

# El diseño de un modelo lineal de comportamiento para un anemómetro análogo comparando los métodos de mínimos cuadrados y de interpretación línea de Newton por diferencias divididas

Design of a linear behavior model for an anemometer: comparing two validated classical methods of physical mechanics

L.L. Vargas Oseguera  ; J.M. Rodríguez-González  ; J. Morán-Hernández  ; A. Terán-Soria 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25430>

Scientific and technological research paper

**Abstract**— This article underscores the importance of accurate wind speed measurements and highlights the necessity of standardizing anemometers using robust mathematical models to ensure reliable data across a range of fields, including meteorology, wind energy, aviation, and civil engineering. Two classical mathematical modeling methods—the Least Squares Method and Newton's Divided Differences Method—are presented and compared. The paper evaluates the performance of these methods in anemometer standardization, taking into account their practical applications, limitations, and accuracy under varying experimental conditions. Previous studies demonstrating the efficacy of both methods across different domains are referenced. A methodology is proposed for comparing the two approaches through a controlled wind tunnel experiment using a calibrated digital anemometer under diverse flow conditions. The results will enable researchers and practitioners to select the most appropriate method for their specific needs, thereby enhancing the precision and reliability of wind speed measurements in a wide array of applications. In conclusion, the paper aims to provide a comprehensive analysis of the advantages and limitations of the Least Squares Method and Newton's Divided Differences Method in anemometer standardization, ultimately contributing to improved measurement quality in various sectors.

**Index Terms**—Wind speed measurement, anemometer, mathematical model, comparison, standardizing, least squares, method, Newton's divided differences method.

**Resumen**— El artículo se centra en la importancia de la medición precisa de la velocidad del viento y destaca la relevancia de la estandarización por medio de modelos matemáticos de los anemómetros para garantizar datos confiables en diversos campos, como meteorología, energía eólica, aviación e ingeniería civil. Se describen dos métodos utilizados en el área de modelado matemático como lo son, el Método de Mínimos Cuadrados y el Método de

Diferencias Divididas de Newton. El artículo propone comparar y evaluar el rendimiento de ambos métodos en la estandarización de un anemómetro, considerando aplicaciones, limitaciones y precisión en diferentes condiciones experimentales. Se mencionan estudios anteriores que han demostrado la eficacia de ambos métodos en distintas áreas. Se presenta una metodología para la comparación detallada de ambos métodos mediante un experimento controlado en un túnel de viento, utilizando un anemómetro digital calibrado y diferentes condiciones de flujo. Los resultados obtenidos permitirán a los investigadores y profesionales seleccionar el enfoque más adecuado para sus necesidades específicas y mejorar la precisión y confiabilidad de las mediciones de velocidad del viento en diversas aplicaciones prácticas. Es decir, que se busca proporcionar una visión integral de las ventajas y desventajas de los Métodos de Mínimos Cuadrados y Diferencias Divididas de Newton en la estandarización de anemómetros, con el objetivo de mejorar la calidad de las mediciones en diversas áreas.

**Palabras claves**— Anemómetro, estandarización de instrumentos, medición de la velocidad del viento, método de mínimos cuadrados, método de diferencias divididas de Newton

## I. INTRODUCCIÓN

La medición precisa y confiable de un parámetro como la velocidad del viento es esencial para una amplia gama de aplicaciones en meteorología, por ejemplo, para aplicaciones en la meteorología [1] [2], así como en la energía eólica, aviación e ingeniería civil, esta última disciplina involucra a arquitectos, ingenieros y contratistas que deben cuidar la planificación y el diseño de las estructuras constructivas en las que participan, las

This manuscript was submitted on September 06, 2023, accepted on August 21, 2024 and published on September 27, 2024.

J.M. Rodríguez-González Ingeniero mecánico, egresado de la Universidad Autónoma del Estado de México actualmente profesor asignatura "A" del Tecnológico Nacional de México / TES Valle de Bravo, miembro del comité de investigación institucional (e-mail: jose.rg@vbravo.tecnm.mx).  
J. Morán-Hernández. Dr. en C. y M. Sc. por la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México. Q.F.B. por la Universidad

Autónoma Metropolitana, estancia en el Instituto de Inmunología de la Universidad de California U.S.A (e-mail: juanmoran825@gmail.com).

A. Terán-Soria. Egresado de la carrera de Ingeniería Mecatrónica del TES campus Valle de Bravo. Actualmente laborando en el área de automatización y diseño de procesos (e-mail: l201935037@vbravo.tecnm.mx).

L.L. Vargas Oseguera. Ingeniera Mecatrónica egresada del TES campus Valle de Bravo, obteniendo la primera mención honorífica del Programa de Estudios por su alto desempeño académico. (e-mail: lilianalucero Vargasoseguera@gmail.com).



cuales van desde, casa habitación, hasta rascacielos, que estructuralmente requieren del cuidado y determinación o medición de las condiciones meteorológicas, para el adecuado proceso constructivo y la culminación efectiva en tiempos y formas que sean congruentes con lo planificado [3].

