ASEPEYO

Estudio con cámara acústica de ruido generado por motores eléctricos en la industria

R4E23347

ÍNDICE

ÍNDICE 2
Introducción 3
1- MODELO DE ESTUDIO DE RUIDO GENERADO POR UN MOTOR 5
2- ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE RUIDO EN DIFERENTES UBICACIONES 8
3- ESTUDIO DE NIVELES ACÚSTICOS 17
4- DATOS CORRESPONDIENTES A MOTORES SEÑALADOS COMO FUENTE PRINCIPAL DE RUIDO 26
5- CONCLUSIONES 27

Anexo. Informe bibliográfico sobre motores eléctricos y ruido generado

Dirección de Prevención de Asepeyo

Autores: Javier Aniés Escartín, Santiago Rosell Bartrés Área de Innovación e Investigación

Supervisión: Santos Huertas Ríos

Introducción

El motor eléctrico es un componente imprescindible en la actividad de prácticamente todas las instalaciones industriales. Se adopta para muchas funcionalidades diferentes, y por tanto la diversidad de tipos y formas que puede adoptar es una característica fundamental, que se describe en esta memoria de proyecto de investigación. El proyecto de investigación va asociado a una programación de visitas con la cámara acústica que han determinado que los motores eléctricos son una fuente de ruido en ubicaciones en las que hay un puesto de trabajo. Así un motor eléctrico se considera un elemento que genera ruido de un nivel que supone un riesgo para la salud de los trabajadores.

Son múltiples las tecnologías asociadas y usos y montajes que involucran motores eléctricos, el presente estudio analiza y diferencia los diferentes tipos y características que pueden determinar la generación de ruido, para fundamentar unas buenas prácticas asociadas a su uso, mantenimiento, montaje y adquisición.

En este estudio se relacionan los diferentes tipos de motores eléctricos que se pueden encontrar en instalaciones industriales, los tipos de ruido que se genera, y las medidas preventivas relacionadas con los motores.

Las fuentes de información bibliográfica son numerosos y abarcan la diversa problemática asociada. Tanto la relacionada con la generación de ruido y sobretodo con las vibraciones generadas por la rotación de los motores. Así ambos efectos se asocian en diferentes estudios por la interrelación que tienen.

El IDI de Asepeyo llevado con la cámara acústica permite obtener información de motores en situaciones reales en los que se genera ruido. La información obtenida en el estudio se presenta y se analiza.

Para considerar y valorar los niveles de ruido que se recogen en diferentes emplazamientos y lugares en los que se ha estudiado la incidencia de los motores sobre el ruido se tiene en cuenta el Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido. En concreto lo dispuesto en el Artículo 5. Valores límite de exposición y valores de exposición que dan lugar a una acción.

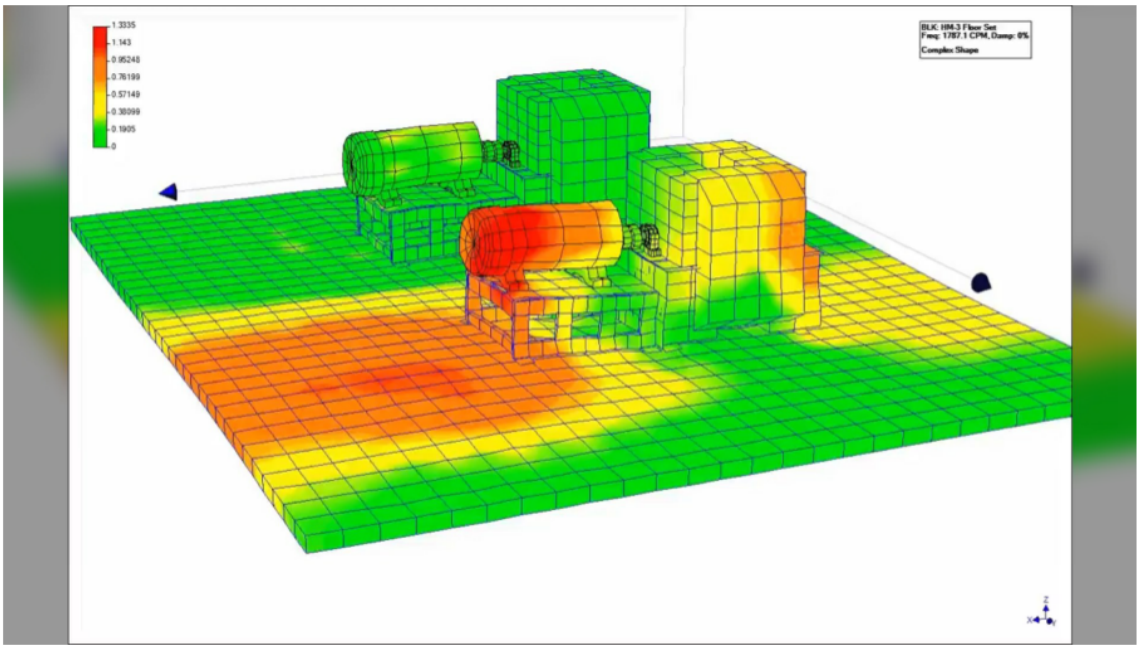
Este estudio desarrolla la información recogida con la cámara acústica en el plan de visitas realizado a instalaciones industriales en los que se ha detectado un motor eléctrico como origen de la exposición laboral a ruido.

Se incorpora como anexo una síntesis conceptual sobre el motor eléctrico desarrollando especialmente desde un punto de vista teórico todos aquellos aspectos que pueden tener relación con ese ruido generado por este tipo de equipamiento.

De acuerdo a programa de visitas desarrollado por la organización territorial de Prevención de Asepeyo, se han localizado fuentes de ruido en diferentes entornos laborales, de forma aleatoria se han programado visitas, sin selección previa de ningún tipo, excepto que se ajuste al programa del Plan de Actividades Preventivas de la Mútua.

1- MODELO DE ESTUDIO DE RUIDO GENERADO POR UN MOTOR

Para introducir el estudio se presenta un modelo teórico de emisión de ruido y vibraciones, con la siguiente imagen gráfica, obtenida a partir de un modelo de cálculo de una disposición habitualmente encontrado en la empresa.



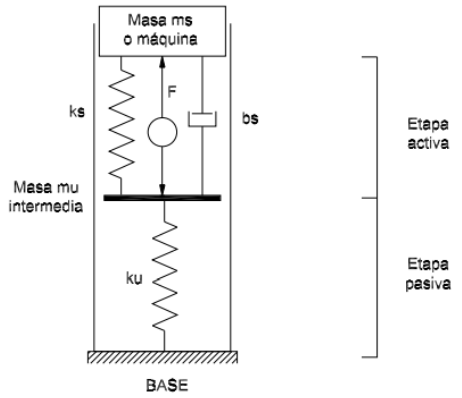
Esta figura presenta un modelo general de la generación de vibraciones en una disposición típica de montaje de un motor eléctrico, acoplado al equipo de producción. El código de colores señala la intensidad de las vibraciones en cada uno de los puntos de la superficie. Así en color rojo se señalan las zonas críticas en las que se encontrarán intensidades de vibración más significativas.

La relación entre punto en movimiento asociado a una vibración superficial, con la generación de ruido es directa, por lo que se analiza en su conjunto.

Aunque el orígen del ruido se encuentre en el motor, el medio de transmisión pese a que parezca rígido es rígido y actúa como un transmisor de este movimiento. Es decir que se propagan en forma de ondas de compresión, flexión e incluso de torsión. Esta propagación se hace a través del suelo, cimientos, y elementos estructurales y en todas las direcciones. Se ve atenuado por la distancia, y se comporta como onda que es al pasar de un tipo de material a otro o por los diferentes medios, generando absorciones, reflexiones o refracciones. Así cuando estas vibraciones pasan al aire, se transforman en ruido siguiendo justamente estas leyes de la física.

Frecuencia propia de vibración

Una característica especial de los sistemas vibratorios, que justamente es de lo que se trata este tipo de instalación, es que determinan o tienen asociada una frecuencia propia de vibración.



En la imagen se visualiza un esquema simplificado posible del sistema que conforma el motor eléctrico montado en una base (si está suspendido o colgado se trataría de forma análoga). Cuando se trabaja con este modelo para resolver cómo se propaga el movimiento, se obtiene una frecuencia propia de vibración. Es la que lleva a una resonancia.

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

En el modelo anterior la expresión que relaciona la frecuencia propia de vibración del sistema con una frecuencia propia es ésta.

Si la frecuencia de giro del motor es cercana a una frecuencia propia del sistema tenemos esa sobreexcitación y un ruido asociado a esa frecuencia de vibración que resulta amplificado por el sistema y por tanto generando problemas para los trabajadores.

Se puede visualizar un paso más en la aproximación del modelo simple a la situación más realista.

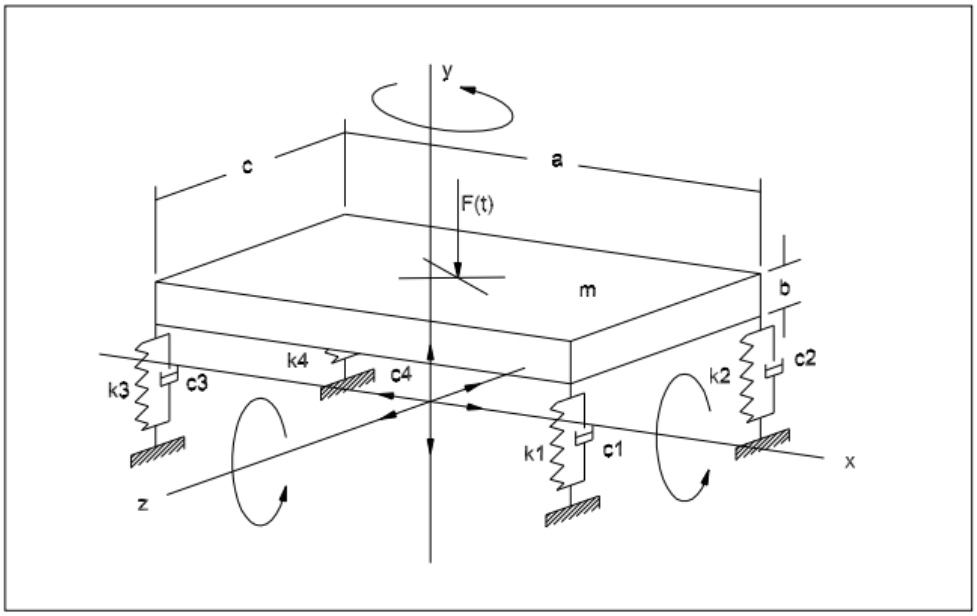


Figura 4.1: Modelo de máquina con seis grados de libertad. Tres grados de libertad para los desplazamientos longitudinales de la máquina y tres grados de libertad para las rotaciones alrededor de los ejes de referencia.

La conclusión de este apartado es que teniendo una adecuada descripción del montaje del motor eléctrico se pueden introducir los parámetros asociados en un modelo matemático que genera un cálculo de esas frecuencias de resonancia. Y como se verá en puntos posteriores evitar que dicha instalación acople la propia frecuencia del motor por su velocidad de giro, con la frecuencia propia de la resonancia del sistema lo cual implica una amplificación de esa vibración y por tanto un ruido elevado en esa frecuencia definida.

