

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

APLICACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA EN EL ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR CON VARIACIONES EN SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN

COMPONENTE DEL TRABAJO: ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR CON VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

ESLEYDER AGENOR PAUCAY CHIMUNJA

esleyder.paucay@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr. WASHINGTON SALVATORE REINA GUZMAN

salvatore.reina@epn.edu.ec

Quito, febrero de 2024

CERTIFICACIONES

Yo, ESLEYDER AGENOR PAUCAY CHIMUNJA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ESLEYDER AGENOR PAUCAY CHIMUNJA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ESLEYDER AGENOR PAUCAY CHIMUNJA, bajo mi supervisión.

WASHINGTON SALVATORE REINA GUZMAN

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ESLEYDER AGENOR PAUCAY CHIMUNJA

WASHINGTON SALVATORE REINA GUZMAN

DEDICATORIA

El siguiente trabajo es para quien me formó desde el vientre de mi querida madre, él antes de nacer ya me había escogido para ser su representante aquí en la tierra. Hablo del único y soberano Dios que envió a su unigénito a salvarme y ofrecerme vida eterna. Fue él quien me dio la sabiduría y yo lo reconozco en todos mis caminos. Que mis números y letras estecen al servicio de mi Señor Jesucristo por toda la eternidad. ¡Amén!

Este trabajo significa mucho en mi vida, he luchado mucho para poder culminarlo. Todo sacrificio tiene su recompensa. Esta es la razón por la cual dedico a todos y cada uno de los miembros de mi familia: encabezando por mi hogar, mi padre el Sr. Olmedo Agenor Paucay Solano, mi madre la Sra. Consuelo Irene Chimunja Fernández; mis queridos hermanos: Patricia Carolina Chimunja Fernández, Edwin Darío Guachamín Chimunja, Griseldina Azucena Chimunja Fernández, Pablo Leodan Paucay Chimunja, Roberto Carlos Paucay Chimunja, Katerin Amelia Chimunja Fernández, Lily Andreina Paucay Chimunja, Neider David Paucay Chimunja y Stacy Carmelina Paucay Chimunja. Mi familia es muy especial, un regalo de Dios, yo los quiero con todo mi corazón.

No puedo pasar por alto la dedicatoria de este trabajo hacia todos mis amigos de infancia y compañeros de universidad que siempre en las buenas y en las malas han estado conmigo desde que tengo memoria hasta el día de hoy. Para toda esa gente maravillosa que me vio crecer en mi hermosa Parroquia Pacto y en mi pueblito natal, Río Anope. Este trabajo es para ustedes.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco al único y soberano Dios, al que creó los cielos y la tierra. Mi único y eterno salvador. Mi vida y todo lo que tengo es porque él me lo ha dado. Toda honra y gloria sea para mi Señor Jesucristo. ¡Amén!

En segundo lugar, agradezco a toda mi familia. En es especial a mis padres: el Sr. Olmedo Agenor Paucay Solano y la Sra. Consuelo Irene Chimunja Fernández; a mi hermano mayor Pablo Leodan Paucay Chimunja y a su querida esposa Jennifer Paola Paucar Taco por permitirme vivir todos estos años en su hogar. A mis compañeros de universidad, de los cuales los considero como mis hermanos, en particular a Andrés Sebastián Jaya Mena, Jorge Daniel Viteri Tapia y Zachary Nicolás Padilla Tufiño.

De todo corazón agradezco a mi tutor de tesis, el Dr. Washington Salvatore Reina Guzmán. Un agradecimiento muy especial para mi amigo Jeremy Alexander Gordillo Córdova por su ayuda incondicional; el Ing. Francisco Javier Martínez Zambrano y al Ing. Christian Rafael Tapia Arias quienes siempre les estaré muy agradecido por su apoyo y dirección. También agradezco a todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional por desempeñar un papel crucial en los conocimientos y experiencias compartidos durante toda la carrera.

Finalmente, un agradecimiento muy especial para mi compañero de tesis, amigo y hermano Nelson Andrés Trujillo Mejía. Todo este trabajo no hubiese sido posible sin su amistad, honestidad y arduo trabajo. Estoy muy agradecido con su dulce familia, a su padre Nelson Ricardo Trujillo Salazar y su madre Elyta Pamela Mejía Ramírez.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
Efectos de la vibración en los intercambiadores de calor	3
Vibración en el haz de tubos del intercambiador de calor.....	4
Variación de la temperatura del fluido	4
Espectro de frecuencia.....	5
Respuesta dinámica del sistema.....	6
Eficiencia del intercambiador de calor	7
Benchmarking	8
Intercambiador de calor de tubo concéntrico	8
Descripción del equipo	8
Intercambiador de calor de tubos y coraza	9
Descripción del equipo	10
Intercambiadores enfriados por aire y radiadores	11
Intercambiadores de placas empacadas (PHE).....	11
Intercambiadores en espiral (SHE)	12
Características de los intercambiadores de calor.....	13
Ecuaciones asociadas a un intercambiador de calor con vibraciones	16
Frecuencia natural.....	16
Coeficiente global de transferencia de calor	16
Método convectivo.....	16
Método de la eficiencia	17

Vector aceleración máxima promedio (a_{wv})	17
Rigidez axial	17
Evaluador en decibeles [dB]	18
La aceleración en un movimiento armónico simple	18
2 METODOLOGÍA	19
Modelamiento matemático del intercambiador de calor	20
Mediciones experimentales en el LTC	25
Desbalanceador	25
Analizador de vibraciones mano-brazo y cuerpo completo de 4 canales	27
Análisis de las condiciones de operación: Variación de la temperatura del fluido ..	28
3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	29
3.1 Pruebas experimentales del componente	29
Parte experimental en el LTC	29
3.2 Resultados experimentales y simulación	56
Resultados experimentales en el LTC	56
Resultados de la simulación	58
Análisis de resultados	58
3.3 Conclusiones	60
3.4 Recomendaciones	61
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
5 ANEXOS	64
ANEXO I: Intercambiador de tubos y coraza	64
ANEXO II: Especificaciones técnicas del acelerómetro	65
ANEXO III: Instalación del equipo para las mediciones de vibraciones experimentales	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Modos de vibración.	3
Figura 1.2. Vibración en el haz de tubos.	4
Figura 1.3. Variación de temperatura de un fluido en un intercambiador de calor.	5
Figura 1.4. Espectro de Frecuencia.	6
Figura 1.5. Respuesta dinámica del sistema.....	7
Figura 1.6. Tipos de intercambiadores.	8
Figura 1.7. Intercambiador de calor de tubo concéntrico.	9
Figura 1.8. Intercambiador de calor de tubos y coraza.	10
Figura 1.9. Intercambiador enfriado por aire y radiadores.....	11
Figura 1.10. Intercambiador de placas empacadas (PHE).	12
Figura 1.11. Intercambiador en espiral (SHE).	12
Figura 2.1. Metodología.	19
Figura 2.2. Sistema del análisis estructural en Ansys 2019 R2.....	20
Figura 2.3. Diseño de tubos	21
Figura 2.4. Propiedades del acero inoxidable.	21
Figura 2.5. Deflectores	22
Figura 2.6. Ubicación de los deflectores	22
Figura 2.7. Coraza del intercambiador de calor.....	23
Figura 2.8. Configuración del material de la coraza	23
Figura 2.9. Vista interna de los componentes del intercambiador de calor	24
Figura 2.10. Modelo final de la simulación	24
Figura 2.11. Convertidor de frecuencias	26
Figura 2.12. Soporte del motor.....	26
Figura 2.13. Mesa vibratoria.....	27
Figura 2.14. Analizador de vibraciones	28
Figura 2.15. Sensor de vibraciones.....	28
Figura 3.1. Condición 1 del protocolo 1.....	30
Figura 3.2. Espectro de frecuencia de la medida 1 del protocolo 1	30
Figura 3.3. Espectro de frecuencia de la medida 2 del protocolo 1	32
Figura 3.4. Espectro de frecuencia de la medida 3 del protocolo 1	33
Figura 3.5. Condición 2 del protocolo 1	34
Figura 3.6. Espectro de frecuencia de la medida 4 del protocolo 1	35
Figura 3.7. Espectro de frecuencia de la medida 5 del protocolo 1	36

Figura 3.8. Espectro de frecuencia de la medida 6 del protocolo 1	37
Figura 3.9. Condición 3 del protocolo 1	38
Figura 3.10. Espectro de frecuencia de la medida 7 del protocolo 1	39
Figura 3.11. Espectro de frecuencia de la medida 8 del protocolo 1	40
Figura 3.12. Espectro de frecuencia de la medida 9 del protocolo 1	41
Figura 3.13. Condición 4 del protocolo 2	43
Figura 3.14. Espectro de frecuencia de la medida 10 del protocolo 2	43
Figura 3.15. Espectro de frecuencia de la medida 11 del protocolo 2	44
Figura 3.16. Espectro de frecuencia de la medida 12 del protocolo 2	46
Figura 3.17. Condición 5 del protocolo 2	47
Figura 3.18. Espectro de frecuencia de la medida 13 del protocolo 2	48
Figura 3.19. Espectro de frecuencia de la medida 14 del protocolo 2	49
Figura 3.20. Espectro de frecuencia de la medida 15 del protocolo 2	50
Figura 3.21. Condición 6 del protocolo 2	51
Figura 3.22. Espectro de frecuencia de la medida 16 del protocolo 2	52
Figura 3.23. Espectro de frecuencia de la medida 17 del protocolo 2	53
Figura 3.24. Espectro de frecuencia de la medida 18 del protocolo 2	54
Figura 3.25. Aceleración máxima del protocolo 1 y 2	56
Figura 3.26. Frecuencia 1,25 Hz	57
Figura 3.27. Frecuencia amortiguada simulación	58
Figura 3.28. Desplazamiento simulación	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Especificaciones técnicas del equipo	9
Tabla 1.2. Especificaciones técnicas del equipo	10
Tabla 1.3. Características de los intercambiadores de calor.....	13
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del motor.....	25
Tabla 3.1. Condiciones de operación del protocolo 1 (condición 1)	29
Tabla 3.2. Aceleración máxima de la medida 1 del protocolo 1	31
Tabla 3.3. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 1 del protocolo 1 .	31
Tabla 3.4. Aceleración máxima de la medida 2 del protocolo 1	32
Tabla 3.5. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 2 del protocolo 1 .	32
Tabla 3.6. Aceleración máxima de la medida 3 del protocolo 1	33
Tabla 3.7. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 3 del protocolo 1 .	33
Tabla 3.8. Condiciones de operación del protocolo 1 (condición 2)	34
Tabla 3.9. Aceleración máxima de la medida 4 del protocolo 1	35
Tabla 3.10. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 4 del protocolo	135
Tabla 3.11. Aceleración máxima de la medida 5 del protocolo 1	36
Tabla 3.12. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 5 del protocolo	137
Tabla 3.13. Aceleración máxima de la medida 6 del protocolo 1	37
Tabla 3.14. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 6 del protocolo	138
Tabla 3.15. Condiciones de operación del protocolo 1 (condición 3)	38
Tabla 3.16. Aceleración máxima de la medida 7 del protocolo 1	39
Tabla 3.17. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 7 del protocolo	140
Tabla 3.18. Aceleración máxima de la medida 8 del protocolo 1	41
Tabla 3.19. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 8 del protocolo	141
Tabla 3.20. Aceleración máxima de la medida 9 del protocolo 1	42
Tabla 3.21. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 9 del protocolo	142
Tabla 3.22. Condiciones de operación del protocolo 2 (condición 4)	42
Tabla 3.23. Aceleración máxima de la medida 10 del protocolo 2	44
Tabla 3.24. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 10 del protocolo 2	44
Tabla 3.25. Aceleración máxima de la medida 11 del protocolo 2	45
Tabla 3.26. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 11 del protocolo 2	45
Tabla 3.27. Aceleración máxima de la medida 12 del protocolo 2	46

Tabla 3.28. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 12 del protocolo 2	46
Tabla 3.29. Condiciones de operación del protocolo 2 (condición 5)	47
Tabla 3.30. Aceleración máxima de la medida 13 del protocolo 2	48
Tabla 3.31. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 13 del protocolo 2	48
Tabla 3.32. Aceleración máxima de la medida 14 del protocolo 2	49
Tabla 3.33. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 14 del protocolo 2	49
Tabla 3.34. Aceleración máxima de la medida 15 del protocolo 2	50
Tabla 3.35. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 15 del protocolo 2	51
Tabla 3.36. Condiciones de operación del protocolo 2 (condición 6)	51
Tabla 3.37. Aceleración máxima de la medida 16 del protocolo 2	52
Tabla 3.38. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 16 del protocolo 2	53
Tabla 3.39. Aceleración máxima de la medida 17 del protocolo 2	53
Tabla 3.40. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 17 del protocolo 2	54
Tabla 3.41. Aceleración máxima de la medida 18 del protocolo 2	55
Tabla 3.42. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 18 del protocolo 2	55
Tabla 3.43. Desplazamiento de la parte experimental de medición de vibraciones	57
Tabla 3.44. Comparación de resultados.....	59

RESUMEN

En la actualidad los diseñadores de intercambiadores de calor enfrentan a grandes desafíos el cómo contrarrestar las vibraciones, mejorar la eficiencia térmica, la integridad estructural y la seguridad operativa de todo el equipo. Cada diseño debe seguir un cumplimiento normativo y de seguridad, con el fin de implementar tecnologías que detecten problemas y a la vez brindar mantenimiento predictivo para anticipar y prevenir fallas. El presente trabajo describe el modelamiento matemático de la simulación de un intercambiador de calor de tubos y coraza desarrollado en Ansys 2019 R2. Las dimensiones, características físicas y propiedades son basadas en el intercambiador de calor disponible en el LTC (Laboratorio de Transferencia de Calor) para uso académico. Se agrega un resorte en la parte inferior del intercambiador, este resorte genera vibraciones y el resultado final se expresa en metros [m], ya que se considera un desplazamiento a una frecuencia amortiguada en Hercios [Hz].

La parte experimental consiste en medir vibraciones por medio de un vibrómetro denominado SVAN 958, el sensor capta las vibraciones cuando el intercambiador de calor se encuentra en plena operación, dichas condiciones son planteadas acorde a la capacidad del propio intercambiador. El software proyecta espectros de frecuencias que van desde 0,8 hasta 200 Hz. El programa proporciona la aceleración en decibeles [dB], estos resultados deben ser transformados a metros, es decir, en términos de desplazamiento.

Finalmente, los resultados finales de la simulación y la parte experimental son comparados. El desplazamiento máximo adquirido en la simulación es $4,83 \times 10^{-6}$ [m] cuando la frecuencia amortiguada es 1,32 Hz según el programa Ansys 2019 R2. Mientras que, el desplazamiento máximo obtenido en la parte experimental es $9,90 \times 10^{-6}$ [m], la frecuencia amortiguada en el software SvanPC++ es 1,25 Hz. Por lo tanto, la validación experimental cumple con las expectativas y resultados obtenidos mediante la simulación, es decir, el proceso es válido y verdadero.

PALABRAS CLAVE: Respuesta dinámica, vibración, SVAN 958, espectro de frecuencias, aceleración máxima, valor máximo de vibración transitoria.

ABSTRACT

Currently, heat exchanger designers face significant challenges in countering vibrations, enhancing thermal efficiency, ensuring structural integrity, and operational safety of the entire equipment. Each design must adhere to regulatory and safety compliance to implement technologies that detect issues and provide predictive maintenance to anticipate and prevent failures. This paper describes the mathematical modeling of the simulation of a shell and tube heat exchanger developed in Ansys 2019 R2 software. The dimensions, physical characteristics, and properties are based on the heat exchanger available in the LTC (Heat Transfer Laboratory) for academic use. A spring is added to the bottom of the exchanger, generating vibrations, with the result measured in meters [m], considering displacement at a damped frequency in Hertz [Hz].

The experimental part involves measuring vibrations using a vibrometer called SVAN 958. The sensor captures vibrations when the heat exchanger is in full operation, conditions set according to the capacity of the exchanger itself. The software projects frequency spectra ranging from 0.8 to 200 Hz. The program provides acceleration in decibels [dB], which must be converted to meters, i.e., in terms of displacement.

Finally, the simulation results and the experimental part are compared. The maximum displacement acquired in the simulation is 4.83×10^{-6} [m] when the damped frequency is 1.32 Hz according to Ansys 2019 R2 software. Meanwhile, the maximum displacement obtained in the experimental part is 9.90×10^{-6} [m], with the damped frequency in SvanPC++ software being 1.25 Hz. Therefore, the experimental validation meets the expectations and results obtained through simulation, indicating the process is valid and accurate.

KEYWORDS: Dynamic response, vibration, SVAN 958, frequency spectrum, maximum acceleration, maximum transient vibration value.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En la era moderna existe un problema cuando se trata de diseñar un intercambiador de calor ya que existe la presencia de vibraciones inducidas en medio de los tubos cuando se da paso a un fluido. Un factor de limitación de operación en un intercambiador de calor es el exceso de vibración de los tubos. El movimiento dinámico de un fluido no estacionario produce vibración. Los pulsos se originan por el cruce entre las corrientes de los fluidos, cambio brusco de las presiones, por los fenómenos acústicos y también se debe al paso de calor entre el fluido y los tubos del intercambiador de calor.

La acción de fuerzas desbalanceadas reiterativas en los tubos genera vibraciones en todo el sistema. Generalmente, estas fuerzas desbalanceadas son pequeñas, pero ocurren millones de veces por segundo y esto hace que la velocidad del fluido incremente de manera inminente. Se conoce que las fuerzas desbalanceadas vibran a una frecuencia similar o cercanas a las frecuencias naturales del sistema, estamos hablando de un fenómeno llamado resonancia; es decir, que así sean pequeñas las fuerzas incidentes los tubos de igual manera tienden a vibrar fuertemente.

En los tiempos recientes han surgido nuevas tecnologías que nos permiten predecir la o las posibles configuraciones que debe tener un intercambiador de calor con el único fin de resistir todo tipo de vibración. A pesar de su corto tiempo de la ejecución de métodos numéricos en el campo de la transferencia de calor se han obtenido resultados muy convincentes a pesar de que aún se considera una ciencia que no ha sido bien desarrollada.

Todo tipo de vibración es considerada altamente perjudicial y dañina en la superficie de los tubos. Existen casos en que los tubos pueden ser cortados por los separadores, así como también, los tubos se pueden romper unos con otros y pueden causar grietas a lo largo de la superficie por un exceso de vibración. No hay que ignorar que existen tensiones sobre el tubo en todo momento del paso del fluido ocasionando múltiples fracturas por fatiga, rotura en los puntos de soldadura y también se estima que la corrosión aparece sobre el material con el que están elaborados los tubos.

La experiencia de un diseñador es quien marca diferencia cuando se trata de crear nuevas tecnologías que son eficientes al ser aplicados en áreas térmicas como también mecánicas, sobre todo si se aplican en un elemento que es muy común encontrar en toda industria, tal es caso de un intercambiador de calor.

1.1 Objetivo general

Implementar espectros de frecuencias en el estudio y análisis de la respuesta dinámica de un intercambiador de calor con variación de la temperatura.

1.2 Objetivos específicos

1. Precisar una respuesta dinámica de un intercambiador de calor que depende múltiples factores dentro de su estructura física.
2. Determinar las frecuencias naturales, modos de vibración y espectro de frecuencia variando la condición de operación como la temperatura en el intercambiador de calor.
3. Analizar el espectro de frecuencia obtenido de la solución dinámica del sistema vibratorio en función del coeficiente global de transferencia de calor.

1.3 Alcance

El siguiente proyecto propone como alcance de recopilar la mayor cantidad posible de información con referencia a las condiciones en especial a la variación de temperatura de un intercambiador de calor. Después se va a definir un modelo matemático para las vibraciones en los tubos debido al paso de un fluido, así como la velocidad del paso del fluido, también la frecuencia de resonancia en los tubos y las fuerzas externas presentes en el sistema a causa de la variación de parámetros de operación, con el único fin de establecer los espectros de frecuencia para las posibles condiciones de operación. Con ayuda del software de Matlab buscamos una solución dinámica del sistema, para hallar el módulo del análisis modal usaremos el software de Ansys, y finalmente, vamos a validar experimentalmente las vibraciones en los tubos usando un analizador de vibraciones marca Syan.

1.4 Marco teórico

El siguiente apartado permite conocer la teoría de vibraciones en un intercambiador de calor. En primer lugar, hay que entender que es un gran problema la vibración inducida por el paso de un fluido en un intercambiador de calor y que la mayoría de las vibraciones aparecen en los vórtices del dispositivo. En esta sección se describe las causas más comunes del por qué existen perjuicios generados por las vibraciones en el haz de tubos.

Es necesario explicar las consideraciones que se deben tener en cuenta cuando la temperatura de un fluido cambia en un intercambiador de calor donde puede afectar las vibraciones de distintas maneras, dependiendo de los factores específicos. También hay que describir las consideraciones cuando la temperatura del fluido cambia en el intercambiador y aparecen los efectos en el espectro de frecuencia del sistema. Finalmente, presentar las influencias en la respuesta dinámica de un intercambiador de calor cuando varía la temperatura del fluido.

Esta sección describe teóricamente las fórmulas para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor usando dos métodos distintos, tales son el método convectivo y el método de la eficiencia de la transferencia de calor. Se define el benchmarking comparativo de los tipos de intercambiadores de calor que dispone el LTC.

Efectos de la vibración en los intercambiadores de calor

En la actualidad el intercambiador de calor tiene un grave problema como es la presencia de vibraciones. Eventualmente los tubos vibran y son coaccionados contra los deflectores (baffles), pueden chocar con los tubos aledaños creando deformaciones y desgastes en el interior del dispositivo. En la Figura 1.1, se observa los modos de vibración.