Los anemómetros son dispositivos esenciales utilizados para esta tarea, y su calibración adecuada es de vital importancia para garantizar mediciones precisas y consistentes [4]. La estandarización de un anemómetro, que implica determinar su curva de calibración, es un proceso crítico en el aseguramiento de la fiabilidad y exactitud de los datos recolectados [1] ya Pindado y colaboradores en 2014, investigadores del Instituto IDR/UPM en Madrid España, han reportado sus resultados experimentales sobre el funcionamiento de anemómetros en la industria eólica y de las variables específicas que afectan sus señales de salida durante su monitoreo, para ello también los autores han aplicado modelos matemáticos analíticos que estudiaron el comportamiento de los componentes analizados en los anemómetros monitoreados.

En este contexto, existen diferentes enfoques para la estandarización de dispositivos cuando no hay datos del proveedor o en la reparación o mantenimiento que se realiza, sin embargo, en un ejercicio académico y de trabajo colaborativo se han seleccionado el Método de Mínimos Cuadrados y el Método de Diferencias Divididas de Newton. Ambos métodos han demostrado su eficacia en la aproximación y ajuste de curvas a datos experimentales, pero cada uno tiene sus propias características y ventajas que deben ser analizadas cuidadosamente para seleccionar el enfoque más adecuado para este propósito específico. El presente artículo tiene como objetivo comparar y evaluar el desempeño de estos dos métodos en la estandarización de un anemómetro, destacando sus aplicaciones, limitaciones y precisión en un rango de condiciones experimentales. Para lograr este objetivo, se consultaron algunas investigaciones y artículos científicos publicados que abordan experimentos validados utilizando estos métodos.

En 2012 Pacheco y Colaboradores, hablan de un modelo no lineal combinado de interpolación de Lagrange y de diferencias divididas de Newton con un procedimiento de alto orden para la identificación de baja frecuencia en una contingencia crítica en un sistema eléctrico, con una aplicación eficaz y la disminución del tiempo en la búsqueda de parámetros críticos [5].

En el estudio realizado por Zhang y colaboradores en 2015, utilizan el Método de mínimos cuadrados para modelar el pos procesamiento de datos de medición de campos electromagnéticos haciendo énfasis a la capacidad de ajuste flexible propia del método en la función de ponderación y tener como lo relatan una buena estabilidad [6].

Mientras que, De Vicente y Oliva, y Sánchez, en 2016 utilizaron ajustes por medio del método de mínimos cuadrados en el análisis de diversas aplicaciones en la metrología, mostrando por ejemplo el caso de la utilización de un patrón de

calibración vertical usado en rugosímetros y microscopios, para poder obtener el modelo que representaría la estimación de la altura en la fecha actual por medio de la deriva anual [7].

Mohammed y Abood en reportaron en 2017 el uso comparativo de estos métodos de interpolación y diferencias divididas en un estudio acerca de la contaminación de suelos por metales pesados en un campamento de personas desplazadas en Irak, obteniendo un modelo matemático de alta precisión, eficiente y rápido [8].

En adición, Azorin y colaboradores en 2018, de la Universidad de Gothenburg, reportaron el uso de modelos estadísticos para analizar y minimizar problemáticas con relación a la afectación de anemómetros respecto al sesgo en la detección y el almacenamiento de datos, lo cual es inherente a el efecto del viento sobre los instrumentos de medición [4].

Para 2018 en un estudio realizado por Zhang y colaboradores donde utilizan como base el método de mínimos cuadrados, llevándolo a un método de mínimos cuadrados recursivos ponderados desacoplados aplicado que estima por separado parámetros de dinámica rápida y lenta de batería y su sistema de gestión, haciendo un análisis de sus parámetros de funcionamiento y generando un modelo que se pudiera simular mejorando no solo la precisión sino también el rendimiento [9].

Otro estudio realizado por Wijaya y colaboradores en 2019 muestra la aplicación de interpolación de diferencias divididas de Newton para optimizar el tiempo de funcionamiento de una señal de tránsito hasta en 21.7% en una intersección de alto flujo de automóviles en Yogyakarta [10].

En una aplicación ingenieril, Cantera Cantera y colaboradores en 2019 para la estimación de parámetros del algoritmo de control de un motor ultrasónico lineal (LUM) se utilizó el método de mínimos cuadrados y mínimos cuadrados totales con lo que se obtuvieron las leyes de control del LUM para llevar a cabo tareas de seguimiento y regulación [11].

Para 2020, Tianqui y colaboradores, muestran el uso del método de mínimos cuadrados haciendo un proceso de truncamiento, recortando el método para poder evitar el error del método ante valores atípicos en el proceso de medición de una máquina de coordenadas utilizada en cilindros de acero [12].

