

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



“SELECCION DE EQUIPO POSENFRIADOR DE AIRE PARA PRUEBAS EN DINAMÓMETRO DE MOTORES CATERPILLAR C32”

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO

JHOSMELL AUGUSTO MAQUÍN GAMBINI

EGRESADO 2006-II

LIMA-PERU

2010

INDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO 1	
1. Introducción	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivos	9
1.4 Alcances	
1.5 Limitaciones	9
1.5.1 La selección del equipo	9
1.5.2 Modificaciones o rediseño	10
1.5.3 Responsabilidad	10
1.5.4 Punto de partida	10
CAPÍTULO 2	
2. Marco Teórico	11
2.1 Historia de los poseenfriadores	11
2.2 El diseño actual	12
2.3 Comportamiento de la temperatura en un poseenfriador	13
2.4 Sistema poseenfriador	16
2.5 Terminología	17
2.6 Motor C32 perteneciente al camión Caterpillar 777F	20
CAPÍTULO 3	
3. Descripción del Problema	24
3.1 Planteamiento del problema	24
3.1.1 Herramienta propuesta por el fabricante	25
3.1.2 Herramienta construida en Ferreyros S.A.A.	27
3.1.3 Herramienta propuesta por otros distribuidores	28
3.1.3.1 Finning Inglaterra	28
3.1.3.2 Walker Machinery (Virginia)	30
3.1.3.3 Gecolsa	32
3.1.3.4 Propuesta por Power Test	34
3.2 Solución del problema	36
3.2.1 Verificar historial	37
3.2.2 Calor de aire que ingresa al poseenfriador	42
3.3 Cálculos y resultados	44

3.3.1	Cálculo de la temperatura de aire antes de ingresar al posenfriador	45
3.3.2	Cálculo del flujo de aire que ingresa al posenfriador	49
3.3.3	Cálculo de la densidad de aire	53
3.3.4	Cálculo del calor específico del aire a presión constante	58
3.3.5	Cálculo del flujo de calor que debe disipar el equipo posenfriador de aire	59
CAPÍTULO 4		
4.	Análisis Técnico y Económico	62
4.1	Posenfriador usado por el distribuidor Finning Inglaterra	63
4.1.1	Características técnicas	63
4.1.2	Partes y costo de fabricación	64
4.2	Posenfriador usado por el distribuidor Walker Machinery	65
4.2.1	Características técnicas	65
4.2.2	Partes y costo de fabricación	65
4.3	Posenfriador usado por el distribuidor Gecolsa	66
4.3.1	Características técnicas	66
4.3.2	Partes y costo de fabricación	68
4.4	Posenfriador recomendado por proveedor del dinamómetro, Power Test	69
4.4.1	Características técnicas	69
4.4.2	Partes y costo de fabricación	70
4.5	Posenfriador recomendado por el fabricante Caterpillar	70
4.5.1	Características técnicas	70
4.5.2	Partes y costo de fabricación	71
4.6	Matriz de toma de decisiones	71
4.7	Selección del equipo posenfriador de aire	75
5.	CONCLUSIONES	77
6.	RECOMENDACIONES	81
7.	BIBLIOGRAFÍA	82

PRÓLOGO

El presente trabajo nace de la necesidad de evitar problemas durante las pruebas de los motores C32 Caterpillar en el banco de pruebas del Centro de Reparación de Componente (CRC) de Ferreyros S.A.A. El problema presentado en estas pruebas se relaciona con la insuficiente capacidad en disipar el calor por el equipo posenfriador de aire que se usa actualmente.

Este trabajo está dividido en cuatro capítulos.

En el **capítulo uno**, se indican los antecedentes, la justificación de la necesidad y se establecen los alcances, las limitaciones y los objetivos que se pretenden alcanzar.

En el **capítulo dos**, se establece el marco teórico que permitirá la comprensión de los equipos posenfriadores de aire así como se presenta una breve descripción de las características técnicas del motor C32 Caterpillar que usa el posenfriador que será sujeto de estudio.

