

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

**“Optimización de banco de pruebas de desempeño en
intercambiadores de calor para estudios de fatiga térmica”**

Proyecto de Aplicación II

Presenta:

Julián Contreras Durón

Co-Director(es) del proyecto:

Dr. Jesus Mora

Maestro Ivan Williams

Mexicali, B.C., a 23 de marzo de 2019

Agradecimiento y dedicatorias

Carta Institucional

Índice

ACRÓNIMOS	II
RESUMEN	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	1
JUSTIFICACIÓN	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	3
OBJETIVOS	4
HIPÓTESIS	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	5
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	10
CONTEXTO	10
MUESTRA O PARTICIPANTES	10
PROCEDIMIENTO	10
RESULTADOS	14
DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	15
REFERENCIAS	16

Índice de Figuras

NO TABLE OF FIGURES ENTRIES FOUND.

Acrónimos

ppm	Pounds per minute (libras por minuto)
psi	Pound square inch (libras por pulgada cuadrada)
SIL	Systems Integration Laboratory (Laboratorio de Integración de Sistemas)
MRTC	Mexicali Research and Technology Center (Centro de Tecnología e Investigación de Mexicali)

Resumen

Honeywell como empresa líder en la industria Aeroespacial y como uno de sus importantes objetivos, trabaja para desarrollar soluciones de prueba de primer nivel que les brinden una ventaja competitiva a sus clientes, según sus necesidades particulares. El Laboratorio de Integración de Sistemas (SIL) cuenta con la capacidad de simular las actuales condiciones extremas de vuelo a la que los intercambiadores de calor son expuestos en campo. La necesidad es optimizar el banco de prueba para simular ciclos térmicos con rampas de temperatura de 400°F a 1050°F en 8 segundos y así provocar fatiga térmica en la unidad a prueba. El reto es lograr alcanzar estas temperaturas manteniendo el flujo y presiones requeridas al punto de entrega. Para esto, es necesario agregar líneas de sangrado de manera que el flujo másico se incremente y por ende la temperatura se mantenga a lo largo de los ductos.

Capítulo 1: Introducción

Antecedentes

Honeywell como empresa líder en la industria Aeroespacial y como uno de sus importantes objetivos, trabaja para desarrollar soluciones de prueba de primer nivel que les brinden una ventaja competitiva a sus clientes, según sus necesidades particulares.

Cómo parte de los esfuerzos para lograr este objetivo, se desarrolló en Mexicali el Centro de Investigación y Tecnología de Mexicali (MRTC), con el cual se busca reforzar el vínculo laboral entre Estados Unidos y Latinoamérica, además de ofrecer costos más competitivos.

El Laboratorio de Integración de Sistemas (SIL) como parte fundamental del MRTC, facilita por medio de sus instalaciones de tecnología de punta y personal altamente capacitado, cumplir con los requerimientos de pruebas de integración y de componentes aeroespaciales, únicas en su rama, debido a la

capacidad de simular las actuales condiciones extremas de vuelo a la que los sistemas son expuestos en campo.

La capacidad del SIL para integrar sistemas de instalaciones altamente complejos, junto con los productos y sistemas hechos por Honeywell, han hecho al laboratorio sede de millonarios proyectos de pruebas aeroespaciales. El banco de pruebas en este laboratorio da soporte a la etapa de diseño y desarrollo de válvulas, intercambiadores de calor, instrumentación, unidades de control, entre otros. La integración, operación y control de todos estos elementos en un solo sistema y sin fallas, hacen que las necesidades tecnológicas de simulación de sistemas sean de lo más novedosas.

El banco de prueba para intercambiadores de calor en el SIL es capaz de simular ciclos térmicos para determinar si el desempeño y durabilidad del producto se asemejan al análisis por diseño del producto.

Justificación

La presente investigación explica las bases para establecer una solución para maximizar la eficiencia del banco de prueba de intercambiadores de calor en cuanto a las condiciones críticas del ambiente al que va a ser expuesto, tomando en consideración el cumplir y mantenerse dentro de los requerimientos de operación establecidos por la ingeniería del producto.

Particularmente, se cuenta con la necesidad de optimizar el banco de prueba de fatiga térmica, cumpliendo con los requerimientos de ciclos térmicos de 400°F a 1050°F en un periodo de 8 segundos al punto de entrega del intercambiador de calor.