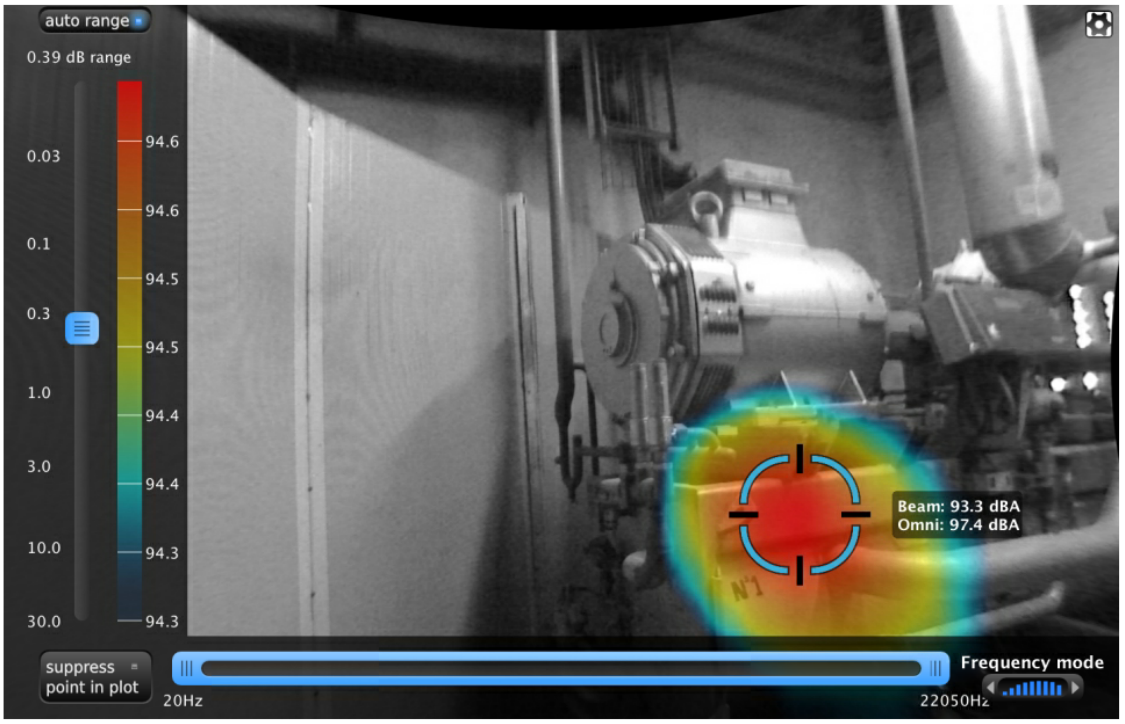
En general se considera que la frecuencia propia del sistema ha de ser tan baja como sea posible para eso:

- Se aumenta la masa que se coloca en la base de la máquina.
- Se dota de una capa de un material elástico de espesor suficiente.
- Se considera el tipo de material elástico con unas características determinadas.

En general se hace un tratamiento diferente para las vibraciones longitudinales o transversales, ya que ambas se encuentran simultáneamente con mayor o menor importancia.

Se puede relacionar el ejemplo ilustrado en el gráfico presentado con el modelo de cálculo con situaciones reales para validar el modelo y sobre la situación real obtener datos de interés sobre cómo se presenta el ruido en la fuente.

Nor848 Report



Descripción de la información generada en las imágenes tomadas con la cámara acústica

En la imagen superior se visualiza un equipo similar al del modelo que ilustra la primera parte de este apartado, el motor eléctrico montado en una base y conectado al resto de equipamiento.

Para interpretar la imagen se señala que superpuesta a la foto de escena, con el software de la cámara se señala mediante un código de colores, las fuentes de ruido que quedan sombreadas. En color rojo que establece mayor intensidad, la zona en la que se registra el mayor ruido generado. Así el círculo azul que aparece delimitará una zona que causa un ruido de 93,3 dBA.

La barra inferior de la imagen señala que se recogen frecuencias asociadas a ruido entre los 20 Hz y los 22050 Hz, por lo que no se ha colocado ningún filtro y cualquier fuente quedaría señalada sin importar en qué frecuencia se emite. Se puede modificar dicha barra para que solamente aparezcan en la imagen señaladas las fuentes de frecuencia en una banda seleccionada.

La banda de la izquierda señala umbral de 94 dBA (escala en la derecha de la banda) ,por lo que se “señalan” fuentes que estén por encima de ese nivel. Asimismo en la izquierda de la banda se señala un rango dinànico de 0,3 dBA. Por lo que entre la zona coloreada en rojo y la zona en azul existe una diferencia de ese valor. Por tanto la zona central de la parte coloreada es la que emite en mayor intensidad de ruido y la parte exterior en azul es inferior en ese valor de 0,3 dBA.

La información que se extrae de la imagen es que la zona de generación del ruido está en la parte de fijación del motor a la estructura. En ell propio motor o la zona en movimiento de ésta no habría tanto problema porqué no queda señalado como la principal fuente de ruido,

2- ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE RUIDO EN DIFERENTES UBICACIONES

En este apartado y a partir de la información recogida por la cámara acústica en diferentes emplazamiento en los que previamente se ha convenido una visita, por haberse valorado riesgo por ruido, se presenta un análisis del ruido generado por motores eléctricos señalados por la cámara acústica como fuentes de ruido más importante en ese lugar de trabajo. Se analizarán diferentes ubicaciones registradas en las visitas, presentando la información recogida en diferentes situaciones a partir de imágenes gráficas y la información asociada a esa imagen. Es importante destacar que la información de frecuencia asociadas a un ruido, fundamentalmente a través del análisis con Fast Fourier Transform, permite discriminar con una mínima incertidumbre, las contribuciones a la onda acústica de cada componente de frecuencia.

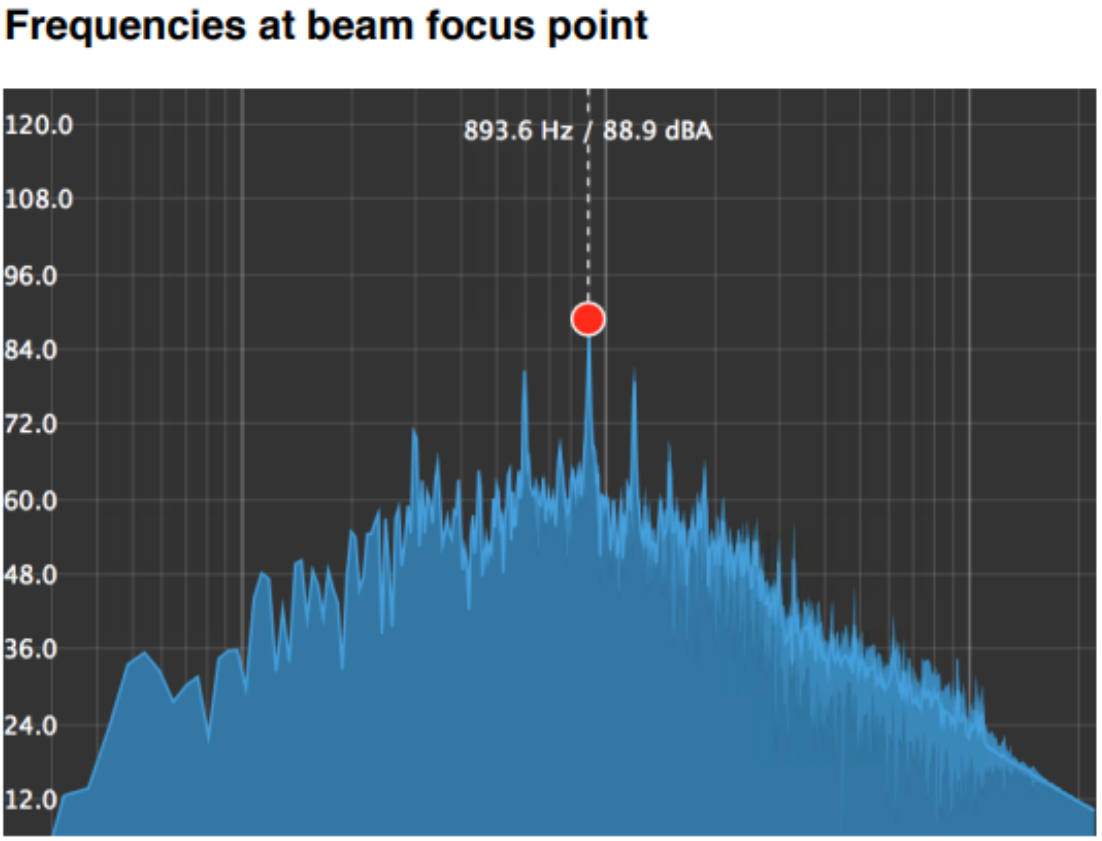
Igual que en modelo presentado para este tipo de instalaciones, en esta situación se marca una zona de elevado nivel en la base de tipo inercial que deberá funcionar a modo de aislamiento de la vibración generada por el motor.

9

En este caso se aporta otra evidencia que el montaje del equipo es fundamental. Las características de emisión de ruido y vibraciones que proporciona el fabricante del equipo pueden ser modificadas sustancialmente por la forma en la que se monta el equipo, o la evolución temporal del sistema.

El dato de valor de ruido en el emplazamiento señala 97,4 dBA. Un valor considerado muy elevado. Claramente el valor generado en la zona señalada por el círculo supone una muy fuerte contribución a ese valor global (omni). En todo caso el motor queda fuera de la zona señalada y por tanto se asume que éste funciona correctamente.

Asociada a este imagen se presenta el siguiente espectro de emisión obtenido de forma simultánea por el equipo:



Se hace un análisis en frecuencia obtenido a partir de la gráfica FFT generada a partir de la señal acústica que captan los micrófonos del equipo. Esta información permite discriminar la frecuencia exacta de emisión y por tanto no es sólo el análisis con un filtro pasa bandas, que no es capaz de determinar precisar tanto un valor de frecuencia de emisión.

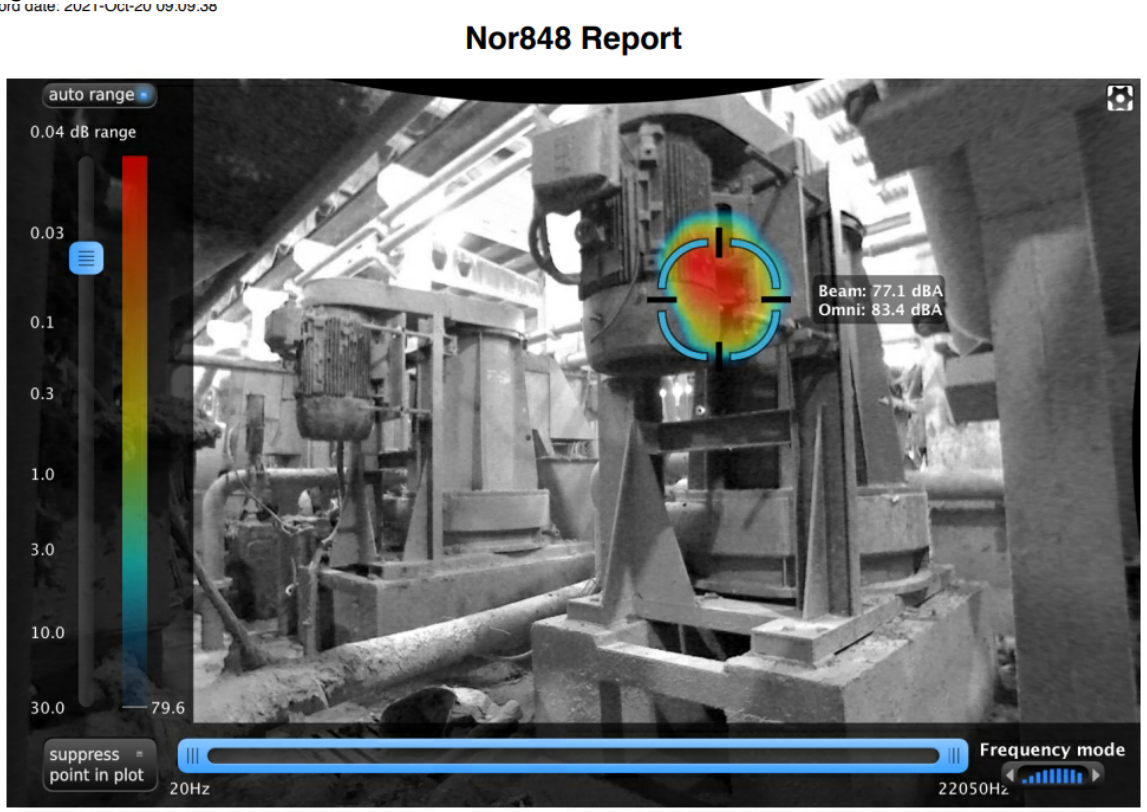
Esta gráfica señala unos picos de emisión de ruido en unas frecuencias muy concretas. Otros tipos de ruido pueden presentar unas curvas más suaves sin esta característica. Ese contraste es destacable.