En este artículo, proponemos una comparación detallada del Método de Mínimos Cuadrados y el Método de Diferencias Divididas de Newton en la estandarización de un anemómetro. Se llevó a cabo un experimento controlado en un túnel de viento, utilizando un anemómetro digital calibrado y condiciones de flujo, para obtener conjuntos de datos que representen diversas situaciones experimentales. Estos datos serán sometidos a ambos métodos, y se compararán los resultados obtenidos para evaluar la precisión y la estabilidad de cada método.

Este estudio proporcionó una visión integral de las fortalezas y debilidades del Método de Mínimos Cuadrados y

el Método de Diferencias Divididas de Newton en la estandarización de un anemómetro. Los resultados obtenidos permitirán a los investigadores y profesionales seleccionar el enfoque más adecuado para sus necesidades específicas, mejorando así la precisión y confiabilidad de las mediciones de velocidad del viento en diversas aplicaciones prácticas.

## II. METODOLOGÍA

El objetivo del desarrollo y la estandarización de un anemómetro análogo marca Adafruit, modelo 1733 (fig. 1) para obtener mediciones confiables, debido a que el proveedor no esclarece de manera oportuna los rangos de medición, ya que sólo proporciona un mínimo y un máximo de velocidad de medición y voltaje de salida en estos dos parámetros, y son visualizados en la ficha técnica del fabricante [13], para este proceso de estandarización se utilizó un anemómetro digital calibrado, marca PEAKMETER, modelo PM6252B (fig. 2), del cual podemos encontrar sus características directamente del fabricante, donde se hace una descripción técnica del equipo y sus rangos de confiabilidad [14] y un túnel de viento GUNT Hamburg-HM 226 (fig. 2) que se encuentran en las instalaciones de la institución. Cada uno se describen y caracterizan de manera general.



Fig. 1. Anemómetro análogo Adafruit 1733. Nota: Adafruit (2023). Anemómetro análogo 1733 (fotografía). Adafruit. <https://www.adafruit.com/product/1733>



Fig 2. Anemómetro digital, PEAKMETER, PM6252B.

Nota: Meteport. (2023). Anemómetro digital, PM6252B (fotografía). Meteport. <https://meterport.com/es/products/peakmeter-pm6252b-digital-anemometer>.

### Caracterización del anemómetro análogo Adafruit 1733

Se seleccionó el anemómetro análogo Adafruit 1733 que utiliza un conjunto de cazoletas giratorias conectadas a un generador eléctrico. La velocidad de rotación de las cazoletas está correlacionada con la velocidad del viento. Las características técnicas son; 1) salida: 0,4 a 2 V, 2) rango de prueba: 0,5m/s a 50 m/s, 3) resolución de 0,1 m/s, 4) exactitud reportada de 1m/s en el peor de los casos, 5) velocidad máxima: 70m/s y 6) conexión de tres pines: Pin 1 es para la fuente de energía, Pin 2 es tierra y Pin 3 la señal de datos.

### Caracterización del anemómetro digital PEAKMETER PM6252B:

Se utilizó un anemómetro digital comercial de alta precisión como referencia. El anemómetro digital fue calibrado previamente en un laboratorio acreditado utilizando un sistema de calibración trazable, con pantalla LCD para visualizar mediciones, además de la velocidad el viento, mide temperatura ambiente, humedad, temperatura de punto de rocío y volumen de aire. Las especificaciones técnicas son: 1) medición de 0,8 – 98,4 ft/s-- +- (2% de lectura +50) – ft/s, 2) alimentación con una batería de 9V.

### Caracterización del túnel de viento utilizado en el proceso de estandarización:

Se empleó un túnel de viento GUNT Hamburg-HM 226 con capacidad para generar flujos de aire de diferentes velocidades y perfiles de turbulencia controlados. Se verificó la calibración del túnel de viento para asegurar su adecuado funcionamiento durante las pruebas. Se trata de un túnel de viento con un soplador radial de flujo variable de 10 niveles con 480 m<sup>3</sup>/h de caudal volumétrico máximo.



Fig. 3. Túnel de viento Gunt Hamburg HM 226. Nota: Gunt Hamburg (2023). HM 226. Túnel de viento (fotografía). Gunt Hamburg. <https://www.gunt.de/es/productos/tunel-de-viento-para-la-visualizacion-de-lineas-de-corriente/070.22600/hm226/glct-1:pa-150:pr-819>

Del túnel de viento no se conoce cual es el flujo en cada uno de los niveles que cuenta el soplador radial, ya que no se cuenta con el manual de uso en el laboratorio, adicional a ello no encontramos especificaciones por parte del fabricante para conocer estos datos, por ello es por lo que se utilizó el anemómetro digital para poder determinar dichos valores.

*Comparación en el túnel de viento.*

Se realizaron pruebas comparativas colocando de forma asíncrona el anemómetro análogo que tiene mediciones en Voltaje [V] y el anemómetro digital con mediciones en velocidad del viento [m/s] en el mismo punto de salida del túnel de viento, dejándolos 30 segundos para la lectura de la medición. Se realizaron mediciones bajo los diferentes niveles de velocidad del túnel, con ello surgieron los datos mostrados en la Tabla I, para poder modelar se recopilaron los datos de ambos anemómetros y se generaron curvas de estandarización para el anemómetro análogo.