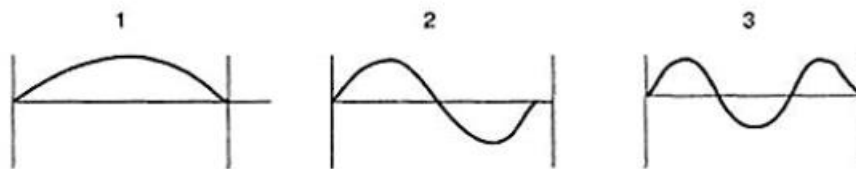


Figura 1.1. Modos de vibración. (Reyes, Moya & Goytisolo, 2014)

Gran parte de las vibraciones surgen desde los vórtices del dispositivo, esto se debe a las condiciones iniciales de flujo. Pueden ser mínimas, pero son innumerables, y en algunas ocasiones tienen frecuencias muy altas, y cada vez empeora cuando incrementa la velocidad del líquido.

Vibración en el haz de tubos del intercambiador de calor

El daño ocasionado por las vibraciones en los tubos hoy en día es un fenómeno creciente cada vez que el dimensionamiento y las cantidades de flujo aumentan en los intercambiadores de calor. Algunas de las causas son: derramamiento en los vórtices, debido a la frecuencia de dispersión del fluido cuando el sistema se halla en flujo cruzado sobre los tubos puede llegar el caso de coincidir con la frecuencia natural de los tubos y generar vibraciones resonantes en amplios intervalos de tiempo. El acoplamiento elástico del líquido, cuando el fluido atraviesa los tubos induce vibración con un movimiento semejante a un remolino. El dispositivo de acoplamiento elástico posee un espacio cuando se supera a la velocidad crítica y cuando la vibración es autoexcitante y aumenta la amplitud. El mecanismo ocurre a menudo en un intercambiador de calor cuando han padecido daños por exceso de vibraciones. La fluctuación de la presión, las oscilaciones de la presión causada por la agitación progresada en la superficie del cilindro. Los tubos llegan a responder al segmento del espectro de energía cerca a la frecuencia natural del sistema. Finalmente, acoplamiento acústico, dado que el fluido que está cerca de la carcasa es un gas de muy baja densidad, se despliega una resonancia o mejor dicho un acoplamiento acústico cuando las pulsaciones fijas se hallan en concordancia con la difusión en los vórtices de cada tubo. (Mendoza, 2006)



Figura 1.2. Vibración en el haz de tubos. (123RF, 2023)

En la Figura 1.2, las pulsaciones fijas están perpendicularmente con los ejes de los tubos y dirección en el intercambio de fluidos. Los tubos se averían ocasionalmente, pero el ruido es muy molesto.

Variación de la temperatura del fluido

El cambio en la temperatura de un líquido en un intercambiador de calor puede afectar al haz de los tubos con la presencia de vibraciones, dependiendo de múltiples factores y consideraciones como: expansión térmica, cuando la temperatura de un fluido cambia,

existe una expansión térmica del material empleado en el intercambiador de calor. La expansión genera tensiones internas en el dispositivo y causa vibración si no se interviene a tiempo. Razón por la cual se diseñan intercambiadores de calor con materiales con coeficientes de expansión térmica apropiados. Cambios en la viscosidad, el aumento de la temperatura afecta a la viscosidad del fluido. Cada vez que la temperatura aumenta, la viscosidad del fluido disminuye. Por este motivo cambia las características de flujo y genera turbulencia, lo que conduce a vibraciones no deseadas. El diseño y selección de cada elemento del intercambiador de calor como los tubos o las aletas se deben considerar estos cambios en las propiedades del fluido. Efectos de contracción y expansión, se debe tener en cuenta a estos efectos de contracción y expansión ya que pueden desencadenar vibraciones no deseadas. Es necesario contemplar la dilatación térmica y esfuerzos mecánicos como resultado del diseño y el montaje del intercambiador de calor. (Neely, 1964)

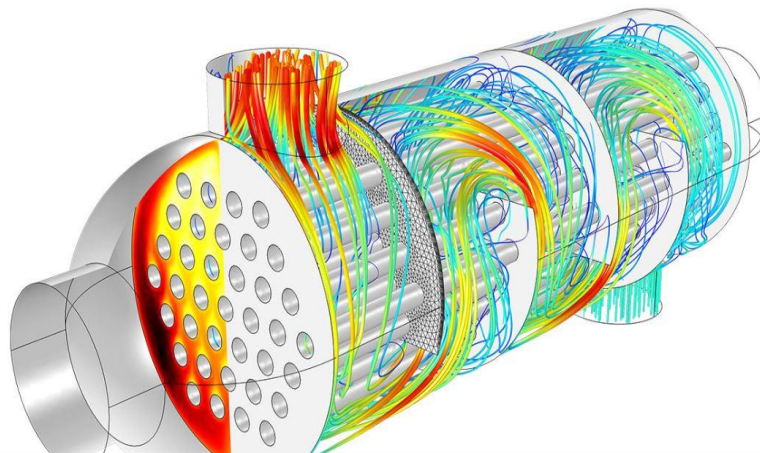


Figura 1.3. Variación de temperatura de un fluido en un intercambiador de calor. (Marino, 2018)

En la Figura 1.3, se enseña los cambios en la distribución de temperaturas, en caso de que la distribución de temperatura se vuelve desigual dentro el intercambiador, existe la probabilidad de que exista diferencias de expansión y contracción en las partes del equipo, lo cual se generan tensiones y vibraciones.

Espectro de frecuencia

Al cambiar la temperatura del fluido, puede haber efectos en el espectro de frecuencia del sistema. Las consideraciones importantes son: cambios en la densidad y viscosidad del líquido, a medida que la temperatura varía, la densidad y viscosidad del fluido cambian, afectando el flujo y características del sistema. Los cambios intervienen directamente en las frecuencias características del sistema, sobre todo en los modos de flujo turbulento o a

la vez en las frecuencias asociadas con la interacción fluido-estructura. Efectos de la dilatación térmica, la dilatación térmica afecta la geometría y las propiedades mecánicas de cada componente del dispositivo, alterando la frecuencia natural del sistema. Eso quiere decir que, los cambios en la temperatura pueden introducir nuevas frecuencias que modifican a los espectros de frecuencias ya existentes en el intercambiador. La modificación de la propagación térmica, los cambios en la modificación de la conductividad térmica de los materiales afectan en la propagación del calor, también a las respuestas dinámicas del sistema. Si hay cambios en la conductividad térmica, estos pueden introducir nuevas frecuencias que tratan de alterar las amplitudes en el espectro de frecuencia. Finalmente, Cambios en las condiciones de flujo, los cambios en las condiciones de flujo pueden afectar las fuerzas dinámicas, las presiones y los gradientes de velocidad del fluido dentro del sistema. (Quintero & Vargas, 2018)

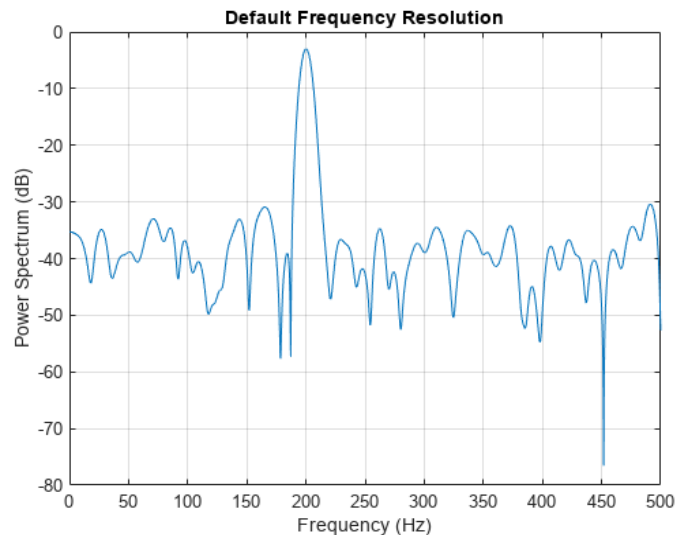


Figura 1.4. Espectro de Frecuencia. (MathWorks, 2023)

Debido a estas alteraciones en las condiciones de flujo son generados pulsaciones o excitaciones adicionales como se ilustra en la Figura 1.4, alteran el espectro de frecuencia del intercambiador de calor.

Respuesta dinámica del sistema

La respuesta dinámica de un intercambiador de calor varía cuando la temperatura del fluido se modifica o altera su estado inicial. Las influencias más relevantes en la respuesta dinámica son: cambios en la rigidez estructural, cuando aumenta la temperatura del fluido, los materiales experimentan dilatación térmica, lo que hace que la geometría, las dimensiones y propiedades mecánicas de los componentes son alteradas. Los cambios afectan a la rigidez global del sistema y, por lo tanto, también se modifica la respuesta

dinámica del intercambiador de calor. Variación en la frecuencia natural, las características físicas de los materiales cambian al aumento de la temperatura, lo que a su vez las características vibracionales son transformadas ante a los cambios repentinos en el sistema. Cambios en la transferencia de calor, hay una conexión directa entre el intercambiador de calor y la transferencia de calor que existe entre el líquido hacia el resto de las superficies. Si la temperatura del fluido cambia, la transferencia de calor puede verse afectada, hay gradientes de temperatura y distribuciones térmicas no uniformes dentro del intercambiador. (Ghiselli, 1990)

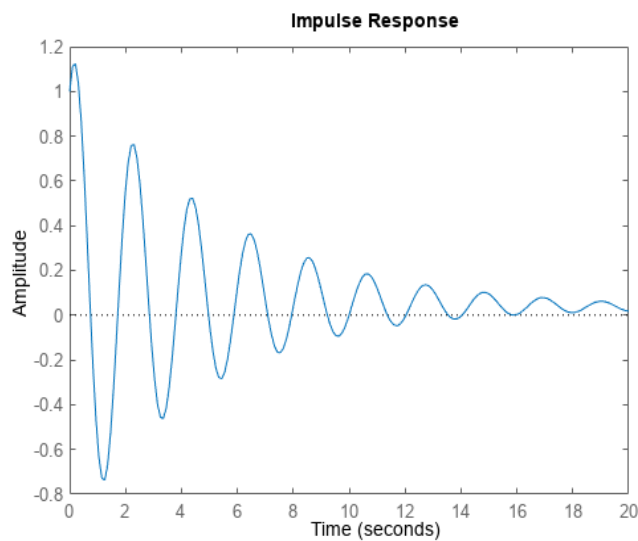


Figura 1.5. Respuesta dinámica del sistema. (MathWorks, 2022)

En la Figura 1.5, los gradientes introducen tensiones y deforman a los componentes del dispositivo, finalmente, influye directamente en la respuesta dinámica del sistema.

Eficiencia del intercambiador de calor

La eficiencia del intercambiador de calor se ve afectada por los modos de vibración, el cambio repentino de la temperatura del fluido y también se debe a las diferentes condiciones de operación. En primer lugar, los modos de vibración abren paso a vibraciones excesivas causando daños mecánicos, como deformaciones y fracturas, causa desgaste en las superficies. El cambio de temperatura del fluido influye directamente en la eficiencia del intercambiador, hay que tener en cuenta que si aumenta la diferencia de temperatura aparecen incrustaciones, problemas corrosivos en la superficie o problemas en la transición del flujo. La eficiencia del intercambiador se ajusta según las condiciones de operación, tales como la velocidad con la que avanza el fluido (por ejemplo, si la velocidad del fluido es lenta puede resultar una capa límite térmica gruesa), la presión (por ejemplo, una alta presión en el fluido hace que aumente la resistencia térmica del

intercambiador, reduce la eficiencia), y las características físicas del líquido (por ejemplo, la viscosidad).

Benchmarking

En el siguiente apartado se mencionará sobre los tipos de intercambiadores de transferencia de calor. En la Figura 1.6, se identifica los equipos disponibles en el LTC.



Figura 1.6. Tipos de intercambiadores. (Fuente Propia)

Intercambiador de calor de tubo concéntrico

El intercambiador de calor del laboratorio radica en dos tubos con diámetros diferentes que van uno dentro del otro de manera concéntrica. El equipo posee un grupo de cuatro pasos específicos que permiten efectuar estudios de transferencia de calor entre dos líquidos a distintas temperaturas.

Descripción del equipo

El intercambiador de tubos concéntricos es un intercambiador básico donde se puede transportar un fluido caliente y otro frío. El calor se propaga desde el fluido que está en el interior hacia el fluido que está en el exterior a través de la resistencia metálica que los separa.

El equipo dispone de válvulas que permiten ajustar los pasos de intercambios activos. Las conexiones de cada tubo flexible están basadas en códigos de colores siendo el rojo la entrada del fluido caliente y el color azul para el fluido frío que proviene a temperatura ambiente.



Figura 1.7. Intercambiador de calor de tubo concéntrico. (Fuente Propia)

En la Figura 1.7, el intercambiador tiene un arreglo en serie con el único fin de reducir la longitud total del intercambiador, esto hace que cuando se toman las temperaturas de los diferentes fluidos a mitad del camino y estos van evaluando el historial de cambio de temperatura en el sistema.

Tabla 1.1. Especificaciones técnicas del equipo

Nombre	Datos
Diámetro interno del tubo	0,0083 [m]
Diámetro externo del tubo	0,0095 [m]
Diámetro interno de la coraza	0,014 [m]
Longitud de transferencia de calor	0,330 [m] por tubo

En la Tabla 1.1, se describe los requisitos técnicos del equipo como el material con el que está elaborado el tubo externo es acrílico, y tiene un diámetro de 14 mm, mientras que, el tubo interno está elaborado de acero inoxidable con un diámetro de 8.3 mm en el interior y en el exterior con 9.5 mm. El paso tiene una longitud de 66 cm, tiene una distancia total de 1.32 m. (Instruction Manual HT36, 2010)

Intercambiador de calor de tubos y coraza

El intercambiador de calor de carcasa y tubos consta de una serie de tubos paralelos que están encerrados en una carcasa cilíndrica. El fluido que circula a través de los tubos transfiere calor hacia el fluido que fluye por la cubierta cilíndrica alrededor de los tubos.

Descripción del equipo

El LTC dispone el equipo que se exhibe en la Figura 1.8, el intercambiador miniatura posee deflectores que están dentro de la carcasa, los cuales impiden que aumente la velocidad del fluido. La coraza está elaborada por acrílico transparente y presenta siete tubos internos que están elaborados de acero inoxidable con dos buffles transversales. El dispositivo está montado sobre una base de PVC que está conformado por el equipo HT30XC. Los requisitos técnicos se encuentran en el ANEXO I.



Figura 1.8. Intercambiador de calor de tubos y coraza. (Fuente Propia)

El transporte del líquido caliente viene dado desde el calentador y atraviesa todos los tubos de acero inoxidable. El fluido frío proviene de la red de agua potable de Quito, y esta pasa por la coraza cilíndrica del intercambiador de calor. Esto hace que las pérdidas de calor sean menores, razón por la cual no es necesario usar un aislante adicional.

En los cabezales que se hallan en los extremos se encuentran sensores que sirven para la medición de temperaturas de los fluidos y conexiones hacia las fuentes de agua caliente y fría. Las termocuplas llevan una enumeración desde T1 hasta T4.

Tabla 1.2. Especificaciones técnicas del equipo

Nombre	Datos
Diámetro interno del tubo	0,00515 [m]
Diámetro externo del tubo	0,00635 [m]
Longitud de transferencia de calor	1,008 [m]

En la Tabla 1.2, se identifica las especificaciones técnicas del intercambiador de tubos y coraza. El dispositivo dispone de mangueras flexibles que están conectadas al equipo por medio de abrazaderas que facilitan el paso del flujo del fluido y también permite el cambio

de dirección de fluido permitiendo tener un arreglo en contraflujo o paralelo. Para identificar el paso del fluido frío se marca de color azul y para reconocer el paso del fluido caliente se marca con el color rojo. (Instruction Manual HT33, 2014)

En la industria existen diferentes tipos de intercambiadoras de calor, entre ellos están los más destacados:

Intercambiadores enfriados por aire y radiadores

Es un equipo de transferencia de calor tubular en el que aire ambiente pasa por el haz de tubos, este actúa como refrigerante que busca refrigerar al líquido interno.

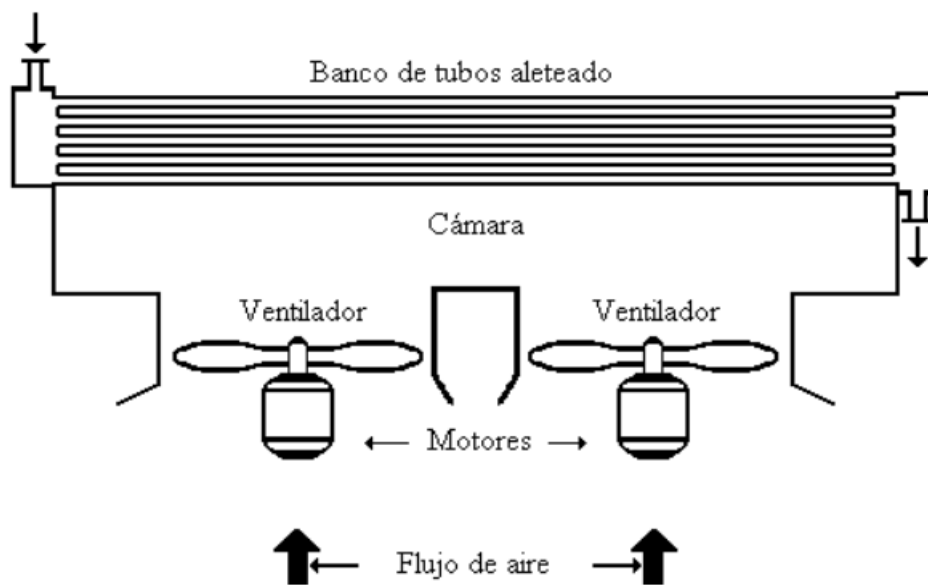


Figura 1.9. Intercambiador enfriado por aire y radiadores. (González, 2002)

En la Figura 1.9, el diseño del intercambiador consiste plenamente en un arreglo de tubos de manera rectangular, normalmente con muy pocas filas de profundidad, donde el líquido caliente se condensa en cada tubo cuando los ventiladores succionan el aire del haz.

Intercambiadores de placas empacas (PHE)

En este tipo de intercambiador los tipos de fluidos que permanecen separados por placas, las cuales son láminas de poco espesor rectangular, las cuales presentan un diseño corrugado. En un extremo de cada placa se encuentra un empaque que bordea todo el contorno.

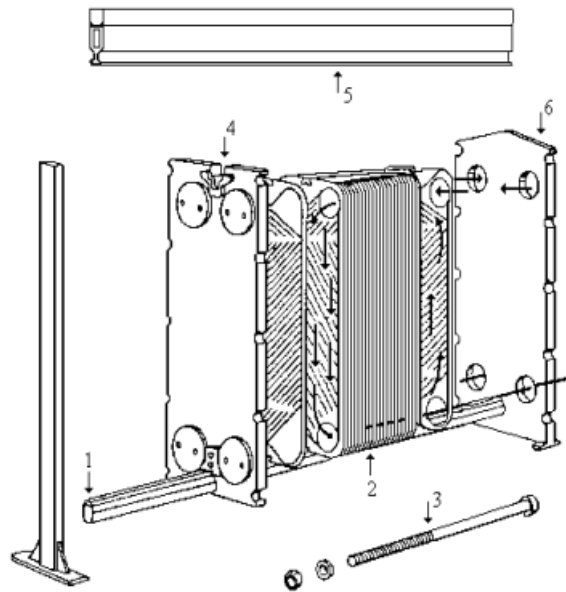


Figura 1.10. Intercambiador de placas empacadas (PHE). (González, 2002)

El intercambiador que se muestra en la Figura 1.10, es el óptimo para trabajar con fluidos viscosos, además de ser fácilmente desmontable para el mantenimiento del equipo.

Intercambiadores en espiral (SHE)

El modelo del equipo se basa en un par de láminas enrolladas de metal por el borde de un eje que forman pasajes convergentes en forma de caracol por los cuales avanzan los fluidos. Son empleados en la dirección de los fluidos altamente viscosos, lodo y también manejan líquidos con sólidos en suspensión.



Figura 1.11. Intercambiador en espiral (SHE). (González, 2002)

Como se observa en la Figura 1.11, el intercambiador no requiere de aislantes, ya que el refrigerante pasa por el exterior.

Los intercambiadores de tipo superficie raspadora son dispositivos que poseen una parte giratoria en su diseño provisto de una hoja que está sujeta a un muelle, el muelle sirve únicamente para pulir sobre toda la superficie de transferencia de calor del intercambiador.