En el **capítulo tres**, se plantea el problema que motivó el presente estudio, se presenta una estructura o metodología que permitirá dar con la solución del problema relacionado a obtener la capacidad de enfriamiento del posenfriador, se plantean los cálculos que permitirán obtener la solución y finalmente se podrá revisar el resultado de la capacidad de refrigeración con la que debe contar el equipo posenfriador a elegir.

En el **capítulo cuatro**, se plantea la evaluación de las características de los posenfriadores que se presentan como alternativas, comparando detalles técnicos, costos de fabricación o de adquisición y otros detalles en base a requerimientos propios de la empresa, luego de esta comparación se establece una metodología para decidir entre las opciones de equipos posenfriadores, para finalmente elegir el posenfriador más adecuado para las demandas del CRC.

Mediante estas líneas quisiera enviar un profundo agradecimiento a mis padres, por su constante dedicación y esfuerzo en brindarme, durante todos estos años, una formación humanista y en valores, así como también me ofrecieron un gran cariño y aprecio, también agradecer a la Universidad Nacional de Ingeniería por ofrecernos, a sus estudiantes, la formación académica que hoy nos convierten en líderes de la industria nacional y también mundial, también agradecer al Dr. Guillermo Lira por su apoyo desinteresado en asegurar que el presente informe sea elaborado con calidad.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En el año 1922 nació la empresa Enrique Ferreyros y CIA en Sociedad en Comandita, la cual se dedicó en sus primeros años de operación a la comercialización de productos de consumo masivo, atendiendo al mercado de abarrotes. Veinte años más tarde, la empresa experimenta un giro trascendental cuando toma la decisión de asumir la representación de Caterpillar Tractor Co. en el Perú en 1981, se transforma en sociedad anónima, como parte de un proceso de modernización a fin de reflejar la nueva estructura accionaria, que la llevaría finalmente a transformarse en 1998 en una sociedad anónima abierta bajo la denominación de Ferreyros S.A.A.

Ferreyros S.A.A. (en adelante FSAA) contaba con un Taller de Componentes que realizaba actividades de reparación de componentes de maquinaria pesada tales como: Motores de combustión interna, convertidores de torque, transmisiones de velocidad, conjunto de diferenciales, ejes de mandos finales, ruedas y frenos; componentes que forman parte del tren de potencia de la maquinaria pesada, posteriormente y por la

necesidad de certificación ante la fábrica Caterpillar es que este taller se convierte en el Centro de Reparación de Componentes (CRC).



FIGURA 1.1 Vista de un motor Caterpillar que Ferreyros SAA vende y ofrece el servicio posventa.

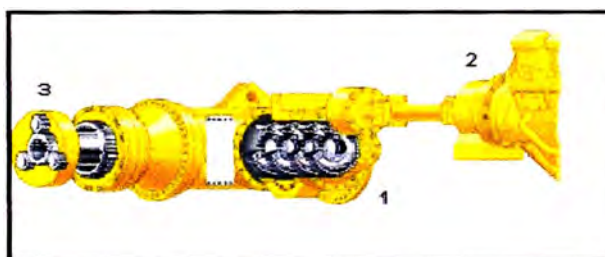


FIGURA 1.2 Componentes del tren de potencia de un equipo pesado Caterpillar: Transmisión (1); Convertidor (2); Mando final (3)

El CRC es un taller de reparaciones cuya administración pertenece a la gerencia de Soporte al Producto de FSAA, en el que se vienen desarrollando reparaciones de componentes que conforman el tren de potencia de los diversos equipos Caterpillar que componen el parque de máquinas en el Perú y algunos que operan en otros países. Para el caso de reparación de motores de maquinaria pesada, el CRC cuenta con 2 bancos de prueba para motores, estos bancos cuentan con dinamómetros para realizar las pruebas de motores luego de ser reparados y de esta forma poder asegurar la operatividad y confiabilidad de cada motor reparado en el CRC.