Actualmente, se cuenta con la capacidad de cumplir con el ciclo térmico en un tiempo de 85 segundos al punto de entrega, por lo que se presentaran las bases para mejorar el tiempo de rampa.

Planteamiento del Problema

La arquitectura utilizada actualmente en el banco de prueba debe ser modificada para cumplir con los altos estándares de temperatura y tiempos de respuesta, ya que actualmente no es posible alcanzar la temperatura de 1050°F en el tiempo requerido de 8 segundos.

Es necesario mencionar las limitaciones de distribución de espacio en el área de prueba por lo que no es posible modificar el banco de prueba para ajustar o recortar distancias que ayuden a disminuir la pérdida de calor a través de los ductos de flujo. Es por esto que se propone agregar líneas de sangrado de aire adicionales, en la actual configuración, para aumentar el flujo y por ende la temperatura a través de las líneas de aire y de esta manera reducir el tiempo de ciclo de 85 segundos a 8 segundos.

Preguntas de Investigación

- ¿Cuáles son las ventajas de agregar líneas adicionales de sangrado en el banco de prueba de fatiga térmica?
- ¿Cuántas líneas de sangrado son necesarias agregar al banco de prueba para reducir el tiempo de ciclo de 32 segundos a 8 segundos?
- ¿Qué costo/beneficio tiene para Honeywell actualizar/optimizar la arquitectura del banco de prueba de fatiga térmica?

En base a las preguntas de investigación, se han identificado las siguientes variables en la presente investigación:

- Independientes:
 - Línea de flujo de aire
- Dependientes
 - Costo/beneficio

Objetivos

Objetivo General

Implementar la modificación necesaria, agregando líneas de sangrado de aire al banco de prueba de fatiga térmica utilizado actualmente en el SIL, cumpliendo y/o superando las capacidades de incrementos y cambios de temperatura, así como manteniendo el requerimiento de presión y flujo a la entrada de la unidad a prueba.

La mejora en el sistema puede considerar cambios de diseño en las líneas de flujo de aire para adaptar las nuevas líneas de sangrado adicionales con la ventaja de mantener el calentador eléctrico actual para continuar con el mismo consumo eléctrico.

Objetivos Particulares

- Cuantificar el costo de implementación de la nueva arquitectura de línea de flujo.
- Comparar el sistema y diseño del banco de pruebas usado en el SIL, con el utilizado en otras pruebas similares.
- Demostrar los beneficios de un cambio de diseño para cumplir/exceder los requerimientos de cambios de temperatura en los nuevos intercambiadores de calor.

Hipótesis

Al agregar líneas de sangrado al banco de prueba de intercambiadores de calor, es posible cumplir con el requerimiento que actualmente se requiere de obtener ciclos térmicos con rampas de 400°F a 1050°F de 8 segundos medidos a la entrada del intercambiador de calor. Esto sin alterar la presión de entrada a la unidad a prueba de 100 psi y sobre todo el flujo de 50 ppm.

Capítulo 2: Marco Teórico

En el presente capítulo, se detallarán los conceptos para el desarrollo de la investigación. Se hablará de la transferencia de calor y sus diferentes formas, así como el comportamiento térmico a través de la tubería utilizada en el laboratorio para el banco de pruebas de intercambiadores de calor.

Transferencia de calor por conducción

La transferencia de calor por conducción ocurre básicamente debido a una diferencia de temperatura. Es una forma de energía en tránsito que se transmite por comunicación molecular directa, sin desplazamiento observable de las moléculas. El calor como en todo proceso de transferencia fluirá en la dirección de la temperatura decreciente.

La transferencia ocurre porque las moléculas que poseen mayor energía transferirán esta a las de energía inferior. En este tipo de transferencia de calor existe una diferencia apreciable de temperatura entre las dos zonas por las que fluirá el calor, además de que existe un contacto físico entre las zonas de transferencia. Otro punto a considerar es que no existe movimiento apreciable de la materia en la que fluirá el calor.

Transferencia de calor por convección

Una situación física que aparece con frecuencia es un fluido en movimiento sobre una superficie a diferente temperatura. En este caso la transferencia de calor, tendrá lugar gracias a otro mecanismo que es conocido como la convección. Cuando un fluido se desplaza a un tiempo y velocidad determinado sobre una superficie que se encuentra a otra temperatura, se produce transferencia de calor en las adyacencias de la frontera cuyo signo dependerá del valor relativo de las temperaturas.

Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad de los materiales que nos indica la cantidad de calor que fluirá a través de un área unitaria en la unidad de

tiempo, si el gradiente de temperatura entre las dos superficies entre las cuales fluye el calor es unitaria. Esta propiedad determina la facilidad con la cual un material conduce el calor.

Flujo de aire en tubería

Nuestro banco de prueba de intercambiadores de calor consiste en un sistema de flujo de aire a través de tubería, el cual es suministrado por un compresor y calentado por un calentador eléctrico.

Considerando un flujo de aire por tubería y aplicando conservación de masa, de acuerdo a la primera ley de la termodinámica, es posible realizar un balance de materia y energía. En otras palabras, el flujo másico total de las corrientes de entrada, por su energía, debe ser igual al flujo másico de las corrientes de salida multiplicadas también por su energía.

$$m_1h_1+m_2h_2=m_3h_3$$

Donde:

m: flujo másico

h: entalpia especifica

La transferencia de calor en una corriente de aire dentro de una tubería se manifiesta tanto en conducción como en convección. La Ley de Fourier define cuantitativamente el proceso de transferencia de calor por conducción y nos sirve para saber como se relacionan variables como flujo de calor, temperatura y propiedades de un material. En otras palabras, la Ley de Fourier establece que la cantidad de calor conducido en la dirección x, a través de un material solido homogéneo en un intervalo de tiempo, es el producto entre el área expuesta y la transmisión de calor normal al eje x, el gradiente de temperatura y una propiedad del material conocida como conductividad térmica. Matemáticamente tiene la siguiente forma:

$$q = \frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

Donde:

q: Flujo de calor perpendicular al área de transferencia de calor

A: Área de la superficie de transferencia

k: Conductividad térmica del material

dt/dx: Gradiente de temperatura a lo largo del eje x

Si consideramos que el fluido se desplaza a una temperatura T^∞ y a una velocidad U^∞ sobre las adyacencias de una superficie que se encuentra a una temperatura uniforme T_s , el flujo de calor que tendrá lugar puede ser determinado por:

$$Q = hA(T_s - T_\infty)$$

Donde:

h: Coeficiente de transferencia por convección

T_s : Temperatura superficial

T^∞ : Temperatura en el seno del fluido

A: Área de transferencia de calor por convección

Q: tasa de transferencia de calor por convección

A esta ecuación se le conoce como ley de enfriamiento de Newton y nos proporciona una relación para determinar la tasa de transferencia de calor entre una superficie y un fluido en movimiento que se encuentra a una temperatura diferente.

Capa imite

Cuando el fluido se mueve sobre una superficie que se encuentra a diferente temperatura, se formará todo un perfil de velocidades y de temperatura sobre la superficie. El fluido que está más cerca de la superficie tendrá una velocidad cercana a la de la superficie y en la medida que se aleje de la superficie, la velocidad se parecerá más a la de la corriente libre, la forma como varía la velocidad entre estos dos límites constituye lo que se conoce como capa limite.

Algo muy similar ocurre con la temperatura, el fluido adyacente a la superficie tendrá una temperatura cercana a esta y en la medida que se aleje su temperatura se acercará a la de la corriente libre y el comportamiento del perfil de temperaturas a lo largo del fluido se conoce como la capa límite térmica.

Las características de transferencia de calor a través del mecanismo de convección, obedecerá básicamente al comportamiento de estas dos capas límite, las cuales dependen de las propiedades del fluido que se mueve y de la geometría de la superficie.

Aislamiento de la tubería

La conducción del calor es reducida con el aislamiento de la tubería con la que cuenta el banco de prueba. El radio crítico de aislamiento es el radio de un aislante en el que la transferencia de calor es máxima o la resistencia del flujo de calor es muy baja, por lo que al colocar un material aislante se debe verificar que el radio externo de este sea mayor al radio crítico o que el radio crítico sea menor al radio exterior del cilindro. El radio crítico de aislamiento está dado por

$$r_{cr} = \frac{k}{h}$$

Donde:

h: Coeficiente de transferencia de calor

k: Conductividad térmica

La disipación de calor en la tubería, en su cara externa, es función de la temperatura ambiente y se modela con la Ley de Enfriamiento de Newton. Dependiendo del coeficiente de transferencia de calor por convección, se puede saber que tanto calor se va a disipar. Sabiendo cuanto calor se disipa, podemos obtener la temperatura del aire interior de la tubería.

