

AUTOMATIZACIÓN DE ESPECTROS DE VIENTO PARA APLICACIONES DINÁMICAS EN ESTRUCTURAS

C. Carvallo Fritz¹, M. Nozaki Uribe², C. Oyarzo Vera³

RESUMEN

Mediante la utilización de los registros de vientos de cualquier zona de estudio se confeccionó un software basado en Matlab e independiente de él, con el objetivo de obtener la función de densidad espectral de potencia, es decir, conseguir la función real positiva de una variable de frecuencia directamente relacionada con un proceso estocástico, el cual determina cuánta potencia hay asociada a cada frecuencia. Esta se puede graficar en el dominio de la frecuencia de potencia por unidad de Hz contra frecuencia.

Por medio de la utilización de este software se busca; en primer lugar, optimizar el proceso matemático de la obtención de información de los registros de viento, dependiendo de qué tan turbulentos son estos durante el tiempo de lectura; en segundo lugar, encontrar el periodo de tiempo de turbulencia máxima y; finalmente, entregar la función de densidad espectral, la cual se consigue mediante la transformada de Fourier (FFT), aplicada a los datos de la turbulencia máxima, que se obtuvieron en mediciones cada dos segundos generando espectros cada una hora. Sin embargo, el software permite ingresar cualquier tiempo de medición en segundos y obtener espectros de periodo de tiempo de n horas, con la precaución de que el periodo de tiempo del espectro sea mayor al de lectura.

PALABRAS CLAVES: Función de densidad espectral de potencia, turbulencia, frecuencia.

¹ Carlos Carvallo Fritz, Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, ccarvallo@ing.ucsc.cl.

² Minor Nozaki Uribe, Docente de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, minornozaki@gmail.com.

³ Claudio Oyarzo Vera, Docente de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, coyarzo@ucsc.cl.

ABSTRACT

Through the use of registration of winds of any study zone a software was created based on Matlab and independent of it, with the objective of obtain the function of spectral density of power, this is to say to obtain the real positive function of a frequency variable related directly with a stochastic process, which determine how much power is related to each frequency. This can be graphed in the domain of the power frequency per unit Hz against frequency.

Through the use of this software it is search: in first place, optimize the math process of the Information obtainment of the registration of wind, depending on how turbulent are these during the reading time; in second place, find the period of time of maximum and; finally, give the density spectral function, which is obtain through the Fourier transformed (FFT), apply to the data of the maximum turbulence, obtained in measurements every two seconds generating specters every one hour. Nevertheless, the software allows to enter any time measurement in seconds and obtain specters of period of time of n hours, with the caution that the period of time of the spectrum has to be higher than the reading one.

KEYWORDS: Function of spectral density of power, turbulence, frequency.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe la necesidad de edificar estructuras más esbeltas debido a la escasez de terrenos disponibles para la construcción, obligando a aumentar en altura las edificaciones; además, hoy en día la estructura moderna presenta nuevos retos que consideren estructuras propensas al efecto del viento, donde la esbeltez de la estructura puede favorecer la participación del viento con énfasis en el rango de frecuencias asociado a ráfagas de viento, las cuales tienden a ser intensas desde el punto de vista cinemático.

De esta forma, el efecto dañino en estructuras o en elementos no estructurales provocado por las cargas sísmicas, puede ser, incluso, menor que el producido por el viento, puesto que éste puede inducir otro tipo de fenómenos en estructuras esbeltas hasta el punto en que las vibraciones pueden modificar las propias cargas aerodinámicas. Bajo este punto, las fluctuaciones de velocidades o ráfagas, debido a la turbulencia atmosférica, poseen alto contenido de energía en el rango de frecuencia entre 0.01-1 [Hz], excitando dinámicamente a un grupo limitado de estructuras con bajo amortiguamiento estructural y frecuencia natural aproximadamente inferior a 1 [Hz].

La actual Norma Chilena, NCh 432 Of 2010, plantea la determinación de la carga de viento mediante tres metodologías: método simplificado, método analítico y túnel de viento. Los dos primeros métodos consideran el viento como una fuerza o presión dinámica estática, desestimando la fluctuación que posee la componente turbulenta del viento, mientras que el tercer método consiste en un ensayo mediante túnel de viento para determinar las cargas de diseño. Es así como el viento toma cada vez mayor importancia en los diseños de estructuras esbeltas con bajo amortiguamiento, por esto el presente estudio describe, detalladamente, el comportamiento aleatorio de los registros de viento para que éstos puedan ser utilizados en distintos cálculos de diseños bajo un programa que automatice el cálculo matemático en términos de la función de densidad espectral de potencia.

2. FENOMENOS DINÁMICOS EN ESTRUCTURAS

Los incesantes desarrollos en el diseño y en los métodos de fabricación de estructuras y edificaciones han dado lugar a construcciones más flexibles y con menor amortiguamiento que las que se construían en el pasado, con el resultado de que con el devenir del tiempo ha ido aumentando la sensibilidad de éstas a la acción del viento atmosférico. Esto ha originado una extraordinaria concentración de esfuerzos en el estudio de tales acciones, tanto estáticas como dinámicas, con una especial atención en los casos en que la interacción entre viento y estructuras implica el movimiento de éstas, dando lugar a la aparición de fenómenos aereolásticos.

El estudio de los fenómenos de inestabilidad aeroelástica es cada día más importante desde el punto de vista de su aplicación potencial al diseño de estructuras. Las inestabilidades aeroelásticas pueden aparecer cuando un cuerpo en el seno de una corriente fluida se mueve o se deforma apreciablemente bajo las fuerzas producidas por el viento, donde una de las causas del movimiento de una estructura es la turbulencia de la corriente incidente.

Debido al elevado número de parámetros que intervienen en los fenómenos dinámicos originados por el viento atmosférico, que afectan tanto a la causa perturbadora (turbulencia del viento) como a las propiedades mecánicas de la edificación, dentro de las inestabilidades aeroelásticas se suelen distinguir diversos tipos, tales como desprendimiento de torbellinos, galope transversal, galope de estela, divergencia torsional, flameo y bataneo.

Las vibraciones inducidas por el desprendimiento de torbellinos en estructuras tales como chimeneas, mástiles, torres o puentes son un problema de interés práctico para muchos campos de la ingeniería. Aunque raramente pueden llegar a provocar el colapso inmediato de la estructura, con el tiempo pueden reducir su vida útil por fatiga.

En el caso de chimeneas o mástiles, el viento es un tipo de acción que induce flexión sobre este tipo de estructuras. Comportamientos anómalos caracterizados por vibraciones excesivas debidas al viento han sido descritos por varios autores como, Battista, Korten y Blessmann. En el caso de las torres metálicas, en general ligeras y con bajo amortiguamiento, las vibraciones son lo suficientemente fuertes y frecuentes como para causar un acúmulo de daño en la estructura. Las torres de hormigón son, en general, más rígidas que las metálicas y en los dos casos los esfuerzos originados debido a la acción del viento son determinantes en el proyecto.

El galope transversal genera movimientos de gran amplitud en la dirección normal al flujo de aire, con frecuencias menores a las que se producirían en el caso de desprendimientos de torbellinos. Este fenómeno es característico de estructuras esbeltas con secciones transversales rectangulares o en forma de D. El galope inducido por una estela tiene lugar cuando existen dos obstáculos próximos de tal forma que uno de los cuerpos se encuentra en la estela del otro. Debido a la estela de torbellinos que genera el cuerpo arriba del flujo de aire, el segundo cuerpo recibe una corriente incidente cuya intensidad y sentido variarán con el tiempo. Este fenómeno es típico de las catenarias de ferrocarril y de las líneas de transporte de energía eléctrica en las que los cables discurren agrupados en conjunto formados por dos, cuatro, seis o más cables situados en paralelo y separados por espaciadores mecánicos en la dirección transversal.

Por último la inestabilidad aeroelástica provocada por el flameo se produce a partir de una cierta velocidad crítica de viento cuando las fuerzas que el flujo de aire provoca sobre la estructura, en combinación con los movimientos de la propia estructura, dan lugar a amortiguamientos negativos en la estructura de tal manera que los movimientos de la misma se van amplificando hasta que, debido al elevado nivel de tensiones que alcanza el material se produce el colapso, como en el ejemplo clásico del Puente de Tacoma.



Figura 1. Puente de Tacoma, inestabilidad aeroelástica provocada por flameo.

Dadas estas diferentes inestabilidades aeroelásticas en estructuras, es que toma tanta importancia caracterizar el viento de forma dinámica. La forma más común de caracterizar el viento de una manera dinámica es a través de la función de densidad espectral, que a través de esto se puede comenzar a realizar el análisis de las diferentes inestabilidades aeroelásticas.

