

ENSAYO DE CALIBRACIÓN DE ANEMÓMETROS DE COPAS EN TÚNEL DE VIENTO

Ruffini L.¹, Allende Venencia J.¹, Grosso J.¹, López G.¹,
Jeandrevin G.³ y Butteler M.².

¹Departamento Electrónica, Facultad de Ingeniería, Instituto Universitario Aeronáutico, Argentina

²División de Radar Sistemas Electrónicos, Centro de Investigaciones Aplicadas,
Instituto Universitario Aeronáutico, Argentina

³Departamento Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Instituto Universitario Aeronáutico, Argentina
Av. Fuerza Aérea 6500 (5010) Córdoba- Argentina.

Email: lucasruffini@gmail.com

RESUMEN

En el siguiente trabajo se presentan los ensayos de calibración de anemómetros de copas realizados en el Túnel de Viento Mayor del Centro de Investigaciones Aplicadas del Instituto Universitario Aeronáutico. El objetivo principal de estos ensayos es determinar los parámetros de calibración de anemómetros no calibrados utilizando como patrón un anemómetro certificado del mismo tipo. Además, se usaran estos resultados para evaluar las características del túnel y en que medida las mismas son suficientes para la calibración de acuerdo a estándares internacionales, siguiendo el procedimiento de la Red MEASNET. Para llevar a cabo los ensayos se desarrolla un circuito de adquisición de datos y un software de visualización y almacenamiento. Se realiza un análisis de los valores de los errores obtenidos al contrastar los anemómetros calibrados y no calibrados.

Palabras clave: anemómetro, calibración, túnel de viento, certificación de anemómetros.

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto "Factibilidad Técnica, Económica y Ambiental de la Producción de Hidrógeno en la Provincia de Córdoba en Base a Recursos Eólicos Evaluada a Partir de Mediciones de Campo", seleccionado en la convocatoria 2004 PICTOR II realizada por la ex Agencia Córdoba Ciencia y actualmente en ejecución en el Instituto Universitario Aeronáutico se desarrolla un adquirente y un sistema de transmisión, almacenamiento y visualización vía web de datos meteorológicos para evaluación del recurso eólico.

Dicha convocatoria fue abierta para abordar temas-problema definidos en el ámbito de la Provincia de Córdoba y el proyecto se presentó en la sección "Crisis del Sector Energético Nacional y sus Políticas a Largo Plazo: Sistemas Alternativos de Generación Energética para la Provincia de Córdoba".

El equipo de trabajo está constituido por una red interdisciplinaria de investigadores pertenecientes a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Córdoba, la Universidad Empresarial Siglo 21 y la Facultad de Ingeniería del Instituto Universitario Aeronáutico (IUA).

En el contexto del objetivo específico del IUA de evaluar el recurso eólico, surge la necesidad de realizar la verificación de anemómetros no calibrados en un Túnel de Viento. Estos ensayos se llevaron a cabo en el Túnel de Viento Mayor perteneciente al Departamento Aerodinámica Experimental del Centro de Investigaciones Aplicadas (CIA) del Instituto Universitario Aeronáutico de la Fuerza Aérea Argentina.

El objetivo principal de los ensayos es contrastar los anemómetros calibrados y no calibrados del mismo tipo y marca con el fin de obtener los parámetros de calibración. Para ello es necesario desarrollar un circuito de adquisición de datos. Estos resultados servirán además para evaluar las características del túnel y en que medida las mismas son suficientes para la calibración de acuerdo a estándares internacionales, siguiendo el procedimiento de la Red MEASNET [1].

METODOLOGÍA

La calibración se llevó a cabo mediante la instalación de dos anemómetros en la cámara de ensayo, uno con certificado de calibración y el otro no calibrado. Este montaje pudo realizarse de esta manera debido a las dimensiones de la cámara.

Los valores de velocidad del viento de referencia se obtuvieron a partir de la señal entregada por el anemómetro calibrado.

Para conseguir los parámetros de velocidad de los anemómetros se desarrolla un sistema electrónico de adquisición de datos y un software de procesamiento. La señal de los anemómetros es adquirida, adaptada para su medición y posteriormente procesada con el software implementado. El proceso de medición consiste en digitalizar las señales otorgadas simultáneamente por los anemómetros, y luego determinar su frecuencia. Tomando como patrón la velocidad calculada por el anemómetro certificado se realiza una regresión lineal con los valores obtenidos por el segundo anemómetro. De esta manera, se consigue la función a la que responde la señal entregada por el anemómetro no calibrado, lográndose así el objetivo de la calibración.