Son utilizados en plantas donde los fluidos son viscosos o tienen tendencias a formar depósitos internos. Son construidos semejantes los de doble tubo. Los Intercambiadores tipo bayoneta consiste en que tiene un tubo externo y otro interno. El tubo interno y externo están hechos de acero de carbono y de una aleación muy costosa respectivamente. El intercambiador estilo bayoneta sirve en gran manera cuando existe una abismal diferencia de temperatura entre los fluidos. También son utilizados en servicios con cambio de fase donde no es recomendable tener un flujo bifásico que vaya en contra de la gravedad. Los enfriadores de serpentín se encuentran sumergidos algunos serpentines en un recipiente con agua, su construcción es simple, son costosos. Son utilizados cuando se necesita enfriar un fluido de emergencia y no existe disponible otra fuente de agua. Los intercambiadores de láminas presentan aletas o espaciadores que están intercalados entre las láminas metálicas distribuidoras de forma paralela, normalmente están hechas de aluminio. Las láminas cumplen la función de separar las corrientes de los líquidos, mientras que, las aletas forman los pasos individuales para el flujo. Los condensadores de contacto directo consisten en una pequeña torreta, donde el agua y el vapor se desplazan unidos. Este equipo es utilizado cuando la capacidad de disolución del refrigerante y el fluido del proceso no contaminan al agua o de los productos. Los enfriadores de película en vertical descendente presentan los tubos verticales de cabezal fijo. El principio de funcionamiento es que el agua cae por el interior de los tubos creando una densa película donde se produce el intercambio de calor con los vapores que están ascendiendo. Enfriadores en cascada están constituidos por tubos colocados de manera horizontal uno sobre otro y sobre estos gotea agua de enfriamiento que proviene del distribuidor. Generalmente, el agua caliente circula en contraflujo con respecto al flujo de agua. Los intercambiadores de grafito impermeable se usan exclusivamente para asesoramientos que son abrasivos, con en la extracción del isobutano y en las plantas de ácidos. (González, 2002)

Características de los intercambiadores de calor

En la Tabla 1.3, los intercambiadoras de calor presentan distintas aplicaciones a distintas condiciones de operación, ventajas y desventajas; tales se describen a continuación:

Tabla 1.3. Características de los intercambiadores de calor (González, 2002)

Tipo de intercambiador	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Tubo concéntrico	Refrigeración y climatización, procesos industriales, intercambio de calor en equipos médicos y	Eficiencia muy alta, con muy compacto, evitan la mezcla de fluidos, resistencia a la corrosión	Presión limitada, limpieza y mantenimiento complicado, elevados costos.

	recuperación de calor		
Tubos y coraza	Se amolda a cualquier tipo de servicio, refinerías y petroquímica, generación de energía, procesos industriales y refrigeración	Alta eficiencia, versatilidad, resistencia a la presión, facilidad de mantenimiento	Costo, tamaño y peso, pérdida de carga
Enfriados por aire y radiadores	Son empleados por los costos elevados del agua o cuando se requiere de una torreta específica para refrigerar agua, sistemas de refrigeración en vehículos	Simplicidad en la instalación, independencia de sistemas auxiliares, mayor durabilidad y aplicaciones móviles	Menor eficiencia térmica, dependen del ambiente, tamaño y peso, generan ruido
Placas empacas (PHE)	Calefacción y refrigeración, industria alimentaria, recuperación de calor	Alta eficiencia, puede agregarse o quitar placas según la capacidad requerida	Sensibilidad a la corrosión, tendencia a la incrustación, costo inicial, limitaciones de temperatura y presión
Espiral (SHE)	Procesamiento de alimentos y bebidas, generación de energía	Facilidad de limpieza, resistente a la corrosión	Elevado costo del equipo, sensibilidad a la suciedad
Tipo superficie raspadora	Procesamiento de alimentos, en la industria farmacéutica	Alta eficiencia, capacidad para fluidos viscosos, mayor control del tiempo de residencia, operación continua	Sensibilidad a la abrasión, necesidad de una limpieza cuidadosa
Tipo bayoneta	Industria petroquímica y petroquímica, farmacéutica	Alta eficiencia en fluidos viscosos, resistencia a la obstrucción, menor costo de mantenimiento, operación continua	Menor eficiencia en fluidos de baja viscosidad, espacio requerido muy amplio en comparación con otros intercambiadores
Serpentín	Aire acondicionado y refrigeración, sistemas de enfriamiento industrial, equipos electrónicos,	Buena eficiencia de enfriamiento, diseño compacto, fácil mantenimiento, bajo costo	Limitaciones de capacidad, sensibilidad a la corrosión, pérdida de carga, requieren

	procesos químicos y petroquímicos		espacio para instalación
Láminas	HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado)	Alta eficiencia térmica, mayor flexibilidad, fácil mantenimiento	Incrustaciones, sensibilidad a la corrosión, limitaciones de temperatura y presión
Contacto directo	Enfriamiento evaporativo, torres de enfriamiento, deshumidificación, refrigeración industrial	Alta eficiencia en transferencia de calor, pérdida mínima de carga, menor costo	Limitaciones en el rango de temperaturas, necesidad de tratamiento de agua
Película vertical descendente	Refrigeración de agua, procesamiento de alimentos, desalinización de agua	Alta eficiencia de enfriamiento, muy compactos, fácil mantenimiento	Requieren control adecuado del flujo y distribución uniforme del líquido sobre la superficie de enfriamiento
Cascada	Plantas de energía, refrigeración en cascada	Flexibilidad, ahorro de energía, control de temperatura de cada etapa	Mayor costo inicial, requiere mayor espacio para su instalación, mayor complejidad debido a sus etapas
Grafito impermeable	Industria química, tratamiento de aguas	Resistencia química, alta eficiencia térmica, resistencia a altas temperaturas, larga vida útil	Fragilidad, limitaciones del diseño, costo inicial

En resumen, los intercambiadores de calor son dispositivos que tienen una amplia gama de aplicaciones, ya que proporciona una manera eficiente y segura de transferir calor. A pesar de presentar algunas desventajas, son mayores sus beneficios en términos de eficiencia energética y mejora del rendimiento de los sistemas que compensan ampliamente las limitaciones.

Ecuaciones asociadas a un intercambiador de calor con vibraciones

Frecuencia natural

Las frecuencias de vibración están asociadas a los modos naturales. La frecuencia natural de vibración en los tubos del intercambiador de calor se puede expresar de manera general con la siguiente Ecuación 1.1:

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{M}}$$

Ecuación 1.1. Coeficiente Global de transferencia de calor método convectivo. (Ghiselli, 1990)

Donde:

f : es la frecuencia natural en Hertz

λ : es un parámetro adimensional en función del contorno del tubo

L : longitud del tubo de un apoyo al otro

M : masa por unidad de longitud del tubo

E : módulo de elasticidad del material del tubo

I : momento de inercia de la sección del tubo

Coeficiente global de transferencia de calor

Método convectivo

El coeficiente global de transferencia de calor en un intercambiador de calor considerando a las vibraciones y que dependen del ajuste específico del intercambiador de calor. La Ecuación 1.2, es una fórmula general para cualquier calculo, pero depende del tiempo de intercambiador y condiciones particulares de vibración en el sistema:

$$U = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_1}\right) + \left(\frac{1}{h_2}\right) + \Sigma(R_w)\right]}$$

Ecuación 1.2. Coeficiente global de transferencia de calor método convectivo

Se sabe que U es el coeficiente global de transferencia de calor, h_1 y h_2 son coeficientes de transferencia de calor correctiva en los fluidos o medios que interactúan y $\Sigma(R_w)$ es la suma de las resistencias térmicas en la pared del intercambiador.

Método de la eficiencia

El método asume que es constante la eficiencia de transferencia de calor, similar a un intercambiador convencional en condiciones estables.

La fórmula aproximada es la Ecuación 1.3:

$$U = \frac{U_{estable}}{F}$$

Ecuación 1.3. Coeficiente Global de transferencia de calor método de la eficiencia

U es el coeficiente global de transferencia de calor, $U_{estable}$ es el coeficiente global de transferencia de calor en condiciones estables, es decir, sin vibración y con temperatura del fluido constante y F es el factor de corrección de la eficiencia de transferencia de calor que considera las vibraciones y a la variación de la temperatura del fluido.

Vector aceleración máxima promedio (awv)

Mediante el proceso de cálculos de los resultados de medición en el acelerómetro (SVAN 598), se consideran los valores en el vector aceleración máxima promedio que se muestra a continuación mediante la Ecuación 1.4:

$$awv = \sqrt{k_1 x^2_1 + k_2 x^2_2 + k_3 x^2_3}$$

Ecuación 1.4. Vector aceleración máxima promedio (awv). (SVANTEK, 2008)

Se entiende que, k_1 , k_2 y k_3 son los coeficientes que varían de 0 a 2 y que x_1 , x_2 , x_3 son los resultados RMS para diferentes canales

Rigidez axial

La rigidez axial se refiere a la capacidad de un cuerpo o estructura que trata de resistir deformaciones en la longitud de este cuando se aplica una carga en el eje longitudinal. Para un tubo se puede expresar la rigidez axial mediante la Ecuación 1.5:

$$k = \frac{A * E}{l}$$

Ecuación 1.5. Rigidez axial para un tubo (Rao, 2011)

El término k es la rigidez axial, A es el área de transferencia de calor de un tubo, E es el módulo de Young del material del tubo y l es la longitud efectiva del tubo.

Evaluador en decibeles [dB]

Los decibeles pertenecen a una unidad de medida para la intensidad de un sonido. Para el caso de la aceleración por medio de la Ecuación 1.6:

$$dB = 20 \log \left(\frac{|\ddot{x}|}{\ddot{x}_0} \right)$$

Ecuación 1.6. Aceleración en decibeles. (Arcos, 2016)

Si \ddot{x}_0 : es el valor de referencia de la aceleración, $10^{-6} \frac{m}{s^2}$. Para obtener la aceleración en $\frac{m}{s^2}$, se despeja $|\ddot{x}|$ de Ecuación 1.6, finalmente, se obtiene la aceleración en el SI (Sistema Internacional) con la Ecuación 1.7.

$$|\ddot{x}| = e^{\frac{dB}{20}} * 10^{-6}$$

Ecuación 1.7. Aceleración en $\frac{m}{s^2}$. (Arcos, 2016)

La aceleración en un movimiento armónico simple

La aceleración en un M.A.S. se expresa con la Ecuación 1.8:

$$a = -\omega^2 * x$$

Ecuación 1.8. La aceleración en un M.A.S. (García, 2023)

Se conoce que, ω es la frecuencia angular, $[\frac{rad}{s}]$, x es el desplazamiento en metros. Si despejamos x de la Ecuación 1.8, tenemos el desplazamiento lineal con la Ecuación 1.9:

$$x = -\frac{a}{\omega^2} \quad \text{ó} \quad x = -\frac{a}{(2 * \pi * f)^2}$$

Ecuación 1.9. El desplazamiento lineal (García, 2023)

Donde f es la frecuencia en Hz.

2 METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se presenta la metodología de medición de vibraciones en un intercambiador de calor cuando varía la temperatura del fluido.

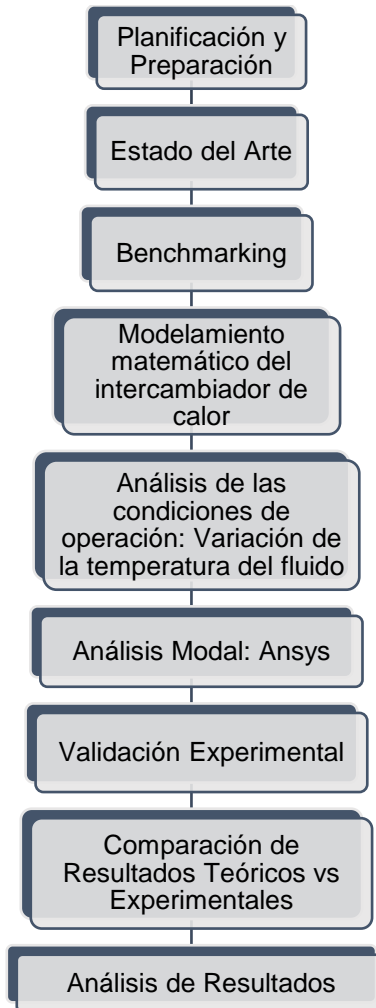


Figura 2.1. Metodología. (Fuente Propia)

En la Figura 2.1, se propone la estructura a seguir del componente. Es necesario realizar la planificación y preparación del material bibliográfico concerniente al componente asignado. Se define el estado del arte donde se describe las condiciones de operación y los factores que intervienen para que exista vibración en un intercambiador de calor. En la sección del benchmarking se detalla los tipos de intercambiadores tanto los equipos que están disponibles en el LTC como a los dispositivos más comunes usados en la industria. Se plantea un modelamiento matemático del intercambiador de calor con el fin de obtener una respuesta dinámica de todo el sistema vibratorio. Hay que considerar que, para todo análisis y cálculo previo, hay que considerar la variación o el cambio de temperatura del fluido de trabajo. Por medio del software Ansys, se realizará el análisis modal, y para

obtener frecuencias naturales, modos de vibración y espectros de frecuencia se hará uso de la herramienta de Matlab. Para comprobar y validar los datos obtenidos teóricamente, se procede a hacer los cálculos experimentales en el LTC. Finalmente, se realizará la comparación de resultados teóricos vs experimentales, donde se podrá extraer información relevante de cada proceso efectuado y a partir de los resultados obtenidos poder concluir y recomendar para cada caso.

Modelamiento matemático del intercambiador de calor

El siguiente trabajo de simulación dinámica de fluidos computacionales, para lo cual se implementa en el software Ansys 2019 R2 debido a su realismo y estos resultados se pueden comparar con los resultados experimentales.

El diseño del intercambiador de calor en Ansys 2019 R2 permite un enfoque integral que abarca el comportamiento térmico, fluidodinámico y estructural con el fin de optimizar el rendimiento y garantizar la fiabilidad del diseño considerando que existe vibraciones en el sistema, en este caso colocar un resorte en el intercambiador.

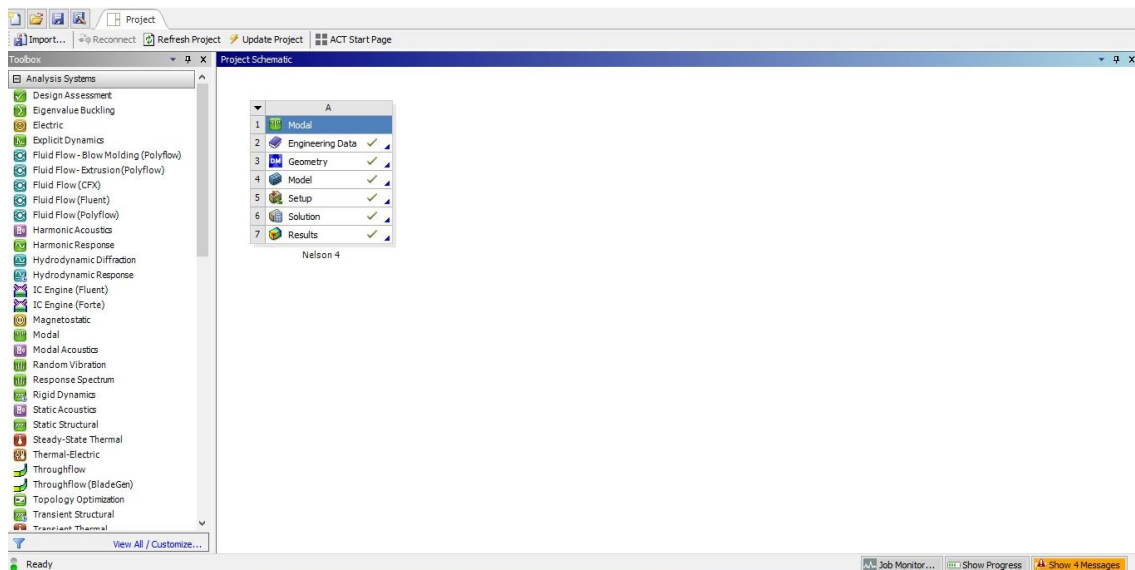


Figura 2.2. Sistema del análisis estructural en Ansys 2019 R2. (Fuente Propia)

En primer lugar, se escoge el sistema de análisis más acorde a la simulación, como se muestra en la Figura 2.2. El sistema permite explorar siete ventanas (análisis modal, datos de ingeniería, la geometría, el modelo, configuraciones, soluciones y los resultados), en cada uno de estos ítems se realizan operaciones específicas que permiten obtener la simulación estimada.

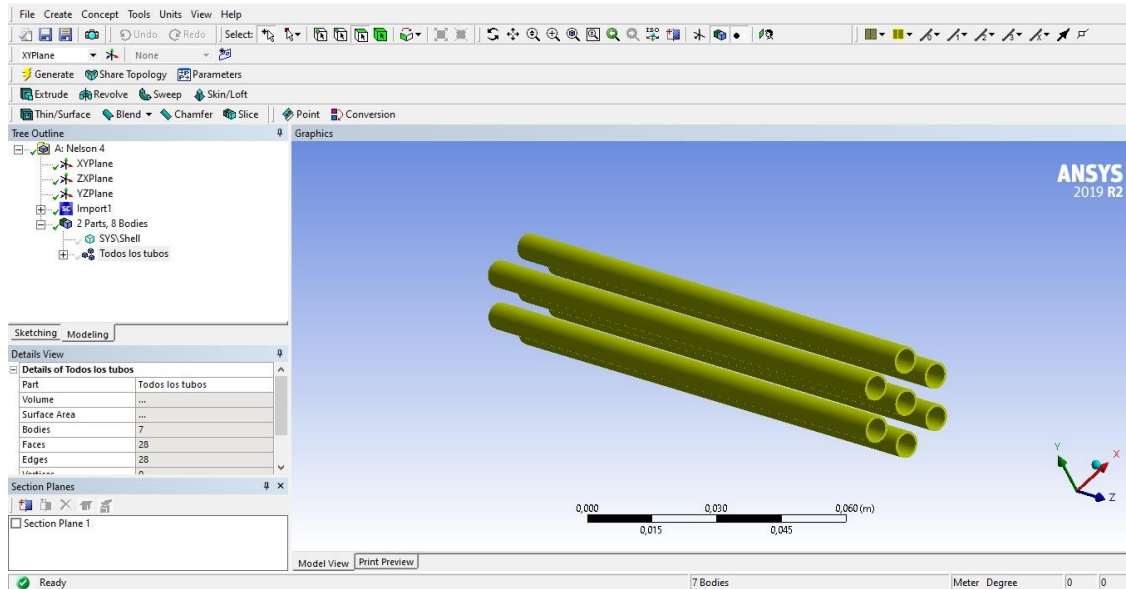


Figura 2.3. Diseño de tubos (Fuente Propia)

Como paso siguiente se plantea empezar con la geometría interna del equipo. En la Figura 2.3, se puede evidenciar claramente el modelamiento de los siete tubos con las dimensiones de acuerdo con el intercambiador de calor disponible en el LTC. A través de los tubos se transporte el fluido caliente.

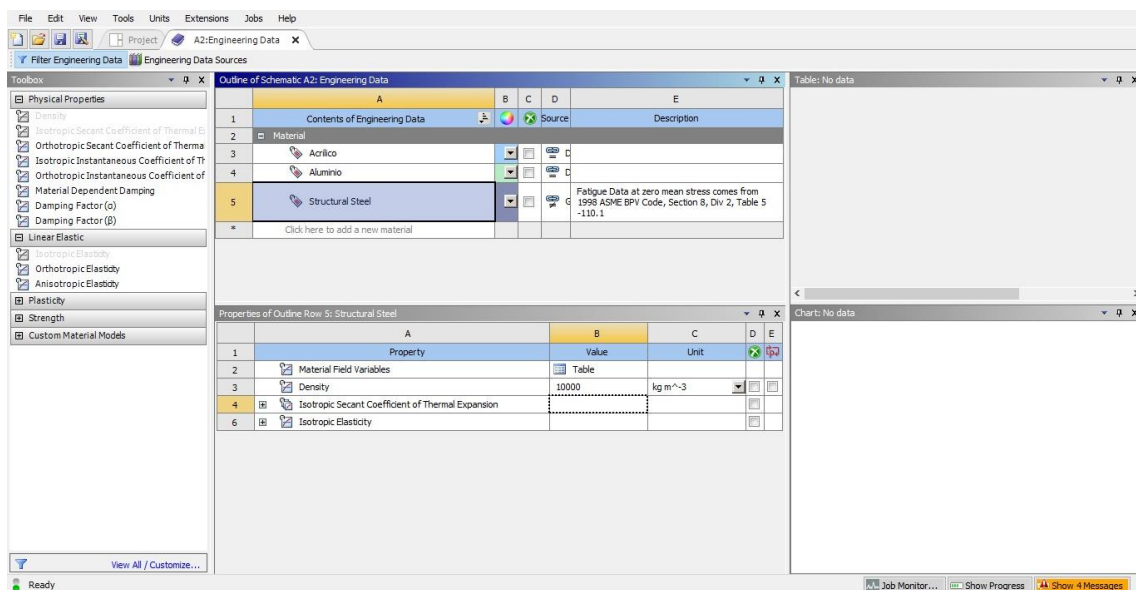


Figura 2.4. Propiedades del acero inoxidable. (Fuente Propia)

Tras finalizar el diseño de los tubos, en la pestaña de Datos de Ingeniería se procede a modificar las propiedades, como la selección del material (acero inoxidable), se ingresa el valor de la densidad del material ($10.000 \frac{kg}{m^3}$). Tal y como se aprecia en la Figura 2.4.