3. FUNCIÓN DE DENSIDAD ESPECTRAL

Para obtener la función de densidad espectral de la manera tradicional, es decir, a través de un proceso matemático, considerando solamente la componente longitudinal turbulenta $u(t)$, pues es la más importante en el estudio de la interacción viento – estructura. Bajo esta condición, si la componente turbulenta es periódica, con media nula y periodo T, su valor en cualquier instante de tiempo t se podría expresar mediante su desarrollo en serie de Fourier:

$$u(t) = \sum_{j=1}^{\infty} C_j \cos\left(\frac{2\pi j}{T} t - \varphi_j\right) \quad (1)$$

Y al ser una función de media nula $\overline{u(t)} = 0$, el valor cuadrático medio y la varianza coinciden, de modo que:

$$\sigma_u^2 = \int_{-T/2}^{T/2} u^2(t) dt = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} C_j^2 \quad (2)$$

Según la expresión (2) los cuadrados de los coeficientes del desarrollo de Fourier, representan la contribución de cada armónico al valor cuadrático medio de la función, y en consecuencia son una medida de energía cinética asociada a cada frecuencia de la componente longitudinal de la turbulencia, es decir, la función de densidad espectral.

Sin embargo, este procedimiento no resulta aplicable al viento atmosférico porque la velocidad de fluctuación $u(t)$ no es periódica; tal inconveniente podría quedar solventado de admitirse que $u(t)$ se comporta como una función periódica de periodo infinito, lo cual exigiría que la función $u(t)$ fuera diferenciable en partes en cualquier intervalo infinito de tiempo, y que existiera y fuera finita la integral.

$$I_{|u|} = \int_{-\infty}^{\infty} |u(t)| dt \quad (3)$$

Bajo estas circunstancias resulta factible efectuar el desarrollo de Fourier de $u(t)$, de manera que esta función se puede expresar como la suma de infinitas funciones armónicas de frecuencia n, amplitud C_n y desfase φ_n , apropiados.

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} C_n \cos(2\pi n t - \varphi_n) dn = \int_{-\infty}^{\infty} (A_n \cos 2\pi n t - B_n \sin 2\pi n t) dn \quad (4)$$

La comparación de los dos últimos términos de (4) resulta $C_n^2 = A_n^2 + B_n^2$, $\varphi_n = \arctan(A_n/B_n)$, estando los distintos coeficientes C_n , A_n y B_n dados por la expresiones

$$C_n = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cos(2\pi nt - \varphi_n) dt \quad (5)$$

$$A_n = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cos 2\pi n t dt \quad (6)$$

$$B_n = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \sin 2\pi n t dt \quad (7)$$

Para calcular la integral (2) en el límite $T \rightarrow \infty$, en el integrando $u^2(t)$ se sustituye una vez la función $u(t)$ por su expresión según (4), tras invertir el orden de integración resulta:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \left[\int_{-\infty}^{\infty} C_n \cos(2\pi nt - \varphi_n) dn \right] dt = \int_{-\infty}^{\infty} C_n \left[\int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cos(2\pi nt - \varphi_n) dt \right] dn = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} C_n^2 dn = 2 \int_0^{\infty} C_n^2 dn \quad (8) \end{aligned}$$

Nótese que la última de las igualdades de (8) se puede escribir gracias a que C_n^2 tiene un carácter simétrico respecto al origen. Planteando este razonamiento respecto a la turbulencia meteorológica habría que considerar que de la componente horizontal de la velocidad de agitación turbulenta $u(t)$, que tiene media nula, se puede conocer su valor en un cierto intervalo de tiempo T , pero no en todo el intervalo que se extiende desde $-\infty$ hasta $+\infty$. La alternativa para calcular la función de densidad espectral podría ser suponer que $u(t)$, es nula fuera del intervalo T , calculando entonces su transformada de Fourier, que será también función del periodo T , y determinar su varianza como el límite para periodos de tiempo grandes, es decir:

$$\sigma_u^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u^2(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^{\infty} C_n^2(T) dn = \int_0^{\infty} S_{uu} dn \quad (9)$$

De donde se obtiene la función de densidad espectral:

$$S_{uu}(n) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} C_n^2 \quad (10)$$

Se debe notar que el procedimiento así planteado resulta inconsistente, pues aun que se ha admitido que la función $u(t)$ es desarrollable en serie de Fourier, en realidad no se cumple la condición relativa a la integral (3); para evitar este formalismo se puede recurrir a la función de autocorrelación $R_{uu}(t)$, (11), definiendo la función de densidad espectral en términos de la transformada de Fourier de esta última. Para ello es parte de la expresión (10), sustituyendo A_n^2 y B_n^2 por (6) y (7) respectivamente, y tras cierta manipulación.

$$\begin{aligned}
 R_{uu}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t) \varepsilon(t + \tau) dt \quad (11) \\
 S_{uu}(n) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} C_n^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} (A_n^2 + B_n^2) = \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \left[\int_{-\infty}^{\infty} u(\tau_1) \cos 2\pi n \tau_1 d\tau_1 \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau_2) \cos 2\pi n \tau_2 d\tau_2 + \dots + \right. \\
 &\quad \left. + \dots + \left[\int_{-\infty}^{\infty} u(\tau_1) \sin 2\pi n \tau_1 d\tau_1 \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau_2) \sin 2\pi n \tau_2 d\tau_2 \right] = \right. \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau_1) u(\tau_2) \cos 2\pi n (\tau_2 - \tau_1) d\tau_1 d\tau_2 = \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) u(\tau + t) \cos 2\pi n t d\tau dt = \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \cos 2\pi n t \left[\int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) u(\tau + t) d\tau \right] dt = \\
 S_{uu}(n) &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{uu}(t) \cos 2\pi n t dt \quad (12)
 \end{aligned}$$

Por lo tanto mediante todo el procedimiento anterior se puede obtener la función de densidad espectral $S_{uu}(n)$. Si se representa $S_{uu}(n)$ en función de la frecuencia n , donde n corresponde a la frecuencia, el producto $nS_{uu}(n)$, en el caso del viento atmosférico la curva resultante tiene el aspecto típico mostrado en la figura 2 (obsérvese que $nS_{uu}(n)$, que es proporcional al cuadrado de la fluctuación, tiene dimensiones de energía cinética por unidad de masa, y constituye, por tanto, una medida de la energía cinética de la fluctuación asociada a cada frecuencia.

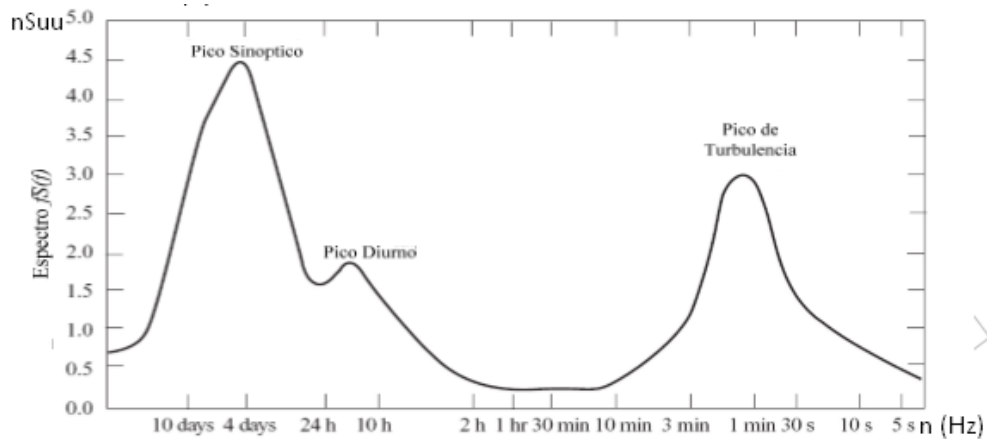


Figura 2. Variación con la frecuencia, n , del producto de la frecuencia por la función de densidad espectral del viento meteorológico, $nS_{uu}(n)$. Espectro de Van der Hoven.

En la figura 2 se pueden apreciar ciertos patrones característicos: se tiene un pico de energía en la zona de frecuencias altas, asociadas a periodos comprendidos entre dos segundos y unos cinco minutos, que señala el régimen de ráfagas de la escala micrometeorológica (de posible importancia en la respuesta dinámica de las estructuras), también aparece un pico en la zona correspondiente a los periodos próximos a doce horas, característico del régimen de brisas la alternancia de días y noches, y un tercer pico que se explica por la sucesión de fenómenos meteorológicos como anticiclones y borrascas, con periodos típicos del orden de cuatro días.

Por lo tanto todo lo anterior describe como obtener la función de densidad espectral a través de un análisis matemático, forma tradicional, donde se puede apreciar que no resulta sencillo obtener la caracterización del viento, es por esto que este estudio se enfoca en automatizar el análisis matemático, a través de un software, el cual permita calcular la función de densidad espectral de una manera más simple para el usuario, ingresando solo el registro de velocidades de viento.

El espectro de Van der Hoven se utilizará para la validación del software.