ETAPAS EN LA IMPLEMENTACION Y EL DESARROLLO DEL ENSAYO

Fase de Preparación del Ensayo y Montaje en Túnel

La fase de preparación del ensayo consta del montaje de los anemómetros: uno calibrado/certificado, el cual es utilizado como contraste para los anemómetros a verificar, y el otro sin certificar.

Los anemómetros a utilizar en los ensayos son del tipo de copas, marca NRG Systems y modelo NRG #40 (www.nrgsystems.com).

El montaje consta en instalar un soporte en la cámara de ensayo con capacidad para dos anemómetros en el cual se ubican los sensores. Para verificar la perpendicularidad de los mismos respecto del flujo incidente, se utiliza un inclinómetro digital.

Fase de Diseño y Desarrollo del Circuito Electrónico

Para conseguir los parámetros de velocidad de los anemómetros se desarrolla un sistema electrónico de adquisición de datos y un software de procesamiento.

El sistema consta de un circuito cuyos componentes principales son dos microcontroladores de la marca Microchip modelo 16F877A. Cada anemómetro se conecta a un conversor A/D de un microcontrolador, los cuales tienen una resolución de 10 bits.

Para obtener la frecuencia, se mide el tiempo entre flancos de subida de la señal. Este valor es almacenado en memoria hasta ser reemplazado por una nueva medición.

Para obtener dos mediciones simultáneas de los dos anemómetros, se designa un PIC como "master" y otro como "slave". El primero estará encargado de coordinar el envío de los datos a través de una interfaz RS232 para ser procesados en un computador con el software desarrollado.

Fase de Implementación y Medición

Cada anemómetro es conectado a un microcontrolador PIC, cuyo algoritmo de adquisición es implementado a través del lenguaje C con el compilador IDE CCS [2].

Los microcontroladores toman una medición por período y la almacenan en memoria. Cada 1,5 segundos estos transmiten, de manera coordinada, el último valor almacenado. De esta manera, se independiza la cantidad de mediciones por segundo de la frecuencia que se esté midiendo. La transferencia se realiza a través de una interfaz RS232 hacia el computador donde se ejecuta el software de visualización y almacenamiento de los datos.

El programa procesa los datos provenientes de los microcontroladores, convirtiendo estas mediciones de período en frecuencia. Luego, se genera un registro con 4 variables:

- Número de Medición.
- Frecuencia Anemómetro Calibrado.
- Frecuencia Anemómetro no Calibrado.
- Velocidad de viento.

El valor de velocidad de viento se obtiene utilizando la frecuencia del anemómetro calibrado y las constantes de calibración del mismo, las cuales se ingresan en el programa de procesamiento antes de comenzar el ensayo.

En la Figura 1 se puede observar la secuencia de las distintas fases del sistema.

