanos o cualquier otro medio gaseoso o líquido. En el contexto del viento, un vórtice puede describir un movimiento giratorio del aire alrededor de un eje central. Estos vórtices pueden variar en tamaño, desde pequeños remolinos hasta sistemas de gran escala, como los huracanes.

Algunos tipos comunes de vórtices en el contexto del viento incluyen:

Vórtices Troposféricos

Son vórtices atmosféricos que ocurren en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera terrestre. Ejemplos incluyen ciclones, anticiclones y torbellinos.

Vórtices en Fluidos Urbanos

En áreas urbanas, la presencia de edificios y otras estructuras puede dar lugar a vórtices locales, como los vórtices de estela detrás de edificios o los vórtices en esquinas de calles.

Vórtices de Microescala

Son pequeños vórtices que pueden formarse en escalas muy pequeñas, como remolinos de polvo o pequeños torbellinos.

Vórtices Mesoscalares

Se refieren a vórtices que operan en una escala intermedia entre las microescalas y las macroscales, como los vórtices en límites de capas de aire.

Vórtices Oceánicos

En los océanos, los vórtices pueden formarse debido a la interacción de corrientes marinas y otros factores. Un ejemplo son los remolinos oculares en los océanos.

Vórtices de Remolino

Son vórtices caracterizados por un giro circular del fluido alrededor de un punto central. Pueden formarse en diversos contextos, desde pequeños remolinos en ríos hasta grandes sistemas de tormentas.

El comportamiento de los vórtices es complejo y está influenciado por factores como la velocidad del viento, la temperatura, la presión atmosférica y la topografía. La formación de vórtices es un fenómeno común en la naturaleza y es fundamental para entender la dinámica atmosférica y oceánica.