4. DESCRIPCIÓN DE LA RUTINA DE PROGRAMACIÓN

El objetivo principal de este estudio es automatizar el cálculo matemático para la obtención de la función de densidad espectral de potencia (FDEP), para lo que se confeccionó un software ejecutable basado en Matlab, el cual, mediante los registros (velocidades registradas) ingresados al software, ordena los datos en periodos de tiempo según la pertinencia que considere el usuario. De esta forma se calcula la velocidad media de cada periodo y se descubre la turbulencia perteneciente a cada uno de estos. Los resultados que se obtienen son de vital importancia, ya que la FDEP se conseguirá mediante la utilización de datos de componentes turbulentas.

Como las componentes turbulentas están en el dominio del tiempo, es importante llevarlas al dominio de la frecuencia, puesto que esto permite descomponer la respuesta de acuerdo a los modos de vibración de la estructura y vincularla con las variaciones temporales de la excitación. El procedimiento se realiza a través de la “Transformada Fourier”, cuyos elementos son números reales y complejos que guardan información de la amplitud y de la fase. Cabe mencionar que la Transformada de Fourier de cualquier señal tiene un número igual de frecuencias positivas como negativas.

Con cierta manipulación de los datos, y considerando el vector de frecuencias positivas, es posible encontrar el espectro de densidad de potencia. Además, se crea un vector de datos turbulentos que registran la turbulencia máxima de acuerdo al periodo de tiempo que el usuario quiere estudiar. Con estos datos se calcula la función de densidad espectral, que es la información representativa de los registros de viento, pues muestra de una forma gráfica cómo está distribuida la potencia en las diferentes frecuencias.

4.1. CÁLCULO DE COMPONENTE TURBULENTO

Meseguer J. Et al. (2003) señala que en el modelo más simple de viento atmosférico, la velocidad en un punto genérico del espacio, $U(t)$, puede ser representada por un valor medio U al que se le superponen las componentes de la velocidad de agitación turbulenta, $u(t)$.

Teniendo en cuenta que la componente longitudinal de la agitación turbulenta $u(t)$ es la más relevante para la estimación de las acciones producidas por el viento sobre las estructuras, en el análisis se considera que, en primera aproximación, la velocidad instantánea es únicamente la suma de la velocidad media de la corriente incidente y de la componente de fluctuación asociada a esta dirección, es decir, $U(t) = U + u(t)$ ⁴.

⁴ Meseguer Ruiz J., et al. (2003). Efectos del viento en edificaciones y estructuras. (Pág. 43)

Bajo esta aproximación se empiezan a separar los datos en periodos que el usuario estime conveniente, con la condición de que ésta separación debe estar definida en unidad de tiempo (horas), de manera que a cada periodo se le calcula una velocidad media, la cual se resta a la velocidad registrada o velocidad instantánea para obtener las velocidades de fluctuación de cada registro y tener una representación más real de los datos por periodo.

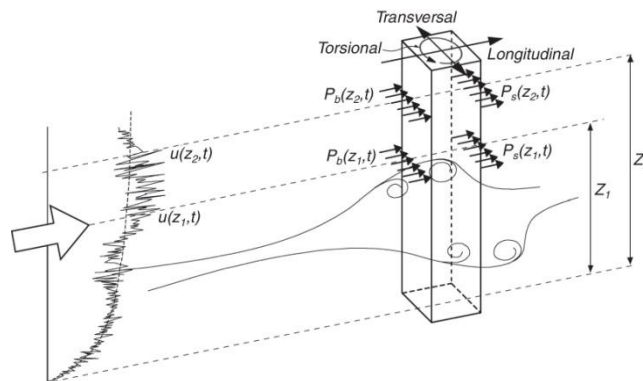


Figura 3. Caracterización de la turbulencia

4.2. APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

La Transformada de Fourier se aplica a los datos turbulentos que se obtienen de acuerdo a lo detallado en 4.1., debido a que los registros turbulentos están en el dominio del tiempo y este estudio se enfoca en obtener el espectro de potencia y la función de densidad espectral de potencia que deben estar en el dominio de la frecuencia; puesto que, como se mencionó en el punto 4, esto permite descomponer la respuesta de acuerdo a los modos de vibración de la estructura y vincularla con las variaciones temporales de la excitación. Considerando que en la Transformada de Fourier cualquier señal tiene un número igual de frecuencias positivas como negativas, la rutina de programación crea un vector de frecuencia que considere lo anterior. En primer lugar, se debe definir la frecuencia de muestreo f_s , que es la inversa del periodo de lectura (P_l), (13), en la que este periodo corresponde a cada cuánto tiempo en segundos se están registrando los datos.

$$f_s = \frac{1}{P_l} \text{ (Hz)} \quad (13)$$

En segundo lugar, se crea un vector de frecuencia que queda determinado por la *expresión 1*.

$$f = \left[-\frac{f_s}{2} : \frac{f_s}{length(u)} : \frac{f_s}{2} - \frac{f_s}{length(u)} \right] \quad \text{expresión 1.}$$

Es importante señalar que la *expresión 1*. describe cómo la rutina de programación crea el vector de frecuencia en lenguaje de programación de Matlab. Donde $length(u)$ corresponde a la cantidad de datos que hay por periodo de tiempo.

Al aplicar la transformada de Fourier a la matriz de datos turbulentos “*u*”, donde cada columna representa un periodo de tiempo, la “*fft(u)*” considera las columnas de “*u*” como un vector y devuelve la transformada de Fourier de cada columna.

Como se mencionó anteriormente, la transformada de Fourier incluye tanto frecuencias negativas como positivas que existen, únicamente, como propiedades matemáticas de esta, donde la primera mitad corresponde a frecuencias positivas, mientras que la segunda mitad corresponde a frecuencias negativas; es por esto que se utiliza el comando “*fftshift*” de Matlab, que cambia la mitad izquierda por la mitad derecha de cada periodo. Además, como la transformada de Fourier entrega números reales y complejos que guardan información de la amplitud y fase, se aplica la función “*abs*” de Matlab para tener solamente números reales.

Finalmente, con el vector de frecuencias y con la manipulación realizada a los datos, representada de una mejor manera en la figura 4, es posible obtener una representación del comportamiento de los datos en una primera fase.

```
%% TRANSFORMADA DE FOURIER  
  
fs= 1/pl;  
y=fft(u)./size(u,1);  
yy=abs(fftshift(y));  
for k=1:size(yy,1)  
    yy(k,1)=mean(yy(k,:));  
end
```

Figura 4. Aplicación de la Transformada de Fourier.

Dentro del ciclo *for*, como se observa en la figura 4, se efectúa un cálculo del promedio de los datos de cada frecuencia.

Cabe destacar que al entregar la información a través del software éste muestra el gráfico con frecuencias negativas y positivas en el eje x, pero para efectos de cálculos solo se considera las frecuencias positivas.

4.2.1. GRAFICO REPRESENTATIVO TRANSFORMADA DE FOURIER

El gráfico que arrojará el software al aplicar la rutina en la figura 4 es el que se presenta en la figura 5.

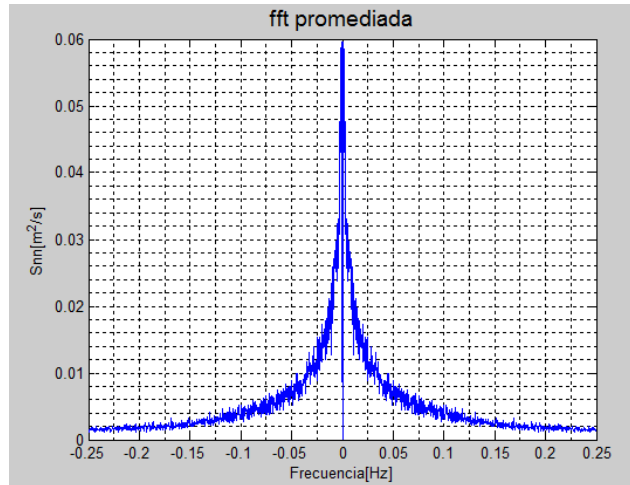


Figura 5. Gráfico representativo “Transformada de Fourier”.

4.3. ESPECTRO DE POTENCIA

El espectro de potencia indica cómo la potencia de cada registro se distribuye sobre las distintas frecuencias que la conforman. Con los registros llevados al dominio de la frecuencia mediante la Transformada de Fourier 4.2. es posible obtener el espectro de potencia que corresponde a la multiplicación de los datos en el dominio de la frecuencia “yy” por el vector de frecuencia “f”, (14). Cabe destacar que, para crear el vector de datos representativos del espectro de potencia “ S_{nn} ” en unidades de potencia por Hz, se considera el máximo registro distribuido en las distintas frecuencias, mostrando cómo es la distribución de la potencia de todos los registros con todas las frecuencias. Es importante señalar que, teóricamente, la multiplicación de los vectores corresponde a una multiplicación matricial, que es distinta a la que se aplica más adelante para calcular la función de densidad espectral de potencia que se detallará en el punto 4.5.

$$S_{nn} = (2 * yy) * f \quad (14).$$

Generalmente, la forma tradicional de representar los datos obtenidos en la ecuación (14) es a través de un gráfico semilogarítmico, como se muestra en la figura 6 y figura 7.

