

## Puente Tacoma ¿Resonancia?

El movimiento armónico simple debe estar presente en todo currículum de física, en razón de que es el punto de partida para estudiar las oscilaciones de cuerpos y, en general, sistemas de partículas.

El sistema físico sobre el cual se desarrolla el análisis dinámico y cinemático de las oscilaciones se denomina oscilador. Este concepto incluye tanto a sistemas simples por ejemplo una masa unida a un resorte, un péndulo, etc, como a sistemas mas complejos tales como una cuerda, el ala de un avión, un puente, etc.

Por supuesto que a nivel medio se utilizan los sistemas simples. Se estudia el oscilador en tres situaciones: oscilador libre de fuerzas exteriores, oscilador amortiguado y oscilador forzado.

Se restringe el movimiento del oscilador a oscilaciones pequeñas para que se cumpla la condición de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación (Ley de Hooke). Esto también asegura que las ecuaciones de movimiento sean lineales, lo cual permite que sus soluciones sean obtenidas por sencillos procedimientos matemáticos.

Respecto a los movimientos del oscilador, el que aquí nos interesa es el movimiento oscilatorio forzado y de éste la resonancia.

Cuando se analiza un oscilador forzado se concluye que a la fuerza exterior periódica que actúa sobre él, este responde con oscilaciones de la misma frecuencia que ésta. La amplitud de estas oscilaciones forzadas depende de características físicas del sistema, del amortiguamiento, de la frecuencia de la fuerza exterior ( $\omega$ ) y de la frecuencia natural del sistema ( $\omega_0$ ). Cuando la frecuencia exterior se aproxima al valor de la natural la amplitud del movimiento forzado del oscilador crece y llega a un máximo para un valor muy próximo a la natural  $\omega_0$ .

Este fenómeno se denomina resonancia.

Cuando se estudia la resonancia, y por razones de simplicidad, se hace en base a un oscilador simple, por ejemplo sistema masa- resorte, pero debe recalcarse que, en general, todo sistema tiene la propiedad de resonar cuando es sometido a vibración forzada y a la frecuencia apropiada. Por ejemplo los instrumentos musicales a cuerda están constituidos por estas y por una caja, generalmente de madera. Estos sistemas, físicamente hablando, tienen un conjunto finito pero muy grande, de frecuencias a las cuales pueden resonar. La configuración de la masa de aire en el interior de la caja, de las placas que la conforman y de las cuerdas, en cada resonancia constituyen un MODO de oscilación. El modo de mayor amplitud es el de menor frecuencia a veces llamado modo principal o, para algunos autores, primer armónico.

Otro ejemplo de un sistema mas complicado lo podemos encontrar en una lavadora cuando centrifuga. Si la distribución de la ropa y el agua no es simétrica el centro de masa de esta distribución se encuentra fuera del eje de rotación del tambor. Esto genera un momento con componentes variables sobre los ejes principales del sistema y de frecuencia igual a la de rotación. Por lo tanto el sistema se comportara como un oscilador forzado y cuando la frecuencia de rotación sea próxima a la natural del sistema completo el sistema resonará y sus vibraciones se harán importantes. También podemos incluir entre sistemas con posibilidad de oscilaciones importantes a los edificios torres y de gran altura y a los puentes, en especial a los colgantes.

Aquí esta el objetivo de este artículo.

Cuando se pretende dar ejemplos de resonancia, frecuentemente se utiliza la ruptura del puente de Tacoma-Narrow en Estados Unidos en 1940.

Generalmente se aplica el ejemplo diciendo que el viento ejerció una fuerza variable sobre el puente con una frecuencia que coincidió con su frecuencia natural, entró en resonancia con amplitudes que su estructura no soportó y luego se derrumbó. Un alumno analítico,

para entender el ejemplo y supuesto que estudió el tema con un sistema masa-resorte, hará una analogía entre ambos sistemas procurando encontrar equivalencia entre los distintos parámetros que actúan en ambas situaciones. Pero sin duda encontrará dificultades en entender el origen de "una fuerza periódica de frecuencia constante". Por ejemplo Resnick (1) cita: "El viento produjo una fuerza resultante cuyas fluctuaciones entraron en resonancia con la frecuencia natural de la estructura" Para adaptar esta explicación, deberíamos reescribir la definición de resonancia. Un intento puede ser:

"Siempre que un sistema físico puede oscilar (o vibrar) al ser accionado por una serie de pulsos periódicos de frecuencia igual a la natural del sistema, efectuará oscilaciones de gran amplitud "

Esta definición exige al viento que envíe sobre el puente golpes de aire y con una frecuencia casi constante y sostenida en el tiempo. No creo que esto pueda convencer a un alumno que piensa.

Algunos autores han procurado encontrar la fuente de la periodicidad necesaria de la fuerza excitadora en la formación de vórtices.

Esto significa: cuando una masa líquida o gaseosa encuentra un obstáculo en su camino, las líneas de corriente se separan y vuelven a unirse después de pasarlo. Esto sucede bajo condiciones muy especiales que dependen de la forma del obstáculo y de la velocidad. La forma de este está relacionada con lo que comúnmente se denomina aerodinámica. En el diseño de automóviles, lanchas, trenes y aviones la forma aerodinámica es de vital importancia para disminuir la resistencia al avance y la reducción de turbulencias.

Cuando el móvil no tiene forma aerodinámica, después que el fluido lo pasa se forman cadenas de vórtices a partir de cierta velocidad. Las líneas de corriente se separan del cuerpo y no contornean sus bordes. Por vórtices se significa: concentración de partículas del fluido que se mueven en trayectorias circulares. Comúnmente se conocen como remolinos.

La frecuencia con que aparecen y desaparecen estos vórtices se traduce en compresiones y depresiones del aire que está después del puente. Esta frecuencia fue identificada por algunos autores como la del agente exterior periódico que generó las oscilaciones del puente hasta su ruptura. Este tipo de movimiento se conoce como vibración inducida por vórtices.

Sin embargo de acuerdo a Billah y Scanlan (2) los registros efectuados durante el colapso del puente, o sea la velocidad del viento (67 km/h) y la frecuencia de oscilación del puente en el momento del colapso fue de 0,2 Hz. Esta frecuencia no coincide con la que corresponde a esta velocidad deducida de la relación de Strouhal (1 Hz). (Referencia en Ref 2).

Brillah y Scanlan (2) explican que ensayos con un modelo a escala del puente Tacoma mostraron la existencia de un modo torsional no acotado de amplitud creciente con la velocidad del viento.

La repetición y ampliación de este experimento mostró definitivamente que la causa de la destrucción del puente fue un modo ondulatorio torsional generado por la compleja interacción de los flujos de aire que pasaban por encima y por debajo del puente.

Resumiendo, y a la vista de todo lo anterior se concluye que la directa analogía entre un oscilador simple en resonancia y la destrucción del Tacoma no es apropiada porque genera dudas y tal vez confusión en la mente de los alumnos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. HALLIDAY – RESNICK. Física. Parte I. CECSA.
2. BILLAH Y. SCANLAN, R. Resonance, Tacoma Narrow Bridge failure and undergraduate physics textbooks. American J. of Physics 59 (2). Febrero 1991.