La frecuencia determinada con una señal acústica de mayor intensidad corresponde con el valor de 893Hz. Se determinan dos picos más con una diferencia de + 300 Hz, y -300 Hz. Pero ambos picos son de una intensidad destacablemente inferior, unos 5 dB, por lo que la intensidad energética asociada a ambas es un orden de magnitud inferior. Sin entrar a valorar la naturaleza de estos picos se puede mantener una hipótesis de que se traten de armónicos.

La síntesis es que tenemos un ruido generado en la parte de sustentación del motor con una frecuencia asociada. Por tanto se trataría de una resonancia claramente definida por la mecánica del sistema sobre el que se puede actuar variando los parámetros que definen la resonancia de acuerdo a los principios establecidos para este tipo de casos.

1.1 Motor suspendido

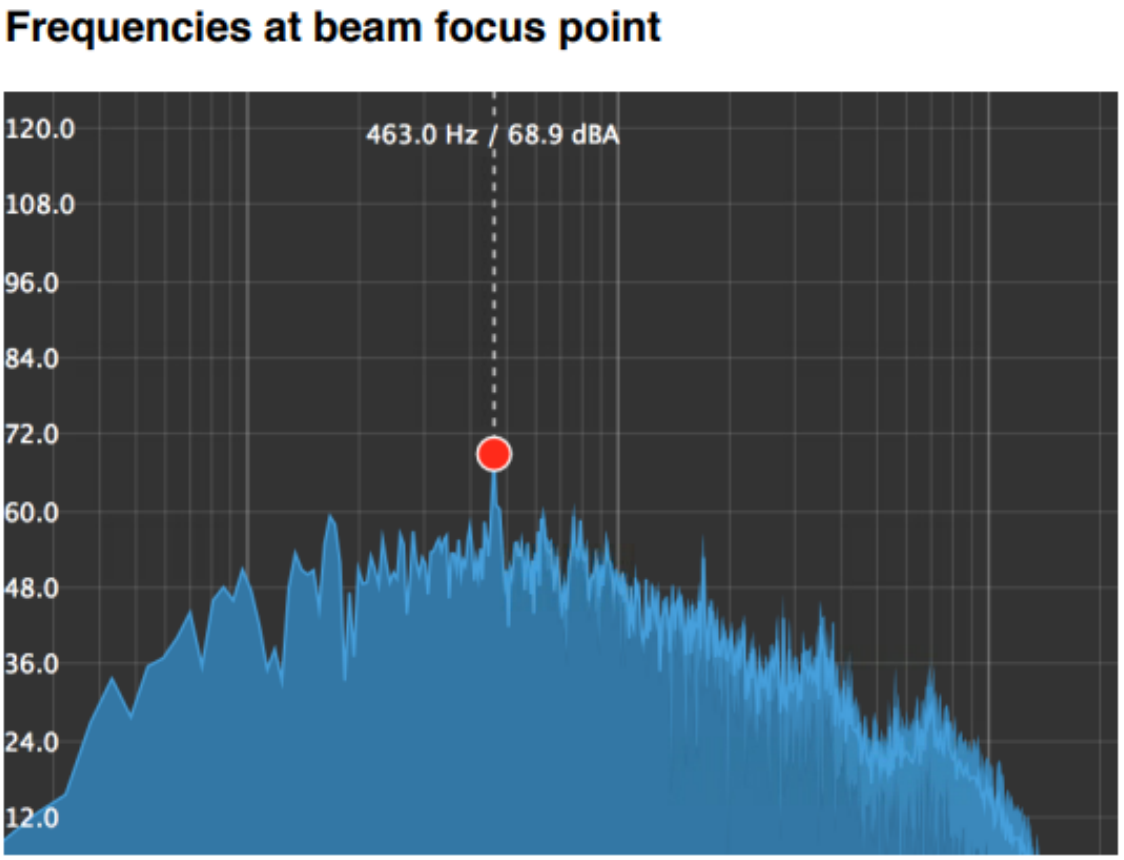
Imagen asociada



Como se puede ver en esta batería de motores, los equipos están suspendidos de un brazo superior pero también fijados a los laterales.

El nivel de ruido generado en la zona señalada como fuente de ruido es de 77 dBA, y el valor de ruido general en el emplazamiento de la cámara acústica, zona de trabajo es de 83,4 dBA. Por tanto es un nivel superior a un valor inferior que da lugar a una acción.

La zona señalada en la que se genera ruido es compatible con el modelo teórico de generación de vibraciones, y la zona de anclaje estaría en la zona marcada cómo crítica en la que se genera el ruido atendiendo al código de colores. Esta imágen se hace con todas la banda de frecuencias audibles.

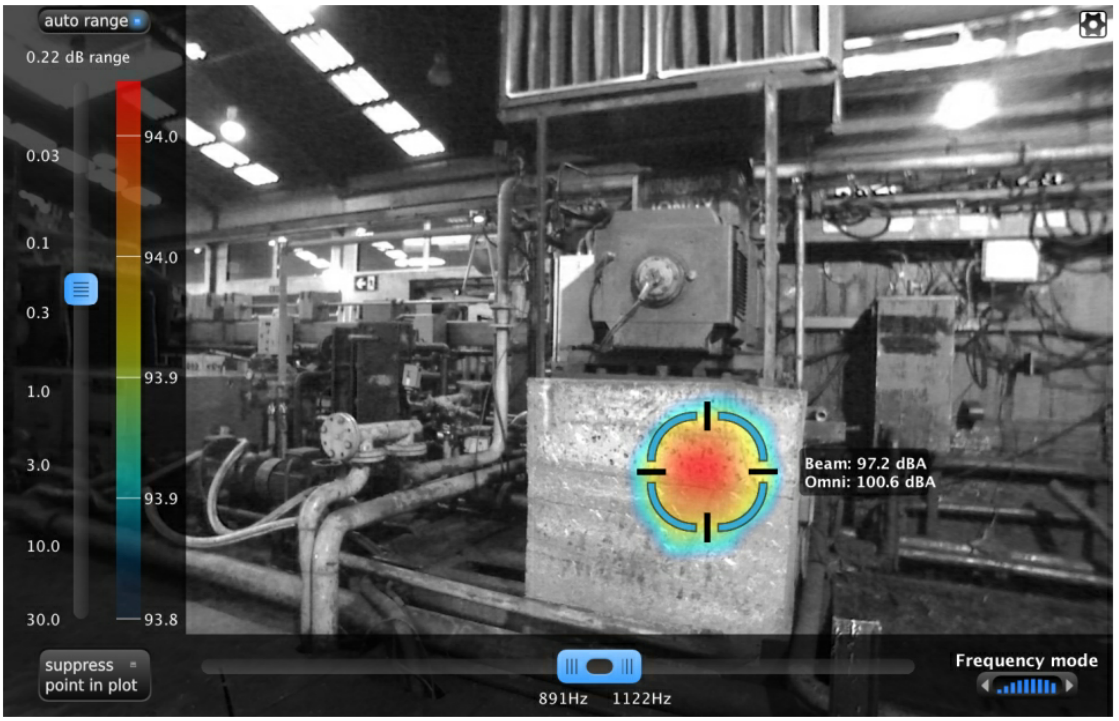


Se destaca un pico en el espectro de ruido generado, señalando claramente una frecuencia de 463 hz en la que se asocia la máxima intensidad de ruido generado. Entre los 68,9dBA asociados al pico más destacado y el ruido correspondiente al resto de frecuencias puede haber una diferencia de 9dBA, por lo tanto es un factor 10 o más el que separa la intensidad de este pico con el resto que tal como marca la gráfica no superan en ningún caso la línea horizontal que marca los 60dBA.

Así se determina que un valor tan elevado de ruido puede estar asociado a esa zona de anclaje y a la aparición de alguna resonancia definida en la frecuencia cuyo pico aparece marcado en la gráfica. Es la posibilidad que convendría analizar de forma prioritaria en una revisión del caso.

Estudio de emisión centrada en una frecuencia:

Nor848 Report



Esta imagen se toma para señalar el ruido generado por una banda de frecuencia estrecha. Así el algoritmo de cálculo se configura para sólo señalar el ruido generado en la banda de frecuencia del intervalo entre 891Hz y 1122 Hz. Se ha cogido este intervalo para recoger sólo el ruido generado en el pico de emisión, encontrado mediante el algoritmo.

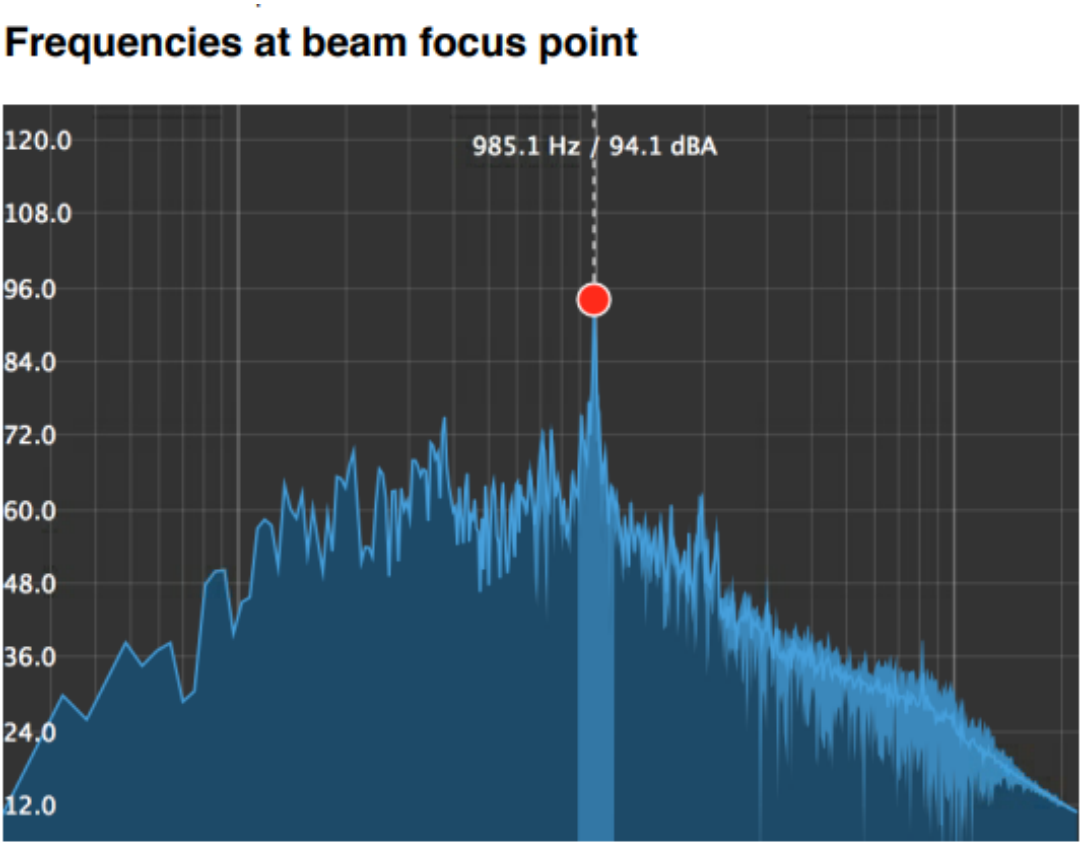
Es destacable que con estas condiciones, la imagen muestra claramente el punto de generación de ruido ubicado no en el propio equipo o motor eléctrico, sinó en el bloque en el que se monta. Se indican como relevantes los siguientes puntos:

- Es un sistema que está generando un nivel de ruido elevadísimo que supone un grave problema higiénico, más de 100 dB en una banda de frecuencia muy limitada.