TABLA I  
COMPARACIÓN DE MEDICIONES

Rango del túnel de viento	Anemómetro Adafruit 1733, Voltaje [V]	Anemómetro PEAKMETER PM6252B, Velocidad de viento [m/s]
1	0.4	0
2	0.412	0.32
3	0.43	0.82
4	0.445	1.13
5	0.469	1.48
6	0.493	1.95
7	0.512	2.33
8	0.531	2.75
9	0.552	3.07
10	0.558	3.21

*Método de Mínimos Cuadrados*

En la Fig. 4 podemos observar un comportamiento lineal (línea roja), utilizando el método de mínimos cuadrados, usaremos una hoja de cálculo debido a su fácil manipulación y replica en la ingeniería aplicada, utilizando la metodología descrita por Chapra y Canale [15] para obtener un modelo de la forma  $y = a_0 + a_1x + e$ , donde  $a_0$  y  $a_1$  son los coeficientes de intersección con el eje y la pendiente, respectivamente, mientras que  $e$  es el error, o diferencia, entre el modelo y las observaciones. El cálculo de sumatorias necesarias y datos para la determinación de los coeficientes lo podemos observar en la Tabla II.

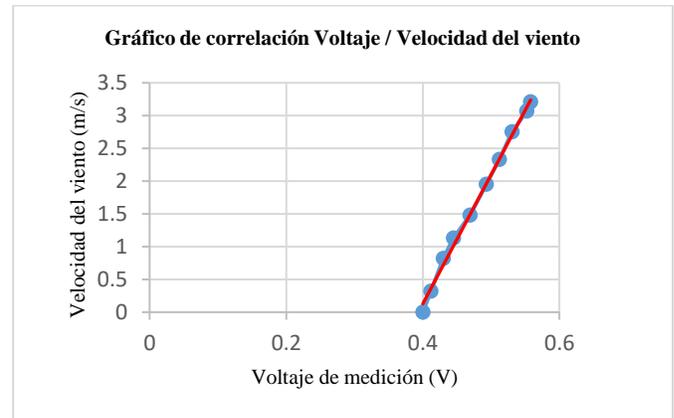


Fig.4. Correlación de variables entre anemómetros (m/s-V)

TABLA II  
CÁLCULO DE SUMATORIAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DEL MODELO LINEAL.

Rango del túnel de viento	$x_i$ [V]	$y_i$ [m/s]	$x_i * y_i$	$x_i^2$	$(y_i - a_0 - a_1x)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	0.4	0	0.0000	0.1600	0.0159	2.9104
2	0.412	0.32	0.1318	0.1697	0.0018	0.1024
3	0.43	0.82	0.3526	0.1849	0.0106	0.6724
4	0.445	1.13	0.5029	0.1980	0.0138	1.2769
5	0.469	1.48	0.6941	0.2200	0.0000	2.1904
6	0.493	1.95	0.9614	0.2430	0.0001	3.8025
7	0.512	2.33	1.1930	0.2621	0.0000	5.4289
8	0.531	2.75	1.4603	0.2820	0.0019	7.5625
9	0.552	3.07	1.6946	0.3047	0.0025	9.4249
10	0.558	3.21	1.7912	0.3114	0.0008	10.3041
$\Sigma =$	0.8020	7.0600	8.7818	2.3359	0.0474	43.6754

*Obtención de Coeficientes:*

**Número de datos:**  $n = 10$

**Medias:**  $\bar{x} = 0.4802$  y  $\bar{y} = 1.7060$

**Coefficientes:** Se desarrollan conforme a (1) y (2).

$$a_0 = \frac{n \sum x_i * y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \tag{1}$$

$$a_1 = \bar{y} - a_0 \bar{x} \tag{2}$$

$$a_0 = -7.7527 \text{ y } a_1 = 19.6975$$

Con los coeficientes se determina el Modelo lineal de la forma descrita en (3),

$$y = -7.7527 + 19.6975x \tag{3}$$

**Cuantificación del error.**

Se determina la suma de los cuadrados de los residuos entre la y medida y la y calculada usando (4) con el modelo lineal.