Transferencia de calor en estado transitorio

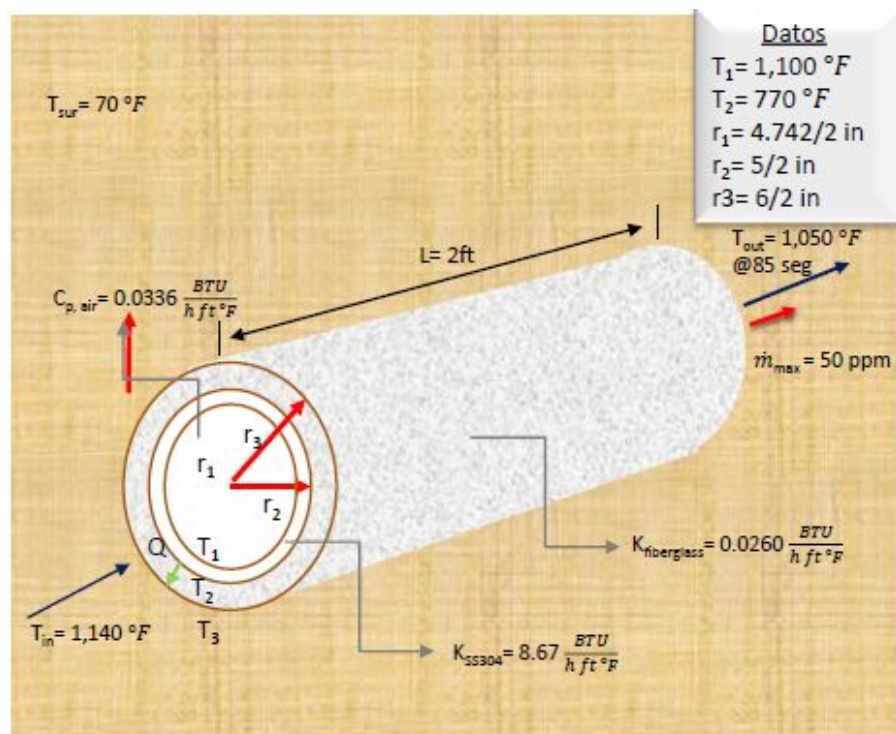
Debido a que la disipación de calor también depende del tiempo, es necesario considerar el modelo matemático o número de Biot el cual establece la caída de temperatura en la superficie de la tubería con respecto a la del fluido,

de manera que si la temperatura baja en un determinado tiempo, se pueda identificar el incremento en la velocidad del aire necesario para que la temperatura no descienda debajo del requerimiento.

$$\frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{T_{s,2} - T_{\infty}} = \frac{(L/kA)}{(1/hA)} = \frac{R_{l,cond}}{R_{l,conv}} = \frac{hL}{k} = Bi$$

Banco de prueba de intercambiadores de calor de Honeywell

Considerando la arquitectura establecida y las características conocidas (constantes) del banco de prueba de intercambiadores de calor en Honeywell, se logra identificar el flujo másico requerido para alcanzar 1050 F en 8 segundos por medio de la ecuación de balance de energías



$$q = \dot{m} C_p \frac{dT}{dt}, \text{ despejamos } dt:$$

$$dt = \frac{\dot{m} C_p}{q} dT, \text{ integrando } dt \text{ y } dT:$$

$$\int_0^t dt = \frac{\dot{m} C_p}{q} \int_{T_{in}}^{T_{out}} dT \rightarrow t = \frac{\dot{m} C_p}{q} (T_{in} - T_{out}), \text{ despejamos } \dot{m} = \frac{tq}{C_p(T_{in} - T_{out})} = \sim 200 \text{ ppm}$$

Consideramos: $T_{in} = 1,140^\circ\text{F}$ en $t_{(0\text{seg})}$ y $T_{out} = 1,050^\circ\text{F}$ en $t_{(8\text{seg})}$

Figura 1

Capítulo 3: Metodología

Contexto

Lugar: El desarrollo de la metodología en esta investigación se realizará en el Laboratorio de Integración de Sistemas (SIL) en Honeywell MRTC, Mexicali, Baja California, México.