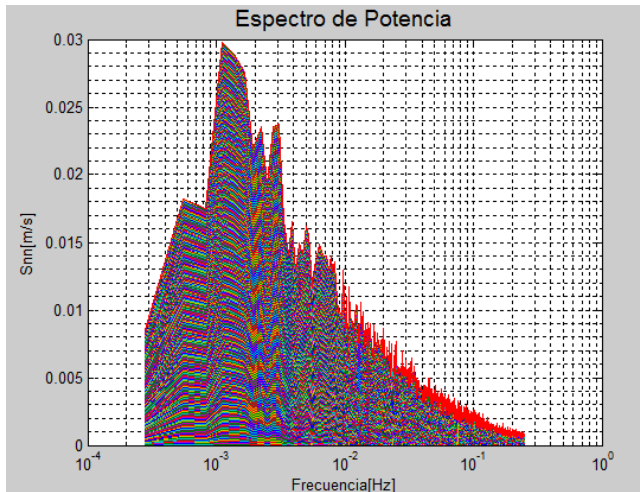


Fig 6. Representación de todos los registros con todas las frecuencias.

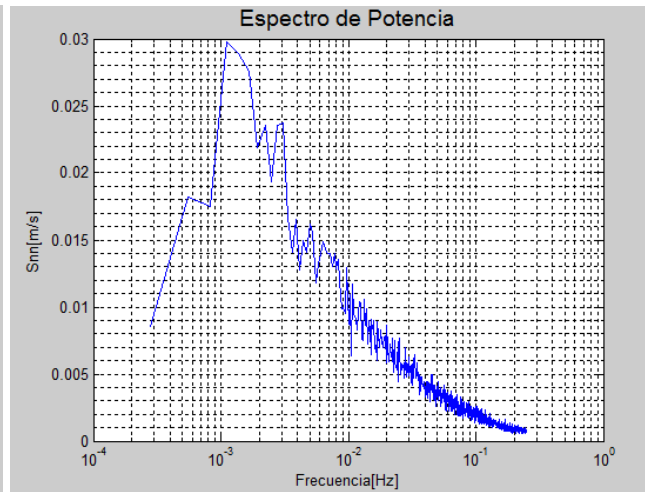


Fig. 7. Espectro de potencia considerando solo valores máximos.

4.4. TURBULENCIA MÁXIMA

Con la obtención del espectro de potencia es necesario enfocarse en obtener la función de densidad espectral de potencia que se calculará con un periodo de tiempo en el cual se registren las mayores fluctuaciones del viento. De acuerdo a lo anterior, el software compara, en primera instancia, el primer periodo de tiempo con el segundo periodo que está desfasado un instante después, para luego obtener la desviación estándar de cada periodo. De esta forma, es posible analizar qué periodo contiene los registros más dispersos, es decir, aquel que contiene la mayor turbulencia. Luego, la rutina de programación va comparando el periodo de tiempo con la mayor turbulencia con los demás periodos hasta encontrar un periodo de tiempo más disperso, en caso de que se encuentre alguno, éste queda como periodo más turbulento.

El algoritmo utilizado para encontrar la turbulencia máxima se muestra en la figura 8.

```

vturb=[];
for i=1:b
    vturb=[vturb u(:,i)'];
end
turmax=vturb(1:nh);
for k=2:size(vturb,2)-(nh-1)
    tur2=vturb(k:k+(nh-1));
    if std(turmax)<std(tur2)
        turmax=tur2;
    end
end
    
```

Figura 8. Algoritmo para encontrar periodo con turbulencia máxima.

4.5. FUNCIÓN DE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA

La función de densidad espectral de potencia (FDEP) es una función real positiva de una variable de frecuencia asociada con un proceso estocástico o una función determinística del tiempo, que tiene unidades de potencia por Hz. Esta se puede representar mediante una gráfica en el dominio de la frecuencia de potencia por unidad de Hz contra frecuencia.

Además, la función de densidad espectral es una medida de energía para diversos contenidos de frecuencias para ráfagas de vientos establecidas.

Para calcular la FDEP se utilizaron los datos obtenidos en el periodo de turbulencia máxima 4.4., en donde al vector de turbulencia máxima, *yymax*, se le aplica la Transformada rápida de Fourier.

Para llevar los registros al dominio de la frecuencia se realiza el mismo procedimiento aplicado en 4.2., con la diferencia de que el vector a considerar corresponde a la turbulencia máxima. Es así como se obtiene la FDEP, calculada a través de la ecuación (15), donde se realiza una multiplicación (*.**), este lenguaje de programación, en términos matemáticos, multiplica el primer elemento del primer vector con el primer elemento del segundo vector; luego, el segundo elemento del primer vector con el segundo elemento del segundo vector, y así sucesivamente hasta llegar al elemento N, es decir, multiplica elemento a elemento de ambos vectores. Dicho de otro modo, la rutina de programación multiplica la potencia del registro transformado al dominio de la frecuencia con su frecuencia respectiva.

$$S_{uu} = f.* (2 * yymax) \quad (15)$$

Generalmente, la densidad espectral se presenta mediante gráficas del tipo semi-logarítmico o logarítmico en sus dos ejes, tal como se muestra en la figura 9 y figura 10, respectivamente.

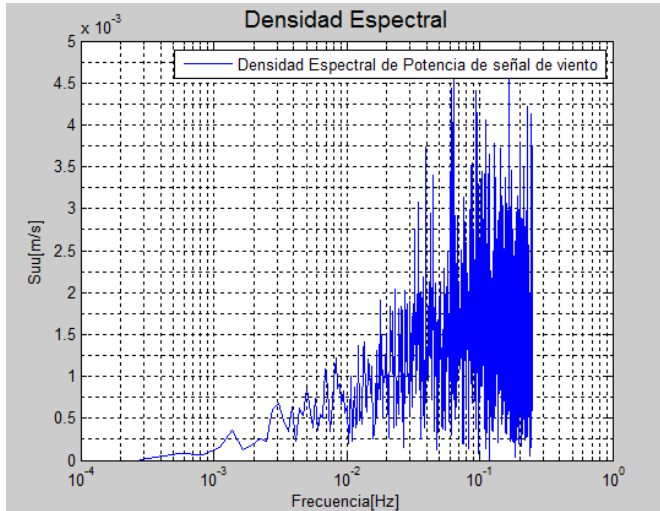


Figura 9. FDEP en gráfico semilogarítmico.

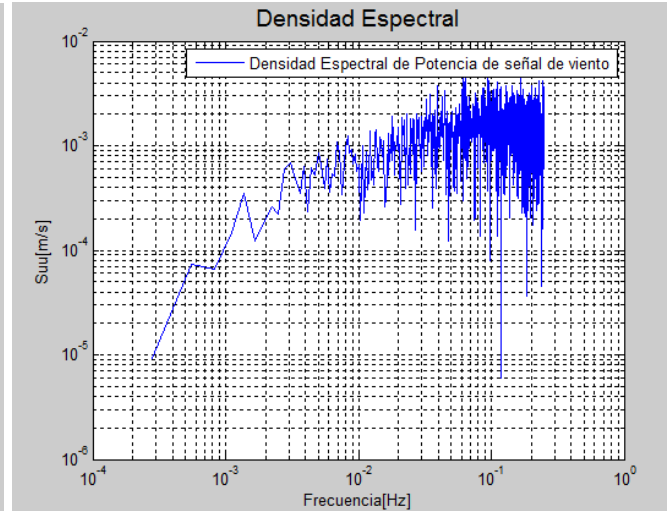


Figura 10. FDEP en gráfico logarítmico.

5. INTERFAZ GRÁFICA

En resumen, el proceso anterior explica cómo funciona la rutina de programación en Matlab para la obtención de todas las gráficas representativas de los registros de viento, además de los valores correspondientes.

Dado que Matlab es un herramienta utilizada en muchos ámbitos de la ingeniería, muchas veces resulta engorrosa su aplicación directa en proyectos profesionales, por esta razón conviene independizar su interfaz y automatizar el proceso matemático para la obtención de de estos resultados, facilitando la aplicación de los registros de viento como cargas dinámicas sobre estructuras u otras aplicaciones. Para lograr ésta metodología se crea una interfaz gráfica, a través de un GUIDE, que consiste en un entorno de programación visual que dispone Matlab para crear y ejecutar programas que requieran un ingreso constante de datos en el cual el software está capacitado para analizar una cantidad infinita de datos, separándolos en periodos de tiempo que el usuario estime conveniente: por ejemplo, puede ingresar registros de datos de un mes o de un año, obteniendo espectros de vientos en periodos de tiempo en horas, días, meses, es decir, el usuario puede manipular los datos como él quiera para representar su análisis con la considerando que los datos sean fidedignos.