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,medida} - y_{i,modelo})^2 \tag{4}$$

$$= (y_i - a_0 - a_1 x)^2$$

$$S_r = 0.0474$$

Determinación del error estándar de la estimación por medio de (5),

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-2}} \tag{5}$$

$$S_{y/x} = 0.0770$$

Cuantificación de la suma total de los cuadrados de las diferencias entre los datos y la media por medio de (6),

$$S_t = (y_i - \bar{y})^2 \tag{6}$$

$$S_t = 43.6754$$

Determinación del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y el coeficiente de correlación ( $r$ ), por medio de (7),

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \tag{7}$$

$$r^2 = 0.9989$$

$$r = 0.9995$$

Determinación de la desviación estándar respecto de la media ( $S_y$ ), utilizando (8),

$$S_y = \sqrt{\frac{S_t}{n-1}} \tag{8}$$

$$S_y = 2.2029$$

El criterio para estimar si el modelo es adecuado, se describe en (9),

$$S_{y/x} < S_y \tag{9}$$

El modelo es adecuado debido a que:  $0.0770 < 2.2029$

*Método de Diferencias Divididas de Newton*

Para la realización de este método tendremos que realizar una sola diferencia al tratarse de un modelo lineal, sin embargo, podrá surgir un modelo lineal para cada iteración retratada en la primera de las columnas, es decir, 9 modelos lineales, estos serán evaluados para seleccionar uno y compararlo con el modelo obtenido a partir de este, en la Tabla III se desarrolla cada diferencia indicada para la iteración indicada,

TABLA III  
CÁLCULO DE LAS PRIMERAS DIFERENCIAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DEL MODELO LINEAL

Iteración (i)	Rango del túnel de viento	$x_i$ (V)	$y_i = f(x_i)$ [m/s]	$y_i = f(x_i, x_j)$
0	1	0.4	0	26.6667
1	2	0.412	0.32	27.7778
2	3	0.43	0.82	20.6667
3	4	0.445	1.13	14.5833
4	5	0.469	1.48	19.5833
5	6	0.493	1.95	20.0000
6	7	0.512	2.33	22.1053
7	8	0.531	2.75	15.2381
8	9	0.552	3.07	23.3333
9	10	0.558	3.21	1.7912

*Obtención de Coeficientes:*

Número de datos:  $n = 10$

Medias:  $\bar{x} = 0.4802$  y  $\bar{y} = 1.7060$

Coefficientes: Se desarrollan en (10) y (11)

III. RESULTADOS

$$b_0 = f(x_i) \tag{10}$$

$$b_i = \frac{f(x_j) - f(x_i)}{x_j - x_i} \tag{11}$$

La determinación de los coeficientes se detalla en la Tabla IV, de la cual podemos observar también el modelo lineal generado para cada iteración en la última columna.

TABLA IV  
DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES B<sub>0</sub> Y B<sub>1</sub> DEL MODELO LINEAL

<i>i</i>	<i>x<sub>i</sub></i> (V)	<i>b<sub>0</sub></i> = <i>f</i> ( <i>x<sub>i</sub></i> )	<i>b<sub>i</sub></i> = <i>f</i> ( <i>x<sub>i</sub></i> , <i>x<sub>j</sub></i> )	Modelo lineal
0	0.4	0	26.6667	<i>y</i> = 0 + 26.6667( <i>x</i> - 0.4)
1	0.412	0.32	27.7778	<i>y</i> = 0.32 + 27.7778( <i>x</i> - 0.32)
2	0.43	0.82	20.6667	<i>y</i> = 0.82 + 20.6667( <i>x</i> - 0.82)
3	0.445	1.13	14.5833	<i>y</i> = 1.13 + 14.5833( <i>x</i> - 1.13)
4	0.469	1.48	19.5833	<i>y</i> = 1.48 + 19.5833( <i>x</i> - 1.48)
5	0.493	1.95	20.0000	<i>y</i> = 1.95 + 20( <i>x</i> - 1.95)
6	0.512	2.33	22.1053	<i>y</i> = 2.33 + 22.1053( <i>x</i> - 2.33)
7	0.531	2.75	15.2381	<i>y</i> = 2.75 + 15.2381( <i>x</i> - 2.75)
8	0.552	3.07	23.3333	<i>y</i> = 3.07 + 23.3333( <i>x</i> - 3.07)
9	0.558	3.21		

A partir de los modelos obtenidos podemos determinar los coeficientes *a*<sub>0</sub> y *a*<sub>1</sub> (Tabla V) que servirán en la comparación con el modelo del Mínimos Cuadrados, ya que de estos se seleccionarán aquellos con menor error estándar respecto a *a*<sub>0</sub> y *a*<sub>1</sub> desarrollados.

TABLA V  
DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES *a*<sub>0</sub> Y *a*<sub>1</sub> DEL MODELO LINEAL.