Tiempo: La ejecución de la metodología planteada está planeada con una duración de 3 meses.

Accesos o permisos: Para la realización de la metodología, se requiere tener acceso a información de previas implementaciones de instalaciones y equipos de prueba. Los permisos y accesos están concedidos a cualquier empleado del área del SIL que requiera del uso de este banco de prueba.

Muestra o participantes

Para la resolución del objetivo planeado en esta investigación, no es requerido el uso de una muestra. La solución del problema de investigación aplica de forma completa al SIL y es para todos los ingenieros y técnicos que laboran en esta área.

Procedimiento

En esta investigación, de la actual configuración mecánica del banco de prueba de fatiga térmica para intercambiadores de calor, se trabaja en eliminar la limitante actual de alcanzar 1050F en estado estable a la entrada del circuito caliente de la unidad a prueba para simular el flujo de sangrado de la aeronave. El requerimiento en tiempo para alcanzar esta temperatura no es un requisito, sin embargo se busca que sea en el menor tiempo posible para efectos de eficiencia en el uso de los compresores, así como el calentador de gas y eléctrico.

El segundo requerimiento a considerar e igual de importante es que una vez alcanzados los 1050F a la entrada del circuito caliente, el sistema debe ser capaz de realizar ciclos térmicos con rampas de 400F a 1050F en 8 segundos.

Además de ambos requerimientos, se debe tomar en cuenta que la presión debe mantenerse constante a 100 psi a lo largo de la prueba, así como el flujo mantenerse en 50 ppm.

Es importante mencionar que el laboratorio cuenta con limitantes en el espacio donde se ubica el banco de prueba, por lo que no es posible aplicar cambios en el diseño, sobre todo en las dimensiones y distribución de componentes, así como cambios en los equipos de pre-calentado y calentador eléctrico.

Conociendo lo anterior, la propuesta se basa en la adición de líneas de sangrado justo antes de la entrada al circuito caliente del intercambiador de calor de manera que se pueda incrementar el flujo en el banco de prueba y disminuir la pérdida de temperatura, manteniendo el requerimiento de flujo de 50 ppm a la entrada del intercambiador.

La configuración inicial considera una temperatura máxima de entrada al sistema de 1140 F suministrada por el calentador eléctrico, este es un parámetro fijo que está establecido por la capacidad del calentador eléctrico y la máxima temperatura de operación del material de la tubería.

De igual manera, el aislante es otro factor que fue considerado como una constante ya que para efectos de este proyecto no fue parte de la optimización. La temperatura de la superficie de la tubería es de 476F.

Conociendo la “q” total del sistema de 1,456.8205 BTU/h y como se mencionó en el capítulo anterior, aplicando balance de energías, se determinó que el flujo másico requerido para alcanzar los 1050 F en 8 segundos es de 200 ppm.

Para lograr incrementar el flujo en el banco de prueba y continuar manteniendo 50 ppm a la entrada de la unidad a prueba, se efectuó una modificación en la tubería para agregar 8 líneas de sangrado de aire y así liberar los 150 ppm restantes.