Luego, para poder ejecutar este software en cualquier ordenador, sin la necesidad de contar con la instalación de Matlab, se utiliza la aplicación “*application compiler*”, que extrae la información necesaria, es decir, rutinas e imágenes para compilar y lograr obtener un software con extensión .EXE ejecutable.

5.1. PRIMERA VENTANA DE VISUALIZACIÓN

La primera ventana de visualización del software corresponde a la interfaz que el usuario va a encontrar en primera instancia para ingresar el registro de viento que se quiere analizar, en donde además se podrá observar el registro turbulento del registro de viento. Esta ventana tiene el nombre de “ventana 1” y queda representada a continuación.

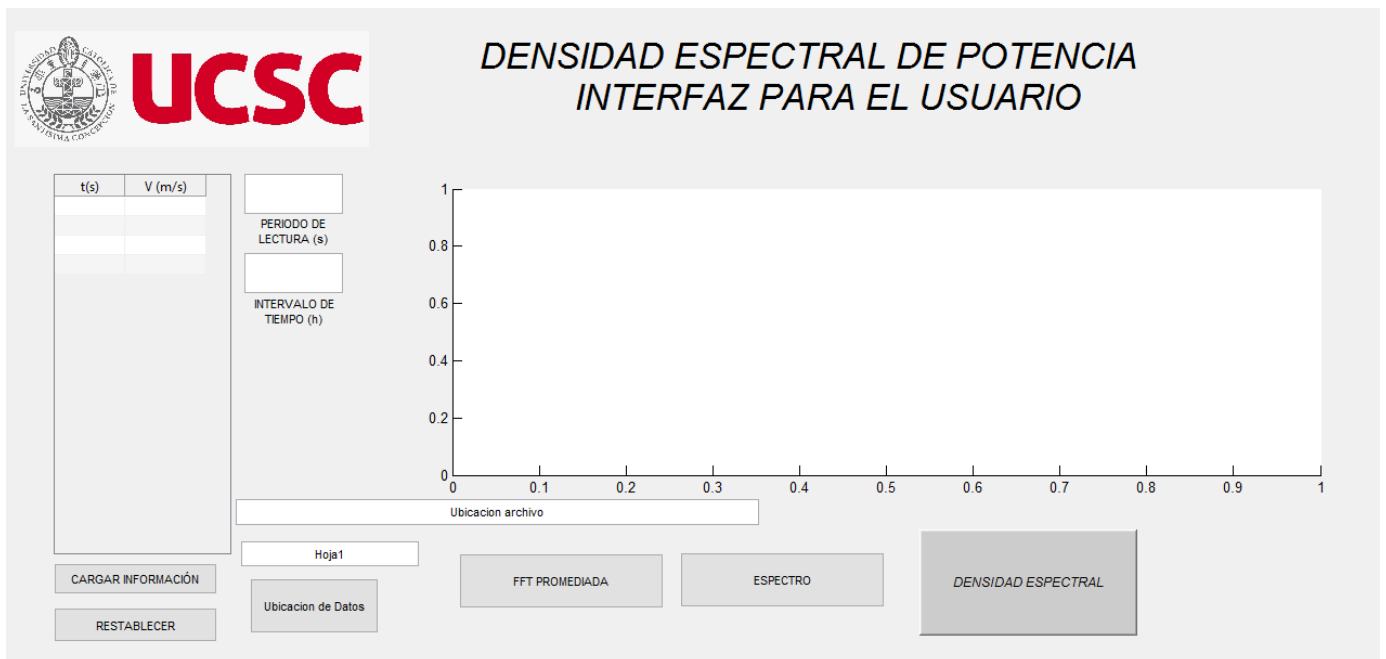


Figura 11. Ventana 1.

En la ventana 1, el usuario debe ingresar los registros de vientos que se quieren analizar, estos registros deben estar en formato Excel, y serán cargados en la tabla del extremo izquierdo de la venta de visualización, donde previamente se debe seleccionar el archivo Excel a través de el botón “ubicación de datos”, además se mostrará la dirección de ubicación del archivo en el cuadro “ubicación de archivo”, es importante que los datos estén contenidos en la hoja 1 del archivo Excel, pues el software viene programado, por defecto, para obtener datos desde la hoja 1. En caso contrario, debe indicarse en la hoja que estén los datos en el cuadro “hoja1”, además el usuario debe indicar el periodo de lectura, es decir, cada cuanto tiempo se estaban registrando los datos y cada cuanto tiempo en horas quiere obtener la información, es decir, si quiere que los espectros estén en periodos de 1 hora, dos horas o N horas.

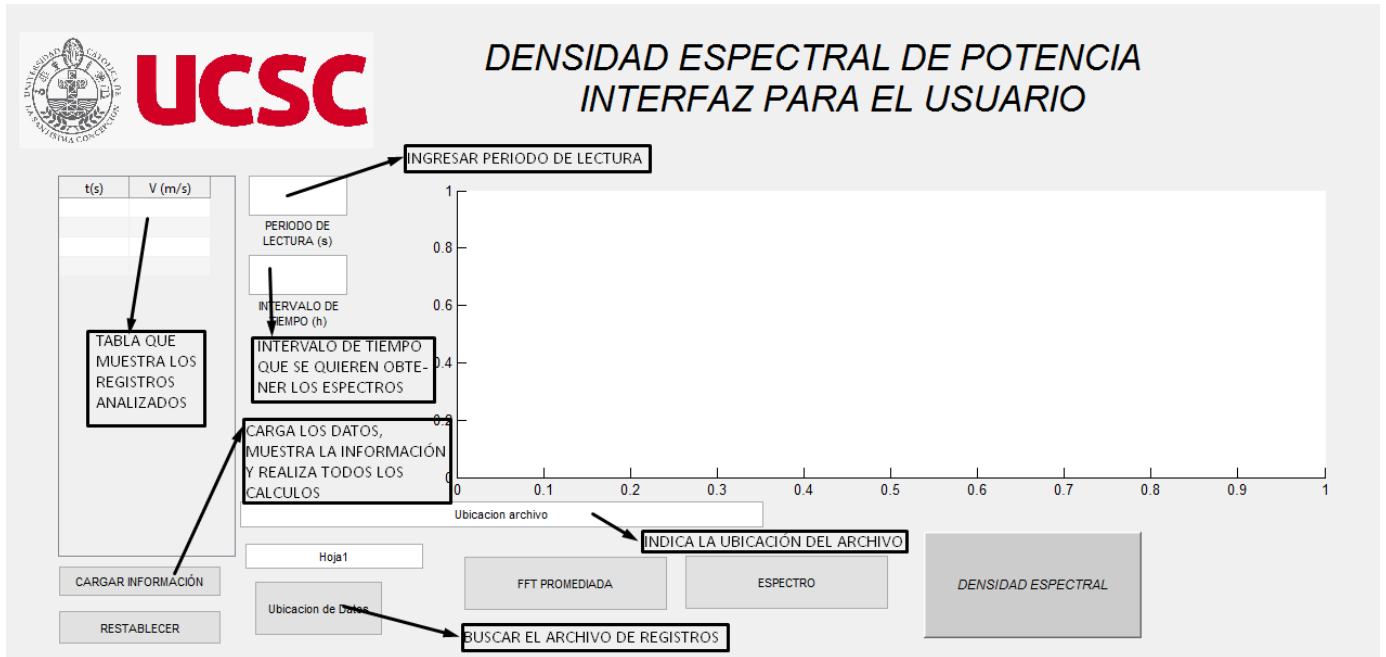


Figura 12. Indicaciones para ingreso de datos.

Luego, se debe hacer clic en **CARGAR INFORMACIÓN**, parte inferior izquierda de la ventana 1, para poder tener una primera representación de los datos que corresponden a la turbulencia de los registros.

Además, es importante señalar que si el usuario no ingresa el periodo de lectura o el tiempo en horas en el que se quiere visualizar la información de los registros, el programa emitirá una alerta o un error, indicando que el usuario debe ingresar los datos, pues son necesarios para que el programa funcione correctamente.

