**Capítulo 1**

**Estado del conocimiento**

**1.1 Introducción**

Los puentes carreteros son susceptibles a la influencia de cargas dinámicas como sismos, movimiento de los automóviles, viento, etc. Cuando están sujetos a cargas de viento durante un periodo largo, pueden sufrir inestabilidad estructural y colapsar. Es por ello que los ingenieros deben considerar la influencia del viento en el análisis y diseño.

El colapso del puente Tacoma Narrows en 1940 (Figura 1.1) atrajo la atención de los ingenieros civiles en el tema de la ingeniería eólica sin embargo no fue el primero en colapsar, en Inglaterra en 1836 colapso el puente l Bringhton Chain Pier, y rn 1879 en Escocia el Tay Bridge (Holmes, 2007).

|  |
| --- |
|  |
| Figura 1.1 Colapso del puente Tacoma Narrows (Jurado et al, 2011) |

Cuando se construyó el puente Tacoma, la teoría de diseño eólico consideraba principalmente en cargas estáticas, al no considerar las cargas dinámicas se desestimaban las características aeroelásticas cuando el puente se movía (Jurado et al, 2011). De hecho lo que causo tanta conmoción fue que el puente se diseñó para una velocidad de viento de 44.72 m/s (161km/h) y una presión de 14.88 Pa (146 kg/m²) y colapsó ante un viento de 22.36 m/s con presiones de aproximadamente 2.48 Pa.

A partir del colapso del primer puente Tacoma se iniciaron las investigaciones con el fin de determinar el origen de la falla, llegando a la conclusión de que el viento actuó en conjunto con el puente reduciendo el amortiguamiento e incrementando el movimiento hasta llegar al colapso. Esta nueva teoría propuesta por Scanlan y Tomko (1976) es conocida como aleteo (Flutter) la cual establece que hay una acoplamiento entre los modos flexión y torsión. En el caso del Tacoma Narrows, su rigidez a torsión era baja por lo que cuando se presentaron velocidades de viento bajas, se dio dicho acoplamiento generando un incremento en la torsión (Jurado et al,2011).

A partir del colapso del puente Tacoma se comenzó a utilizar la teoría de aeroelasticidad en la ingeniería civil, además de que los tableros de los puentes se comenzaron a construir con formas aerodinámicas como el puente Great Belt de Dinamarca.

En la actualidad el análisis de viento se hace para tres efectos distintos: (1) Ráfagas, (2) desprendimiento de vórtices y (3) condiciones de inestabilidad aeroelástica.

Las ráfagas es el efecto directo del viento el cual depende de la velocidad del mismo. El modo en que los cuerpos interactúan con el viento se puede medir con los coeficientes aerodinámicos. En un principio cuando se desarrolló la teoría de ráfagas, Davenport (1973) propuso las ecuaciones de fuerza de viento en función a los coeficientes aerodinámicos, esta teoría es conocida como cuasi-estática (Quasy Steady).

El desprendimiento de vórtices se genera cuando el flujo de viento entra en contacto con un cuerpo, el cual se mantiene adherido a él, sin embargo a lo largo del cuerpo se va generando una presión que puede llegar a ser negativa generando el desprendimiento del flujo y con ello un vórtice. Esto se da en cuerpos no aerodinámicos, es decir cuya forma no permite el flujo normal del viento.

Los efectos de inestabilidad son aquellos en lo que el viento interactúa con la estructura modificando sus propiedades dinámicas y con ello lleva al colapso la estructura. Strommen (2010) propone una metodología para obtener las velocidades críticas ante cuatro efectos de inestabilidad: (1) divergencia estática, (2) inestabilidad torsional, (3) galopeo y (4) aleteo.

La divergencia estática es aquella en la que el puente va perdiendo rigidez a torsión debido al viento, la inestabilidad a torsión es similar al a divergencia estática, sin embargo, considera los efectos dinámicos por lo que el puente pierde tanto rigidez como amortiguamiento a torsión. El galopeo es la perdida de rigidez y amortiguamiento a flexión vertical y el aleteo es el acoplamiento de los modos de flexión vertical como aleteo en el cual se tiene que dar una serie de factores para entrar en esta inestabilidad.