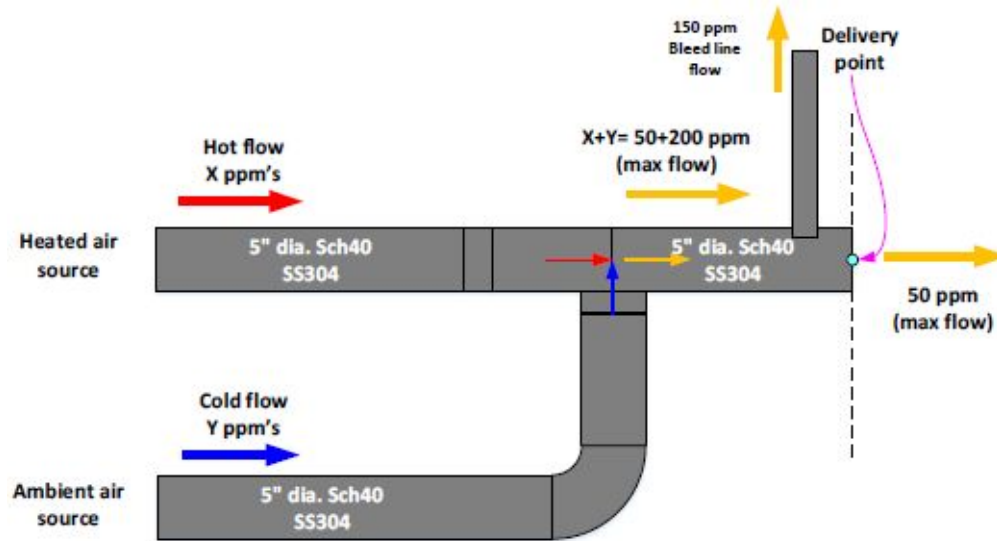


Figura 2



Figura 3



Figura 4

De esta manera se puede incrementar el flujo a través de la tubería del banco de prueba y ver una reducción en el tiempo de rampa debido a la menor pérdida de calor lograda al incrementar la velocidad del aire.

El ciclo térmico requerido tiene una duración de 125 segundos el cual debe ser completado un total de 7000 veces. Esto nos da un total de 243 horas de prueba por intercambiador de calor.

Resultados

Una vez implementada la modificación en el banco de prueba para agregar una línea de sangrado, se logró disminuir el tiempo de rampa de 85 a 32 segundos para alcanzar la temperatura de 400 a 1050, mostrada en la Figura 5. Esto debido al incremento de velocidad del aire a través de la línea que alimenta al intercambiador de calor. Al agregar las 8 líneas de sangrado totales de 3/4" cada una e incrementarse el flujo másico a 200 ppm a través de la tubería se logró alcanzar la rampa a 1050 F en 8.2 segundos, Figura 6. Cabe mencionar que fue necesario liberar los 150 ppm restantes a través de las 8 líneas de sangrado de manera que mantuviéramos los 50 ppm a la entrada del intercambiador. De esta manera, al aumentar la velocidad del aire a través del banco de prueba, la pérdida de calor disminuyó y el resultado fue un tiempo de respuesta más rápido en el sistema.