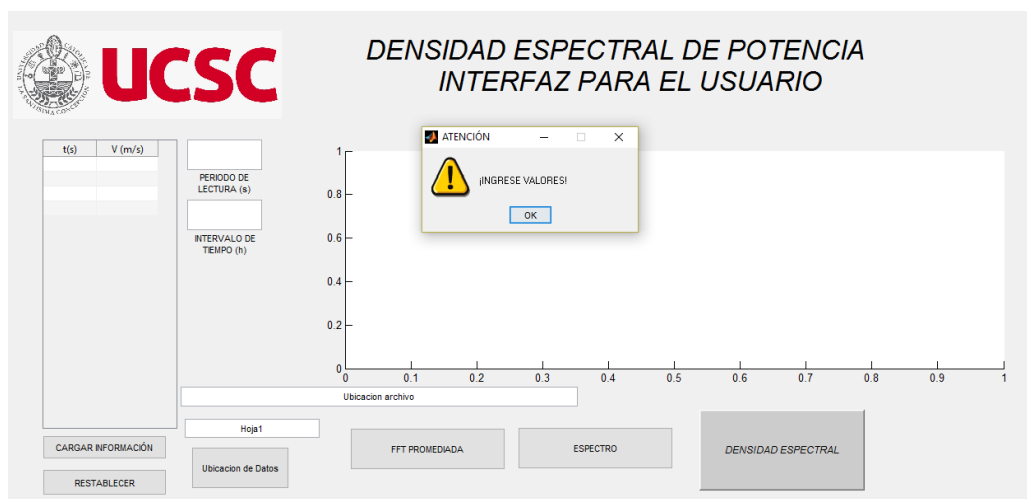


Figura 13. Mensaje de alerta “INGRESE VALORES”

Si el usuario ingresa correctamente los registros e indica el periodo de lectura con las horas que se quieren analizar los registros, el programa internamente realizará todos los cálculos anteriormente mencionados en 4. para que el usuario desde ahora sólo obtenga información a través de gráficos y tablas, que es la transformada de Fourier promediada, el espectro de potencia y la función de densidad espectral de potencia. Esta información se entrega con los botones ubicados en la parte inferior de la ventana 1, que son “FFT PROMEDIADA”, (botón1), que corresponde a la Transformada de Fourier que se le aplicó a todos los registro por periodo, obteniéndose un promedio de estos. Luego se encuentra el botón 2 “ESPECTRO”, el cual muestra la información del espectro de potencia, que es información más importante y aplicable, lo que realiza el botón 2 se explico en 4.3. Y por último, se encuentra el botón 3 “DENSIDAD ESPECTRAL” correspondiente a la función de densidad espectral de potencia, que es la información principal de esta investigación.

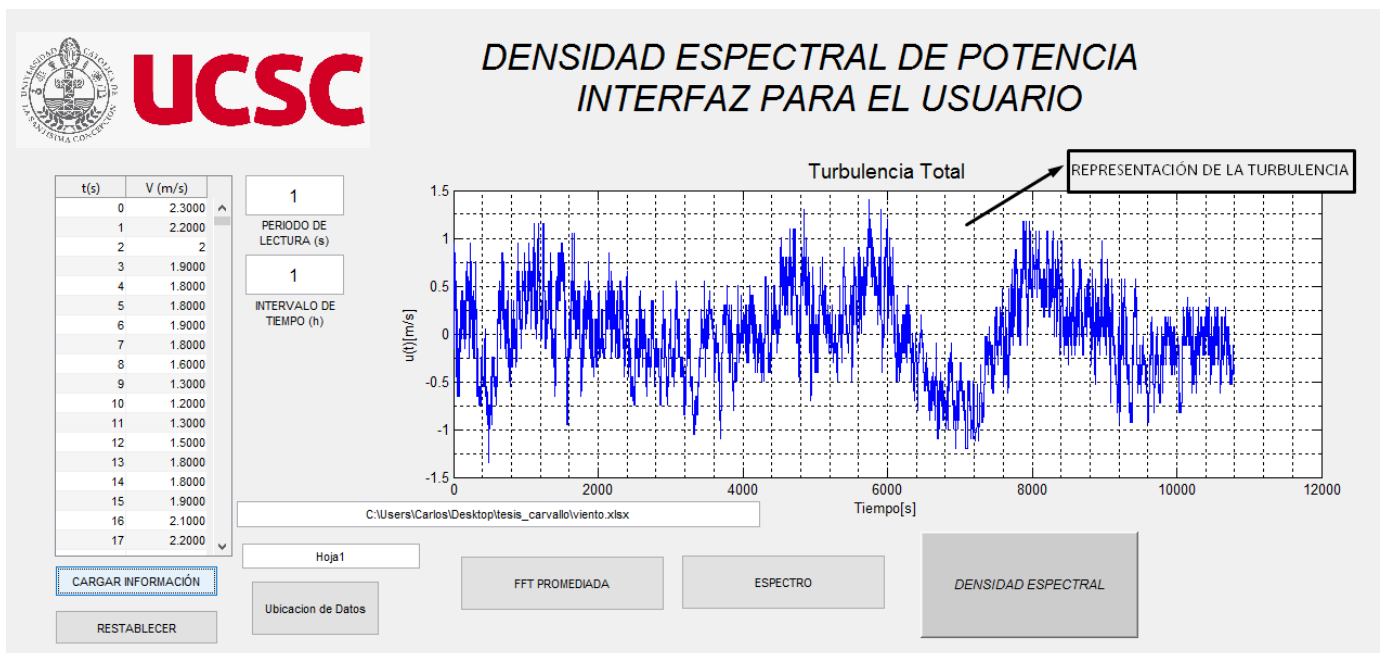


Figura 14. Información completa de la ventana 1.

El gráfico de la figura 14. muestra la turbulencia de las velocidades instantáneas en todo el tiempo de lectura.

5.2. SEGUNDA VENTANA DE VISUALIZACION

La segunda ventana de visualización entrega información correspondiente a lo indicado en 4.2., donde se aplica la Transformada de Fourier, proporcionando información representativa del fenómeno utilizado. Al presionar clic en el botón 1, “FFT PROMEDIADA” se muestra la segunda ventana representada en la figura. 15.

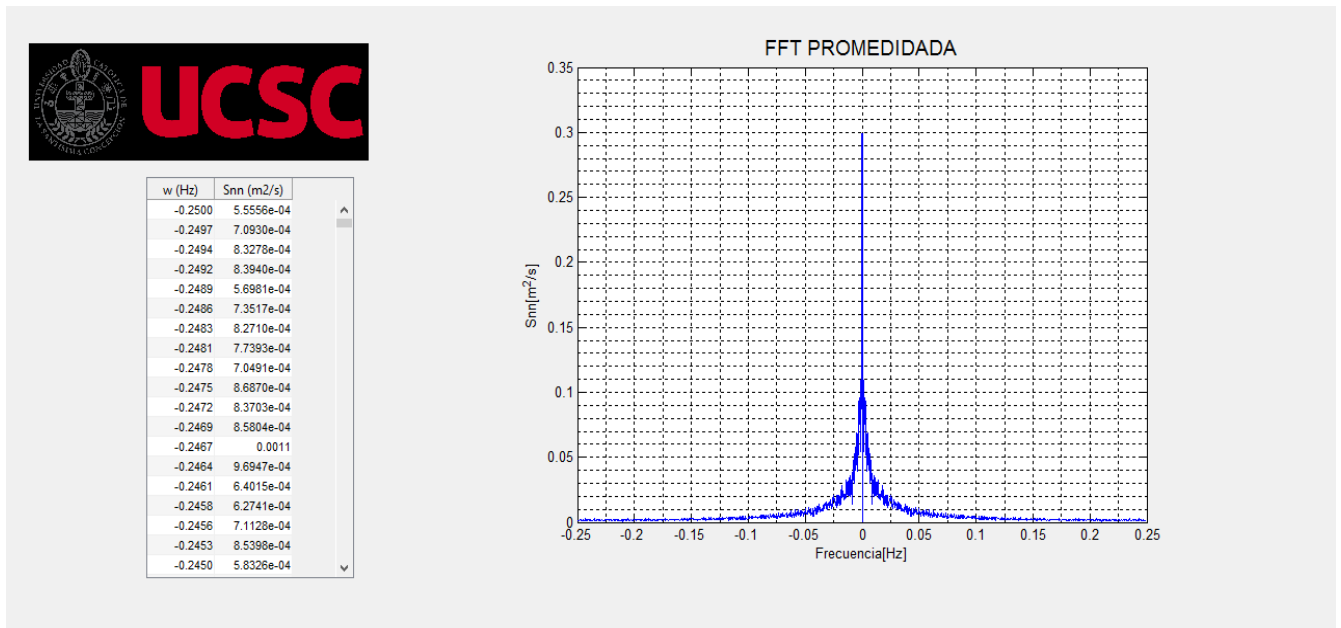


Figura 15. Segunda ventana FFT PROMEDIADA.

El gráfico de la segunda ventana muestra los datos llevados al dominio de la frecuencia en el eje mientras que en el eje de las abscisas se indica el vector de frecuencias. Nótese la utilización del vector completo de las frecuencias, tomando en consideración tanto frecuencias positivas como negativas, con el fin de una mejor visualización, aún cuando para efectos de estimación de cargas de viento, se debe considerar solamente frecuencias positivas.

Además se muestra la tabla con los valores con los que se obtiene el gráfico.