- El ruido en esa ubicación, en la frecuencia establecida, prácticamente proviene de la zona delimitada por el círculo de la imagen. El valor de BEAM correspondería con la onda acústica originada en esa zona, a la que se le asocia un valor de 97,2dBA.

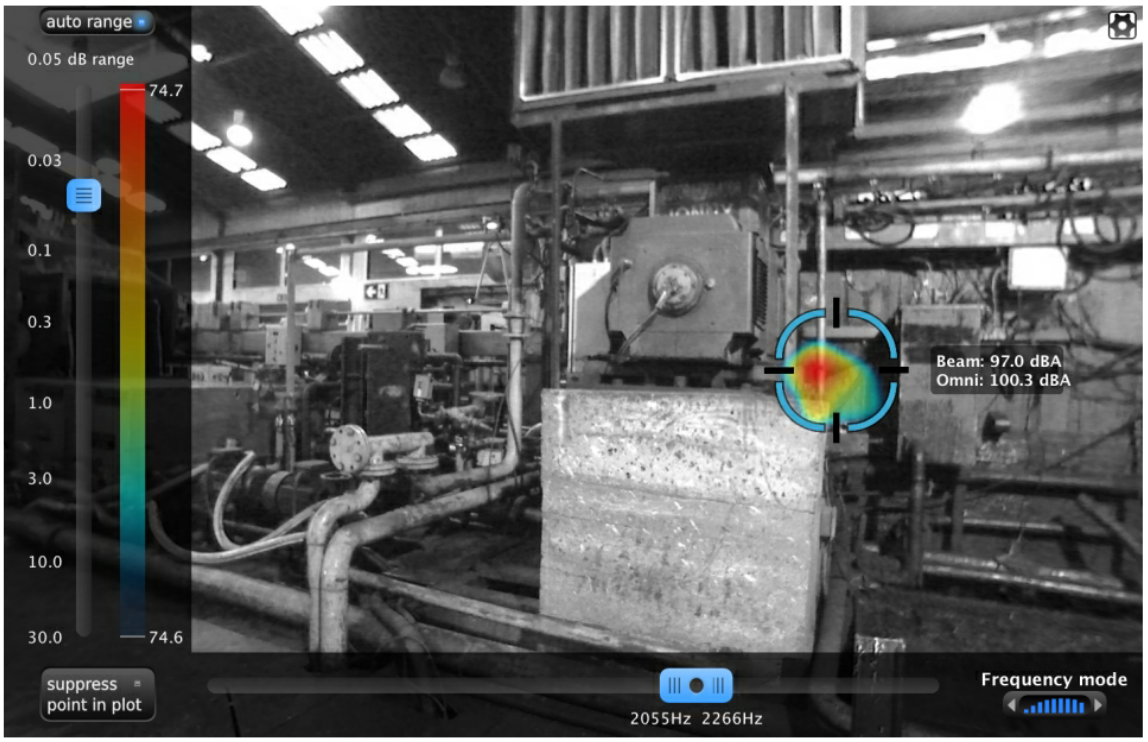
- Se muestra como el montaje del motor encima de un bloque de hormigón sería un unos elementos con una cierta elasticidad.

Así para esa señal acústica se muestra la composición espectral:



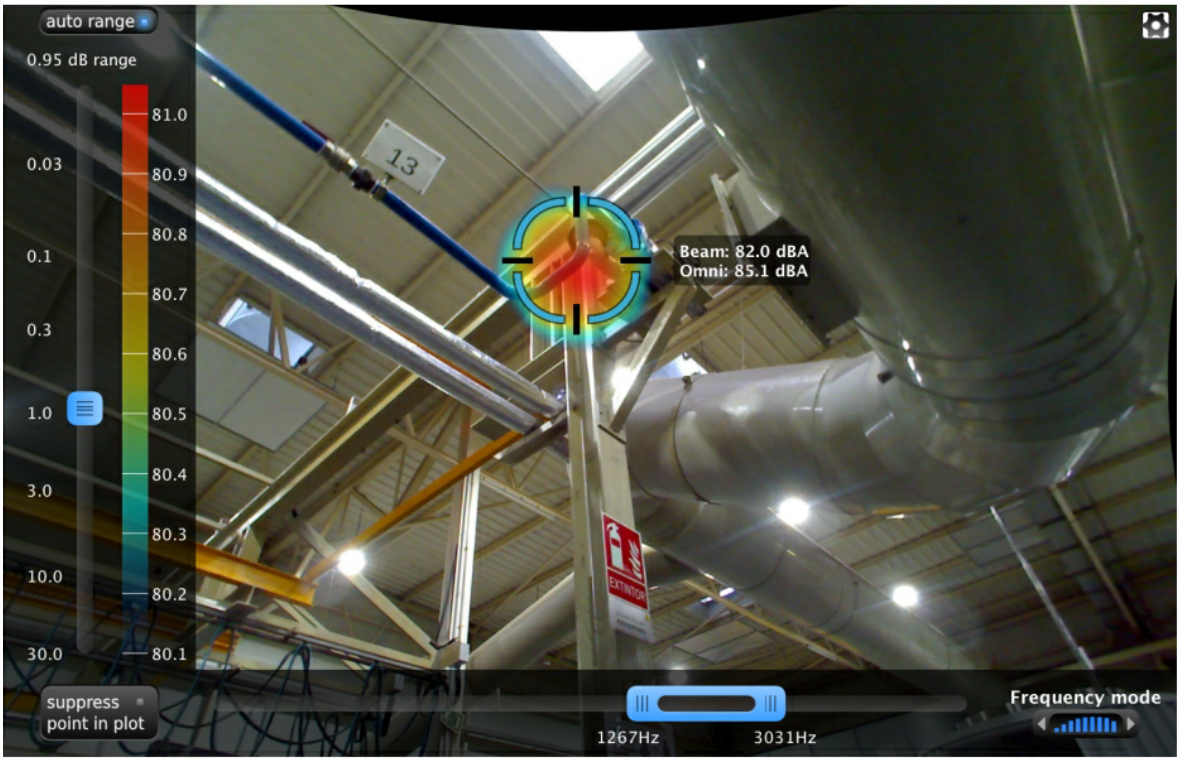
Señala un único pico de emisión de frecuencias en el punto correspondiente a 985,1 Hz. La composición espectral del ruido generado en esa zona está absolutamente concentrada en esa frecuencia siendo despreciable el resto de frecuencias de emisión.

Centrando el estudio en alguno de los picos secundarios (varios órdenes de magnitud inferiores) , se obtiene la siguiente imágen para señalar la generación de ruido correspondiente a ese pico:



En este punto marcado se puede corresponder con la zona de fijación del equipo.Ubicado en ese punto del extremo del equipo propiamente dicho. En todo caso sigue quedando fuera de la zona que se corresponde con el propio equipo o motor. Con lo que sigue determinando que el problema de ruido no es dicho sistema sinó el montaje propiamente.

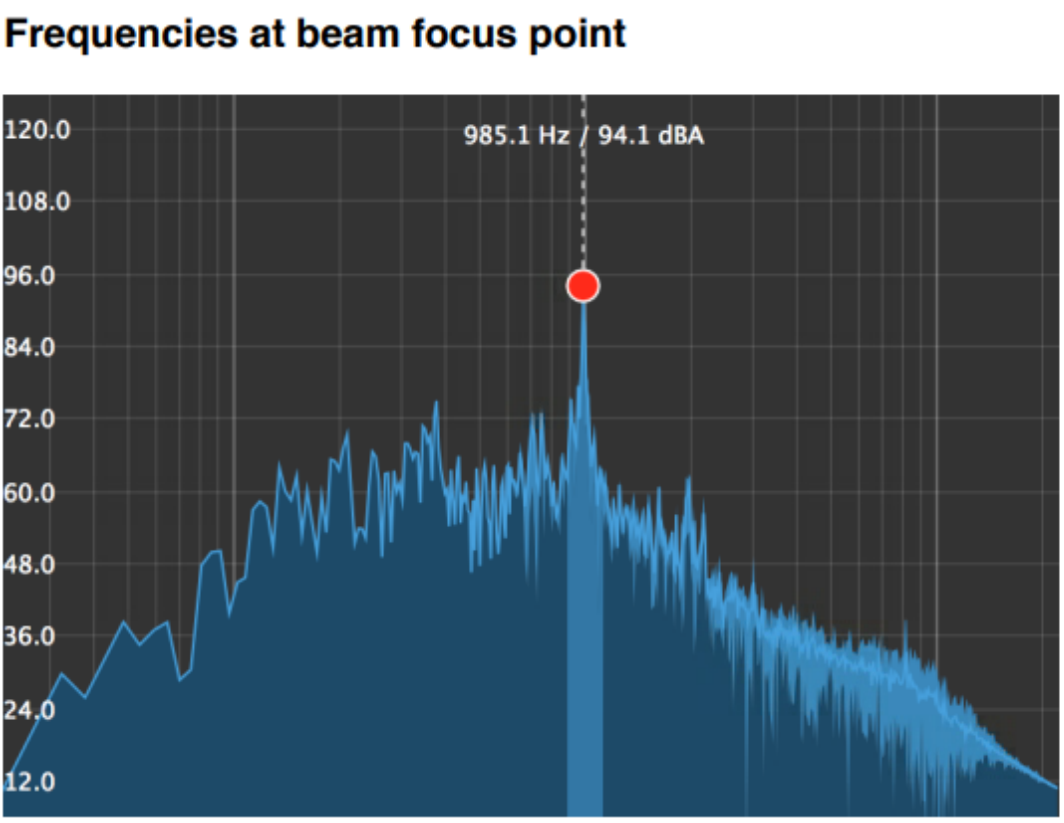
Motor ubicado en zona elevada de la nave de trabajo



Esta nave de trabajo en la que se determina riesgo por exposición higiénica a ruido, tiene una fuente determinada por la cámara acústica en el motor eléctrico ubicado en una zona aérea, no montada por directamente en un sustento sobre el suelo.

Las imagenes se han recogido a nivel de suelo y no se ha tenido que acceder a ese equipo,para tener unas conclusiones. Por la dificultad que supone dada su ubicación.

Es una zona en la que se determinaría peligro higiénico para trabajadores que operen allí. El valor de ruido que se mantiene de forma continuada es el que muestra la imagen, 85 dBA. De la misma manera el valor de Beam permite determinar que la contribución fundamental al nivel de ruido que se mediría en esa zona se originaría en la zona marcada por el semicírculo.



El pico de generación de ruido está claramente definido en una frecuencia determinada con el valor de 985Hz. En este caso dada la ubicación de la fuente de ruido la caracterización del equipo a distancia que permite hacer la cámara acústica es importante para determinar ese origen del ruido. En este caso los picos secundarios también son de una magnitud muy inferior al pico principal, y por tanto despreciables, se puede valorar que existe una diferencia prácticamente de 20dB de diferencia entre el valor de dichos picos y el pico principal.