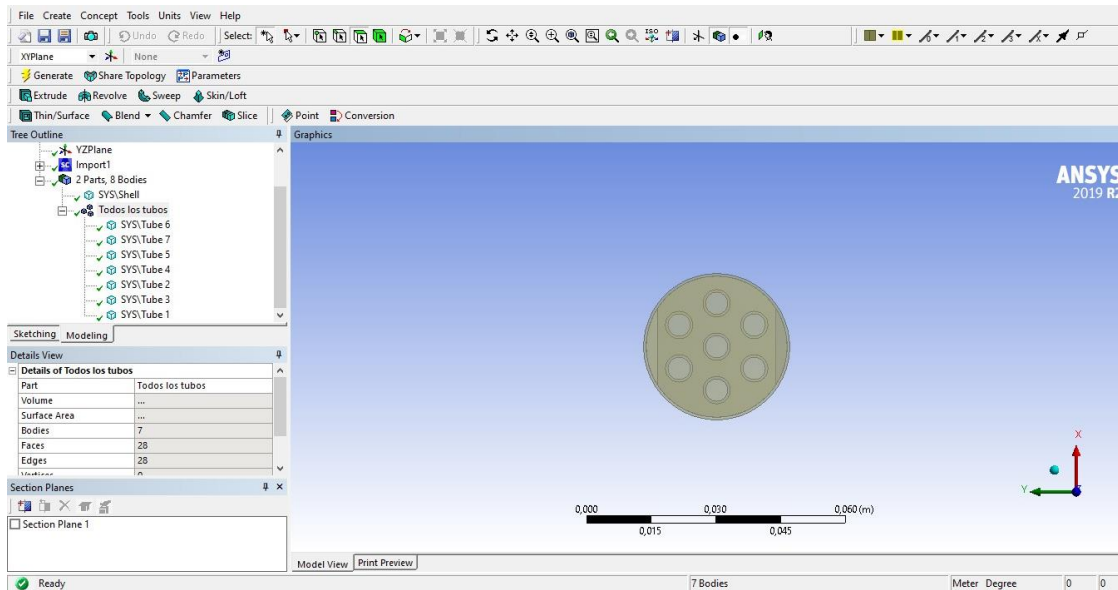


Figura 2.5. Deflectores (Fuente Propia)

El intercambiador de calor cuenta con dos buffles (deflectores) que sirven de sostén a los tubos como función principal y también permiten una buena distribución del fluido, además de que evita que se formen depósitos en el interior de la coraza. La Figura 2.5, muestra el modelo de dicha tecnología.

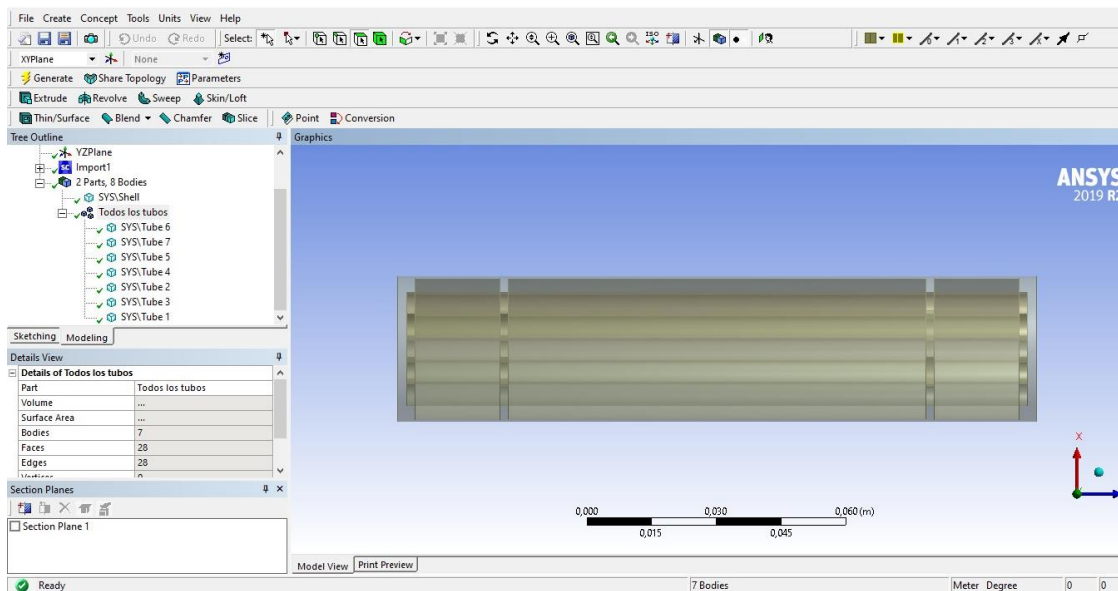


Figura 2.6. Ubicación de los deflectores. (Fuente Propia)

La Figura 2.6, pone en evidencia a los deflectores la ubicación y distribución a lo largo de los tubos. El material de los deflectores es de acrílico transparente, los buffles tienen una geometría muy peculiar debido a que se busca la reducción de vibraciones y turbulencia generada por la variación de la temperatura del fluido. Este dispositivo es fundamental ya que también impide el contacto entre los tubos.

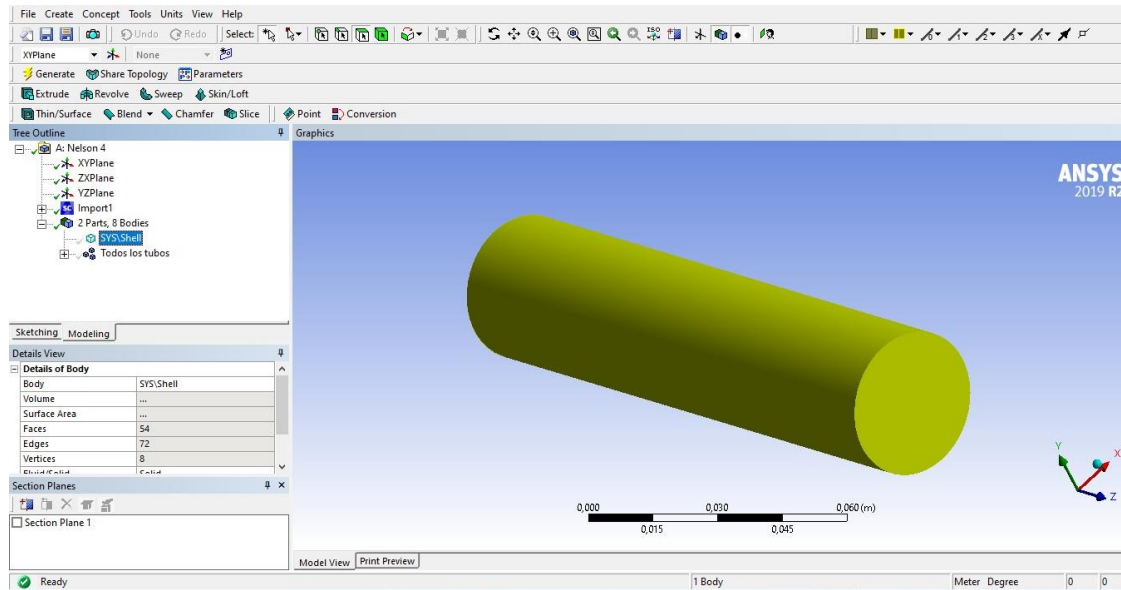


Figura 2.7. Coraza del intercambiador de calor. (Fuente Propia)

Después de completar la geometría de los tubos y de los deflectores, se procede a graficar la coraza del intercambiador de calor. Este dispositivo protege a los tubos, deflectores y, además, a través de su superficie interna se desplaza fluido frío conforme a las condiciones de operación (caudal de entrada del fluido frío hacia el intercambiador). La Figura 2.7, muestra el componente bien definido y revela su veracidad.

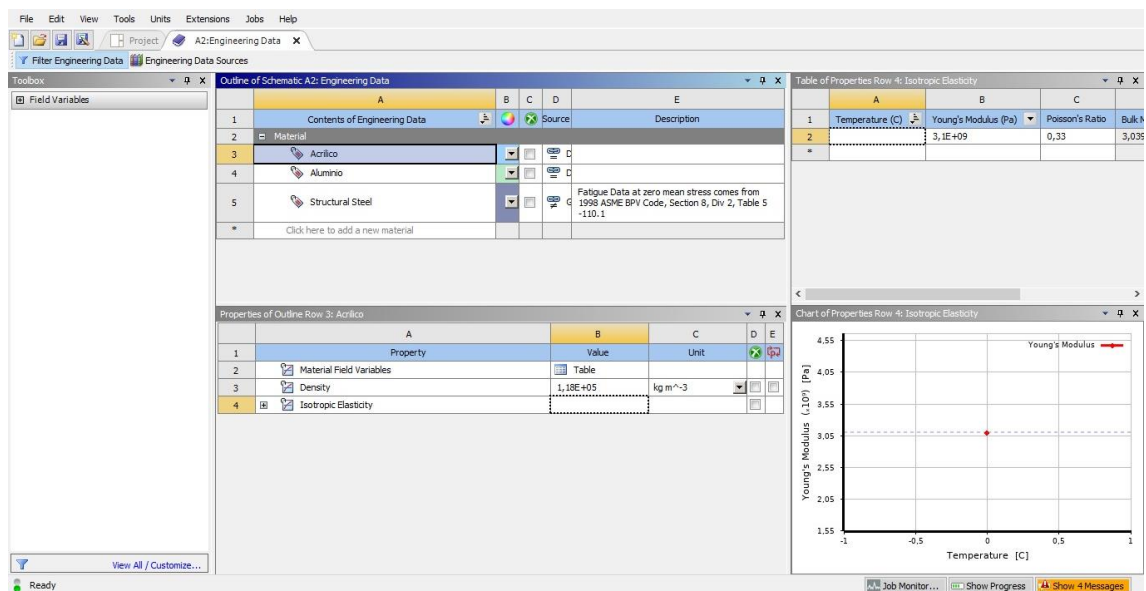


Figura 2.8. Configuración del material de la coraza. (Fuente Propia)

En la Figura 2.8, al igual que en los tubos, la coraza necesita el cambio de configuraciones como la selección del material (acrílico), de la misma manera es necesario ingresar el valor numérico de la densidad ($1,18 \times 10^5 \frac{kg}{m^3}$). Todo esto es fundamental para que el peso y dimensiones de la coraza sea similar a la realidad.

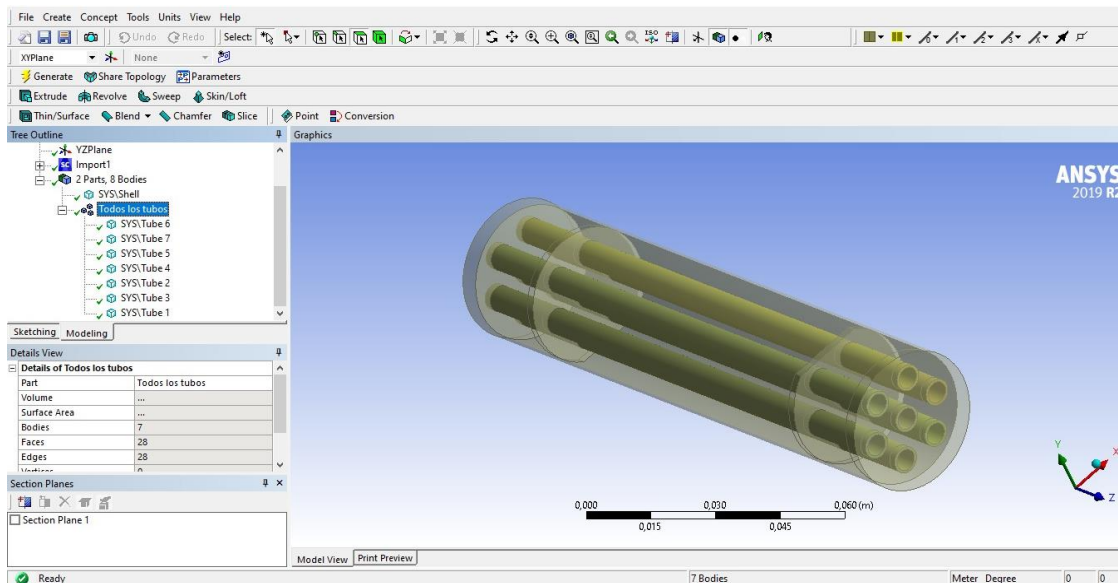


Figura 2.9. Vista interna de los componentes del intercambiador de calor. (Fuente Propia)

La Figura 2.9, representa una visión transparente de todos los componentes del intercambiador. Esta vista proporciona la estructura y geometría interna de los tubos adheridos a los deflectores y estos a la vez conectados a la coraza. También se habilita la visión de las entradas y salidas de los líquidos fríos y calientes que ingresan al intercambiador de calor.

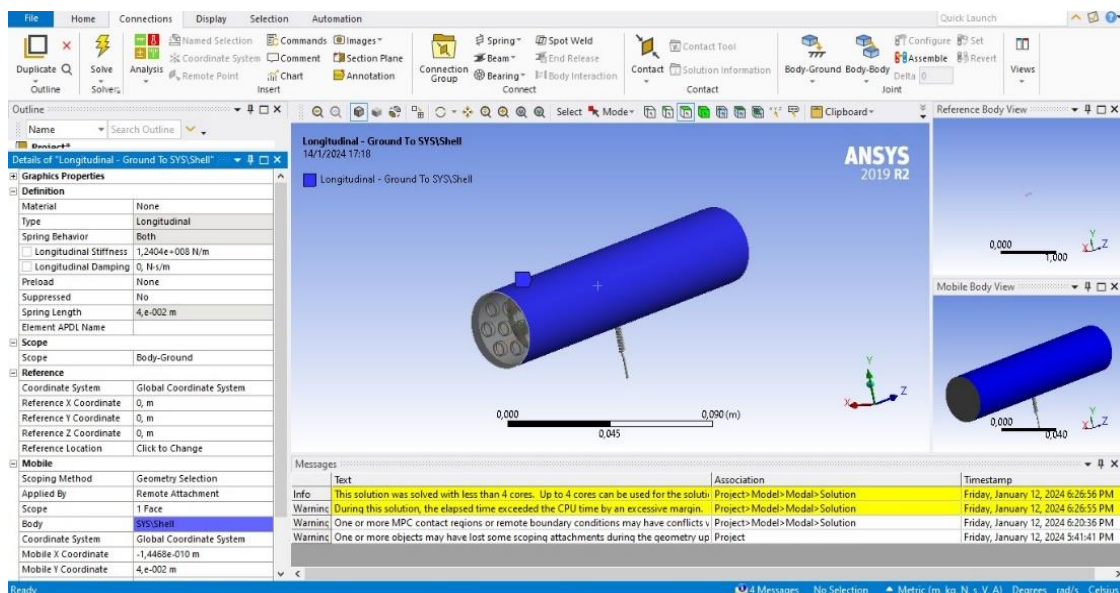


Figura 2.10. Modelo final de la simulación. (Fuente Propia)

Finalmente, en la Figura 2.10, se tiene una vista puntual del modelo final del intercambiador de calor de coraza y tubos, donde se distingue la coraza del intercambiador de color azul, los tubos internos son transparentes, y en la parte inferior se encuentra el resorte formando

un solo cuerpo con el intercambiador. El resorte facilita la entrada de un coeficiente de amortiguamiento “c” y la rigidez “k”.

Una vez finalizado el proceso del modelamiento matemático del intercambiador de calor y seleccionada las condiciones de operación, en este caso, la variación de la temperatura del fluido de trabajo (agua); se puede decir que la simulación esta lista para ser ejecutada y obtener los resultados conclusivos.

Mediciones experimentales en el LTC

A continuación, se detalla los equipos y componentes que están disposición que facilitan el trabajo de implementación y desarrollo del componente experimental.

Desbalanceador

El desbalanceador es un equipo que genera vibración la consta de un convertidor de frecuencias, conectado a un motor eléctrico, en la salida motor están ubicadas dos levas que tiene como función principal vibrar mientras éstas aumentan la velocidad (aumento de la frecuencia). La vibración de las levas permite que la mesa anclada a una tabla sea un solo cuerpo vibratorio. Sobre la superficie de la tabla se instala el intercambiador de calor considerando que todos los componentes están unidos entre sí (motor-levas-mesa-tabla).

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del motor.

Aspectos	Especificación de placa
Marca	SIEMENS
Referencia	1LA7 073-6YA60
Eficiencia (η [%])	0,5
Frecuencia [Hz]	60
Corriente (A [V])	220-440
Peso [kg]	5,7

En la Tabla 2.1, se encuentran las especificaciones técnicas del motor que está conectado al convertidor de frecuencias.



Figura 2.11. Convertidor de frecuencias. (Fuente Propia)

En la Figura 2.11, se puede observar el convertidor de frecuencias que es utilizado para cambiar la frecuencia de una señal de una forma controlada.



Figura 2.12. Soporte del motor. (Fuente Propia)

En la parte inferior del soporte se encuentra adherido el motor, y este motor sostiene dos levas que giran conforme aumenta la frecuencia y velocidad de giro. Ver Figura 2.12.



Figura 2.13. Mesa vibratoria. (Fuente Propia)

En la Figura 2.13, se puede apreciar una tabla que se posiciona en la parte superior del soporte, sobre esta mesa el intercambiador de calor de coraza y tubos será colocado para realizar las mediciones correspondientes a la parte experimental.

Analizador de vibraciones mano-brazo y cuerpo completo de 4 canales

El SVAN 958 es un analizador de vibraciones que cuenta con cuatro canales que son digitales en su totalidad, con una precisión tipo I (Norma ISO 8041). El equipo dispone de filtros transductores, de ponderación y adaptadores que son necesarios para realizar medidas triaxiales de las vibraciones brazo-mano y del cuerpo completo también, esto permite obtener resultados fáciles y confiables. Las especificaciones técnicas del acelerómetro en el ANEXO II.

Los canales son independientes, eso quiere decir que, funcionan simultáneamente con configuraciones, filtros y transductores distintos. La memoria interna, es de 32 Mb y es ampliable hasta 64 Mb, tiene la capacidad de acumular la evolución temporal de cada uno de los canales a lo largo de todas las pruebas implementadas.

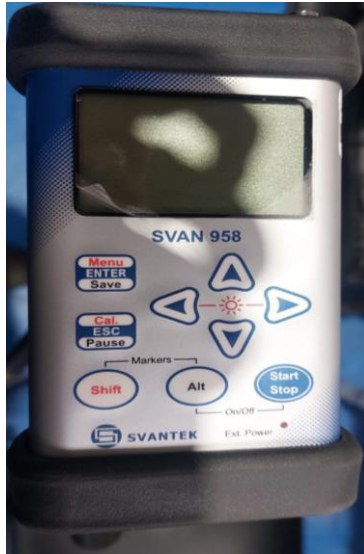


Figura 2.14. Analizador de vibraciones. (Fuente propia)

El analizador de la Figura 2.14, cuenta con la ventaja de medida de vibración mano-brazo, medida de vibración en cuerpo completo, descarga y procesado de datos en el PC por medio de una conexión USB. Además, el equipo cuenta con el software SVANPC ++, mediante el cual se puede procesar los datos obtenidos en la jornada laboral. (SVANTEK, 2008)

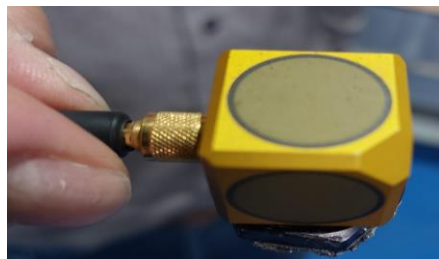


Figura 2.15. Sensor de vibraciones (Fuente Propia)

En la Figura 2.15, se aprecia el sensor de vibraciones, es un dispositivo muy sensible para captar movimientos de toda índole. El dispositivo se adhiere junto al intercambiador de calor cuando se inicia con las mediciones.

Análisis de las condiciones de operación: variación de la temperatura del fluido

En la validación experimental se realiza bajo los siguientes parámetros:

Protocolo 1: caudal fluido frío variable, caudal fluido caliente constante, temperatura fluido caliente variable

Protocolo 2: caudal fluido frío constante, caudal fluido caliente constante, temperatura fluido caliente variable

Fluido de trabajo: agua de la red pública

Dirección del fluido: contraflujo

Equipo desbalanceador (convertidor de frecuencias): 0 – 40 [Hz]

Rango de temperatura del fluido caliente: 30 – 65 [°C]

Unidad de medida del acelerómetro (SVAN 958): decibeles [dB]

3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Pruebas experimentales del componente

El siguiente capítulo presenta los resultados teóricos obtenidos mediante el uso del software Ansys 2019 R2 y los resultados obtenidos experimentalmente en el LTC de la Facultad de Ingeniería Mecánica, con ayuda del equipo de medición de vibraciones denominado acelerómetro (SVAN 958).

El HT33 es un tipo de intercambiador de calor compuesto por una carcasa y tubos, pertenece a una variedad de modelos que son diseñados para ser implementados con la unidad de servicio HT30XC, la cual nos proporciona las condiciones de operación en cada protocolo. La instalación del equipo en el ANEXO III.

Parte experimental en el LTC

Tabla 3.1. Condiciones de operación del protocolo 1 (condición 1)

PROTOCOLO 1				
Condición	Agua fría [°C]	Caudal frío [L/min]	Agua caliente [°C]	Caudal caliente [L/min]
1	12,1	2	30	1,5

La Tabla 3.1, pone en evidencia a la condición 1 del protocolo 1, tales son propuestas conforme a la capacidad de operación del intercambiador de calor de tubos y coraza que se encuentra disponible en el LTC.