La gerencia del CRC se propone poder contar con las condiciones necesarias para que pueda atender cualquier tipo de componente del tren de potencia perteneciente a un equipo Caterpillar con la finalidad de mantenerse como líder dentro del mercado de maquinaria pesada Caterpillar en el Perú.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El motor C32 del camión Caterpillar 777F es uno de los primeros motores en su tipo recibidos en el taller, esto debido a que su posenfriador no es parte del motor, por esa razón es que después de ser reparado este motor, no se puede probar en banco con su propio posenfriador, este posenfriador se queda en la máquina (camión), a diferencia de otros motores que sí traen el posenfriador como parte del motor. Para este caso el motor tiene que ser probado con un posenfriador que no es original del equipo, tampoco es posible realizar las pruebas con el posenfriador original, esto debido a su dimensión y porque es un sistema de refrigeración que utiliza el aire del ventilador del motor para enfriar, al enfriador original de este equipo se le conoce como ATAAC, que viene de la frase en inglés: Air to air aftercooler, que significa: Enfriador de aire con aire.



FIGURA 1.3 Vista del posenfriador de aire original del motor del camión 777F de Caterpillar.

Como el posenfriador usado para las pruebas de banco no es original del equipo, es que luego de un tiempo de mantener operando el motor cerca a su máxima potencia es que surgen problemas de recalentamiento en el equipo posenfriador, también se generan problemas de elevación de la temperatura en la sala de pruebas y adicionalmente a esto, puede generarse problemas de potencia en el motor.

En los últimos meses el CRC ha atendido las reparaciones de motores Caterpillar C32, surgiendo la necesidad de evaluar el problema de recalentamiento, generado durante la prueba de estos motores en el dinamómetro de la sala número 2 y a esto se une el hecho de que el proyecto minero Toromocho ha adquirido una flota de camiones Caterpillar 777F a FSAA y han celebrado un contrato MARC (Mantenimiento y reparación de componentes) con dicho proyecto minero. Este motivo hace que el CRC

mejore aún más la calidad de sus reparaciones en este tipo de motores C32, así como las pruebas en banco, para garantizar la calidad del servicio que brinda.

Actualmente, el dinamómetro de la sala número 2 cuenta con un sistema de enfriamiento posenfriador del aire que sale del turbocompresor y que ingresa al múltiple de admisión de los motores C32 para luego ingresar a las cámaras de combustión, este posenfriador está basado en una herramienta Caterpillar pero con algunas modificaciones. Este equipo corresponde al posenfriador con número de parte Caterpillar 6L-6292 de un motor D398B de 727,8 kW de potencia que no cuenta con la capacidad requerida, estos hechos generan problemas de recalentamiento en dicha herramienta, impiden desarrollar la prueba completa del motor en banco debido a que el motor no es probado desarrollando su máxima potencia (758 kW), el sobrecalentamiento del posenfriador también genera un sobrecalentamiento de la sala de prueba, incrementando la temperatura promedio de la sala. Adicionalmente, este problema complica desarrollar una buena combustión dentro de las cámaras ya que el ingreso del combustible establecido para determinado régimen de potencia se hace innecesario al ingresar aire más caliente y, por ende, menos denso a las cámaras, reduciendo la potencia, generando sobrecalentamiento e incrementando las emisiones tóxicas por la alta temperatura del aire.

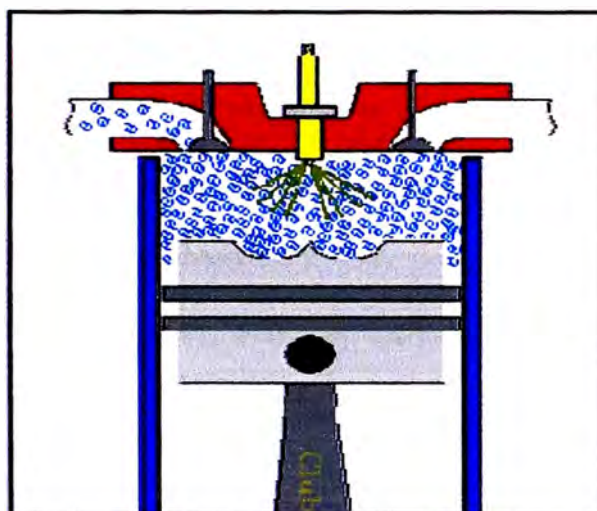


FIGURA 1.4 Ejemplo de una cámara de combustión de un motor Diesel durante su funcionamiento.