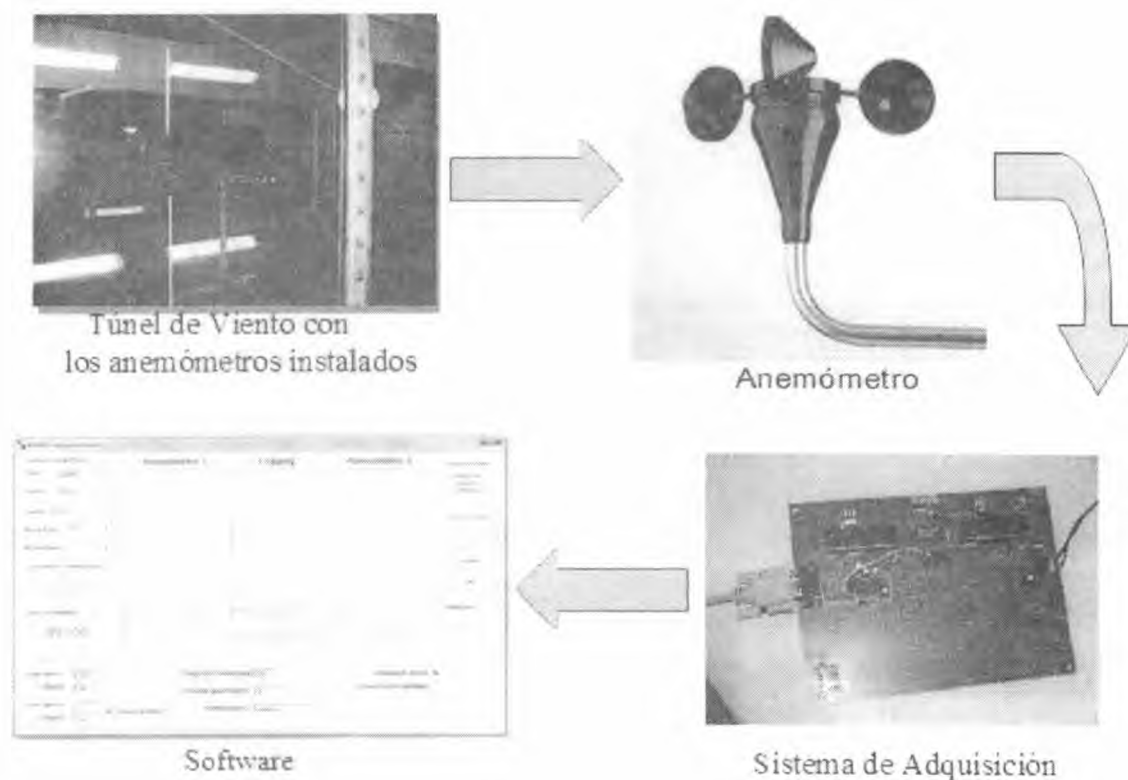


Figura 1. Diagrama de fases de Calibración de Anemómetros.

Fase de Procesamiento de Datos y Obtención de Parámetros de Calibración

El cálculo de los valores de "offset" (ordenada al origen) y "scale factor" (pendiente) de la regresión lineal se efectúa utilizando el software Origin-Pro [3].

Como primer paso se filtran los datos obtenidos. Se eliminan todos los valores menores a 5 m/s, dado el inestable comportamiento del túnel a velocidades menores a esta. Además se decide acotar la velocidad máxima en 25 m/s, considerando esta velocidad como suficiente para caracterizar el comportamiento del mismo. También se eliminan valores que presenten un cambio muy elevado respecto del punto anterior, siendo estos generados por ruido en la señal adquirida.

Finalmente, se realiza una regresión lineal entre el viento medido por el anemómetro calibrado, que se toma como patrón, y la respuesta del anemómetro no calibrado. De esta manera se obtiene una función de respuesta lineal con los parámetros necesarios para su implementación en campo.

ENSAYOS

Se realizaron 6 ensayos independientes. Se registraron las mediciones de los anemómetros A, B, C y D, y se repitió la del anemómetro B, bajo las mismas condiciones, para asegurar la repetitividad en los ensayos. Como último ensayo, se colocaron dos anemómetros calibrados para sacar conclusiones con respecto a la calidad de la calibración.

En cada uno de los ensayos, antes de empezar con la adquisición de los datos, se mantiene la corriente de aire a una velocidad de 10 m/s por 10 minutos para reducir los efectos de cambio de temperatura en el mecanismo del anemómetro.

Una vez iniciada la medición, se intenta mantener la velocidad por períodos regulares de aproximadamente 3 minutos en 5, 10, 15, 20 y 25 m/s. Luego, se procede a bajar la velocidad hasta volver a 5 m/s, de la misma manera.

Se toman valores cada 1,5 segundos en ambos sensores, con un total de 1000 mediciones en paralelo, dando una duración de 25 minutos aproximados por cada ensayo.

PROCEDIMIENTO EN TUNEL DE VIENTO CIA VS. PROCEDIMIENTO MEASNET

La intención del procedimiento MEASNET [1] es dar un marco adecuado para la calibración de anemómetros de copa en túnel de viento. Presenta requerimientos en distintos aspectos del ensayo que se deben cumplir, como requerimientos generales relacionados a la trazabilidad, en las características del túnel de viento, en el montaje, en el sistema de adquisición, entre otros.

En la siguiente tabla se presentan, en forma de resumen, las diferencias entre el procedimiento sugerido por MEASNET y el aplicado en los ensayos de túnel presentados en este trabajo:

Tabla 2. Tabla de principales diferencias entre procedimiento MEASNET y ensayo.