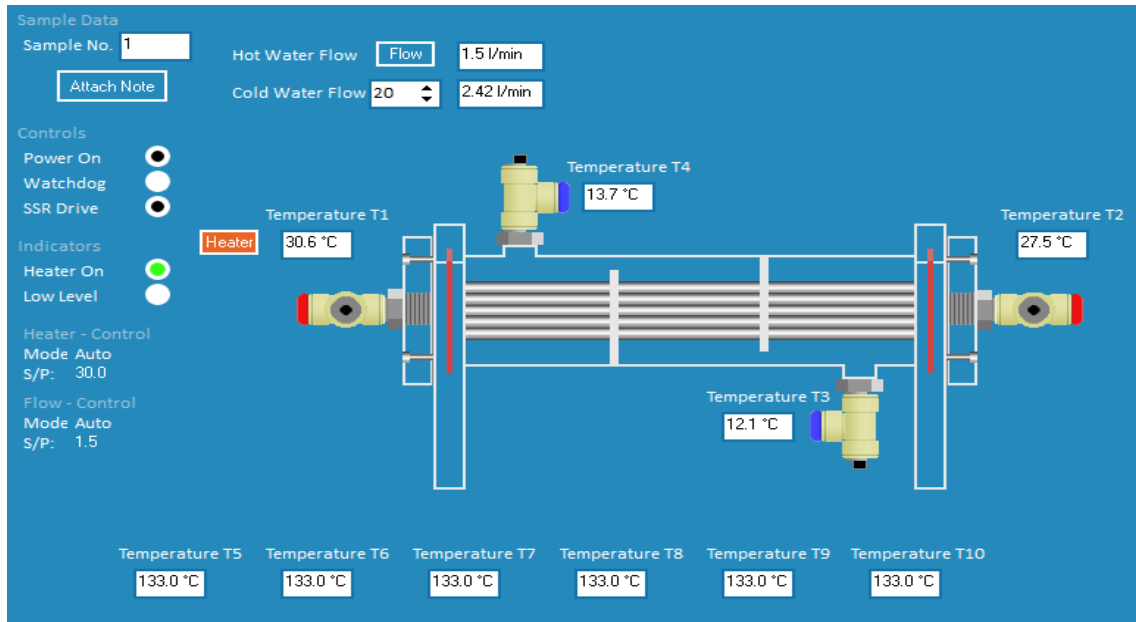


Figura 3.1. Condición 1 del protocolo 1. (Fuente Propia)

El software HT30XC presenta la primera condición del protocolo 1, como se muestra en la Figura 3.1, se despliega las magnitudes numéricas como el caudal del fluido caliente que ingresa al intercambiador de calor ($1,5 \left[\frac{L}{min} \right]$). La temperatura del fluido caliente es de $30^{\circ}C$. El caudal del fluido frío que ingresa al intercambiador de calor es $2 \left[\frac{L}{min} \right]$. La temperatura del fluido frío es $12,1^{\circ}C$, la temperatura del fluido frío (agua) que ingresa al intercambiador no se puede controlar debido a que el líquido proviene de la red pública y presenta muchas inconsistencias durante el transcurso del día, ya que también afecta la temperatura ambiente.

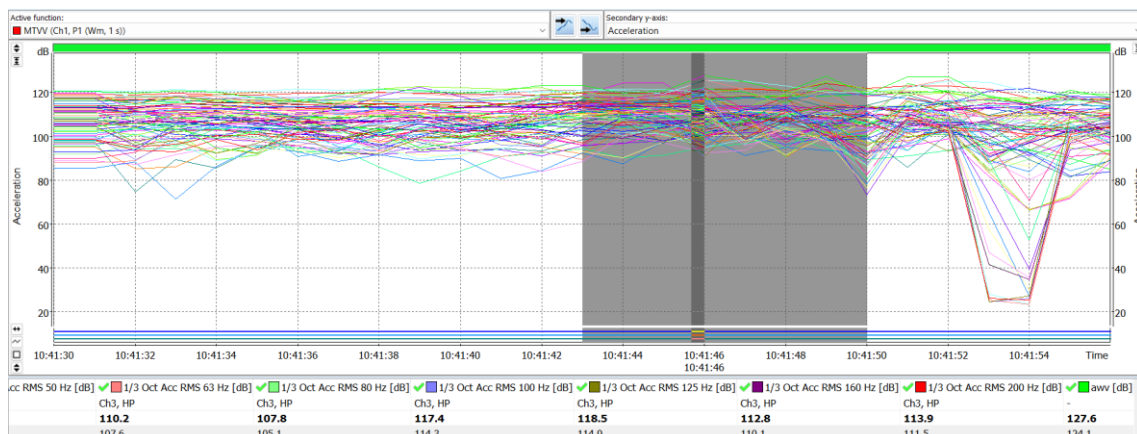


Figura 3.2. Espectro de frecuencia de la medida 1 del protocolo 1. (Fuente Propia)

En la Figura 3.2, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 25 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 13

segundos – fin: 20 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (16 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (a_w) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (a_{wv}) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVV_v), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.2. Aceleración máxima de la medida 1 del protocolo 1

CONDICIÓN 1				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	A_{wv} [dB]	Buffer
119,5	118,1	120,3	124,1	1

En la Tabla 3.2, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (119,5 [dB], 118,1 [dB] y 120,3 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 124,1 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 1 del protocolo 1.

Tabla 3.3. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 1 del protocolo 1

CONDICIÓN 1				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVV [dB]	Buffer
124,1	121,1	125,3	125,3	1

En la Tabla 3.3, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (124,1 [dB], 121,1 [dB] y 125,3 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 125,3 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 1 del protocolo 1.

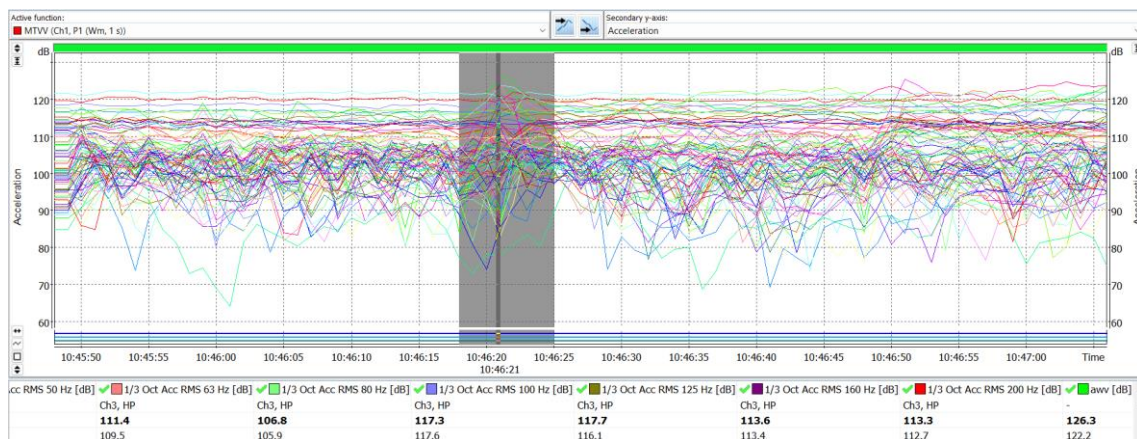


Figura 3.3. Espectro de frecuencia de la medida 2 del protocolo 1. (Fuente Propia)

En la Figura 3.3, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 70 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 28 segundos – fin: 35 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (31 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.4. Aceleración máxima de la medida 2 del protocolo 1

CONDICIÓN 1				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
117,4	112,7	119,7	122,2	2

En la Tabla 3.4, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (117,4 [dB], 112,7 [dB] y 119,7 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 122,2 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 1 del protocolo 1.

Tabla 3.5. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 2 del protocolo 1

CONDICIÓN 1				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
122	118,5	123,7	123,7	2

En la Tabla 3.5, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (122 [dB], 118,5 [dB] y 123,7 [dB]) y el valor máximo de

vibración transitoria promedio es de 123,7 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 1 del protocolo 1.

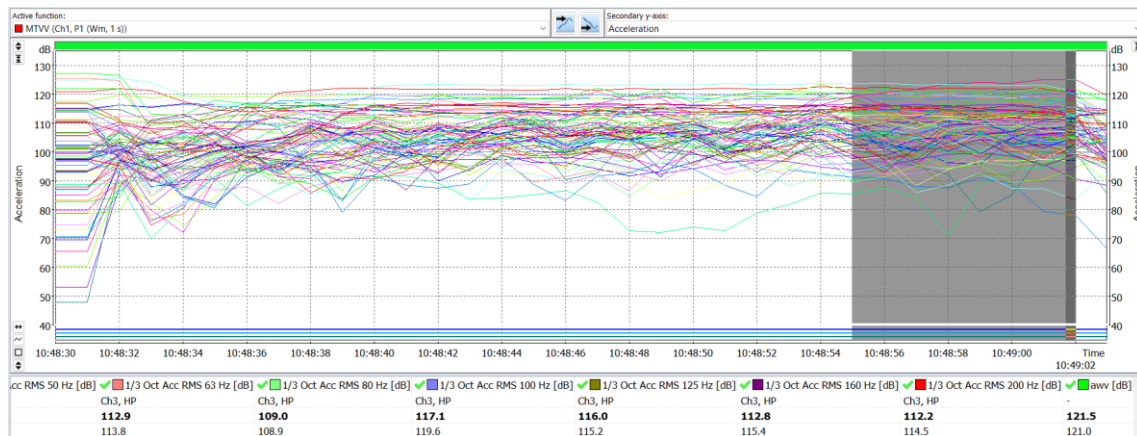


Figura 3.4. Espectro de frecuencia de la medida 3 del protocolo 1. (Fuente Propia)

En la Figura 3.4, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 31 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 24 segundos – fin: 31 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (31 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.6. Aceleración máxima de la medida 3 del protocolo 1

CONDICIÓN 1				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
114,1	112	119,3	121	3

En la Tabla 3.6, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (114,1 [dB], 112 [dB] y 119,3 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 121 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 1 del protocolo 1.

Tabla 3.7. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 3 del protocolo 1

CONDICIÓN 1				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
115,8	112,7	120,5	120,5	3

En la Tabla 3.7, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (115,8 [dB], 112,7 [dB] y 120,5 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 120,5 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 1 del protocolo 1.

Tabla 3.8. Condiciones de operación del protocolo 1 (condición 2)

PROTOCOLO 1				
Condición	Agua fría [°C]	Caudal frío [L/min]	Agua caliente [°C]	Caudal caliente [L/min]
2	13	3	45	1,5

La Tabla 3.8, pone en evidencia a la condición 2 del protocolo 1, tales son propuestas conforme a la capacidad de operación del intercambiador de calor de tubos y coraza que se encuentra disponible en el LTC.

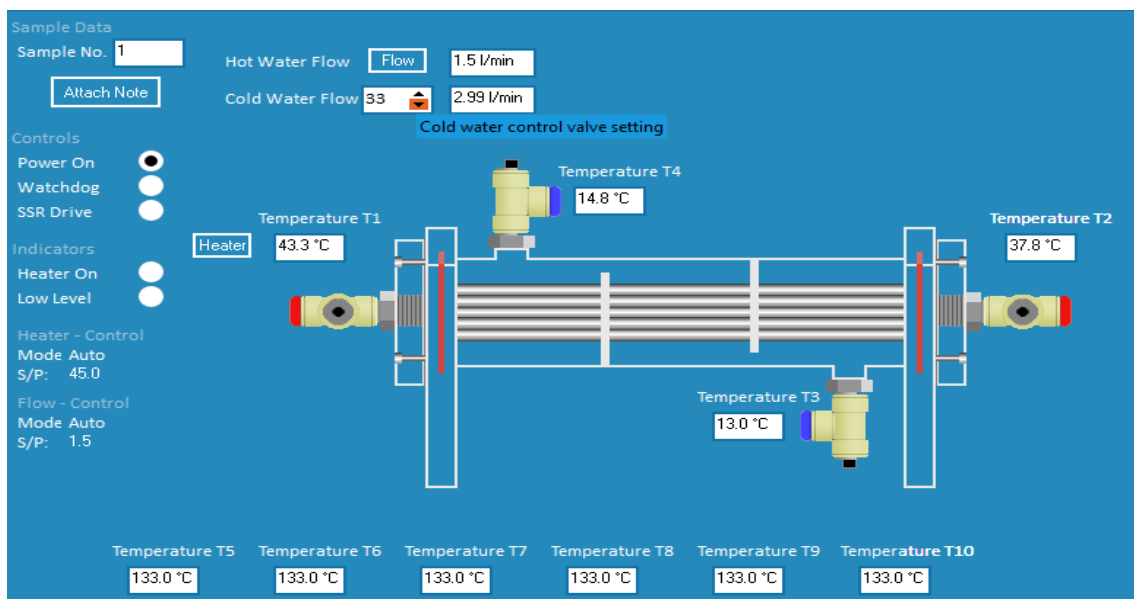


Figura 3.5. Condición 2 del protocolo 1. (Fuente Propia)

El software HT30XC presenta la segunda condición del protocolo 1, como se muestra en la Figura 3.5, se despliega las magnitudes numéricas como el caudal del fluido caliente que ingresa al intercambiador de calor ($1,5 \left[\frac{L}{min} \right]$). La temperatura del fluido caliente es 45°C. El caudal del fluido frío que ingresa al intercambiador de calor es $3 \left[\frac{L}{min} \right]$. La temperatura del fluido frío es 13°C, la temperatura del fluido frío (agua) que ingresa al intercambiador no se puede controlar debido a que el líquido proviene de la red pública y presenta muchas inconsistencias durante el transcurso del día, ya que también afecta la temperatura ambiente.

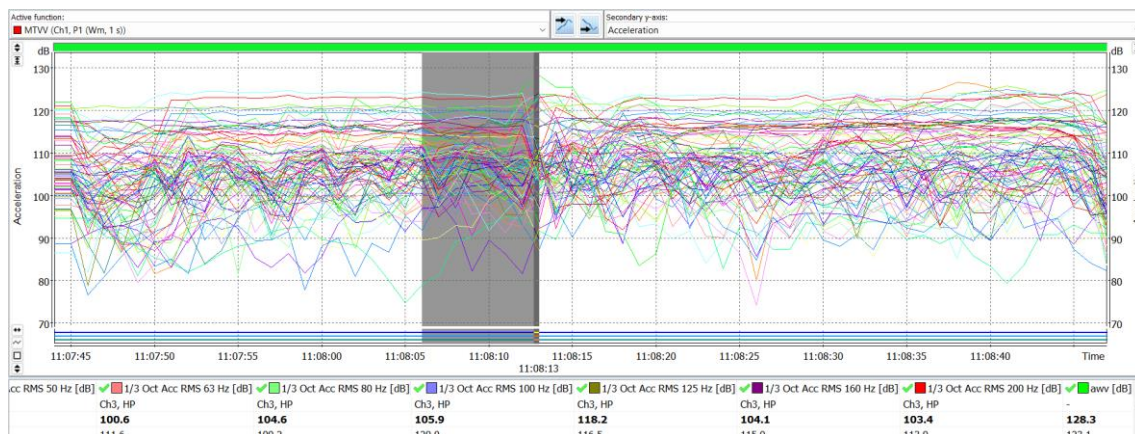


Figura 3.6. Espectro de frecuencia de la medida 4 del protocolo 1. (Fuente Propia)

En la Figura 3.6, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 60 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 26 segundos – fin: 33 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (33 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.9. Aceleración máxima de la medida 4 del protocolo 1

CONDICIÓN 2				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
118,1	116,8	119,6	123,1	4

En la Tabla 3.9, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (118,1 [dB], 116,8 [dB] y 119,6 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 123,1 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 2 del protocolo 1.

Tabla 3.10. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 4 del protocolo 1

CONDICIÓN 2				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
123	122,1	124,1	124,1	4

En la Tabla 3.10, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (123 [dB], 122,1 [dB] y 124,1 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 124,1 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 2 del protocolo 1.

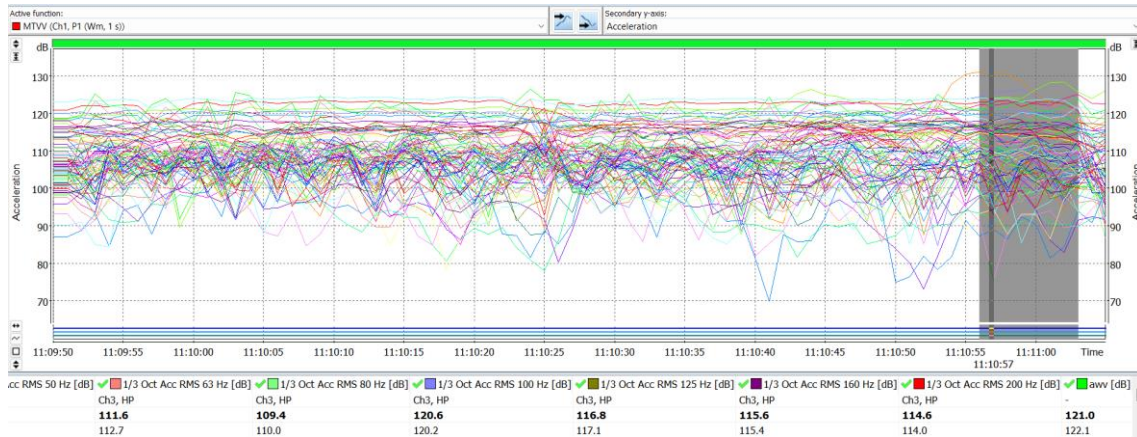


Figura 3.7. Espectro de frecuencia de la medida 5 del protocolo 1. (Fuente Propia)

En la Figura 3.7, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 73 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 66 segundos – fin: 73 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (67 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.11. Aceleración máxima de la medida 5 del protocolo 1

CONDICIÓN 2				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
116	115,2	119,5	122,1	5

En la Tabla 3.11, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (116 [dB], 115,2 [dB] y 119,5 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 122,1 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 2 del protocolo 1.

Tabla 3.12. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 5 del protocolo 1

CONDICIÓN 2				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
117,7	116,5	121,8	121,8	5

En la Tabla 3.12, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (117,7 [dB], 116,5 [dB] y 121,8 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 121,8 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 2 del protocolo 1.

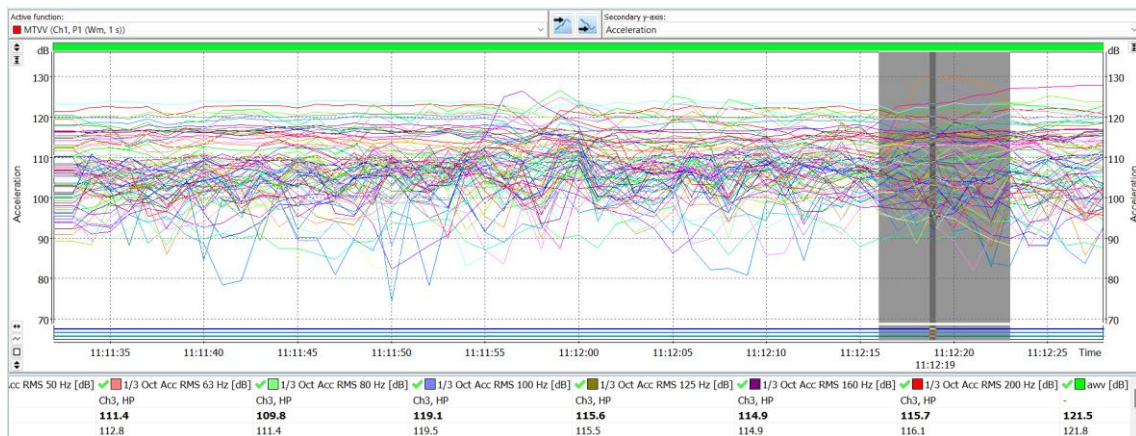


Figura 3.8. Espectro de frecuencia de la medida 6 del protocolo 1. (Fuente Propia)

En la Figura 3.8, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 50 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 41 segundos – fin: 48 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (44 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.13. Aceleración máxima de la medida 6 del protocolo 1

CONDICIÓN 2				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
114,7	115	119,6	121,8	6

En la Tabla 3.13, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (114,7 [dB], 115 [dB] y 119,6 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 121,8 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 2 del protocolo 1.

Tabla 3.14. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 6 del protocolo 1

CONDICIÓN 2				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
116,3	115,9	121,2	121,2	6

En la Tabla 3.14, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (116,3 [dB], 115,9 [dB] y 121,2 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 121,2 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 2 del protocolo 1.

Tabla 3.15. Condiciones de operación del protocolo 1 (condición 3)

PROTOCOLO 1				
Condición	Agua fría [°C]	Caudal frío [L/min]	Agua caliente [°C]	Caudal caliente [L/min]
3	12,7	5	65	1,5

La Tabla 3.15, pone en evidencia a la condición 3 del protocolo 1, tales son propuestas conforme a la capacidad de operación del intercambiador de calor de tubos y coraza que se encuentra disponible en el LTC.