5.3. TERCERA VENTANA DE VISUALIZACIÓN

La tercera ventana de visualización entrega información en relación al espectro de potencia explicado detalladamente en 4.3. al igual que en la ventana 2, que entrega un gráfico más una tabla con valores, los cuales se utilizan para hacer el gráfico.

Los datos obtenidos para calcular el espectro de potencia corresponden a los máximos por registros, es decir, se considera el mayor valor del registro multiplicado por el vector de frecuencias positivas, esto queda representado en la figura 16.

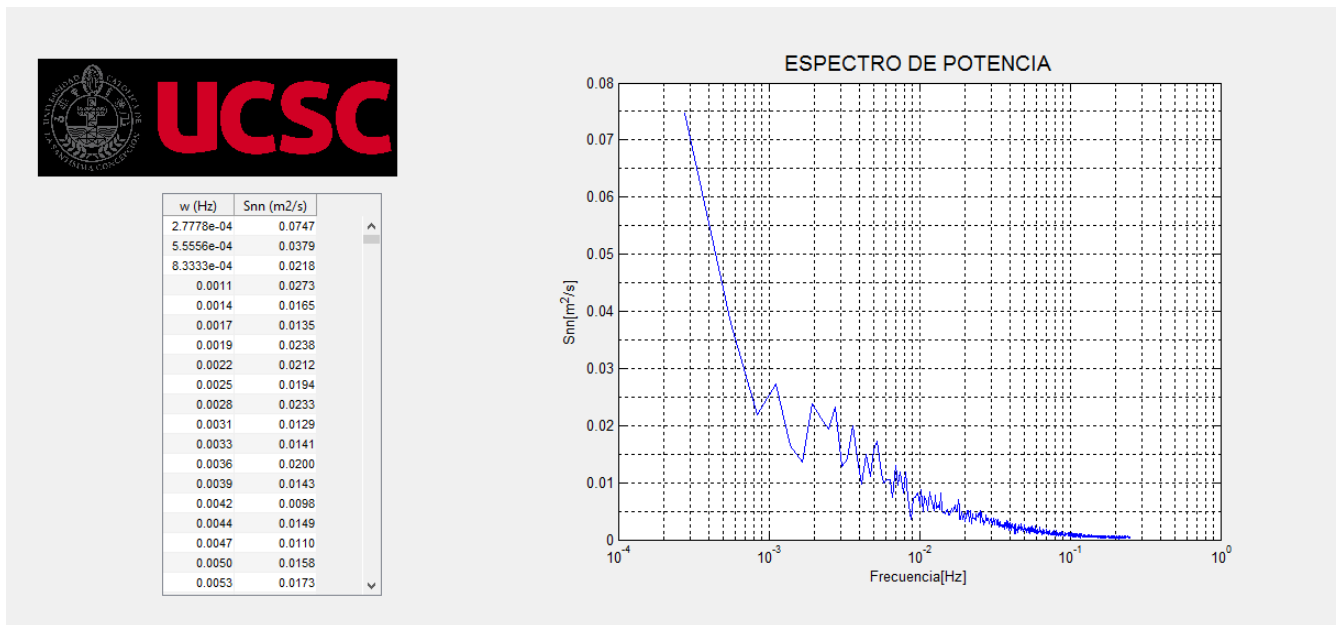


Figura 16. Tercera ventana, ESPECTRO.

El gráfico es semi-logarítmico en el eje x tal como se menciono anteriormente en 4.3.

5.4. CUARTA VENTANA DE VISUALIZACIÓN

La cuarta ventana de visualización es la más importante de las tres, pues muestra los resultados de la función de densidad espectral de potencia. Su importancia radica en que el presente estudio se enfoca en la obtención de esta. Como se detalló en 4.5. ésta función se calcula a partir del periodo en que se registra la máxima turbulencia de los datos, por lo que en esta ventana se muestran dos gráficos, con sus dos tablas correspondientes. El gráfico ubicado en la parte inferior corresponde al de la densidad espectral, mientras que el ubicado en la parte superior muestra la turbulencia máxima registrada. Las tablas presentan, en primer lugar, los datos de velocidades (m/s) y, luego, los datos de potencia por frecuencia, tal como se representa en la figura 17.

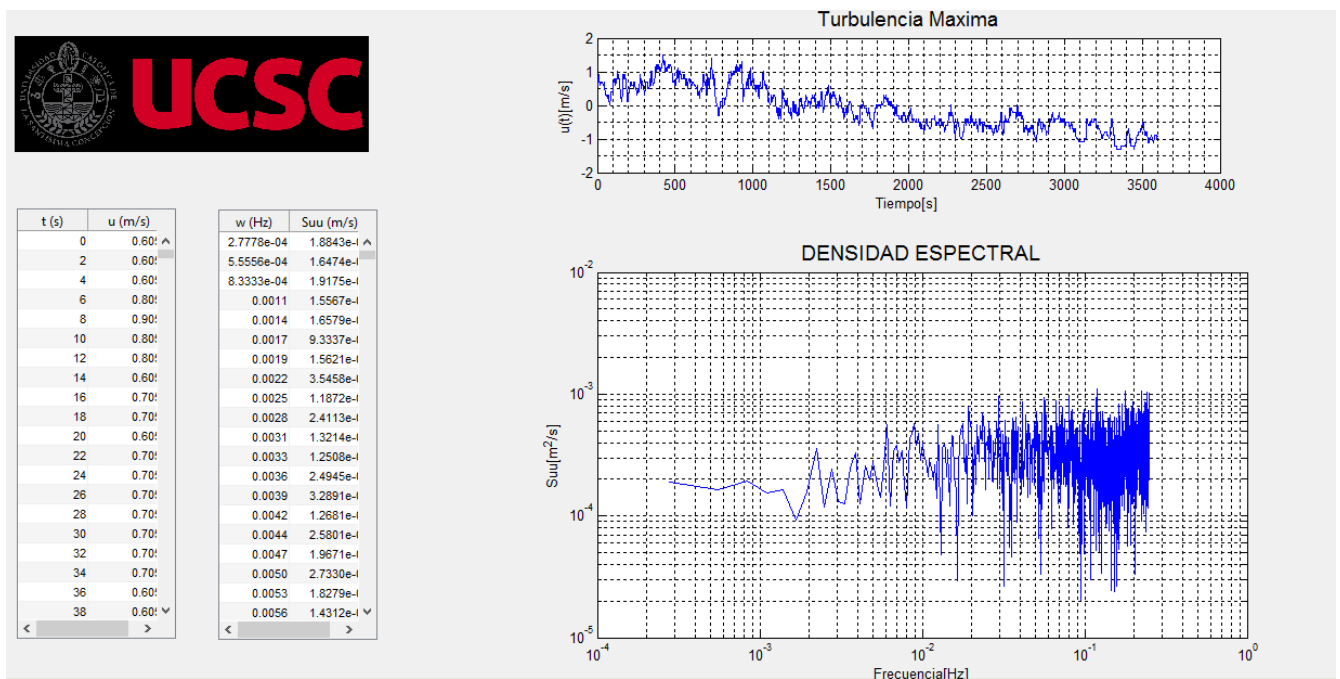


Figura 17. Cuarta ventana de visualización, función de densidad espectral de potencia (FDEP).

El gráfico de densidad espectral se presenta en escala logarítmica en sus dos ejes y el periodo que se utilizó para el cálculo de ésta fue de periodos de 1 hora, por eso el gráfico de turbulencia muestra un tiempo de 3600 segundos.

En todas las tablas mostradas en las diferentes ventanas es posible copiar los datos y llevarlos a otra fuente como Excel para realizar cualquier análisis que el usuario estime conveniente.

6. VALIDACIÓN

Validar el software es necesario y fundamental para comprobar si está cumpliendo o no con los objetivos para los cuales fue creado, debido a que los espectros obtenidos podrían ser utilizados con diferentes fines de estudio, como por ejemplo desarrollar un proyecto de generación de electricidad, donde el recurso eólico surge como fuente de energía primaria, o para estudios estructurales en la ingeniería civil.

La complejidad de validar el software a través de estudios previos es que no se cuenta con los registros que se utilizaron en estos, por esta razón se tomó como punto de partida una investigación de Emanuel Carril (2016), ingeniero egresado de la UCSC, que contaba con los registros utilizados. El estudio consistía en analizar el comportamiento estructural de chimeneas metálicas frente a cargas de viento por agitación turbulenta, con lo que se obtuvo la función de densidad espectral de potencia para modelar la influencia del viento, donde los registros de velocidad de viento instantánea corresponden a una muestra tomada durante dos días, cada dos segundos y separada en periodos de una hora, éstos datos fueron tomados en el mes de septiembre de 2015, mediante los cuales se obtuvo la función de densidad espectral de potencia, figura 18.