	<i>Procedimiento MEASNET</i>	<i>Túnel Mayor CIA</i>
Relación de Bloqueo	≤ 0.05	0.02
Uniformidad del flujo	0.2 %	< 0.3 %
Intensidad de turbulencia	≤ 2 %	1.19 %
Distorsiones de flujo – Montaje	Montado en el mismo tubo en el que se pondrá en servicio	$\emptyset$ Tubo $\leq 7 \emptyset$ boom
Perpendicularidad del tubo Pitot respecto al flujo Máxima disminución permitida	1°	No aplicable
Perpendicularidad del anemómetro respecto al flujo Máxima desviación permitida	1°	$< 1^\circ$
Frecuencia de muestreo	Mínimo de 1 Hz	0.66 Hz (1,5 seg)
Intervalo de muestreo	30 s	1500 s
Estabilidad en la medición. Dos medidas sucesivas de 30s de medición difieren en:	Aproximadamente en 0,05 m/s.	Aproximadamente en 0,75 m/s.

RESULTADOS

Luego de realizar las mediciones correspondientes en 4 anemómetros no calibrados, contrastándolos con uno certificado, se obtuvo la información necesaria para calibrar cada uno de ellos.

Cada anemómetro entrega una señal senoidal linealmente relacionada a la velocidad existente en el túnel de viento, de la siguiente forma:

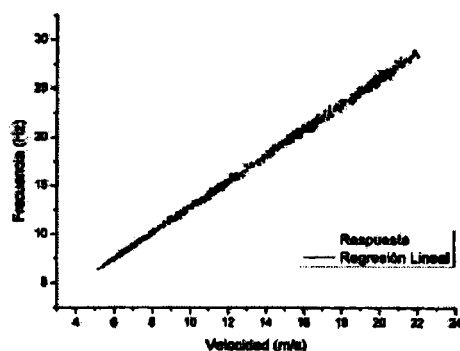
$$Velocidad (m/s) = scale_factor (m/s/Hz) \times (Respuesta)(Hz) + Offset (m/s)$$

El sensor calibrado posee un certificado con estas dos constantes, obtenidas en laboratorio bajo estándares internacionales, para los no calibrados el fabricante especifica valores estándar.

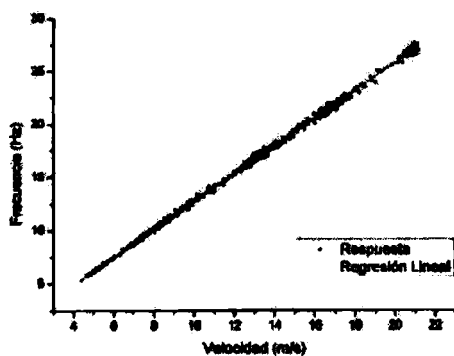
En cada medición, de aproximadamente 25 minutos cada una, se obtuvieron las frecuencias generadas por ambos anemómetros. Tomando la velocidad del anemómetro calibrado como viento real de referencia a través del túnel, se realiza una regresión lineal con la frecuencia medida por el no calibrado.

De esta manera se obtienen los coeficientes necesarios para considerar como calibrado un sensor de este tipo. Teniendo en cuenta que cada medición esta compuesta por 1000 valores tomados en paralelo

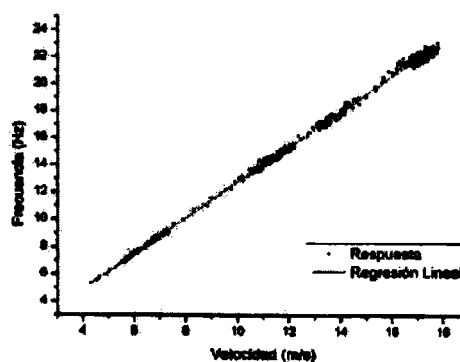
en ambos sensores, se puede considerar este método como estadísticamente robusto y de fiabilidad equivalente al procedimiento MEASNET.