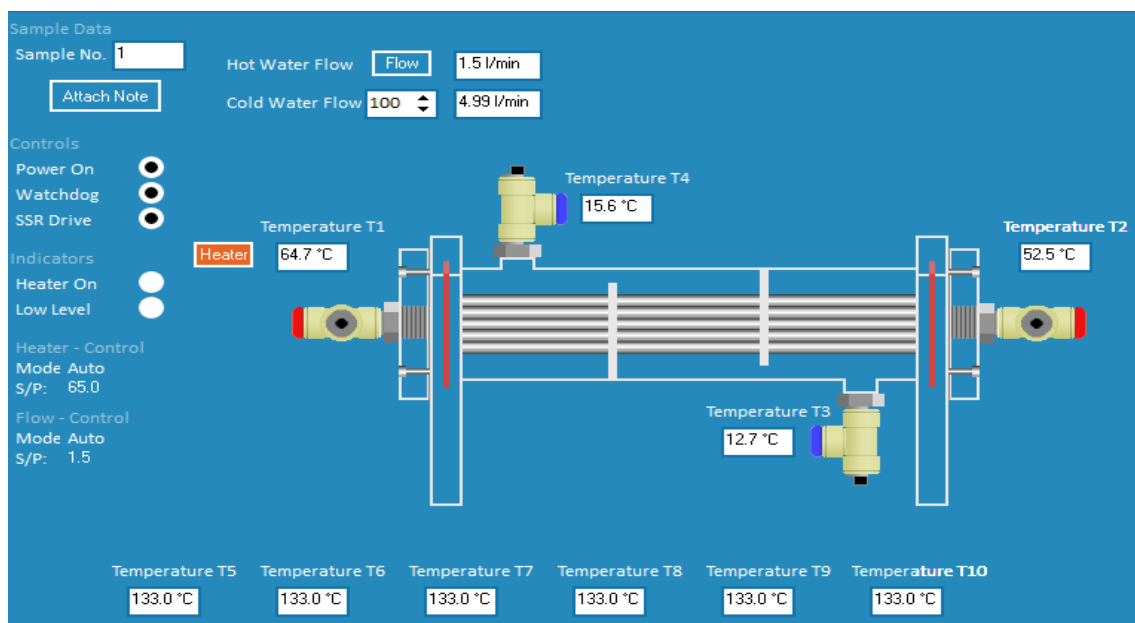


Figura 3.9. Condición 3 del protocolo 1. (Fuente Propia)

El software HT30XC presenta la tercera condición del protocolo 1, como se muestra en la Figura 3.9, se despliega las magnitudes numéricas como el caudal del fluido caliente que ingresa al intercambiador de calor ($1,5 \left[\frac{L}{min} \right]$). La temperatura del fluido caliente es 65°C . El caudal del fluido frío que ingresa al intercambiador de calor es $5 \left[\frac{L}{min} \right]$. La temperatura del fluido frío es $12,7^{\circ}\text{C}$, la temperatura del fluido frío (agua) que ingresa al intercambiador no se puede controlar debido a que el líquido proviene de la red pública y presenta muchas inconsistencias durante el transcurso del día, ya que también afecta la temperatura ambiente.

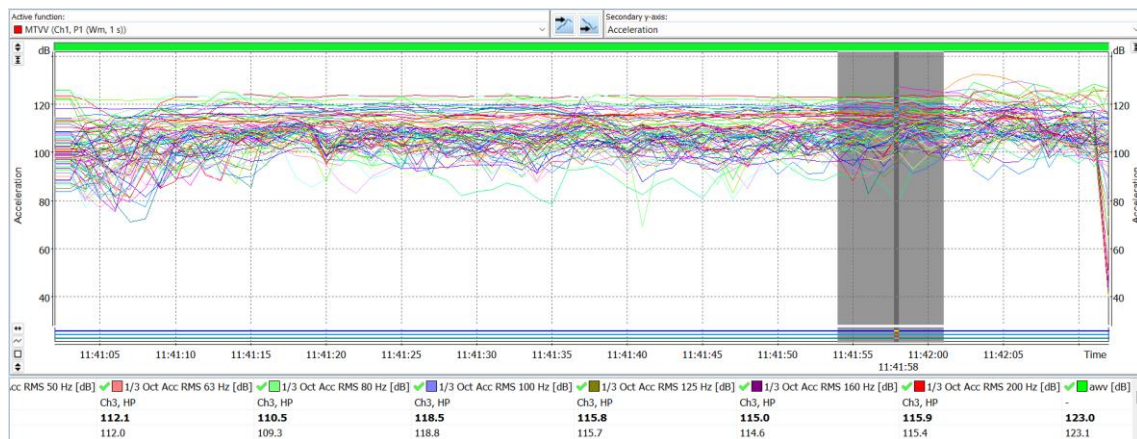


Figura 3.10. Espectro de frecuencia de la medida 7 del protocolo 1. (Fuente Propia)

En la Figura 3.10, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 65 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 49 segundos – fin: 56 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (53 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.16. Aceleración máxima de la medida 7 del protocolo 1

CONDICIÓN 3				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
118,8	115,6	119,8	123,1	7

En la Tabla 3.16, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (118,8 [dB], 115,6 [dB] y 119,8 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 123,1 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 3 del protocolo 1.

Tabla 3.17. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 7 del protocolo 1

CONDICIÓN 3				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
120,8	119,9	121,9	121,9	7

En la Tabla 3.17, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (120,8 [dB], 119,9 [dB] y 121,9 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 121,9 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 3 del protocolo 1.

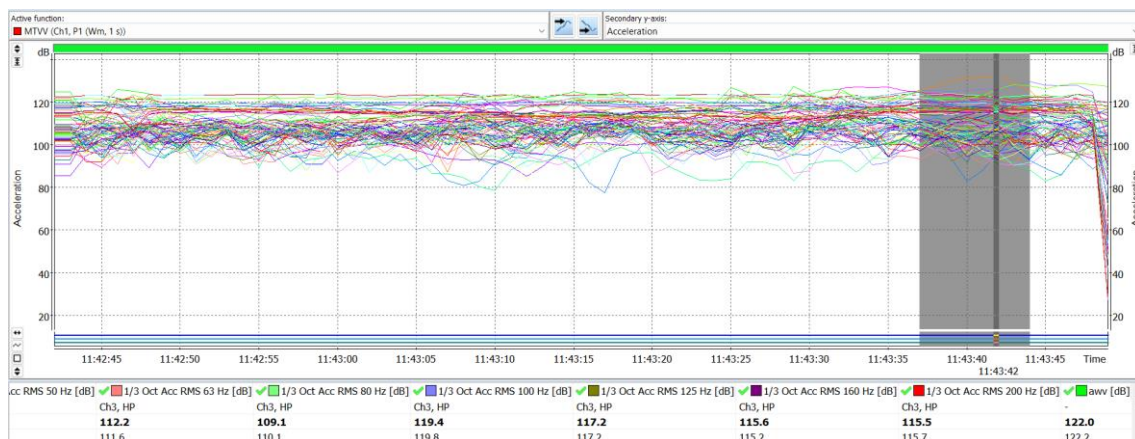


Figura 3.11. Espectro de frecuencia de la medida 8 del protocolo 1. (Fuente Propia)

En la Figura 3.11, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 60 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 52 segundos – fin: 59 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (57 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.18. Aceleración máxima de la medida 8 del protocolo 1

CONDICIÓN 3				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
117,2	116,8	118,3	122,2	8

En la Tabla 3.18, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (117,2 [dB], 116,8 [dB] y 118,3 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 122,2 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 3 del protocolo 1.

Tabla 3.19. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 8 del protocolo 1

CONDICIÓN 3				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
119,8	117,6	121,7	121,7	8

En la Tabla 3.19, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (119,8 [dB], 117,6 [dB] y 121,7 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 121,7 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 3 del protocolo 1.

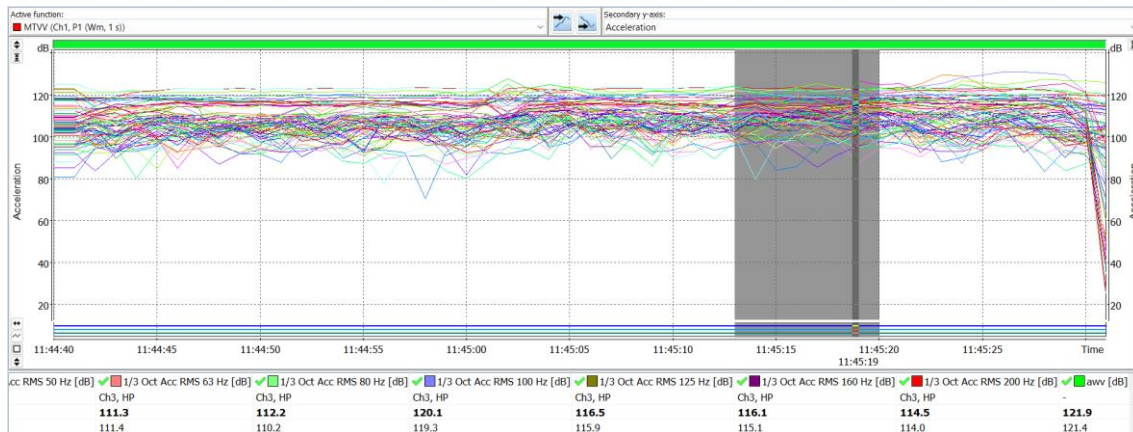


Figura 3.12. Espectro de frecuencia de la medida 9 del protocolo 1. (Fuente Propia)

En la Figura 3.12, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 50 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 33 segundos – fin: 40 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (39 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de

vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.20. Aceleración máxima de la medida 9 del protocolo 1

CONDICIÓN 3				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
116,9	114,1	118	121,4	9

En la Tabla 3.20, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (116,9 [dB], 114,1 [dB] y 118 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 121,4 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 3 del protocolo 1.

Tabla 3.21. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 9 del protocolo 1

CONDICIÓN 3				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
118,5	116	121,3	121,3	9

En la Tabla 3.21, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (118,5 [dB], 116 [dB] y 121,3 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 121,3 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 3 del protocolo 1.

Durante la evaluación experimental del protocolo 2, se muestra que cumple el componente de trabajo, es decir, se mantiene constante la presión (caudal frío) con la que ingresa el agua al intercambiador de calor y se modifica únicamente la temperatura del fluido caliente, finalmente, se procede a realizar la validación respectiva.

Tabla 3.22. Condiciones de operación del protocolo 2 (condición 4)

PROTOCOLO 2				
Condición	Agua fría [°C]	Caudal frío [L/min]	Agua caliente [°C]	Caudal caliente [L/min]
4	12,2	3	30	1,5

La Tabla 3.22, pone en evidencia a la condición 4 del protocolo 2, tales son propuestas conforme a la capacidad de operación del intercambiador de calor de tubos y coraza que se encuentra disponible en el LTC.

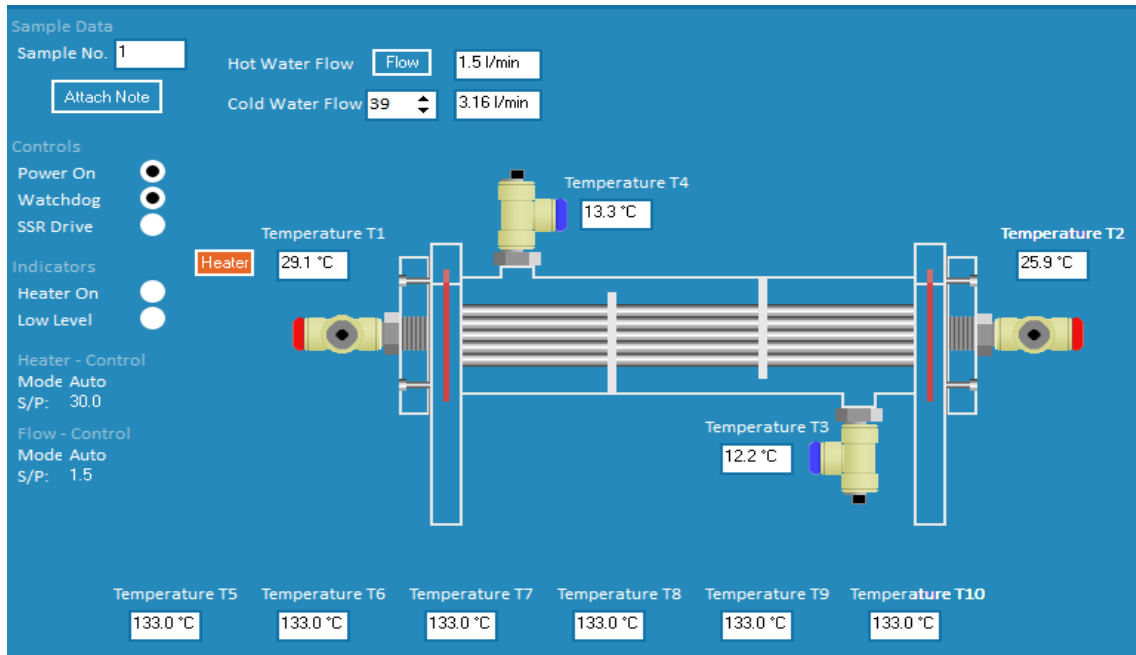


Figura 3.13. Condición 4 del protocolo 2. (Fuente Propia)

La cuarta condición de operación del protocolo 2 introducida en el software HT30XC, como se observa en la Figura 3.13, al igual que en el protocolo 1 tienen en común el caudal del fluido caliente que ingresa al intercambiador de calor ($1,5 \left[\frac{L}{min} \right]$). El caudal del fluido frío es $3 \left[\frac{L}{min} \right]$ (se mantiene constante). La temperatura del fluido caliente es 30°C . La temperatura del fluido frío es $12,2^{\circ}\text{C}$, la temperatura del fluido frío que ingresa al intercambiador se mantiene constante básicamente, una de las razones principales se debe a que se la temperatura ambiente no tiende a variar durante el proceso de la toma de datos respectivos para cada condición.

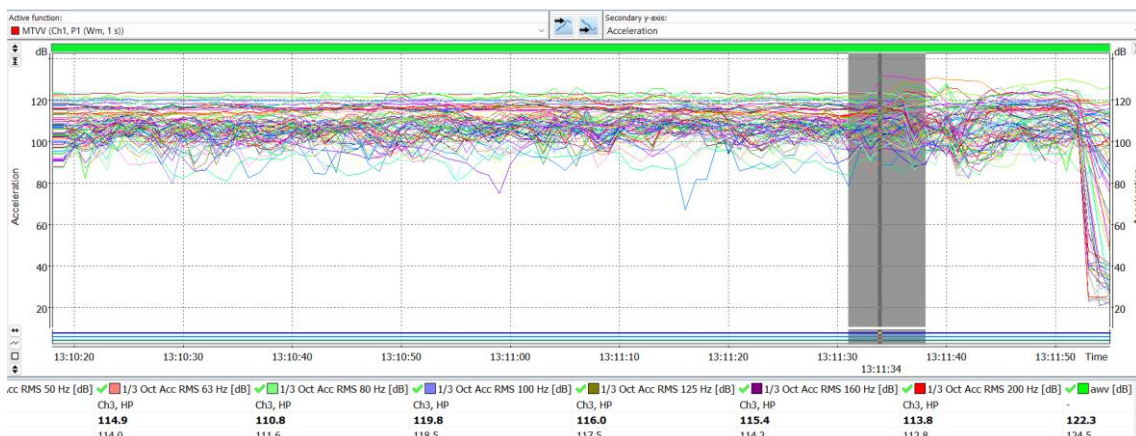


Figura 3.14. Espectro de frecuencia de la medida 10 del protocolo 2. (Fuente Propia)

En la Figura 3.14, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 90 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 71

segundos – fin: 78 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (74 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.23. Aceleración máxima de la medida 10 del protocolo 2

CONDICIÓN 4				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
119,5	120,3	119,1	124,5	10

En la Tabla 3.23, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (119,5 [dB], 120,3 [dB] y 119,1 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 124,5 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 4 del protocolo 2.

Tabla 3.24. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 10 del protocolo 2

CONDICIÓN 4				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
123,9	123,9	123,1	123,9	10

En la Tabla 3.24, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (123,9 [dB], 123,9 [dB] y 123,1 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 121 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 4 del protocolo 2.

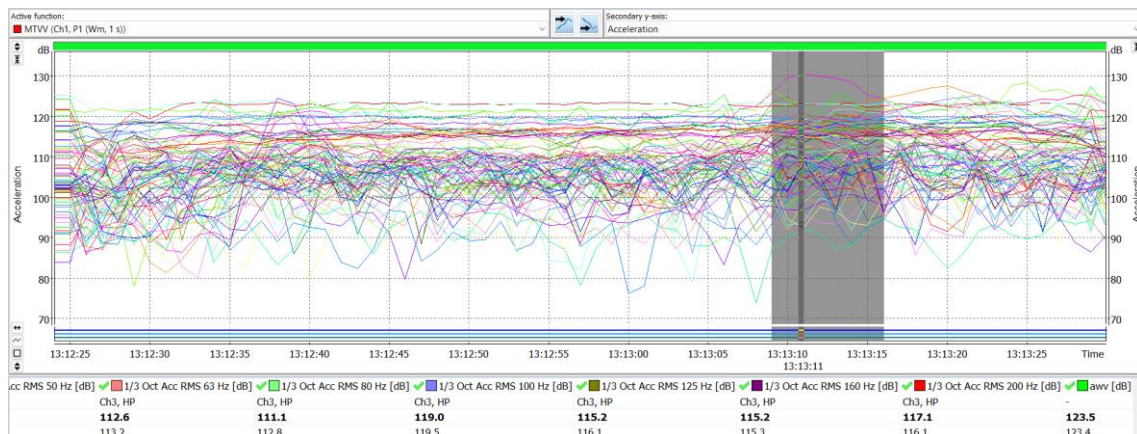


Figura 3.15. Espectro de frecuencia de la medida 11 del protocolo 2. (Fuente Propia)

En la Figura 3.15, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 63 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 44 segundos – fin: 51 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (46 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.25. Aceleración máxima de la medida 11 del protocolo 2

CONDICIÓN 4				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
118,2	117,4	119,9	123,4	11

En la Tabla 3.25, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (118,2 [dB], 117,4 [dB] y 119,9 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 123,4 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 4 del protocolo 2.

Tabla 3.26. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 11 del protocolo 2

CONDICIÓN 4				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
120,5	118,5	121,8	121,8	11

En la Tabla 3.26, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (120,5 [dB], 118,5 [dB] y 121,8 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 121,8 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 4 del protocolo 2.

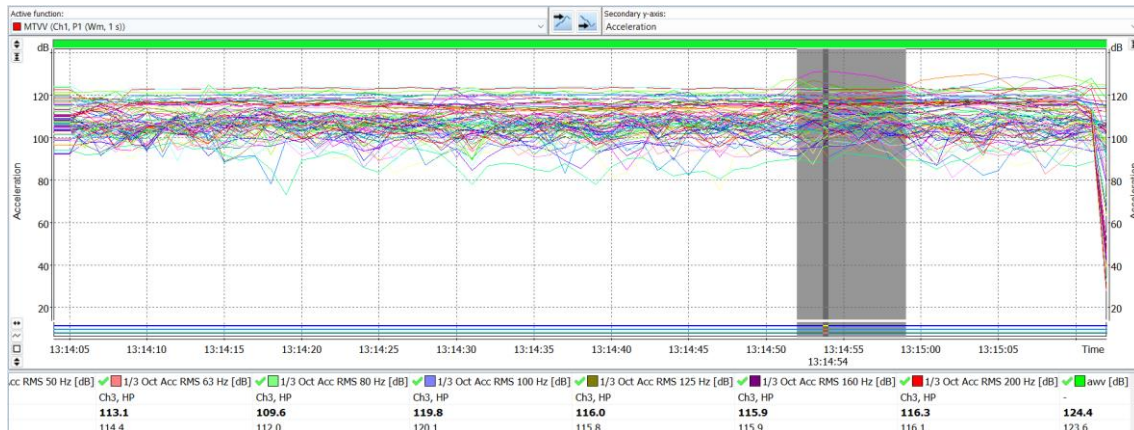


Figura 3.16. Espectro de frecuencia de la medida 12 del protocolo 2. (Fuente Propia)

En la Figura 3.16, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 65 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 47 segundos – fin: 54 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (49 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.27. Aceleración máxima de la medida 12 del protocolo 2

CONDICIÓN 4				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
118,1	116,8	120,7	123,6	12

En la Tabla 3.27, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (118,1 [dB], 116,8 [dB] y 120,7 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 123,6 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 4 del protocolo 2.

Tabla 3.28. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 12 del protocolo 2

CONDICIÓN 4				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
120,1	118	122,5	122,5	12

En la Tabla 3.28, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (120,1 [dB], 118 [dB] y 122,5 [dB]) y el valor máximo de

vibración transitoria promedio es de 122,5 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 4 del protocolo 2.

Tabla 3.29. Condiciones de operación del protocolo 2 (condición 5)

PROTOCOLO 2				
Condición	Agua fría [°C]	Caudal frío [L/min]	Agua caliente [°C]	Caudal caliente [L/min]
5	12,2	3	40	1,5

La Tabla 3.29, pone en evidencia a la condición 5 del protocolo 2, tales son propuestas conforme a la capacidad de operación del intercambiador de calor de tubos y coraza que se encuentra disponible en el LTC.