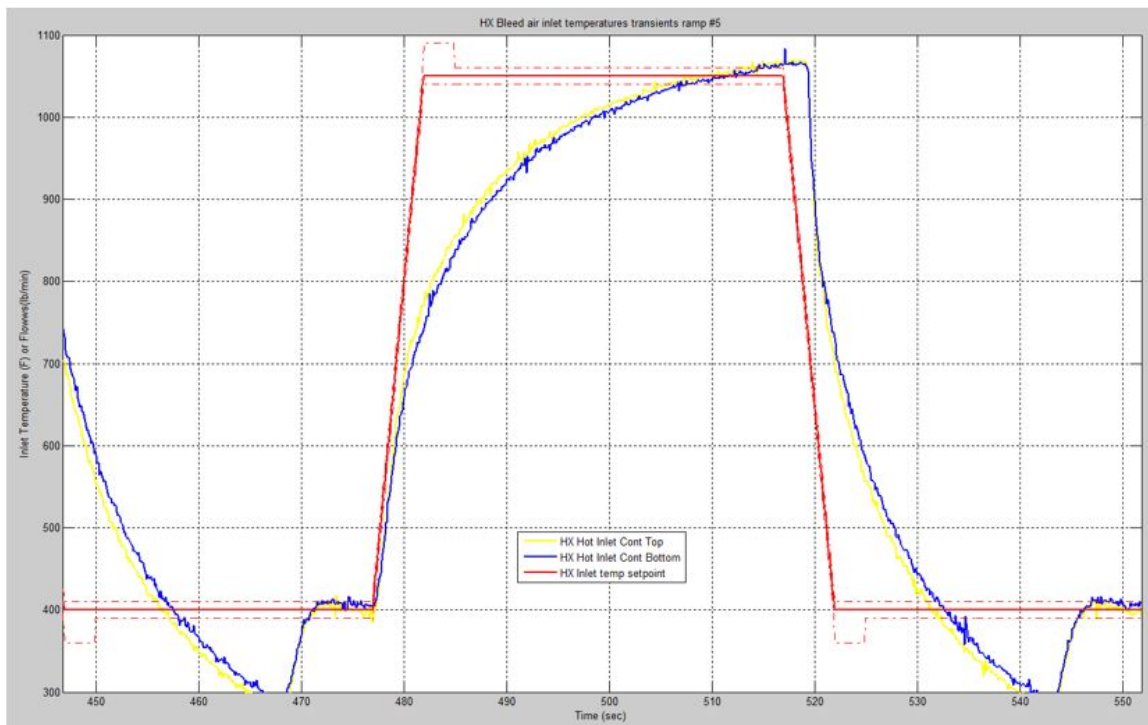


Figura 5

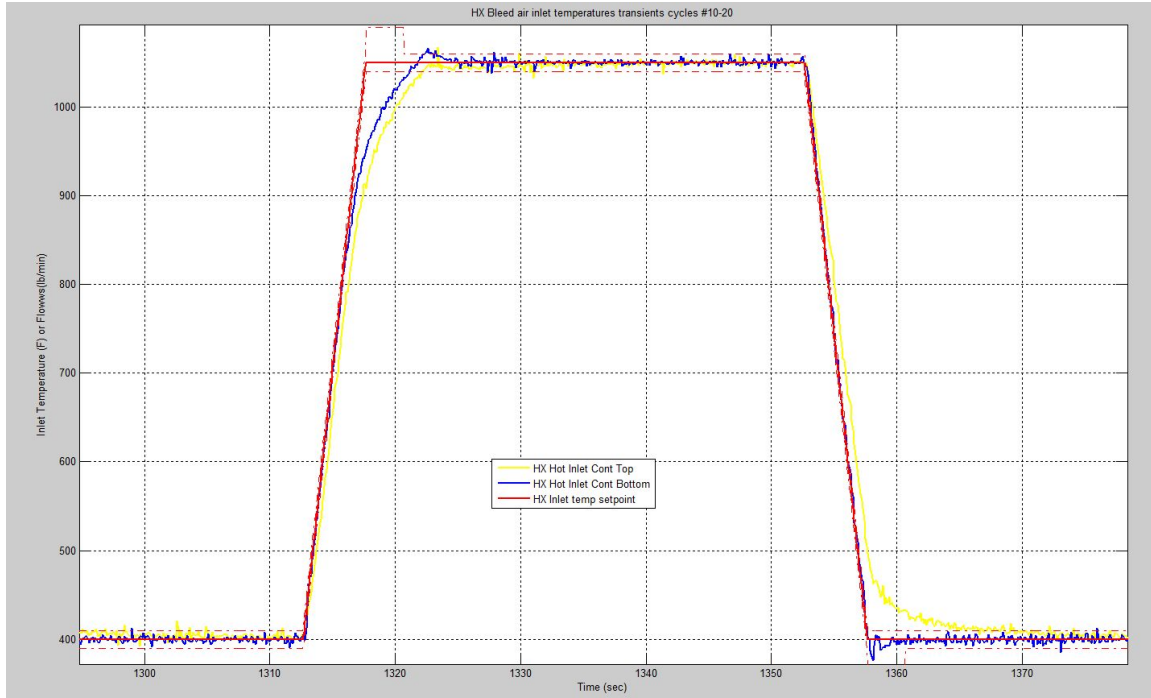


Figura 6

Discusión, conclusiones y recomendaciones

Gracias a la adición de 8 líneas de sangrado justo antes del punto de entrega a la unidad a prueba y al incremento de flujo másico, fue posible lograr alcanzar la máxima temperatura del ciclo térmico (1050°F) en 8.2 segundos, lo cual se interpreta también como una reducción de 76.8 segundos de la condición inicial que se tenía.

Con respecto al costo, considerando los 7000 ciclos necesarios para obtener los resultados de fatiga térmica en la unidad a prueba, nos dan un total de 243 horas de prueba por intercambiador de calor. Si consideramos que se obtienen ingresos por uso de compresores, horas laboratorio y horas ingeniería, obtenemos una ganancia bruta de \$18.7 dolares por ciclo, por lo que se puede concluir que la modificación del banco de prueba para agregar líneas de sangrado se considera redituable para el laboratorio de integración de sistemas.

Por otra parte, mi fuerte recomendación es llevar a cabo un proyecto adicional para la reutilización del flujo que se libera a través de las líneas de sangrado, esto con el fin de aumentar la eficiencia del banco de prueba ya que

actualmente el flujo es liberado por un sistema escape hacia el exterior del laboratorio sin un uso aprovechado.

Referencias

L. Bergman, S.Lavine, P. Incropera, P. Dewitt (2011). Fundamentals of heat and mass transfer. NJ, USA.