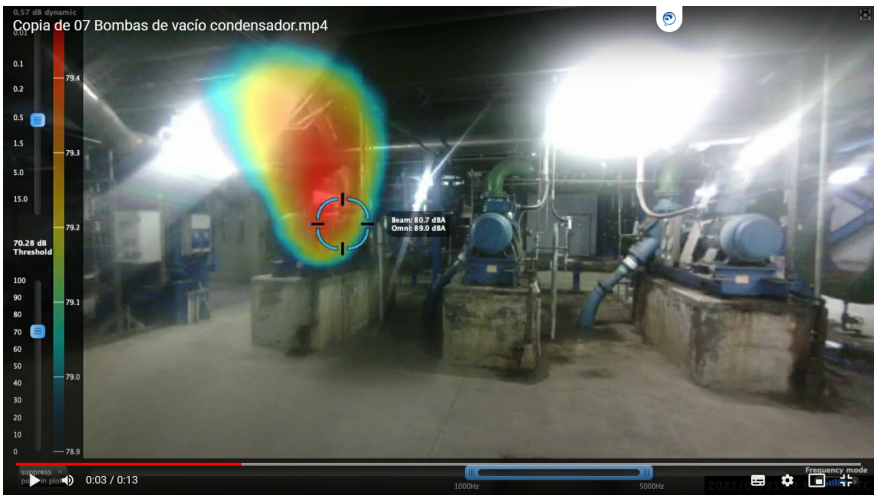
3- ESTUDIO DE NIVELES ACÚSTICOS

Se presentarán analizarán diferentes situaciones registradas en las visitas, presentando la información gráfica recogida, por considerar que proporcionan una información relevante. En este apartado fundamentalmente se valora la incidencia del nivel de ruido asociado al motor eléctrico en el valor global.

Un primer ejemplo muestra cómo se ajusta la generación de ruido de este dispositivo en una instalación industrial.

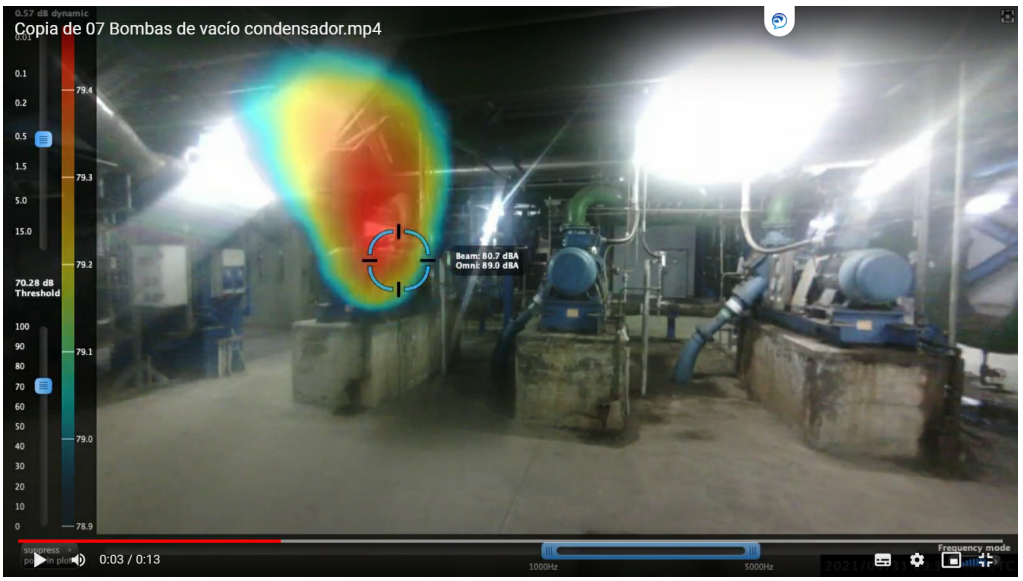
Se muestran tres idénticas imágenes con datos correspondientes a diferentes zonas en los que se valora la emisión de ruido.

Corresponde a tres motores eléctricos de características similares acoplados a una bomba de vacío generan un entorno con un nivel de ruido elevado, unos 90 dBA en la ubicación de la cámara.


Copia de 07 Bombas de vacío condensador.mp4
Beam: 80.7 dBA
Omni: 89.0 dBA
0:03 / 0:13

Copia de 07 Bombas de vacío condensador.mp4
Beam: 77.7 dBA
Omni: 89.0 dBA
Botón de reproducción (k)
0:10 / 0:13

Copia de 07 Bombas de vacío condensador.mp4
Beam: 78.6 dBA
Omni: 89.1 dBA
Botón de reproducción (k)
0:12 / 0:13



Se aprecia en cada una de las tres imágenes el valor de ruido que proviene de los motores. Cada una de las tres imágenes tiene ubicada la medición de ruido en cada uno de los motores para comparar la señal acústica que proviene de cada uno de ellos. La cámara señala que el primer motor por la izquierda genera más ruido y en este caso el ruido que proviene de ése, es de unos 80 dBA.

Buscando el ruido generado en el resto de motores se ve una diferencia de entre 1 y 3 dB. Esta diferencia se puede atribuir a múltiples causas, pero el régimen de funcionamiento de los tres se indica que es el mismo.

Una hipótesis es que la diferencia se debería a particularidades del equipo o de la instalación y montaje. Eso supondría que asimilando las condiciones del motor 1 a la de los otros 2 se puede obtener una reducción neta de ruido en el ambiente significativa actuando sobre el señalado. Dado que los niveles de ruido en el emplazamiento son importantes (se superan los 89dBA de Nivel Acústico mientras los motores funcionan), se observa la relevancia respecto al correcto montaje y mantenimiento del conjunto.

MOTOR STANDARD PUMP SP-280P-2

El siguiente motor analizado se visualiza en las siguiente imágenes;

Los datos correspondientes se indican a continuación:

Datos correspondientes al equipo

DATOS MOTOR (STANDARD PUMP SP-280P-2)			
Cuestión		Aclaración	Cumplimentar si se dispone de la información
1	Ubicación	Denominación de la zona y altura al suelo del punto donde se ubica. Interior o exterior	Edificio Turbina, planta baja. 1 metro de altura. Interior edificio.
2	Posición de funcionamiento	Vertical horizontal...	Horizontal. 3 unidades en paralelo.
3	Potencia	En W	55000
4	Velocidad de giro (r.p.m)	Régimen de uso normal o intervalo	Régimen Normal. 1475 rpm
5	Alimentación monofásica o trifásica	Se alimenta por 2 cables (monofásico) o 3/4 cables (trifásica)	Trifásico
6	Alimentación alterna (AC) o Continua (DC)	Motor de corriente continua o alterna	Alterna
7	Temperatura	Si se conoce especificar T máxima de funcionamiento	
8	Característica de la fuente de alimentación.	Tiene algún sistema de control de la velocidad de giro o de par? Se puede especificar tipo o tecnología	No, velocidad constante.
9a	Nivel de ruido Omni	Valor proporcionado por la cámara con el círculo ubicado sobre el motor	89,1 dBA
9b	Nivel de ruido Beam (señal circular de la cámara centrada en motor)	Valor proporcionado por la cámara con el círculo ubicado sobre el motor	80,1 dBA
10	Funcionalidad	Que elemento mueve o que función realiza (breve descripción)	Motor de una de las bombas de vacío del condensador
11	Protección del motor	Se observa algún tipo de apantallamiento o elemento de control del riesgo (breve descripción)	Las propias envolventes del equipo. IP55. *Sin efectos a nivel acústico

Se trata de un equipo que genera una exposición a ruido alta, claramente relacionable con la pérdida auditiva de trabajadores que operen en su inmediación. En función de la zona pero se puede medir un nivel cercano a 98 dBA, en las inmediaciones. Se trata de un equipo de alta potencia energética por tanto con un valor añadido importante. Cualquier disfunción importante puede utilizarlo y por tanto difícilmente operará en condiciones subestándar. En la imagen superior se señala el ruido proveniente de la parte central del motor, y el punto que genera la mayor intensidad acústica. En este caso y por comparación con situaciones expuestas en el apartado anterior la sustentación y la base de anclaje no queda señalada como un aspecto crítico y la cámara permite visualizar un trabajo adecuado en ese aislamiento.

Las zonas anexas al motor pueden actuar como reflejantes de la onda acústica y aunque como una contribución indirecta al nivel sonoro general la contribución es muy baja. En superfícies cercanas el nivel acústico emitido (que sería una reflexión fundamentalmente),

es unos 10 dB inferior. Pasa de 90 dBA a 79 dbA, el valor numérico que se puede visualizar.

En términos de energía acústica emitida la diferencia sería superior a un órden de magnitud, pasar de unos 10^5W de potencia emitida a 10^6W.

Un cerramiento de esa zona concreta permite reducir el nivel de ruido en 10 dBA. Se había determinado claramente que el motor era la fuente de ruido, una parte de éste según se advierte con la cámara.

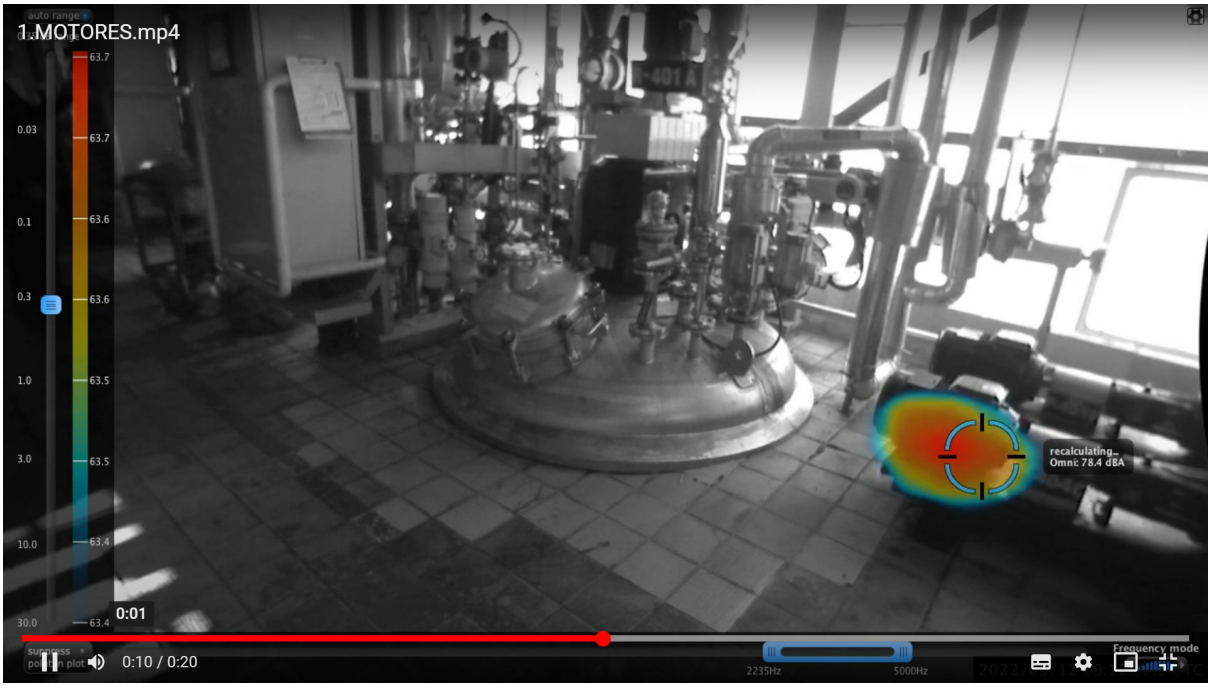
Datos que corresponden al equipo descrito:

HOJA DE RECOGIDA DE DATOS DEL MOTOR IDENTIFICADO COMO FUENTE DE RUIDO			
FECHA	31/05/2021	EMPRESA	REPSOL GENERACION ELECTRICA, S.L.U.L
INSTALACIÓN	Zona condensación bajo Turbina	ACTIVIDAD	Producción de energía eléctrica

DATOS MOTOR (BATIDORA PORTÁTIL STANDARD PUMP SP-280P-2)			
Cuestión		Aclaración	Cumplimentar si se dispone de la información
1	Ubicación	Denominación de la zona y altura al suelo del punto donde se ubica. Interior o exterior	Edificio Turbina, planta baja. 3 metros de altura. Interior de recinto específico en el interior del edificio.
2	Posición de funcionamiento	Vertical horizontal...	Vertical. Dos unidades en el recinto.
3	Potencia	En W	882600 (1200 CV)

4	**Velocidad de giro (r.p.m)**	Régimen de uso normal o intervalo	Régimen Normal. 1485 rpm
5	**Alimentación monofásica o trifásica**	Se alimenta por 2 cables (monofásico) o 3/4 cables (trifásica)	Trifásico
6	**Alimentación alterna (AC) o Continua (DC)**	Motor de corriente continua o alterna	Alterna
7	**Temperatura**	Si se conoce especificar T máxima de funcionamiento	
8	**Característica de la fuente de alimentación.**	Tiene algún sistema de control de la velocidad de giro o de par? Se puede especificar tipo o tecnología	No, velocidad constante.
9a	**Nivel de ruido Omni**	Valor proporcionado por la cámara con el círculo ubicado sobre el motor	97,1 dBA
9b	**Nivel de ruido Beam (señal circular de la cámara centrada en motor)**	Valor proporcionado por la cámara con el círculo ubicado sobre el motor	92,2 dBA
10	**Funcionalidad**	Que elemento mueve o que función realiza (breve descripción)	Motor de bomba de condensado
11	**Protección del motor**	Se observa algún tipo de apantallamiento o elemento de control del riesgo (breve descripción)	Las propias envolventes del equipo.
12	**Distancia puesto de trabajo fijo más cercano**	En metros	No hay puestos cercanos.