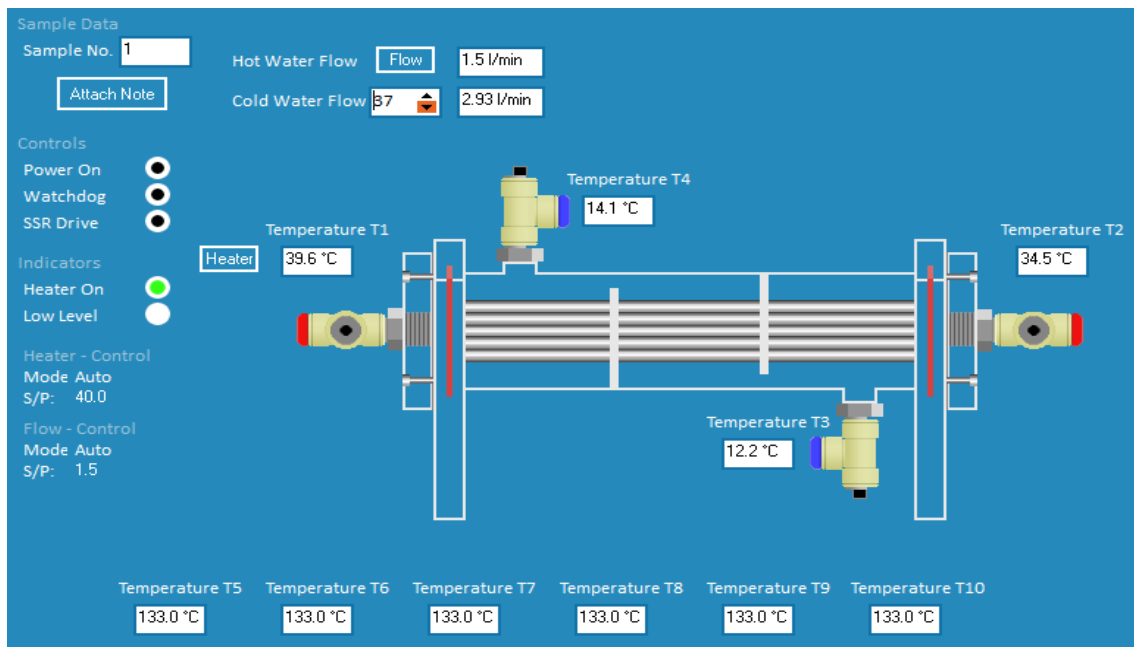


Figura 3.17. Condición 5 del protocolo 2. (Fuente Propia)

La quinta condición de operación del protocolo 2 introducida en el software HT30XC, como se observa en la Figura 3.17, al igual que en el protocolo 1 tienen en común el caudal del fluido caliente que ingresa al intercambiador de calor ($1,5 \left[\frac{L}{min} \right]$). El caudal del fluido frío es $3 \left[\frac{L}{min} \right]$ (se mantiene constante). La temperatura del fluido caliente es 40°C . La temperatura del fluido frío es $12,2^{\circ}\text{C}$, la temperatura del fluido frío que ingresa al intercambiador se mantiene constante básicamente, una de las razones principales se debe a que se la temperatura ambiente no tiende a variar durante el proceso de la toma de datos respectivos para cada condición.

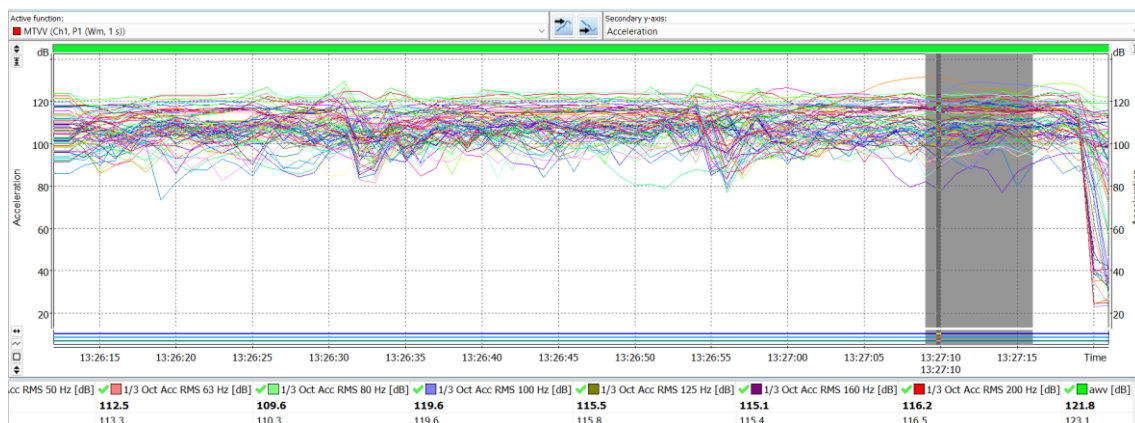


Figura 3.18. Espectro de frecuencia de la medida 13 del protocolo 2. (Fuente Propia)

En la Figura 3.18, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 65 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 54 segundos – fin: 61 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (55 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.30. Aceleración máxima de la medida 13 del protocolo 2

CONDICIÓN 5				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
118,3	115,9	119,8	123,1	13

En la Tabla 3.30, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (118,3 [dB], 115,9 [dB] y 119,8 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 123,1 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 5 del protocolo 2.

Tabla 3.31. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 13 del protocolo 2

CONDICIÓN 5				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
120,9	117,5	122,8	122,8	13

En la Tabla 3.31, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (120,9 [dB], 117,5 [dB] y 122,8 [dB]) y el valor máximo de

vibración transitoria promedio es de 122,8 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 5 del protocolo 2.

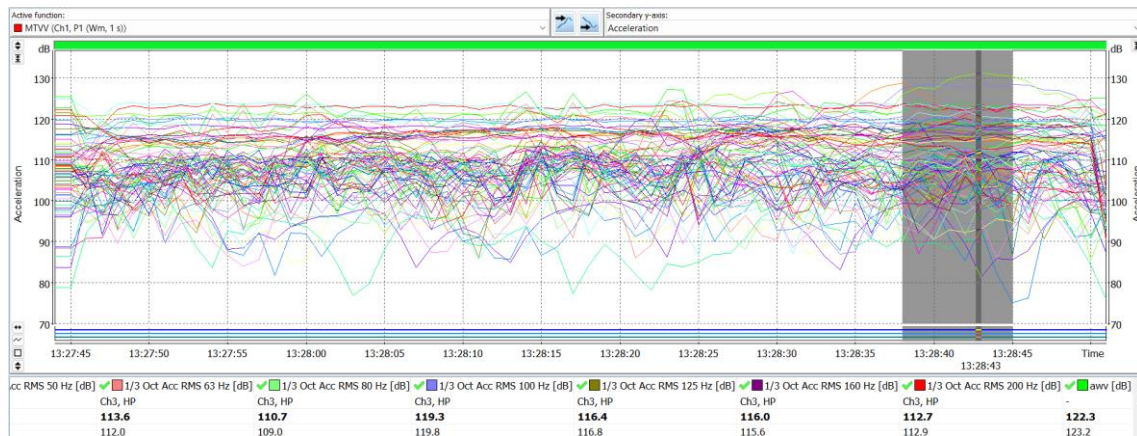


Figura 3.19. Espectro de frecuencia de la medida 14 del protocolo 2. (Fuente Propia)

En la Figura 3.19, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 65 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 53 segundos – fin: 60 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (58 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.32. Aceleración máxima de la medida 14 del protocolo 2

CONDICIÓN 5				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
118,3	115,4	120,2	123,2	14

En la Tabla 3.32, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (118,3 [dB], 115,4 [dB] y 120,2 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 123,2 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 5 del protocolo 2.

Tabla 3.33. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 14 del protocolo 2

CONDICIÓN 5				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
120,2	115,7	122	122,0	14

En la Tabla 3.33, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (120,2 [dB], 115,7 [dB] y 122,0 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 122,0 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 5 del protocolo 2.

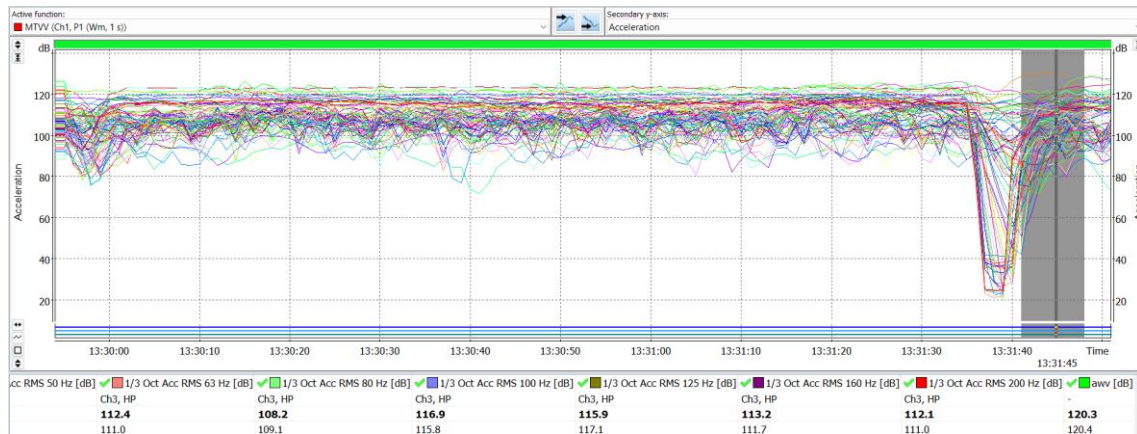


Figura 3.20. Espectro de frecuencia de la medida 15 del protocolo 2. (Fuente Propia)

En la Figura 3.20, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 110 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 101 segundos – fin: 108 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (105 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.34. Aceleración máxima de la medida 15 del protocolo 2

CONDICIÓN 5				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
114,1	115,4	117	120,4	15

En la Tabla 3.34, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (114,1 [dB], 115,4 [dB] y 117 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 120,4 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 5 del protocolo 2.

Tabla 3.35. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 15 del protocolo 2

Condición 5				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
116,7	116,2	119,6	119,6	15

En la Tabla 3.35, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (116,7 [dB], 116,2 [dB] y 119,6 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 119,6 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 5 del protocolo 2.

Tabla 3.36. Condiciones de operación del protocolo 2 (condición 6)

PROTOCOLO 2				
Condición	Agua fría [°C]	Caudal frío [L/min]	Agua caliente [°C]	Caudal caliente [L/min]
6	12,1	3	50	1,5

La Tabla 3.36, pone en evidencia a la condición 6 del protocolo 2, tales son propuestas conforme a la capacidad de operación del intercambiador de calor de tubos y coraza que se encuentra disponible en el LTC.

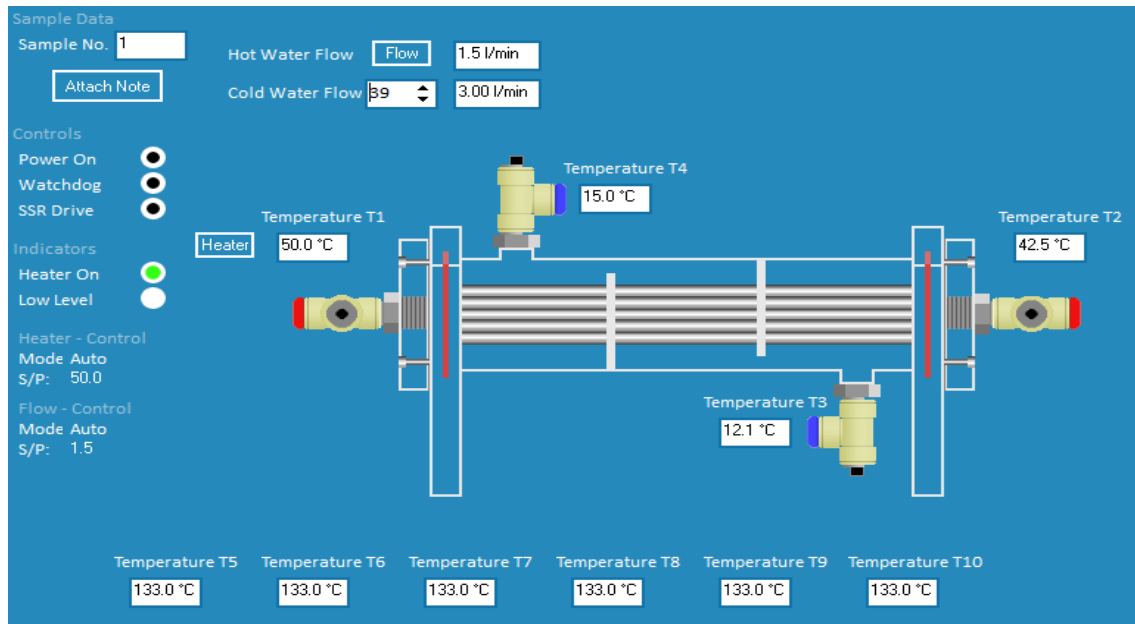


Figura 3.21. Condición 6 del protocolo 2. (Fuente Propia)

La sexta condición de operación del protocolo 2 introducida en el software HT30XC, como se observa en la Figura 3.21, al igual que en el protocolo 1 tienen en común el caudal del fluido caliente que ingresa al intercambiador de calor ($1,5 \left[\frac{L}{min} \right]$). El caudal del fluido frío es

$3 \left[\frac{L}{min} \right]$ (se mantiene constante). La temperatura del fluido caliente es 50°C. La temperatura del fluido frío es 12,1°C, la temperatura del fluido frío que ingresa al intercambiador se mantiene constante básicamente, una de las razones principales se debe a que se la temperatura ambiente no tiende a variar durante el proceso de la toma de datos respectivos para cada condición.

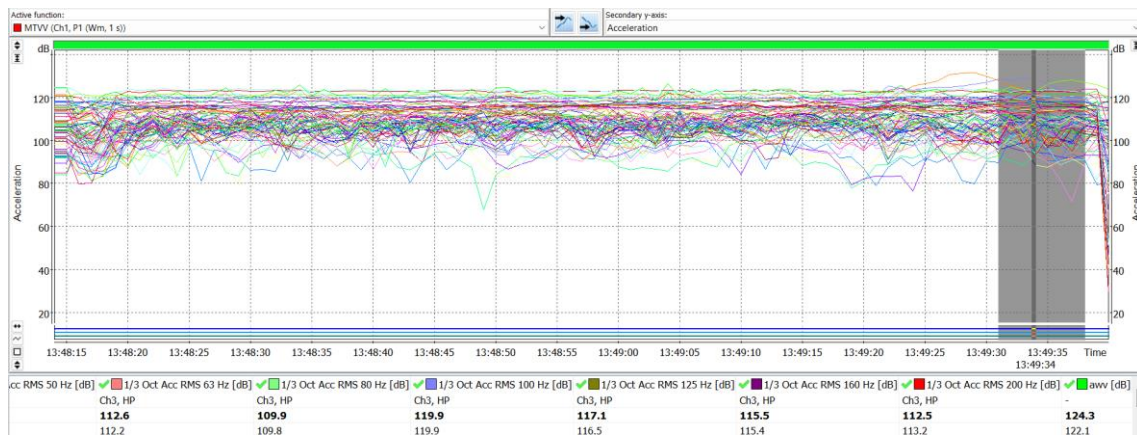


Figura 3.22. Espectro de frecuencia de la medida 16 del protocolo 2. (Fuente Propia)

En la Figura 3.22, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 83 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 76 segundos – fin: 83 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (79 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.37. Aceleración máxima de la medida 16 del protocolo 2

CONDICIÓN 6				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
117,1	114	119,4	122,1	16

En la Tabla 3.37, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (117,1 [dB], 114 [dB] y 119,4 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 122,1 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 6 del protocolo 2.

Tabla 3.38. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 16 del protocolo 2

CONDICIÓN 6				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
119,3	116,8	121,1	121,1	16

En la Tabla 3.38, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (119,3 [dB], 116,8 [dB] y 121,1 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 121,1 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 6 del protocolo 2.

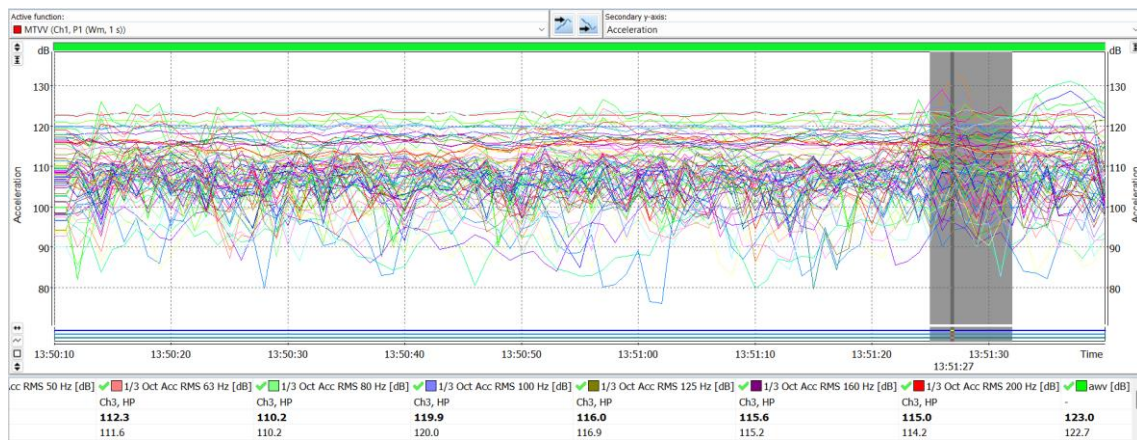


Figura 3.23. Espectro de frecuencia de la medida 17 del protocolo 2. (Fuente Propia)

En la Figura 3.23, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 88 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 75 segundos – fin: 82 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (77 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.39. Aceleración máxima de la medida 17 del protocolo 2

CONDICIÓN 6				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
117	116,1	119,8	122,7	17

En la Tabla 3.39, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (117 [dB], 116,1 [dB] y 119,8 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 122,7 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 6 del protocolo 2.

Tabla 3.40. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 17 del protocolo 2

CONDICIÓN 6				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
119	118,1	121,9	121,9	17

En la Tabla 3.40, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (119 [dB], 118,1 [dB] y 121,9 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 121,9 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 6 del protocolo 2.

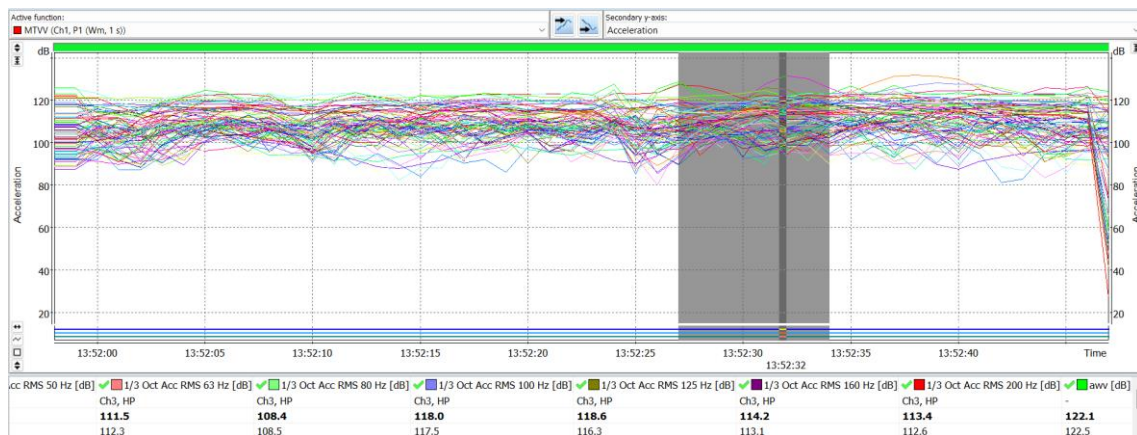


Figura 3.24. Espectro de frecuencia de la medida 18 del protocolo 2. (Fuente Propia)

En la Figura 3.24, se puede observar el espectro de frecuencias obtenidas en el software SvanPC ++ durante un lapso de 45 segundos. En un rango de 7 segundos (inicio: 29 segundos – fin: 36 segundos) por medio del cursor se selecciona donde se encuentra el pico más grande (32 segundos), se adquiere valores numéricos de tres canales tanto para la aceleración máxima (aw) como también el valor máximo de vibración transitoria (MTVV). El software permite adquirir directamente el valor de aceleración máxima promedio (awv) para los 7 segundos, tal situación no es la misma para la medida del valor máximo de vibración transitoria promedio (MTVVv), en este caso se escoge la cifra más grande entre los 3 canales.

Tabla 3.41. Aceleración máxima de la medida 18 del protocolo 2

CONDICIÓN 6				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	Awv [dB]	Buffer
118	116,1	118,6	122,5	18

En la Tabla 3.41, se puede contemplar los valores numéricos de la aceleración máxima en los canales 1, 2 y 3 (118 [dB], 116,1 [dB] y 118,6 [dB]) y la aceleración máxima promedio es de 122,5 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 6 del protocolo 2.

Tabla 3.42. Valor máximo de vibración transitoria de la medida 18 del protocolo 2

CONDICIÓN 6				
Canal 1	Canal 2	Canal 3	MTVVv [dB]	Buffer
126,7	120,5	120,9	126,7	18

En la Tabla 3.42, se puede percibir las cifras numéricas del valor máximo de vibración transitoria en los canales 1, 2 y 3 (126,9 [dB], 120,5 [dB] y 120,9 [dB]) y el valor máximo de vibración transitoria promedio es de 126,7 [dB]. Todo esto perteneciente a la condición 6 del protocolo 2.

Los valores numéricos obtenidos por el software SVAN 958 permiten conseguir la gráfica de aceleración máxima (aw). Cabe mencionar que en cada buffer (18 medidas) se elige un rango de 7 segundos y el cursor indica el punto más alto en cada espectro de frecuencia, es decir, se escoge el valor de aceleración máxima promedio (awv) de dicho tramo en específico.