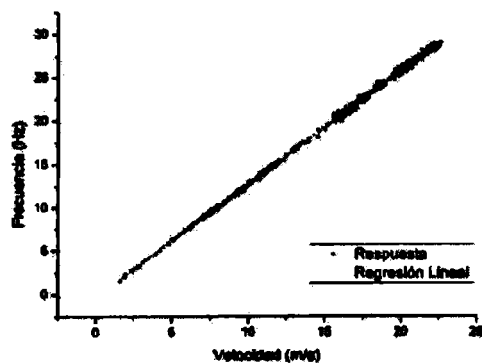
a. Anemómetro A



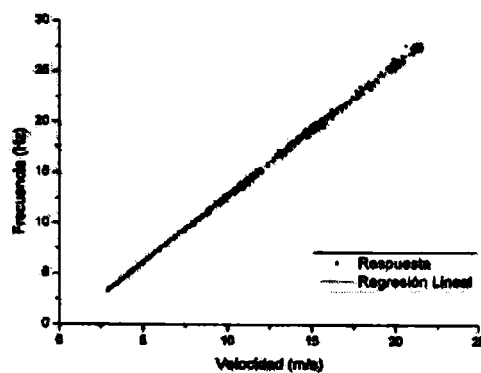
b. Anemómetro B



c. Anemómetro B (repetición)



d. Anemómetro C



e. Anemómetro D

Figura 2. Curvas de regresión lineal para las muestras

ERRORES DE CALIBRACIÓN

Comparando la medición de dos anemómetros del fabricante NRG calibrados por la empresa OTECH Engineering, podemos apreciar que para la misma velocidad de viento se obtienen errores de hasta +/- 3%. Sin embargo, la empresa certifica que su calibración puede tener un error de +/-1%. Esto se cumple para el promedio de los errores (ver Figura 3).

En nuestras calibraciones se obtuvieron valores de similar magnitud, aunque ligeramente superiores. En la siguiente tabla se muestran los errores (diferencias absolutas) entre los valores de velocidad medidos con el anemómetro calibrado y la medida con los valores del ajuste lineal, usando la frecuencia del anemómetro sin calibrar.

Tabla 2. Media del Error y Errores promedios máximos para cada anemómetro.

Anemómetro	Media Error %	Error % Máximo
A	1,51	5,56
B	1,32	4,76
B'	0,99	3,80
C	0,95	4,36
D	0,93	3,94

Una posible mejora de estos errores puede lograrse utilizando como medidor de velocidad de viento patrón, un sensor con precisión un orden de magnitud menor que la deseada y no simplemente un anemómetro calibrado, el cual está en el mismo orden de precisión.

Además, es posible mejorar la dispersión en la curva de calibración permitiendo variar la velocidad del túnel en forma constante y no tratando de mantener estable la velocidad entorno de los valores 5,10, 15 y 20 m/s empleados según el protocolo de MEASNET.

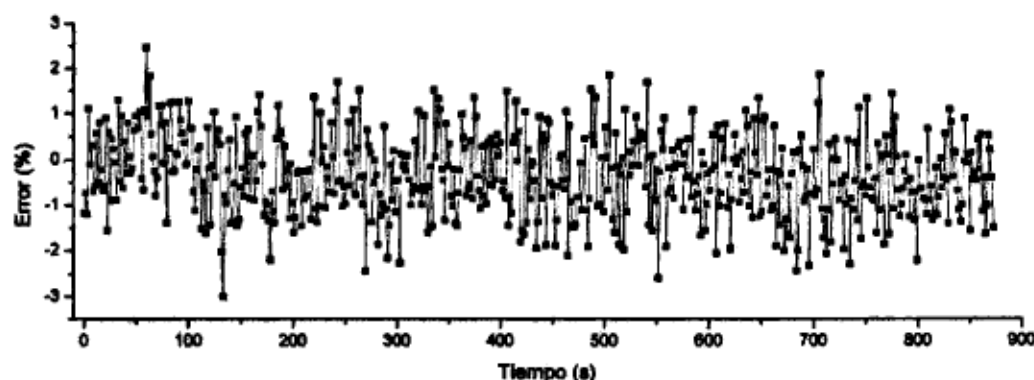


Figura 3. Diferencia porcentual entre anemómetro calibrados (2150-2156)

El error en la magnitud de la velocidad, viene dado por la propagación según:

$$\text{Error } [v] \text{ (m/s)} = \text{Error } [b] \text{ (m/s/Hz)} \times f \text{ (Hz)} + \text{Error } [a] \text{ (m/s)}$$

El error en la medición de la frecuencia puede considerarse despreciable dado que el error relativo de b es menor a $1\text{E-}3$, mientras que el error relativo en la determinación de la frecuencia es en el peor caso posible (1Hz) igual a $1/\text{Frecuencia de muestreo}$. Siendo 8MHz la frecuencia de clock del microcontrolador, el error en la determinación de frecuencia es menor a $1\text{E-}7$.