Motor conectado a bomba Archroma



Un motor característico de la industria química es aquel que impulsa una bomba de trasvase. Es un tipo de equipo que dado el flujo de material que mueve, no reune las características del anterior. Se observa que genera un nivel de ruido cercano a los 80 dBA en ese lugar de trabajo. Dado que la cámara acústica lo señala como la fuente de ruido más importante en ese emplazamiento, se puede concluir que es orígen de un potencial riesgo higiénico por exposición a ruido. Dado que el valor medido 78,4 dBA es inferior a 80dBA, se puede mantener un puesto de trabajo en esa zona por debajo del nivel que da lugar a una acción.

En un ruido contínuo y mantenido. Durante la grabación realizada en el mismo régimen de giro de forma sostenida y con una variación mínima del nivel de ruido.

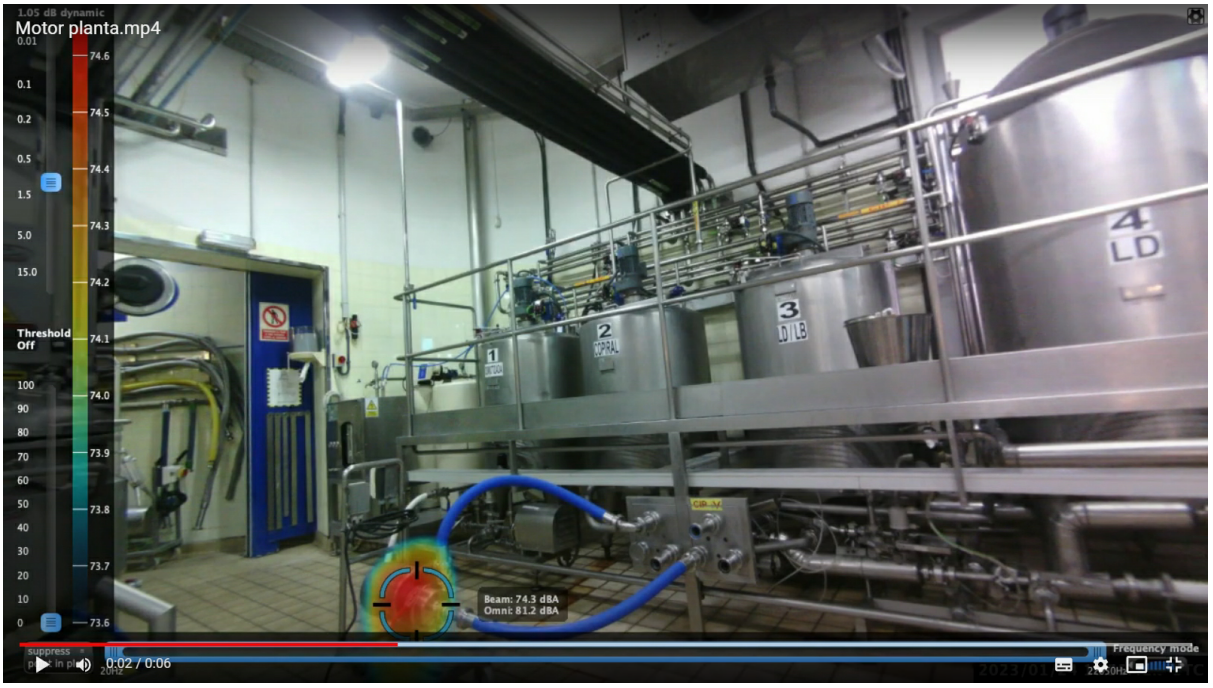
Otro ejemplo de motor de aspiración EMBA

Bomba montada en un sistema de aspiración de pulverulentos.

Ruido medido instantáneo: 87,8dBA. Se supera el valor límite y por tanto un puesto de trabajo en esa zona requiere el uso de protección acústica que garantice un nivel inferior a 80 dBA en el interior del oído.

Controlando el ruido que genera se podría estar por debajo del valor límite en un puesto de trabajo ubicado a unos 3 metros de ese equipamiento. Actuando sobre la fuente de ruido detectada que es ese motor sería la forma viable de reducir el valor de exposición a ruido en ese lugar. Sin entrar a valorar las posibles formas de hacerlo se advierte una viabilidad en el objetivo de tener un valor inferior a esos 87 dBA.

Motor de trasvase de líquidos:



Lugar de trabajo en el que se superaría el valor inferior de acción de 80 dBA por un margen estrecho. El motor instalado para el trasvase de líquido es la fuente de ruido más importante, actuando sobre éste y con alguna actuación adicional se puede estar por debajo de ese nivel de acción señalado. Y por tanto valorar el riesgo por ruido de una forma diferente sustancialmente.

En este caso también la imagen evidencia que la única forma viable de reducir la exposición a ruido en esa zona es actuar sobre ese motor que señala la cámara. El objetivo es la reducción de 2 dB para que teniendo un margen debido a la incertidumbre se pueda garantizar que el valor no supera esos 80dBA de objetivo marcado.

4- DATOS CORRESPONDIENTES A MOTORES SEÑALADOS COMO FUENTE PRINCIPAL DE RUIDO

En el estudio se hizo una recopilación de datos de los motores caracterizados por ser ruidosos y potencialmente generadores de problemas higiénicos para los trabajadores.

En el siguiente cuadro figura la información recogida:

	2	3	4	5	6	9a	9b	10	11	12
	horizontal	45000	1500	tri	ac				cerramiento 210 cm alto	6 m
generación electricidad	horizontal	55000	1475	tri	ac	89,1	80	bomba de vacio		
generación electricidad		2500	2979	tri	ac	89,6	82,6			
generación electricidad	vertical	220000	1460	tri	ac	91.6	81,7	motor bomba tanque lubricación		
generación electricidad	vertical	882600	1485	tri	ac	97,1	92,2			
generación electricidad	horizontal	30000	2950	tri	ac	85,4	75,2	motor de bomba pretratamiento agua		
			825	mono	ac	80,8	76,7	accionamiento de batidora		

Estos es la información propia del motor que se ha introducido en el cuestionario de recogida de datos asociado.

1	Ubicación
2	Posición de funcionamiento
3	Potencia KW
4	Velocidad de giro (r.p.m.)
5	Alimentación monofásica o trifásica
6	Alimentación alterna (AC) o Continua (DC)
7	Temperatura
8	Característica de la fuente de alimentación
9a	Nivel de ruido omni
9b	Nivel de ruido Beam (señal circular de la cámara centrada en motor)
10	Funcionalidad
11	Protección del motor
12	Distancia puesto trabajo fijo más cercano

En la tabla superior se consignan sólo las columnas para las que hay datos recogidos. Dado que existen datos presente en el cuestionario de los que no ha podido ser recabada la información.

Los datos recogidos no permiten extraer información estadísticamente significativa dado que la muestra no tiene un tamaño suficiente.

Se encuentran dos causas:

a/ No se ha podido recopilar la información correspondiente a todos los motores.

b/ No se han encontrado suficiente número de motores eléctricos asociados a una exposición a ruido de los trabajadores en los lugares en los que se ha visitado. En ese sentido se insiste en que la planificación de la visita se realiza de forma aleatoria y sin seleccionar una empresa como objeto de visita con datos previos respecto a la existencia en esas instalaciones de motores ruidosos.

Destaca que todos los motores encontrados tienen una alimentación trifásica. Y la potencia asociada es elevada. Una hipótesis propuesta sería que en general motores de esas características requieren un nivel de atención en su compra, instalación y mantenimiento por poder ser un potencial agente de riesgo en el lugar de trabajo.

5- CONCLUSIONES

Se encuentran ruidos generados por motores en frecuencias definidas alrededor de los 1000 Hz. La hipótesis es que es una velocidad de giro habitual en ese tipo de equipos.

Pueden haber problemas de montaje y mantenimiento de los equipos que han de filtrar las vibraciones generadas en ese rango de frecuencias.

Se constata la importancia de la transmisión de vibraciones favorecida por un tipo de instalación del motor no adecuada, lo que comporta una generación de ruido no en el propio motor sinó en partes adyacentes. El orígen es el propio motor, pero la mejora no se hace en general actuando sobre el propio equipo sinó en la fuente. En todo caso la bibliografía general específica en la materia es abundante y los medios para evitar eso son numerosos y fácilmente implementables.

Una metodología de revisión de las instalaciones basada en el uso de cámara acústica es facilita detectar situaciones no deseadas de generación de ruido debido a resonancias o acoplamiento entre la frecuencia propia de un sistema y las de trabajo de los motores. De una forma más rápida se pueden visualizar este tipo de problemas y hacer un seguimiento en el tiempo para evitar que cambios y modificaciones en el tiempo varíen la instalación respecto a cuando se ha montado.

No se puede establecer una asociación estadísticamente consistente entre un motor eléctrico asociado a ser éste la fuente principal de ruido en la industria manufacturera. Dado el número de visitas realizado la muestra no se ha validado como suficiente para obtener conclusiones al respecto.

El montaje de los motores en general es un aspecto fundamental por la gran cantidad de casos encontrados en los que se advierte una generación de ruido en zonas que deberían estar aisladas del motor. No obstante dichas observaciones son compatibles con lo que los modelos teóricos establecen. Así poniendo de relevancia este hecho se incide en la necesidad de adecuar y mantener el montaje de los equipos adecuadamente y tener una vigilancia en el tiempo que asegure el óptimo funcionamiento. Dadas las características de la naturaleza física de una resonancia, cualquier variación de estas condiciones o parámetros asociados pueden suponer un problema significativo que ha quedado bien señalado en el trabajo de campo.

La potencia de un motor eléctrico está claramente asociada a la generación de ruido, tanto por el propio equipo, como por el montaje en el que se inserta. A partir de cierta potencia todos los motores son susceptibles de generar un problema higiénico de ruido en las instalaciones en las que se llevan a cabo tareas por parte de personas.

Una forma simple de detectar un equipo potencialmente problemático es cuando se alimenta con corriente trifásica, hecho fácilmente controlable. Este tipo de equipos ya serán de cierta potencia.

En general se han encontrado muchos motores más pequeños por ejemplo típicamente en cintas de transporte que no han sido señalados por la cámara acústica como la fuente principal de ruido en esa zona, no se puede asociar pues este tipo de equipos con un problema higiénico sin otras consideraciones.

Ruido generado por motores eléctricos

Informe bibliográfico sobre motores eléctricos y ruido generado

Asepeyo, Mutua Colaboradora con la Seguridad Social nº 151

Dirección prevención / Área de innovación e investigación

Autor: Javier Aniés Escartín, Santiago Rosell Barrés.