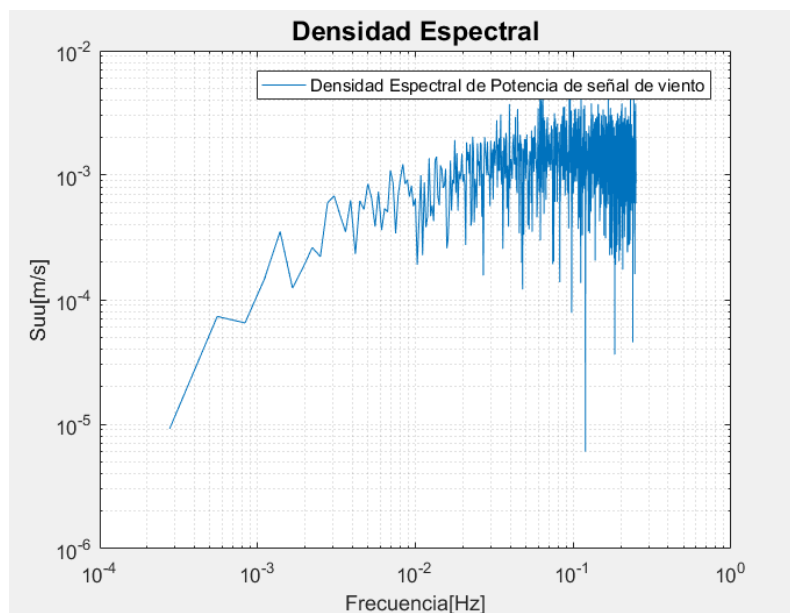


Figura 18. FDEP del estudio, ingeniero UCSC.

Los registros mencionados anteriormente fueron ingresados en el software creado para analizar el comportamiento de éste y evaluar si se ajustaba a lo observado en la figura 18, donde la FDEP fue calculada de la manera tradicional, es decir, sin la automatización propuesta en este estudio.

La gráfica que presenta el software se representa en la figura 19.

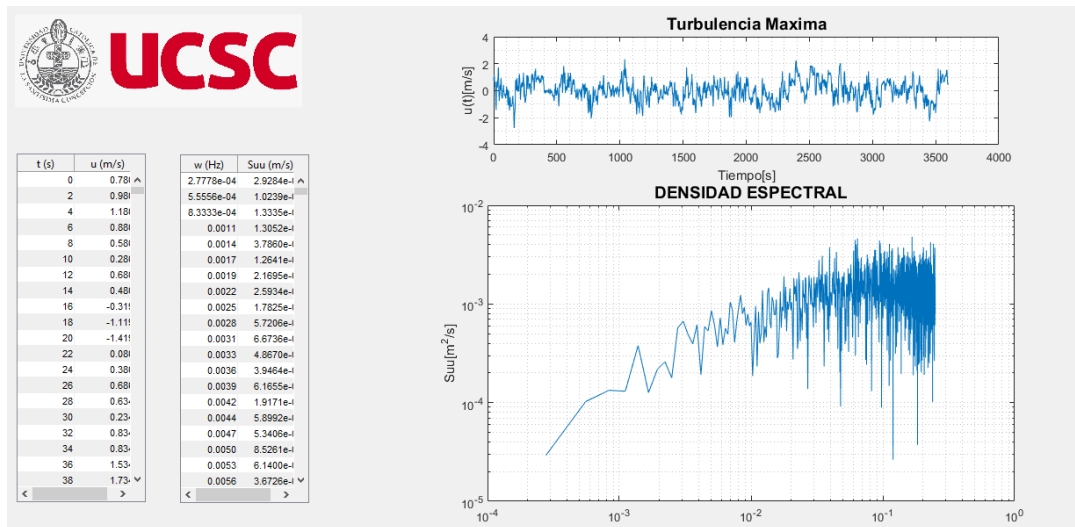


Figura 19. FDEP entregada por el software.

En la figura 18 y figura 9 se puede observar que ambas gráficas tienen el mismo comportamiento, concentrando la energía cinética del viento entre las frecuencias de 0.01 Hz y 0.3 Hz en el eje de las abscisas de las dos, mientras que en el eje Y se concentra en los valores de 0.0001 (m²/s²) y 0.04 (m²/s²), por lo tanto se puede asegurar que el software está entregando información correcta al realizar los cálculos correspondientes para obtener la FDEP.

Además, el espectro de velocidad horizontal del viento trazado por Van der Hoven (1957), figura 20, indica que para ráfagas de vientos de frecuencias altas, asociadas a periodos comprendidos entre dos segundos y unos cinco minutos (de posible importancia en la respuesta dinámica de las estructuras), la FDEP debe tener una tendencia a graficarse como el espectro de Van der Hoven. En este caso, al estar en las frecuencias de 0.01 Hz y 0.3 Hz, se grafica el pico de turbulencia del espectro de Van der Hoven, *fig. 18*.

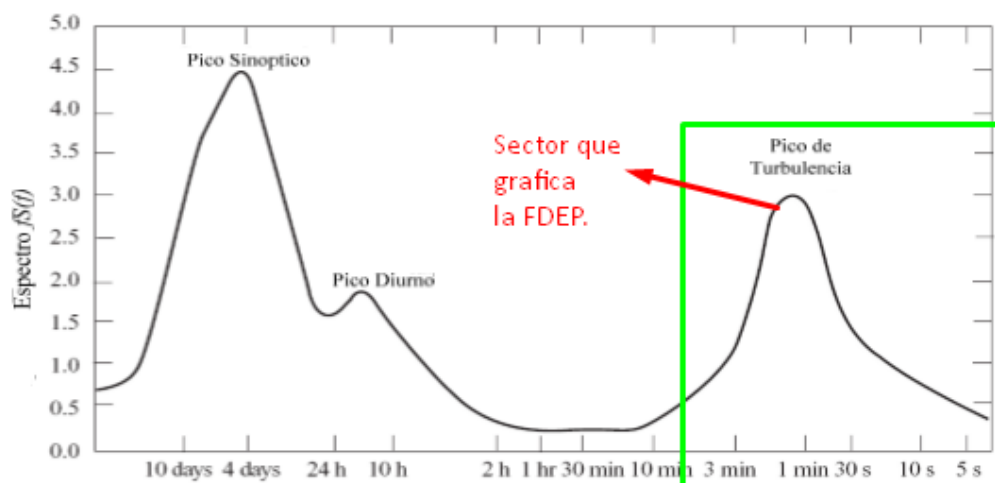


Figura 20. Espectro de Van der Hoven.

Finalmente, se puede afirmar que el software puede ser utilizado para cualquier registro de ráfagas de viento que se quieran analizar.

7. CONCLUSIONES

En relación a los objetivos propuestos para este estudio se logró automatizar, de manera general, el proceso matemático para la obtención de los espectros de potencia a través de la confección de un software que permite calcular la función de densidad espectral de potencia. Al realizar esta automatización en términos generales, se hace referencia a que se pueden ingresar diversos registros al software, ya que éste es capaz de procesar cualquier ráfaga de viento y entregar la información deseada, es decir, los distintos espectros perseguidos. De esta forma y de acuerdo a todo lo precisado en el desarrollo del estudio, se cumple exitosamente el objetivo principal planteado.

Para validar el software se utilizaron registros de vientos de un estudio previo, del cual se obtuvieron los diferentes espectros a través de un análisis matemático tradicional, luego éstos mismos registros se ingresaron al software creado obteniéndose resultados idénticos y confiables. Además, se validó a través del espectro de Van der Hoven analizando el comportamiento que deben tener los registros en el rango de frecuencias que se esté analizando.

La realización de este estudio y la automatización de los datos en la confección del software entregan como producto final una herramienta que permite la obtención de información solicitada en diferentes software de diseños de estructuras con la finalidad de optimizar el tiempo dedicado a obtener la caracterización del viento, a través de la función de densidad espectral de potencia.

8. REFERENCIAS

- **Meseguer Ruiz J.**, (2003). *Efectos del viento en edificaciones y estructuras. Aerodinámica civil.*
- **Carril Medina E.** (2016). *Comportamiento estructural de chimeneas metálicas frente a cargas de viento por agitación turbulenta. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.*
- **Amaya O.** (2007). *Modelado del viento para simulaciones computarizadas de sistemas de potencias.*
- **Gómez Rivera W.** (2006). *Simulación del viento atmosférico y aplicación experimental. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.*
- **Vasallo Belver A.** *Análisis de vibraciones aeroelásticas en estructuras esbeltas sometidas a cargas de viento. Universidad de Valladolid, Valladolid, España.*
- **Battista R. C.** *Evaluación de la estabilidad de la estructura del poste metálico para las telecomunicaciones, PEC-4317, Fundación COPPETEC, Universidad Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.*
- **Koten, H. Van.** *Vortex Excitation of Steel Chimneys, Wind Effects on Buildings and Structures, Riera & Davenport (eds), Balkema, Rotterdam, pp.209-219, 1998.*
- **Blessmann J.** *Accidentes causados por el viento, 4ª Edición, Editorial de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul. 2001.*