Con esta medida también se consigue la reducción en la formación de un contaminante que es muy difícil de eliminar y que son los óxidos de nitrógeno (NO_x), un ingrediente del smog fotoquímico perjudicial para el medio ambiente, la baja formación de NO_x se consigue reduciendo las temperaturas máximas de combustión, ya que a altas temperaturas el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2) moleculares presentes en el aire pueden combinarse para formar óxido nítrico, este componente expulsado a través de los gases de escape al aire puede convertirse, más tarde, en ácido nítrico, produciendo así lluvia ácida. Además el NO y el NO_2 participan en la depleción de la capa de ozono. Su efecto ante la radiación solar es doble, mientras en la baja atmósfera contribuyen al calentamiento global en la alta lo hacen al oscurecimiento global.

1.3 OBJETIVOS

Este informe busca como objetivo principal poder realizar las pruebas de motores Caterpillar C32 de forma satisfactoria sin considerar eventos de sobre temperatura en el enfriador de aire, sin considerar problemas de baja potencia en el motor, sin convertir en excesivo el consumo de combustible, evitar el incremento de emisiones tóxicas y, por ende, restricciones en la prueba que perjudican la calidad de las mismas.

Todas estas limitaciones pueden verse reflejados en un impacto económico para la empresa, en problemas de operabilidad del equipo para el cliente y en un impacto ambiental que afecte a la sociedad y al medio ambiente.

1.4 ALCANCE

El alcance de este proyecto incluye la selección del equipo posenfriador de aire más adecuado para las pruebas del tipo de motor C32 fabricado por Caterpillar, comparando técnica y económicamente las alternativas disponibles.

1.5 LIMITACIONES

1.5.1 La selección del equipo, la selección del posenfriador de aire (aftercooler) se realizará en función de:

- ✓ Las necesidades técnicas requeridas (capacidad necesaria de transferencia de calor).
- ✓ Los costos, considerando la opción más económica.

- ✓ La versatilidad del componente para las pruebas, considerando que el equipo pueda adecuarse a pruebas de motores con distribución de cilindros en V, distribución de cilindros en línea, comodidad para su transporte, fácil desplazamiento dentro de la sala.

- 1.5.2 Modificaciones o rediseño, durante la elaboración de este informe no se considerará la modificación y/o rediseño de los equipos de posefriamiento de aire que se evaluarán como alternativas, se buscará el equipo que más se adecue para satisfacer las necesidades que se tienen durante las pruebas de motores C32 en el dinamómetro.
- 1.5.3 Responsabilidad, el proyecto de selección de equipo posefriador de aire en las pruebas de motores C32 está bajo responsabilidad del área de Producción del CRC y no bajo la responsabilidad del área de Soporte Técnico del CRC, área que brinda el apoyo para la realización del presente estudio.
- 1.5.4 Punto de partida, se considerará como punto de partida el motor instalado en el banco de pruebas del dinamómetro como objeto de estudio, no se cuenta con autorización del fabricante para poder disponer y publicar el procedimiento de instalación del motor en el banco de pruebas, se considera información que debe reservarse como parte de la tecnología que el fabricante maneja.