3.2 Resultados experimentales y simulación

En la siguiente sección se expone los resultados finales experimentales y de la simulación. Los resultados son los siguientes:

Resultados experimentales en el LTC

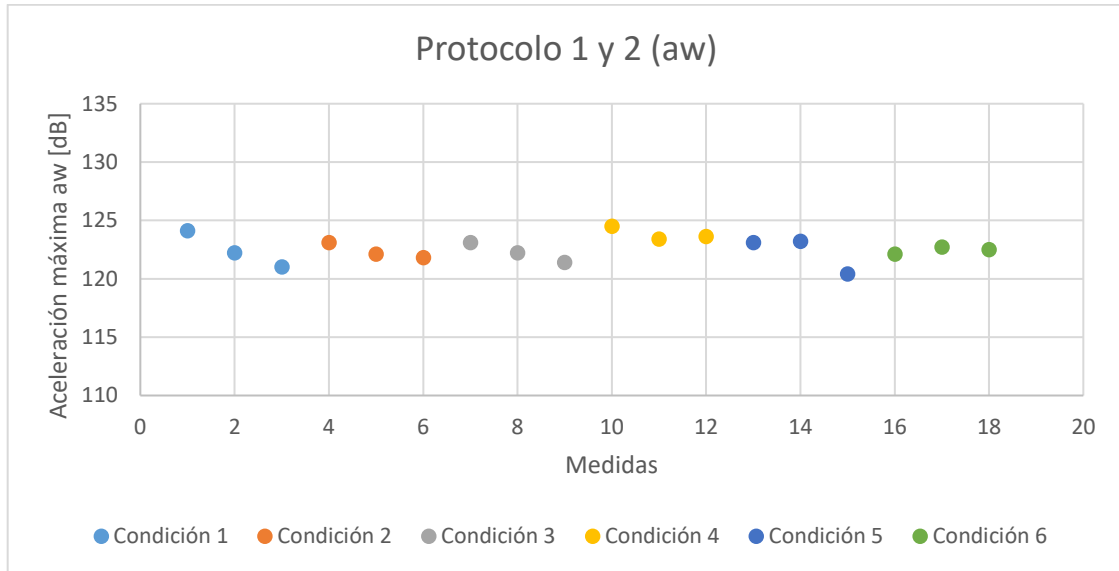


Figura 3.25. Aceleración máxima del protocolo 1 y 2. (Fuente Propia)

La Figura 3.25, favorece la apreciación de la secuencia de la aceleración máxima en cada condición propuesta anteriormente tanto para el protocolo 1 como para el protocolo 2. La información es sumamente interesante ya que revela el comportamiento del intercambiador de calor cuando se varía el caudal de entrada del agua fría y se altera la temperatura de entrada del agua caliente, perteneciente al protocolo 1 (condición 1 – condición 3). En el caso del protocolo 2 (condición 4 – condición 6) se mantiene constante el caudal de entrada del agua fría y se modifica únicamente la temperatura de entrada del agua caliente.

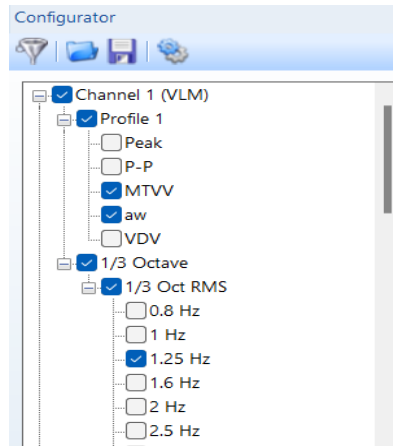


Figura 3.26. Frecuencia 1,25 Hz. (SvanPC++)

En la Figura 3.26, se halla la frecuencia de 1,25 Hz, donde se encuentra el pico más alto de todo el espectro de frecuencia, el cual también significa que se ubica el valor de aceleración máxima promedio (awv).

Tabla 3.43. Desplazamiento de la parte experimental de medición de vibraciones

Condiciones	Mediciones	Aceleración máxima promedio Awv	Aceleración de referencia \ddot{x}_0	Aceleración en $\frac{m}{s^2}$ $ \ddot{x}_0 $	Frecuencia f	Desplazamiento x
1	1	127,6	1,00E-06	5,90E-04	1,25E+00	9,56E-06
	2	126,3	1,00E-06	5,53E-04	1,25E+00	8,96E-06
	3	121,5	1,00E-06	4,35E-04	1,25E+00	7,05E-06
2	4	128,3	1,00E-06	6,11E-04	1,25E+00	9,90E-06
	5	126,6	1,00E-06	5,61E-04	1,25E+00	9,10E-06
	6	126,6	1,00E-06	5,61E-04	1,25E+00	9,10E-06
3	7	129,1	1,00E-06	6,36E-04	1,25E+00	1,03E-05
	8	127,4	1,00E-06	5,84E-04	1,25E+00	9,47E-06
	9	127,8	1,00E-06	5,96E-04	1,25E+00	9,66E-06
4	10	128,1	1,00E-06	6,05E-04	1,25E+00	9,81E-06
	11	127,3	1,00E-06	5,81E-04	1,25E+00	9,42E-06
	12	126,2	1,00E-06	5,50E-04	1,25E+00	8,92E-06
5	13	129,6	1,00E-06	6,52E-04	1,25E+00	1,06E-05
	14	127,2	1,00E-06	5,78E-04	1,25E+00	9,37E-06
	15	126,3	1,00E-06	5,53E-04	1,25E+00	8,96E-06
6	16	126,5	1,00E-06	5,58E-04	1,25E+00	9,05E-06
	17	128,1	1,00E-06	6,05E-04	1,25E+00	9,81E-06
	18	128,8	1,00E-06	6,26E-04	1,25E+00	1,02E-05

Los resultados obtenidos de aceleración máxima (aw) en decibeles [dB], son transformados al sistema internacional $[\frac{m}{s^2}]$ con la Ecuación 1.7. Finalmente, los valores numéricos obtenidos experimentalmente en $[\frac{m}{s^2}]$ son transformados a desplazamiento en metros [m]

con la Ecuación 1.9, los términos son comparados con los desplazamientos alcanzados en la simulación. La Tabla 3.43, pone en evidencia los desplazamientos para cada protocolo.

Resultados de la simulación

Los resultados finales de la simulación implementados en el software Ansys 2019 R2, son los siguientes:

Tabular Data					
	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Damped Frequency [Hz]	<input type="checkbox"/> Stability [Hz]	<input type="checkbox"/> Modal Damping Ratio	<input type="checkbox"/> Logarithmic Decrement
1	1,	2,6818e-003	-5,5836e-012	2,082e-009	-1,3082e-008
2	2,	0,66077	-0,18272	0,26653	-1,7375
3	3,	1,3223	-8,9549e-008	6,7721e-008	-4,255e-007

Figura 3.27. Frecuencia amortiguada simulación. (Ansys 2019 R2)

La Figura 3.27, muestra los datos tabulados de la simulación para los tres ejes de desplazamiento, en el cual cabe recalcar que la frecuencia amortiguada aproximada es 1,32 Hz.

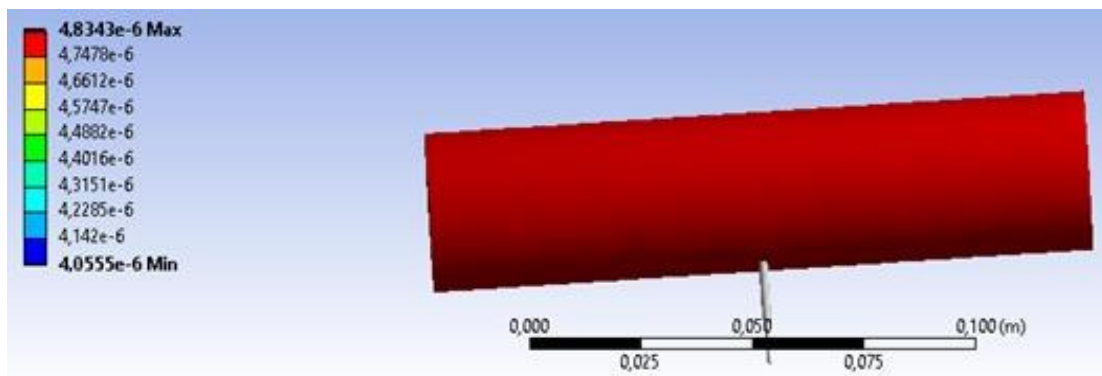


Figura 3.28. Desplazamiento simulación. (Ansys 2019 R2)

La Figura 3.28, representa el rango de desplazamientos en metros logrados en la simulación, siendo el valor máximo $4,83 \times 10^{-6}$ [m].

Análisis de resultados

En esta sección se procede a realiza la comparación de resultados, es decir, los resultados obtenidos de desplazamiento en la validación experimental son parecidos a los resultados que proporciona la simulación efectuada en el software Ansys 2019 R2. Si los desenlaces se parecen, se puede decir que el proceso es válido y es aceptable.

De la Figura 3.25, durante el protocolo 1, se puede deducir que si aumenta el caudal del fluido frío y la temperatura del fluido caliente también incrementa, la aceleración máxima decae. Se le puede interpretar de la siguiente manera, mientras menor sea la aceleración máxima, menor será también la vibración en el intercambiador de calor. En el protocolo 2

el caudal de entrada del fluido frío se mantiene constante, tiende a variar únicamente la temperatura del fluido caliente, en este caso en particular se aprecia que, a mayor temperatura, el valor de la aceleración máxima será cada vez inferior.

Durante la validación experimental de la medición de vibraciones, se aprecia la Tabla 3.43, donde se denota la conversión de la aceleración máxima promedio en decibeles al sistema internacional, para después transformar en términos de desplazamiento. El máximo de dichos desplazamientos es $9,90 \times 10^{-6}$ [m]. El valor de desplazamiento máximo derivado de la simulación es $4,83 \times 10^{-6}$ [m].

Tabla 3.44. Comparación de resultados

Aspecto	Simulación	Experimental
Desplazamiento [m]	$4,83 \times 10^{-6}$	$9,90 \times 10^{-6}$
Frecuencia [Hz]	1,32	1,25

Finalmente, en la Tabla 3.44, hace hincapié que los resultados finales son similares y que no existe mayor diferencia entre ellos. El proceso es válido y aceptable.

3.3 Conclusiones

El intercambiador de calor renderizado en el software Ansys 2019 R2 está disponible para uso académico en el LTC, es implementado con las mismas dimensiones y características, la única diferencia es que se añade un resorte en la parte inferior en reemplazo de una base de PVC, razón por la cual el desenlace entre la simulación y la parte experimental se encuentran próximos debido a la gran correlación entre el equipo desbalanceador y un resorte empírico.

El equipo es sensible, razón por la cual el convertidor de frecuencias del desbalanceador no excede a 40 Hz y tampoco la temperatura del fluido caliente excede a los 65 °C. En el protocolo 1, se puede concluir que, si aumenta la temperatura del fluido caliente y el caudal del fluido frío, la vibración en el intercambiador de calor es cada vez más ausente. En el caso del protocolo 2, se puede decir que, si se intensifica la temperatura del fluido caliente y se mantiene constante el caudal del fluido frío, la vibración es minúscula a altas temperaturas.

La medida 1 del protocolo 1 presenta el menor tiempo empleado, es decir, la frecuencia amortiguada alcanza de 0 a 40 Hz en 25 segundos. La aceleración máxima se encuentra a 16 segundos. La medida 15 del protocolo 2 alcanza los 40 Hz en 110 segundos. La aceleración máxima en 105 segundos de haber iniciado la prueba. Las primeras medidas implementadas en el protocolo 1 indican que el tiempo promedio empleado en cada prueba es 60 segundos. En el protocolo 2 se considera alcanzar los 40 Hz en un lapso igual o superior a 100 segundos para obtener resultados más precisos.

En general, la aceleración máxima promedio es 128,3 [dB], en términos de desplazamiento es $9,90 \times 10^{-6}$ [m]. Por lo tanto, la vibración presente en el intercambiador de calor de tubos y coraza es leve. Según este criterio se puede decir que, no afecta el contacto entre las superficies del intercambiador, y el coeficiente global de transferencia de calor no se ve afectado significativamente.

El desplazamiento adquirido en la simulación es $4,83 \times 10^{-6}$ [m] cuando la frecuencia amortiguada es 1,32 Hz según el programa Ansys 2019 R2. El desplazamiento promedio obtenido en la parte experimental de las mediciones es $9,90 \times 10^{-6}$ [m], la frecuencia amortiguada en el software SvanPC++ es 1,25 Hz. La validación experimental cumple con las expectativas y resultados obtenidos mediante la simulación, por lo tanto, el proceso es válido y verdadero.

3.4 Recomendaciones

Durante la implementación de la parte experimental, se puede asegurar y a la vez recomendar que no se debe exceder a una temperatura mayor a los 60 °C, mucho menos mantenerlo en esas condiciones durante mucho tiempo, el equipo puede sufrir daños internos como destrozarse las mangueras que transportan el fluido e incluso puede llegar a romper el contenedor acrílico que actúa como reservorio del fluido caliente.

Se recomienda girar la perilla del convertidor de frecuencias de manera cautelosa, con el único fin de alcanzar mayor precisión en los resultados finales, ya que en cada condición de operación el objetivo no es llegar a 40 Hz en cortos tramos de tiempo sino más bien se busca subir la frecuencia paulatinamente y analizar el espectro de frecuencias con mayor facilidad. Todo esto es concerniente en la parte experimental del componente.

Es recomendable realizar estas mediciones con el acelerómetro SVAN 958 en un lugar o un espacio donde no exista interferencia como pasos y gritos fuertes, debido a que el equipo es muy sensible y capta cualquier frecuencia generada por un movimiento. Estos factores pueden influir directamente en la toma de datos proporcionando resultados erróneos y es posible que se estropee todo el trabajo. Se recomienda evitar este tipo de inconvenientes y procurar que los resultados sean reales y precisos durante todo el proceso.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arcos R. (2016). *Adquisició i processat de senyal*. Laboratori d'Enginyeria Acústica i Mecànica. Universidad Politècnica de Catalunya.
- 123RF. (2023). *Detalles del haz de tubos de los intercambiadores de calor de la carcasa del intercambiador de calor industrial y el condensador de tubos, hechos de acero con corrosión*. https://es.123rf.com/photo_181300698_detalles-del-haz-de-tubos-de-los-intercambiadores-de-calor-de-la-carcasa-del-intercambiador-de-calor.html
- García Á. (2023). *Oscilaciones: La aceleración en un M.A.S*. Curso Interactivo de Física en Internet. http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/_oscilaciones/m_a_s/mas/mas1.html
- Ghiselli A. M. (1990). *Evaluación experimental de vibraciones en intercambiadores de calor*.
- González D. (2002). *Guía de intercambiadores de calor: Tipos generales y aplicaciones*. (Departamento de Termodinámica Y Fenómenos de Transferencia). Universidad Simón Bolívar.
- Ingeniero Marino. (2018). *Intercambiadores de Calor*. <https://ingenieromarino.com/intercambiadores-de-calor/>
- Instruction Manual HT33. (2014). *Shell and Tube Heat Exchanger*.
- Instruction Manual HT36. (2010). *Extended Tubular Heat Exchanger*.
- MathWorks. (2022). *Impulse*. https://la.mathworks.com/help/control/ref/lti.impulse_es.html
- MathWorks. (2023). *Pspectrum*. <https://la.mathworks.com/help/signal/ref/pspectrum.html>
- Mendoza H. E. (2006). *Desarrollo de un procedimiento de cálculo mejorado para diseño y/o evaluación térmica de intercambiadores de calor de carcasa y haz de tubos*. (Trabajo de titulación). Universidad Central de Venezuela, Venezuela.
- Monografías. *Vibraciones en los Intercambiadores de Calor de Tubo y Coraza*. <https://www.monografias.com/trabajos100/vibraciones-intercambiadores-calor-tubo-y-coraza/vibraciones-intercambiadores-calor-tubo-y-coraza>
- Quintero A. F. & Vargas H. A. (2018). *Identificación de sistemas para un intercambiador de calor de flujo cruzado*. (Trabajo de titulación). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

Rao S. (2011). *Mechanical Vibrations*. Fifth Edition. University of Miami. Prentice Hall.

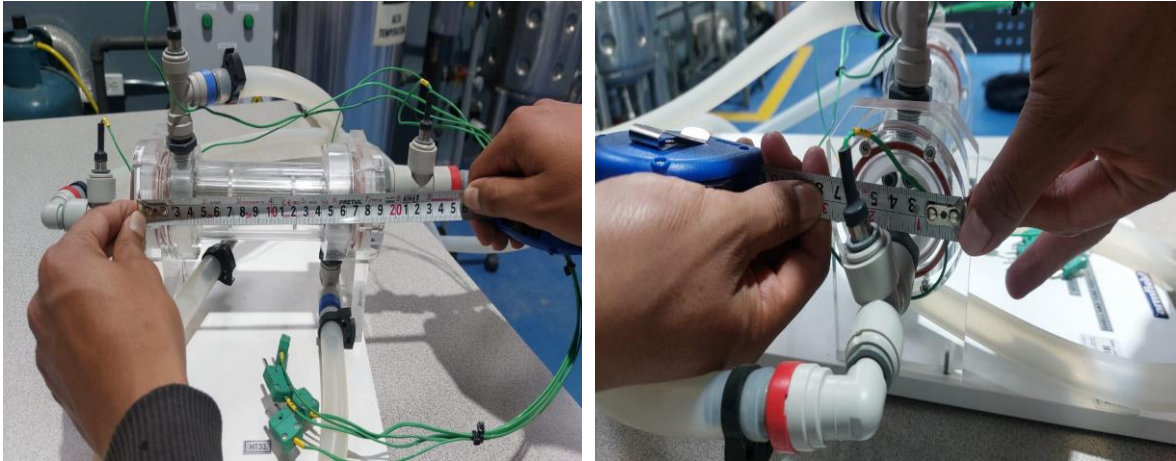
Reyes M., Moya J. & Goytisoló R. (2014). *Simplified calculation of vibrations in shell and tube heat exchangers with liquids*.

SVANTEK. (2008). *SVAN 958: Analizador de Vibraciones Mano-Brazo y Cuerpo Completo de 4 Canales*. Catálogo ALAVA INGENIEROS.

USER'S MANUAL. (2008). *SVAN 958: FOUR CHANNELS SOUND & VIBRATION LEVEL METER & ANALYSER*. Draft version.

5 ANEXOS

ANEXO I: Intercambiador de tubos y coraza



Detalles técnicos

El accesorio consiste en un intercambiador de calor de carcasa y tubos en miniatura con las siguientes características:

- tu Fluido caliente en los tubos interiores y fluido frío en la capa exterior para minimizar la pérdida de calor del intercambiador sin necesidad de aislamiento adicional
- tu Siete tubos de acero inoxidable, 6,35 mm OD
- tu El anillo exterior, las tapas de los extremos y los deflectores están contruidos con acrílico transparente para permitir la visualización de la construcción del intercambiador de calor y minimizar las pérdidas térmicas.
- tu Área nominal combinada de transferencia de calor de 20.000 mm², (equivalente al del Intercambiador de Calor Tubular HT31 para comparación directa)
- tu El fluido frío (agua fría) ingresa por un extremo de la carcasa en la parte inferior y sale por el extremo opuesto en la parte superior después de haber fluido por encima y por debajo de dos deflectores transversales dentro de la carcasa
- tu Los termopares se instalan en las siguientes cuatro ubicaciones:
 - Líquido caliente
 - Salida de fluido caliente
 - Entrada de fluido frío
 - Líquido frío

ANEXO II: Especificaciones técnicas del acelerómetro

Normativa	ISO 8041:2005, ISO 2631-1 y 2 e ISO 5349-1 y 2), ISO 10816 Conforme con el Real Decreto 1311:2005
Parámetros	RMS,VDV,MTVV,Pico,Pico-Pico,Max,Min,Historia temporal
Analizador (opcional)	Análisis en tiempo real en 4 canales en 1/1, 1/3 (resolución temporal de 10ms) o análisis FFT
Ponderaciones / Filtros	Wk,Wc,Wd,Wi,Wh,Wm,HPI,HP3,HPI0,Vel3,Vel10,VelMF,Dil1,Dil3,Dil10,KB Incluye todos los filtros necesarios para la medida de vibraciones mecánicas en el cuerpo humano (mano-brazo y cuerpo entero) de acuerdo con la ISO 2631-1 y 2 e ISO 5349-1 y 2
Detectores RMS y RMQ	Detectores RMS & RMQ digitales con detección de pico, resolución 0.1dB, Constante de tiempo: de 100 ms a 10 s
Acelerómetros (opcional)	SV 39/L acelerómetro para medidas de cuerpo completo SV 50 set para medidas de mano-brazo (incluido acelerómetro triaxial SV3023M2)
Rango de medida	0.003 m/s ² RMS= 1000 m/s ² Pico (con el acelerómetro para cuerpo entero SV 39A/L)
Nivel de ruido	Inferior a 0.1 mms ⁻² RMS con ponderación Wm

Normativa	ISO 8041:2005, ISO 2631-1 y 2 e ISO 5349-1 y 2), ISO 10816 Conforme con el Real Decreto 1311:2005
Parámetros	RMS,VDV,MTVV,Pico,Pico-Pico,Max,Min,Historia temporal
Analizador (opcional)	Análisis en tiempo real en 4 canales en 1/1, 1/3 (resolución temporal de 10ms) o análisis FFT
Ponderaciones / Filtros	Wk,Wc,Wd,Wi,Wh,Wm,HPI,HP3,HPI0,Vel3,Vel10,VelMF,Dil1,Dil3,Dil10,KB Incluye todos los filtros necesarios para la medida de vibraciones mecánicas en el cuerpo humano (mano-brazo y cuerpo entero) de acuerdo con la ISO 2631-1 y 2 e ISO 5349-1 y 2
Detectores RMS y RMQ	Detectores RMS & RMQ digitales con detección de pico, resolución 0.1dB, Constante de tiempo: de 100 ms a 10 s
Acelerómetros (opcional)	SV 39/L acelerómetro para medidas de cuerpo completo SV 50 set para medidas de mano-brazo (incluido acelerómetro triaxial SV3023M2)
Rango de medida	0.003 m/s ² RMS= 1000 m/s ² Pico (con el acelerómetro para cuerpo entero SV 39A/L)
Nivel de ruido	Inferior a 0.1 mms ⁻² RMS con ponderación Wm

ANEXO III: Instalación del equipo para las mediciones de vibraciones experimentales