La condiciones de inestabilidad son efecto debido a las ráfagas, es decir que las ecuaciones para resolverse provienen de la teoría de ráfagas. Como se mencionó anteriormente la teoría cuasi-estática (Quasy Steady) fue desarrollada por Davenport sin embargo para la revisión de inestabilidad fue Scanalan (1976) quién introdujo que las ecuaciones no estuvieran en función de los coeficientes aerodinámicos sino de unas derivadas aerodinámicas las cuales dependen de la sección del tablero.

Una característica importante en el análisis eólico es conocer la interacción del viento con el puente, es por ello que se desarrollaron los métodos ya mencionados. Sin embargo, otro tema muy importante es el comportamiento del viento.

El viento tiende a ser muy variado, dependiendo de la región en donde se encuentre, la altura en que se mida e incluso la temporada del año haciendo que se requiera de métodos probabilistas para su análisis. Para poder trabajar con una variable tan cambiante es necesario la aplicación de métodos estocásticos, sin embargo, se tiene que proponer ciertas hipótesis para poder aplicarlo de manera más sencilla. Una de estas hipótesis es que el viento se considera estacionario, es decir que sus propiedades estadísticas no varían, la segunda hipótesis es que se considera ergorico, eso significa que sus propiedades estadísticas no cambian durante todo el análisis y la tercera hipótesis es tiene un comportamiento homogéneo, con ello se asegura que el comportamiento estadístico de un punto analizado es igual que en todos los otros puntos.

El comportamiento estadístico del viento se comporta adecuadamente para ser representado como como una función con distribución de probabilidad Gaussiana. A pesar de saber cómo es la forma de la función de distribución existen muchos autores que han investigado diferentes ecuaciones para obtener esta función; por ejemplo, está la función de Kaimal la cual es usada en la mayoría de los reglamentos, otra es la de Davenport la cual se basa en una velocidad media a 10 metros sobre el nivel de terreno, existen otras como la Von Karman que tiene buenos valores comparados a los experimentales, y otros como Simiu, Tielman, Panosfky, etc (Liu, 2012).

Con estas funciones se puede obtener la respuesta ante ráfagas de manera directa como lo hace Strommen (2010), sin embargo con el crecimiento actual de la tecnología se pueden crear modelos computarizados que permitan obtener la respuesta de una estructura asignándole una historia en el tiempo. Esto conlleva a hacer simulaciones de viento basado en las funciones de densidad. Dado que es un proceso estocástico existen muchas manera de obtener las simulaciones, por ejemplo Shinozuka (1985), propone la obtención de la respuesta en el dominio del tiempo para un proceso simple el cual se basa en una suma de funciones que involucra la función de densidad multiplicada con la función coseno y un ángulo de fase aleatorio, este método es conocido como WAWS. El inconveniente de este método es que solo es válido sino se considera que existe correlación entre los puntos de análisis, para involucrar esta correlación Cao et al, (2010) muestran una metodología específicamente para puentes. Sin embargo en cuestión de simulaciones existe mucha literatura donde se puede obtener por medios de auto regresión donde se incluye ruido al análisis. Este método es conocido como ARMA donde Li & Kareemn (1990) indican cómo obtenerlo para la representación de viento.

**1.2 Conclusiones**

El análisis eólico de una estructura conlleva a lidiar con procesos estocásticos, haciendo que exista mucha teoría para obtener la respuesta, esto permite que se pueda resolver un mismo problema de muchas maneras, siendo todas válidas dependiendo de qué parámetro se use. Gracias a esto se pueden evitar colapsos como el puente Tacoma que a pesar de ser diseñado para un viento fuerte, colapso debido a condiciones de inestabilidad aeroelástica.

**1.3 Referencias**

Holmes, J. (2007). Wind Loading Structures. Nueva york: Taylor & Francis Group.

Jurado, H. and Mosquera. (2011). Bridge Aeroelasticity Sensitivity Analysis and Optimal Design. Coruña, España. WIT Press.

Li, Y., and Kareem. (1990). Ardma representation of wind field, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 415-427.

Liu, Z. (2012). On The Investigation of Bridge Buffeting. University of Nottingham.

Scanlan, R. H. (1976). Modern Approaches to Solution of the Wind Problems of Long Span Bridges. Engineering Journal american Institute of steel construction, 26-34.

Strommen, E. (2010). Theroy of Bridge Aerodynamics. Trondheim, Noruega: Springer.