Modelo lineal	<i>a</i> <sub>0</sub>	<i>a</i> <sub>1</sub>	Modelo lineal a partir de <i>a</i> <sub>0</sub> y <i>a</i> <sub>1</sub>
<i>y</i> = 0 + 26.6667( <i>x</i> - 0.4)	-10.6667	26.26667	<i>y</i> = -10.6667 + 26.26667 <i>x</i>
<i>y</i> = 0.32 + 27.7778( <i>x</i> - 0.32)	-11.1244	27.7778	<i>y</i> = -11.1244 + 27.778 <i>x</i>
<i>y</i> = 0.82 + 20.6667( <i>x</i> - 0.82)	-8.0667	20.6667	<i>y</i> = -8.0667 + 20.6667 <i>x</i>
<i>y</i> = 1.13 + 14.5833( <i>x</i> - 1.13)	-5.3596	14.5833	<i>y</i> = -5.3596 + 14.5833 <i>x</i>
<i>y</i> = 1.48 + 19.5833( <i>x</i> - 1.48)	-7.7046	19.5833	<i>y</i> = -7.7046 + 19.5833 <i>x</i>
<i>y</i> = 1.95 + 20( <i>x</i> - 1.95)	-7.9100	20	<i>y</i> = -7.91 + 20 <i>x</i>
<i>y</i> = 2.33 + 22.1053( <i>x</i> - 2.33)	-8.9879	22.1053	<i>y</i> = -8.9879 + 22.1053 <i>x</i>
<i>y</i> = 2.75 + 15.2381( <i>x</i> - 2.75)	-5.3414	15.2381	<i>y</i> = -5.3414 + 15.2381 <i>x</i>
<i>y</i> = 3.07 + 23.3333( <i>x</i> - 3.07)	-10.6667	23.3333	<i>y</i> = -10.6667 + 23.3333 <i>x</i>

La comparación de los datos nos tiene que llevar a la selección del modelo más adecuado en la Tabla VI podemos observar el error relativo porcentual (*e*) a partir de los coeficientes del modelo desarrollado por Mínimos Cuadrados:

Coefficientes: *a*<sub>0</sub> = -7.7527 y *a*<sub>1</sub> = 19.6975

TABLA VI  
ERROR RELATIVO PORCENTUAL DE LOS COEFICIENTES *a*<sub>0</sub> Y *a*<sub>1</sub> DEL MÉTODO DE MINIMOS CUADRADOS Y DEL MODELO DEL MÉTODO DE DIFERENCIAS DIVIDIDAS

<i>a</i> <sub>0</sub>	<i>e</i>	<i>a</i> <sub>1</sub>	<i>e</i>
-10.6667	37.59%	26.26667	33.35%
-11.1244	43.49%	27.7778	41.02%
-8.0667	4.05%	20.6667	4.92%
-5.3596	30.87%	14.5833	25.96%
<b>-7.7046</b>	<b>0.62%</b>	<b>19.5833</b>	<b>0.58%</b>
<b>-7.9100</b>	<b>2.03%</b>	<b>20</b>	<b>1.54%</b>
-8.9879	15.93%	22.1053	12.22%
-5.3414	31.10%	15.2381	22.64%
-10.6667	37.59%	23.3333	18.46%

Con base en lo anterior se podrá analizar los modelos lineales de cada método, por un lado, el modelo lineal desarrollado a partir del Método de Mínimos Cuadrados es: *y* = -7.7527 + 19.6975*x* y del Método de Diferencias Divididas serán dos, 1) *y* = -7.7046 + 19.5833*x* y 2) *y* = -7.91 + 20*x*, para dicho análisis se utilizaron diez datos correspondientes a los niveles del túnel de viento con los cuales se obtuvieron dichos modelos y se determinó el error relativo porcentual de cada iteración (Tabla VII), seleccionando aquel modelo que presente una menor cantidad de errores mínimos respecto a los valores originales.

TABLA VII.  
ERROR RELATIVO PORCENTUAL DE LOS MODELOS MEDIANTE EL MMC Y EL MDDN.

Rango del túnel de viento	<i>x<sub>i</sub></i> [V]	<i>y<sub>i</sub></i> = <i>f</i> ( <i>x<sub>i</sub></i> ) [m/s]	Mínimos Cuadrados	<i>e</i>
1	0.4	0	0.1263	12.630%
2	0.412	0.32	0.3627	4.267%
3	0.43	0.82	0.7172	10.278%
4	0.445	1.13	1.0127	11.731%
5	0.469	1.48	1.4854	0.543%
6	0.493	1.95	1.9582	0.817%
7	0.512	2.33	2.3324	0.242%
8	0.531	2.75	2.7067	4.333%
9	0.552	3.07	3.1203	5.032%

Rango del túnel de viento	$x_i$ [V]	$y_i=f(x_i)$ [m/s]	Diferencias Divididas 1)	$e$
1	0.4	0	0.1287	12.872%
2	0.412	0.32	0.3637	4.372%
3	0.43	0.82	0.7162	10.378%
4	0.445	1.13	1.0100	12.003%
5	0.469	1.48	1.4800	0.003%
6	0.493	1.95	1.9500	0.003%
7	0.512	2.33	2.3220	0.795%
8	0.531	2.75	2.6941	5.587%
9	0.552	3.07	3.1054	3.538%
10	0.558	3.21	3.2229	1.288%

Rango del túnel de viento	$x_i$ [V]	$y_i=f(x_i)$ [m/s]	Diferencias Divididas 2)	$e$
1	0.4	0	0.0900	9.000%
2	0.412	0.32	0.3300	1.000%
3	0.43	0.82	0.6900	13.000%
4	0.445	1.13	0.9900	14.000%
5	0.469	1.48	1.4700	1.000%
6	0.493	1.95	1.9500	0.000%
7	0.512	2.33	2.3300	0.000%
8	0.531	2.75	2.7100	4.000%
9	0.552	3.07	3.1300	6.000%
10	0.558	3.21	3.2500	4.000%