Índice

Generalidades del motor eléctrico; Aspectos fundamentales a considerar relacionados con el ruido que generan 4
Tipos de motores 5
DC Tecnologías convencionales originarias 5
Motores AC(Altern Current) o de Corriente Alterna 5
Motores eléctricos alimentados por baterías 7
Formas de emisión de ruido 8
Asociados a la alimentación eléctrica 9
Asociados al sistema mecánico 9
Prevención del ruido generado por motores eléctricos 10
Referencias bibliográficas revisadas 12

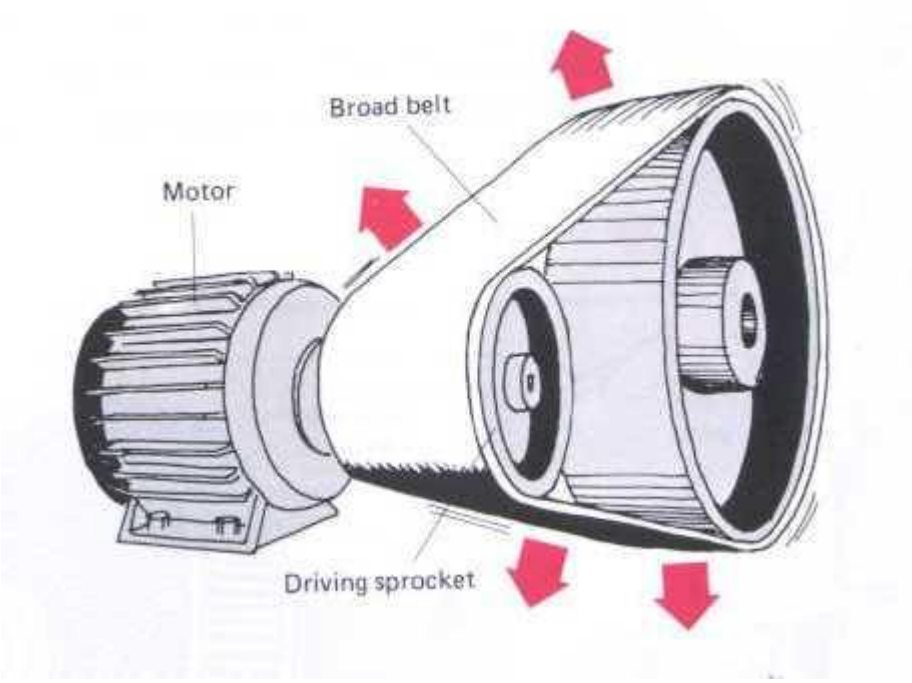
Generalidades del motor eléctrico; Aspectos fundamentales a considerar relacionados con el ruido que generan

Aisladamente en motor eléctrico básicamente se describe como una envoltura con una forma aproximadamente cilíndrica que rodea un eje mecánico que rota sobre sí mismo. Por lo tanto transforma energía eléctrica en energía mecánica, con una elevada eficiencia energética, a diferencia del motor de combustión.

Así en todos los motores se encuentra una parte que gira o rotor y una parte fija o estátor, que en general es la parte externa.

El eje en rotación transmite el par de fuerza (definido por la mecánica clásica). Esa transmisión se realiza directamente a otro componente y puede formarse un sistema más o menos compacto en el que se integraría el motor. Es habitual que un sistema de engranajes o correas transmita y adapte el par y la velocidad de giro a los requerimientos del sistema.

En este aspecto se pueden presentar toda una serie de cuestiones que pueden generar ruido y vibraciones



El otro factor importante es la alimentación eléctrica del sistema. El sistema eléctrico que alimenta y se conecta normalmente a una parte fija del motor, también puede tener una complejidad notable. Es el sistema de control del dispositivo, y el suministro de energía que se precisa transformar a movimiento.

En cada uno de los grupos las características más significativas son:

Tipos de motores

El siguiente cuadro resume los diferentes tipos de motores más frecuentemente utilizados en cualquier sector industrial o de transporte.

La diferencia más importante relativa a los motores eléctricos puede ser según sea e tipo de corriente que los alimenta.

Motores de corriente contínua DC (Direct Current) O AC Corriente Alterna

Históricamente los avances tecnológicos asociados a los motores y la regulación de su régimen de funcionamiento, potencia o prestaciones ha hecho que se decante por una u otra opción, de manera que actualmente conviven ambas tipologías con características que los diferencias claramente y que pueden tener relación con aspectos asociados a su funcionamiento como puede ser el ruido que generan, también el tipo de ruido.

DC Tecnologías convencionales originarias

El sistema más clásico que se encuentra es un motor alimentado por corriente contínua, y un divisor de tensión para modificar la intensidad de la corriente eléctrica que circula por el circuito del motor, para regular su régimen de giro. Es un sistema ampliamente superado pero que todavía puede subsistir por su simplicidad y facilidad de mantenimiento así como la potencial longevidad. Prescinde estructuralmente de imanes permanentes, escobillas y conmutadores, consistiendo el estator sencillamente en una serie de laminaciones de acero apiladas formando una estructura de polos salientes.

Dentro de este grupo se puede distinguir los siguientes tipos:

- Autoexcitado
  - Shuntado

- Serie
  - Compuesto
  - Excitación independiente

hace referencia a como se regula el régimen de giro y por tanto implica a los componentes asociados a su funcionamiento.

Motores AC(Altern Current) o de Corriente Alterna

En este caso el tipo de problemática asociado al propio motor tiene en común que está más en aspectos de confort dado que los niveles de ruido generado no son elevados por lo general. Los motores más comunes no generan niveles de exposición superiores a 80 dBA de forma continuada.

Síncrono. La velocidad del motor se sincroniza con la frecuencia de la corriente que se suministra. El motor de reluctancia síncrona (SynRM) es una respuesta a esta investigación; esta solución se caracteriza no solo por su alta eficiencia energética sino también por su fiabilidad y bajo requerimiento de mantenimiento.

En la actualidad, los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) son la tecnología dominante para muchas aplicaciones, incluida la movilidad eléctrica. La alta eficiencia, el alto par específico y la amplia gama de velocidades de estos motores han hecho que esta tecnología sea popular entre los fabricantes. Los elementos más importantes de los PMSM son los materiales de imán permanente (PM), que incluyen algunas tierras raras. La alta volatilidad del precio de las tierras raras ha dirigido la búsqueda de máquinas sin estos elementos para reemplazar a los PMSM de alto rendimiento.

En comparación con el motor de reluctancia conmutada, el motor de reluctancia síncrono tiene una menor ondulación del par y, por tanto, es más silencioso en su funcionamiento.

Asíncrono. Basado en de inducción electromagnética, existe un desfase entre la función fase correspondiente a la intensidad represtentada respecto al tiempo y la gráfica del momento de fuerza representado en el mismo eje temporal . Momento de inercia: el motor de reluctancia conmutado posee un momento de inercia muy pequeño, debido a la ausencia de masa en los huecos entre los dientes del rotor, ya que no tiene ni bobinados ni imán permanente alguno. El rotor está compuesto únicamente por el eje y el conjunto de chapas. Eso puede suponer un nivel de ruido mecánico inferior. El motor asíncrono es aquel en el que el campo magnético siempre va unos grados por delante del rotor, por lo que nunca llegan a girar a la misma velocidad y por tanto no están sincronizados.

Todo ello diversifica enormemente sus sistemas de control, la alimentación eléctrica de los mismos o de las salidas del par que se obtienen. En definitiva tanto el tipo de ruido que se puede generar, tanto en régimen de funcionamiento normal, como en situación de incidencia.

Rizado de par y ruido acústico: en el caso de las MRCs, el rizado del par es mayor que para otro tipo de motores. Esto da lugar a niveles de vibración y ruido acústico que pueden no ser admisibles para cierto tipo de aplicaciones, requiriendo de una mecánica y un control optimizados para reducir ambos en dichos casos
Por su incidencia en la actualidad y la importancia que este tipo de motores, en especial por cómo afecta al ruido en el contexto de uso de este tipo de motores se indica la siguiente especificación:

Las vibraciones de las bobinas o la deflexión del estator por la componente radial de las fuerzas entre los polos del rotor y el estator también pueden producir ruido audible, el cual pueden amortiguarse, si la aplicación lo requiere, mediante el diseño de una estructura mecánica más rígida. No linealidad: la estructura de polos doblemente saliente que la MRC precisa para

producir par reluctante y el régimen de saturación en el que suelen operar estas máquinas producen características magnéticas altamente no lineales, lo que complica el análisis y el accionamiento de este tipo de motores. La inversión.

Estas dificultades, junto con la falta de electrónica comercial desarrollada específicamente para operar este tipo de tecnología y, sobre todo, el profundo arraigo que los motores convencionales AC y DC tienen en el mercado, están suponiendo que la penetración industrial de las máquinas de reluctancia conmutada esté siendo relativamente lenta. Aún así, a medida que la electrónica de potencia y las técnicas de control han ido desarrollándose, las MRCs se han ido incorporando a un amplio rango de aplicaciones comerciales.
Muchas veces los problemas asociados están en la electrónica y la alimentación de los sistemas. El tipo de ruido generado presenta un potencial disconfort superior al que puede estar asociado a un ruido más mecánico propio de los sistemas que estarían en el primer grupo.

Motores eléctricos alimentados por baterías

El uso de baterías para alimentar eléctricamente a motores es un campo tecnológico de elevadísima atención. Fundamentalmente se podría establecer que es el tipo de motor usado en sistemas de transporte que se están desarrollando actualmente.

En este caso sólo en el caso de motores de sistemas ferroviarios o alimentados por líneas eléctricas no cuentan con un sistema de batería para suministrar la energía, pero podrían incluirse en este grupo dado que se trata de un tipo de motores que presentan una casuística similar.

La investigación en nuevos tipos de motores, con toda la alimentación eléctrica está siendo estudiada por ser foco de desarrollo prioritario asociado a la sostenibilidad en el transporte. Por eso se pueden encontrar diferentes soluciones y alternativas. En ellos el efecto del ruido generado que afecta a los inmediatos usuarios tiene una relevancia especial que en otro tipo de trabajadores o entornos laborales no se daría.

En estos casos la electrónica de potencia tiene una importancia especial en la generación de ruido de este tipo de equipamiento. Tanto por la alta tensión que se genera en determinadas partes de la instalación, como de elevadas intensidades que se inyectan. Son tipos de ruido característicos pero no de elevada potencia acústica asociada.

En este caso el tipo de problemática tiene en común que está más en aspectos de confort dado que los niveles de ruido generado no son elevados por lo general. No se encuentra que puedan llevar a niveles de exposición superiores a 80 dBA.

Momento de inercia: el motor de reluctancia conmutado posee un momento de inercia muy pequeño, debido a la ausencia de masa en los huecos entre los dientes del rotor, ya que no tiene ni bobinados ni imán permanente alguno. El rotor está

compuesto únicamente por el eje y el conjunto de chapas. Eso puede suponer un nivel de ruido mecánico inferior.

Razón Potencia/Peso: para la misma potencia de salida, una MRC puede resultar hasta un 40% más pequeña y más ligera que un motor AC convencional.
Además, el uso de las MRCs no está restringido a un rango de potencias determinado. Se han diseñado así MRCs con potencias de salida desde 50W hasta 2MW.
Refrigeración: en la MRC las pérdidas son mucho menores que en las máquinas con corrientes inducidas en el rotor y además la mayor parte del calor se genera en el estátpr-.

Existen dos tipos de motores de reluctancia, los motores de reluctancia conmutada (SRM) y los motores de reluctancia síncrona (SynRM). Los motores de reluctancia conmutada tienen devanados concentrados, mientras que los motores de reluctancia síncrona tienen devanados distribuidos. Además, los motores síncronos de reluctancia tienen un mayor rendimiento que los motores de reluctancia conmutada. Esto se debe a que el motor de reluctancia conmutada requiere mayores corrientes de fase y la densidad de flujo magnético es menor con los motores de reluctancia síncrona.