De esta forma el Error $[v]$ (absoluto) está en el intervalo (0,011 ; 0,042)m/s para el rango de frecuencias de interés (1, 32)Hz donde 32Hz es la frecuencia máxima a velocidad máxima del ensayo, es decir, 25m/s. En la Figura 4 podemos observar el comportamiento del error relativo en las mediciones, dividiendo el error absoluto por el valor de velocidad medido, utilizando los errores de b y a obtenidos en las calibraciones.

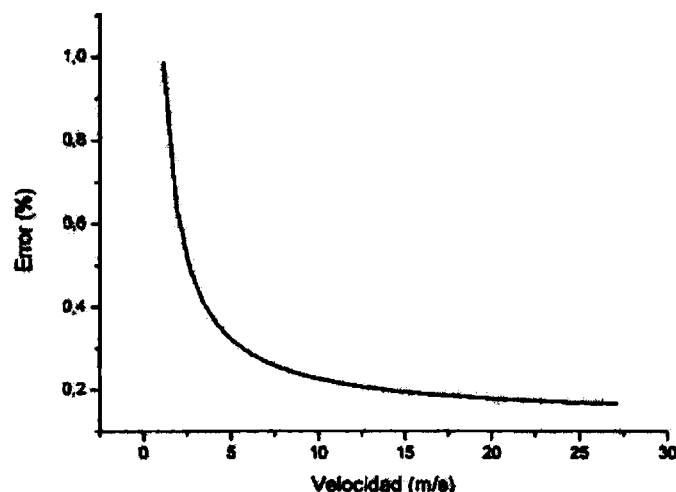


Figura 4. Error relativo en mediciones de velocidad.

CONCLUSIONES

Se logró con éxito desarrollar un sistema electrónico de adquisición de datos capaz de digitalizar la señal de dos anemómetros simultáneamente, ordenarlos y guardarlos en memoria para su posterior análisis.

Este sistema permitió contrastar 4 anemómetros no calibrados con uno calibrado del mismo tipo y marca, lográndose el objetivo de construir la curva de calibración por regresión lineal, de cada uno de ellos.

Los valores de los errores obtenidos en las respuestas durante las calibraciones de cada anemómetro fueron ligeramente superiores al error propio del anemómetro calibrado utilizado como patrón. Por lo que, si se quiere obtener errores dentro del $\pm 1\%$ como el que posee el anemómetro patrón, se deberá utilizar otro tipo de dispositivo que sense la velocidad del viento como un tubo Pitot, de al menos 1 orden de magnitud menor de error.

Se puede concluir también, que para lograr una medición con mayor coeficiente de correlación, se deberá tomar la mayor cantidad de puntos posibles, subiendo la velocidad durante el ensayo en forma lenta y constante hasta 25 m/s y luego bajándola de la misma manera hasta 5 m/s.

Al observar los valores obtenidos de "offset" (ordenada al origen) y "scale factor" (pendiente) de todos los anemómetros puede decirse que utilizar los valores por defecto presentados por el fabricante, $V \text{ [m/s]} = 0.765 f \text{ [Hz]} + 0.35$, es suficiente para obtener errores aceptables para ciertas aplicaciones, donde la exactitud no es fundamental.

En cuanto a las características necesarias del túnel para cumplir con los estándares internacionales de calibración, se llega a la conclusión que el Túnel Mayor cumple con todos los requerimientos necesarios menos con la estabilidad de flujo, haciendo que se deba modificar el control de velocidad de la soplante para poder realizar este tipo de ensayos.

REFERENCIAS

1. Measnet: Cup Anemometer Calibration Procedure; Version 1, September 1997.
2. Manual compilador PCW de CCS, "C Compiler for Microchips PICmicro", de Andrés Canovas López, version pdf Victor Dorado.
3. Oringin- Pro: <http://www.originlab.com>