De acuerdo con lo desarrollado el modelo por Mínimos Cuadrados presenta un solo error absoluto máximo en la iteración seis, mientras que los desarrollados por Diferencias Dividas 1, presentan cuatro y cinco errores absolutos máximos, respectivamente, sin embargo, cabe aclarar que el Diferencias Dividas 2 tiene la mayor cantidad de errores mínimos absolutos respecto a los otros dos con cinco. Podríamos entonces poder seleccionar cualquiera de los tres modelos para poder plantear el comportamiento del anemómetro análogo, pero hablando de cantidades tan pequeñas de voltaje de acuerdo con las lecturas realizadas conviene tener un parámetro establecido de acuerdo con la Tabla VIII, donde observamos la cantidad de errores absolutos de cada iteración, máximos (Máx.), mínimos (Mín.) y la media de errores (Med.).

TABLA VIII  
CANTIDAD DE ERRORES ABSOLUTOS POR TANDA DE TEN ITERACIONES, MÁXIMOS, MÍNIMOS Y MEDIANA.

ERRORES ABSOLUTOS PORCENTUALES			
MODELO	Máx.	Mín.	Med.
Mínimos cuadrados	1	2	7
Diferencias divididas 1	4	4	2
Diferencias divididas 2	5	5	0

#### IV. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Podemos concluir que para realizar un modelo lineal según lo reportado la selección idónea sería un modelo por medio del Método de Mínimos Cuadrados que presentaría menor cantidad de errores contra los hallados por medio de la interpolación del Método de Diferencias Divididas de Newton, esto conllevaría a que presentamos una media de datos aceptable que puede utilizarse para calcular los datos que se recaben en el anemómetro análogo. Cabe aclarar que podemos discutir la eficacia del Método Mínimos Cuadrados frente al Método de Diferencias Divididas de Newton cuando se tratase de un modelo de mayor complejidad respecto al grado de este según lo reportado por Chapra y Canale [15].

La idea de este análisis toma importancia en el no dar por hecho que a pesar de tener un modelo lineal en el cual se pudo determinar usando la ecuación de una recta por medio de dos puntos como lo eran el mínimo y máximo de voltaje y velocidad reportados por el distribuidor, siento esto lo trivial se puede establecer un ejercicio de comparación interesante.

Asimismo, las limitaciones presentadas en el estudio como la falta de datos del túnel de viento en la institución, o bien que el proveedor del anemómetro analógico en cuestión tampoco tenga la fiabilidad del proveedor puede mejorarse cuando se tuviesen los datos de estos y fuera comparable el error encontrado en los modelos.

Este trabajo es complementario al desarrollo de una estación meteorológica automática (EMA) en la cual se requiere el modelo desarrollado para poder almacenar los datos tomados en la nube por medio del anemómetro conectado a una Raspberry Pi 4, plataforma usada para el desarrollo de la EMA.