Formas de emisión de ruido

La información disponible sobre el ruido que generan los motores eléctricos, hacen referencia tanto a ruido como a vibraciones, en general se va a presentar la problemática de forma conjunta, ya que son aspectos muy aparejados en los problemas de funcionamiento de elementos en rotación. Desde el punto de vista de afectación a los trabajadores, los motores será difícil que generen un problema de higiene industrial, si no están en una plataforma móvil, y el trabajador se desplaza encima de ésta. Situación ésta en la que se puede asociar a una transmisión de cuerpo completo. Motores grandes o de mucha potencia, capaces de transmitir a una base en la que se monten un nivel de vibración significativa, deberían ser revisados continuamente y tendrán problemas de mantenimiento sinó se revisa su sistema de anclaje. Igualmente montados en equipos de trabajo que se usan con las manos pueden generar problemas de vibraciones transmitidas al sistema mano brazo, pero tal problema queda fuera del alcance de esta publicación.

Se pueden encontrar dos tipos de publicaciones científicas que podrían servir para clasificar dichos trabajos. Por un lado aquellos que hacen referencia a sistemas más convencionales o clásicos, grupo al que pertenece una gran cantidad de sistemas que se instalan o han instalado en diferentes instalaciones y que por tanto se identifican como fuente de ruido en numerosas instalaciones.

En comparación con el motor de reluctancia conmutada, el motor de reluctancia síncrono tiene una menor ondulación del par y, por tanto, es más silencioso en su funcionamiento.

https://ww**w.pumpsandsystems.com/your-guide-quelling-noise-vibration**

https://drive.google.com/file/d/1B8RMI7kzzWQPsBJAf1t8xf84dzZWVySU/view?usp=sharing

Asociados a la alimentación eléctrica

• Excitación eléctrica

También se puede encontrar la denominación de Torkle ripple y la explicación de este fenómeno es que en general la corriente eléctrica que alimenta el motor no genera un par contínuo perfectamente sinó que introduce pequeños pulsos que suponen un cierto impacto o discontinuidad en el par motor de la fuerza. Esas discontinuidades o pulsos de par suponen una cierta fuerza en direcciones que no son las ideales y que por tanto generan algo parecido a impactos o vibraciones en direcciones no establecidas en el sistema ideal. Eso deriva también en ruido finalmente.

Sobre este aspecto se incide ampliamente en la bibliografía técnica asociada a los motores eléctricos y es una materia clásica de estudio con un equipamiento de medida y detección apropiada para optimizar el sistema.

• Conmutación de inversor

• Armónicos

Asociados al sistema mecánico

• Construcción de máquinas

• Imanes

• Muescas o rendijas

• Resonancias mecánicas. Resonancias propias de las características del motor, que se caracterizan por una frecuencia muy determinada y característica del motor.

Resonancia generada por un montaje incorrecto o cualquier defecto del equipo. Pueden aparecer o desaparecer y se caracterizan por una frecuencia indeterminada.

• Alineación de máquinas

• Sobrecargas
Estas son los problemas más habituales que pueden suponer un incremento del nivel de vibraciones generados por un motor y por tanto del ruido que se genera:

En motores eléctricos, el desbalance se suele originar por alguna de las siguientes causas:

En los acoplamientos y elementos metálicos asociados con la transmisión del par de fuerza se citan los siguientes puntos de generación de ruido y vibración por defecto de funcionamiento:

Procedimiento inadecuado de equilibrado en taller.

- Mala selección de la calidad de equilibrado. Sistema incorrecto de realizar el proceso.

- Uso de chavetas fuera de especificación.

- La chaveta es un pieza que se interpone entre el eje y el mecanismo que recibe el par. Un defecto en su colocación será una causa de ruido.

No considerar la chaveta durante el equilibrado de taller. Es una masa que se coloca en el eje y que por tanto supone una posible causa de desequilibrio y por tanto vibración. Antes de colocar dicho elemento se debe asegurar que se cumplen las especificaciones de uso.

Deformación del rotor por exceso de temperatura:

Las temperaturas extremas provocan dilataciones o contracciones que suponen desplazamientos de masa y por tanto desequilibrios respecto a las condiciones de diseño y montaje.

Desgaste o rotura del ventilador de refrigeración del motor.

Desgaste o rotura del acoplamiento.

Prevención del ruido generado por motores eléctricos

Es una técnica ampliamente desarrollada y con una ingeniería asociada sobradamente accesible.

El control predictivo de modelos es ampliamente recomendado en la mejor técnica de control de rendimiento para accionamientos de motores síncronos de imanes permanentes

por su excepcional flexibilidad para incorporar parámetros no lineales. dichos parámetros son de importancia señalada.

Sin embargo, las mayores ondas en el par y los armónicos en la corriente del estator son las principales debilidades de este método. Guiado por la idea de incluir restricciones no lineales en la función de costo, algunos autores proponen una función de costo novedosa con ondulaciones reducidas en el par, el flujo del estator y los armónicos de corriente. La función de prueba implementada utiliza el seguimiento del par, el par máximo por amperio, la minimización de las pérdidas de conmutación y las restricciones del sistema. Este enfoque logra efectividad en la minimización de las ondas en el par, el flujo del estator y los armónicos de corriente del estator y también reduce el ruido acústico del sistema. Las conclusiones están respaldadas por la comparación cuantitativa de la respuesta simulada con el modelo de control de par predictivo estándar, que utiliza errores en el flujo del estator y el par electromagnético en su función de la entrada. Los resultados de la simulación comparada prueban la eficacia de esas técnica de control.

Hoja de referencias bibliográficas

11 REFERENCES

1. I. Takahashi and T. Nogushi, "A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **IA-22**(5), 820–827, (1986).
2. M. Depenbrock, "Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine", *IEEE Trans. Power Electron.*, **3**(4), 420–429, (1988).
3. S. Arnalte, J. Burgos and J. Rodriguez-Amenedo, "Direct torque control of a doubly-fed induction generator for variable speed wind turbines", *Elect. Power Compon. Syst.*, **30**(2), 199–216, (2002).
4. S.B. Ozturk, W.C. Alexander and H.A. Toliyat, "Direct torque control of four-switch brushless DC motor with non-sinusoidal back EMF", *IEEE Trans. Power Electron.*, **25**(2), 263–271, (2010).
5. R. Morales-Caporal and M. Pacas, "Encoderless predictive direct torque control for synchronous reluctance machines at very low and zero speed", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **55**(12), 4408–4416, (2008).
6. L. Zheng, J.E. Fletcher, B.W. Williams and X. He, "A novel direct torque control scheme for a sensorless five-phase induction motor drive", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **58**(2), 503–513, (2011).
7. S. Pavithra, A. Sivaprakasam and T. Manigandan, "Performance improvement of DTC for induction motor with 12- sector methodology", *Proc. of Int. Conf. on Process Automation, Control and Computing*, 1–5, (2011).
8. L. Zhong, M.F. Rahman, W. Hu and K. Lim, "Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives", *IEEE Trans. Power Electron.*, **12**(3), 528–536, (1997).
9. G.S. Buja and M.P. Kazmierkowski, "Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors—A survey", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **51**(4), 744–757, (2004).
10. T. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli and L. Tolbert, "Direct torque control of induction machines using space vector modulation", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **28**(5), 1045–1053, (1992).
11. B. Kenny and R. Lorenz, "Stator- and rotor-flux-based deadbeat direct torque control of induction machines", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **39**(4), 1093–1101, (2003).
12. C. Lascu and A. Trzynadlowski, "Combining the principles of sliding mode, direct torque control, and space-vector modulation in a high performance sensorless ac drive", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **40**(1), 170–177, (2004).
13. Y.S. Lai and J.H. Chen, "A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction", *IEEE Trans. Energy Convers.*, **16**(3), 220–227, (2001).
14. G.D. Andreescu, C. Pitic, F. Blaabjerg and I. Boldea, "Combined flux observer with signal injection enhancement for wide speed range sensorless direct torque control of IPMSM drives", *IEEE Trans. Energy Convers.*, **23**(2), 393–402, (2008).
15. S. Kouro, R. Bernal, H. Miranda, C. Silva and J. Rodriguez, "High performance torque and flux control for multilevel inverter fed induction motors", *IEEE Trans. Power Electron.*, **22**(6), motor for minimum torque ripple and constant switching frequency", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **35**(5), 1076–1082, (1999).
20. K.B. Lee, J.H. Song, I. Choy and J.Y. Yoo, "Torque ripple reduction in DTC of induction motor driven by three-level inverter with low switching frequency", *IEEE Trans. Power Electron.*, **17**(2), 255–264, (2002).
21. E. Flach, R. Hoffmann and P. Mutschler, "Direct mean torque control of an induction motor", in *Proc. EPE*, **3**), 672–677, (1997).
22. L. Romeral, A. Arias, E. Aldabas and M. Jayne, "Novel direct torque control (DTC) scheme with fuzzy adaptive torque-ripple reduction", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **50**(3), 487–492, (2003).
23. Y. Zhang, J. Zhu, W. Xu and Y. Guo, "A simple method to reduce torque ripple in direct torque-controlled permanent-magnet synchronous motor by using vectors with variable amplitude and angle", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **58**(7), 2848–2859, (2011).
24. Y. Zhang and J. Zhu, "Direct torque control of permanent magnet synchronous motor with reduced torque ripple and commutation frequency", *IEEE Trans. Power Electron.*, **26**(1), 235–248, (2011).
25. Y. Zhang and J. Zhu, "A novel duty cycle control strategy to reduce both torque and flux ripples for DTC of permanent magnet synchronous motor drives with switching frequency reduction", *IEEE Trans. Power Electron.*, **26**(10), 3055–3067, (2011).
26. D. Casadei, F. Profumo, G. Serra and A. Tani, "FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control", *IEEE Trans. Power Electron.*, **17**(5), 779–787, (2002).
27. M. Pacas and J. Weber, "Predictive direct torque control for the PM synchronous machine", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **52**(5), 1350–1356, (2005).
28. G. Abad, M.A. Rodriguez and J. Poza, "Two-level VSC based predictive direct torque control of the doubly fed induction machine with reduced torque and flux ripples at low constant switching frequency", *IEEE Trans. Power Electron.*, **23**(3), 1050–1061, (2008).
29. T. Geyer, G. Papafotiou and M. Morari, "Model predictive direct torque control. Part I: concept, algorithm, and analysis", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **56**(6), 1894–1905, (2009).
30. M. Preindl, E. Schaltz and P. Thoersen, "Switching frequency reduction using model predictive direct current control for high power VSI", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **58**(7), 2826–2835, (2011).
31. M. Preindl and S. Bolognani, "Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems. Part 2: Field weakening operation", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, **9**(2), 648–657, (2013).
32. G. Papafotiou, J. Kley, K.G. Papadopoulos, P. Bohren and M. Morari, "Model predictive direct torque control—part II: Implementation and experimental evaluation", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **56**(6), 1906–1915, (2009).
33. J. Hu, J. Zhu, Y. Zhang, G. Platt, Q. Ma and G. Dorrell, "Predictive direct virtual torque and power control of doubly fed induction generators for fast and smooth grid synchronization and flexible power regulation", *IEEE Trans. Power Electron.*, **28**(7), 3182–3194, (2013).
34. M.N. Uddin and M. Hafeez, "FLC-based DTC Scheme to im-

Referencias bibliográficas revisadas

Análisis de reducción del torquel ripple

http://www.worldacademicunion.com/journal/1746-7233WJMS/wjmsvol12no03paper01.pdf

Máquinas de reluctancia conmutada:

https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4718/fichero/4.M%C3%A1quinas+de+reluctancia+conmutada.pdf

ASEPEYO

Asepeyo, Mutua Colaboradora con la Seguridad Social nº 151