## V. REFERENCIAS

- [1] S. Pindado, J. Cubas y F. Sorribes-Palmer, «The Cup Anemometer, a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry. Research at the IDR/UPM Institute,» *Sensors*, vol. 14, n° 11, pp. 21418-21452, 2014.
- [2] L. Mercedes Cúneo, S. Bibiana Cerne y M. P. Llano, «Descripción preliminar de la velocidad y dirección del viento medio mensual en Trelew,» *Meteorologica*, vol. 44, n° 1, pp. 66-80, 2019.
- [3] gaotek, «Applications of Anemometers in Construction Industry,» gaotek, 11 02 2024. [En línea]. Available: <https://gaotek.com/applications-of-anemometer-in-the-construction-industry/>. [Último acceso: 04 09 2024].
- [4] C. Azorín-Molina, J. Asín, T. R. McVicar, L. Minola, G. Zjahng, A. Chen, J. I. López-Moreno, S. M. Vicente-Serrano y D. Chen, «Evaluating anemometer drift: A statistical approach to correct biases in wind,» *Atmospheric Research*, vol. 203, pp. 175-188, 2018.
- [5] N. J. Pacheco-Martínez, C. Juárez y I. Martínez-Carrillo, «Dynamic Stability Analysis Using High-Order Interpolation,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 13, n° 4, pp. 451-460, 2012.
- [6] H. Zhang, C. Guo, X. Su y C. Zhu, «Measurement Data Fitting Based on Moving Least Squares Method,» *Mathematical Problems in Engineering*, n° 195023, pp. 1-10, 2015.
- [7] J. de Vicente y Oliva y J. M. Sánchez Pérez, «Sobre los ajustes por mínimos cuadrados en metrología,» *Revista Española de Metrología*, vol. 11, n° 5, pp. 12-22, 2016.
- [8] L. Naji Mohammed Tawfiq y I. Najm Abood, «Persons Camp Using Interpolation Method,» de *Journal of Physics: Conference Series, IBN AL-HAITHAM FIRST INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE 2017*, Baghdad, Iraq, 2017.
- [9] C. Zhang, W. Allafi, Q. Dinh, P. Ascencio y J. Marco, «Online estimation of battery equivalent circuit model parameters and state of charge using decoupled least squares technique,» *Energy*, vol. 142, pp. 678-688, 2018.
- [10] W. Dinta Dwi Agung, L. Yakub Fahim, U. Sentagi Sesotya y P. Riza, «Analysis of Vehicle Waiting Time Efficiency Using Webster Method and Newton's Divided Difference: Case Study at Mirota Kampus Intersection, Yogyakarta, Indonesia,» de *2019 IEEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2019.
- [11] L. A. Cantera Cantera, L. Luna, C. Vargas-Jarillo y R. Garrido, «Parameter Estimation of a Linear Ultrasonic Motor Using the Least Squares of Orthogonal Distances Algorithm,» de *2019 16th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, Ciudad de México, México, 2019.
- [12] T. Gu, Y. Tu, D. Tang, S. Lin y B. Fang, «A trimmed moving total least-squares method for curve and surface fitting,» *Measurement Science and Technology*, vol. 31, n° 4, pp. 1-8, 2020.
- [13] adafruit, «Anemometer Wind Speed Sensor w/Analog Voltage Output,» 09 04 2014. [En línea]. Available: <https://www.adafruit.com/product/1733>. [Último acceso: 30 08 2024].
- [14] Peakmeter, «USB Interface Hand Held Wind Anemometer , Custom Air Flow Velocity Meter,» 17 marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.peak-meter.com/china-usb-interface-hand-held-wind-anemometer-custom-air-flow-velocity-meter-10766394.html>. [Último acceso: 30 08 2024].
- [15] S. Chapra y R. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, Eight ed., Somerville, Medford: McGraw Hill, 2020.
- [16] D. Yufeng, X. Neng y L. Jun, «Uncertainty analysis of velocity field calibration in wind tunnels based on GUM and MCM,» de *The Fifth International Conference on Physics, Mathematics and Statistics 2022*, Online, 2022.
- [17] A. Ria, A. Catania, P. Bruschi y M. Piotta, «Experimental Evaluation of a 3D-Printed Fluidic System for a Directional Anemometer,» *Sensors*, vol. 20, n° 15, pp. 1-21, 2020.



**J.M. Rodríguez-González** Ingeniero mecánico, egresado de la Universidad Autónoma del Estado de México, actualmente profesor asignatura "A" del Tecnológico Nacional de México / TES Valle de Bravo, miembro del comité de investigación institucional, actualmente sus intereses de investigación están en el desarrollo de proyectos académicos que busquen respuestas ante problemáticas institucionales y regionales en el área de la ingeniería mecánica aplicada.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3837-7490>



**J. Morán-Hernández.** Dr. en C. y M. Sc. por la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México. Q.F.B. por la Universidad Autónoma Metropolitana, estancia en el Instituto de Inmunología de la Universidad de California U.S.A (Institute for Immunology, UCI). Experiencia en investigación básica en Biología Molecular e Inmunología. Posdoctorado ante la

Contingencia por COVID19, en el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias "Ismael Cosío Villegas". Actualmente, Docente de tiempo completo de la Universidad de la Salud, UNISA y desde 2014 al 2022 ha sido profesor y coordinador académico de la Escuela de Química Farmacéutica en UVM Campus Coyoacán, así como profesor de Asignatura del Tecnológico Nacional de México / TES de Valle de Bravo en la División de Ingeniería del 2018 al 2023, en donde colabora como asesor metodológico para prototipos tecnológicos. Cofundador de la sociedad distribuidora de productos cannabinoides, Funkannabis S.A. de C.V. [www.funkannabis.com](http://www.funkannabis.com) que busca implementar la expansión de productos medicinales de la planta de cannabis, específicamente el cannabidiol como sustancia activa que ha demostrado efectos farmacológicos y de regulación de procesos fisiológicos a través de ligandos y receptores del sistema endocannabinoide.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2677-1888>



**L.L. Vargas Oseguera.** Ingeniera Mecatrónica egresada del TES campus Valle de Bravo, obteniendo la primer mención honorífica del Programa de Estudios por su alto desempeño académico. Actualmente laborando en el área de automatización de procesos, y realizando diversos proyectos aplicados al área de investigación, cuyo ámbito se

enfoca en el desarrollo e innovación electrónica, programación y procesamiento de datos.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0204-192X>



**A. Terán-Soria.** Egresado de la carrera de Ingeniería Mecatrónica del TES campus Valle de Bravo. Actualmente laborando en el área de automatización y diseño de procesos, realizando diversos proyectos aplicados al área de investigación, cuyo ámbito se enfoca en el desarrollo e innovación electrónica, programación y

procesamiento de datos, además en el área de diseño mecánico.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9041-1654>