CAPÍTULO II MARCO TEORICO

2.1 HISTORIA DE LOS POSENFRIADORES.

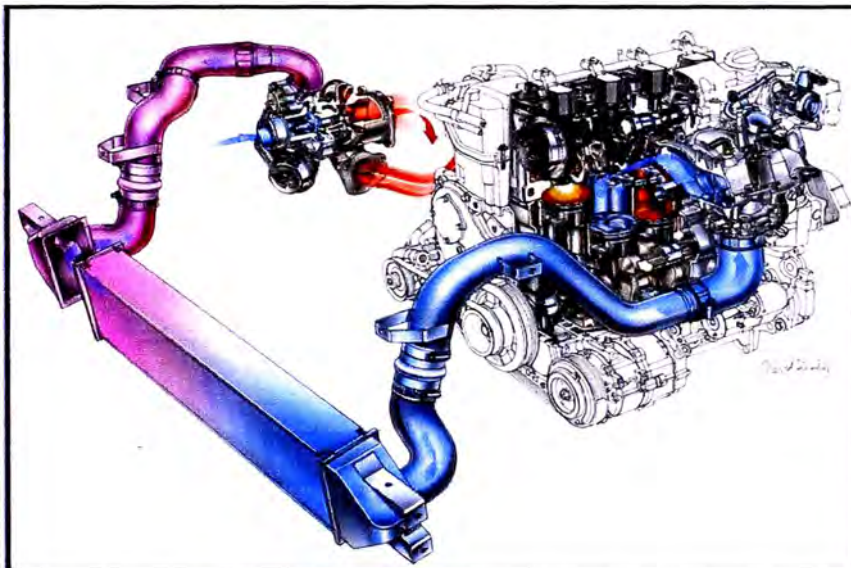


FIGURA 2.1 Ejemplo didáctico de un equipo posenfriador de aire conectado a un motor.

Los primeros posenfriadores aparecieron en las carreras de autos con sobrealimentación para ganar la potencia que les permitía obtener una ventaja frente a la tecnología usada por los demás competidores, esto ocurrió poco antes de estallar la segunda guerra mundial. Los posenfriadores y los interenfriadores (intercooler) fueron utilizados con gran éxito en los aviones de la segunda guerra mundial, esta era una época muy

importante para el desarrollo de la tecnología en la sobrealimentación como estrategia para el incremento de la potencia en los motores de combustión interna. Muchos otros avances fueron hechos en sobrealimentadores y en sistemas de enfriamiento de la carga durante esta época. Durante este tiempo, la sobrealimentación con dos compresores centrífugos, con posefriador de aire con agua (air to water aftercooled) de los motores de Rolls Royce Merlin fue empleado con el modelo P51 Mustang para producir el avión de motor de pistón más impresionante de combate de la historia.

Actualmente, hay mucha experiencia en el diseño y construcción de enfriadores (intercambiadores de calor) de carga, para muchos tipos de sobrealimentación usados en automóviles, camiones, maquinaria pesada, etc. Esta tecnología es usada por una razón principal, la de incrementar la potencia de un motor, como resultado del incremento de la densidad del aire de la carga que ingresa al motor.

2.2 EL DISEÑO ACTUAL

Para los propósitos del diseño del intercambiador de calor, los gases del aire se clasifican como líquidos de baja densidad. Al aire que pasa a través de un sobrealimentador (turbocompresor) se le llama aire de la carga. Un sobrealimentador comprime el aire de la carga antes de que entre en el motor; la compresión aumenta la energía y la densidad del aire de la carga, pero esto también genera una cantidad proporcionada de calor. **El recalentamiento es indeseable, pues tiende a disminuir la densidad del aire de la carga**, una forma de ocuparse del recalentamiento es enfriar el aire de la carga después

de que salga del sobrealimentador y antes de que entre en el motor. Sin embargo, diseñar el sistema de enfriamiento de la carga, que es, como se indicaba, un posenfriador y no un interenfriador (diferencia que será explicada más adelante en el subcapítulo 2.5 TERMINOLOGÍA), se debe considerar que se intenta enfriar el aire sin perder la densidad creciente con pérdidas por fricción. Las pérdidas por fricción significan pérdidas de presión al pasar el aire comprimido a través de los ductos del enfriador, al fluir a través de las vueltas y las longitudes de los tubos que conforman el posenfriador.

En efecto, las pérdidas de presión causadas usando un dispositivo que enfría la carga con presión elevada, pueden ser tan grandes que causen una pérdida neta en la densidad del aire. Por lo tanto, el diseñador debe considerar la tarifa del traspaso térmico y las pérdidas por fricción para cualquier sistema bajo consideración. Esto se llama el gasto de la fricción de energía, que se refleja en términos prácticos, en una caída en la presión del aire de la carga y por ende menor densidad de la misma.

2.3 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN UN POSENFRIADOR

El funcionamiento de los motores de automóvil es intermitente y éstos están funcionando en vacío (ralentí) más tiempo. Por lo tanto, la mayor parte del tiempo, un sobrealimentador está generando poco calor. En este modo de operación típico, con un sistema de enfriamiento de aire - agua (air-to-water), hay continuamente agua fresca almacenada en el depósito puesto que no hay virtualmente recalentamiento del aire de la carga. Cuando el motor se utiliza bajo condiciones de mayor carga, el aire calentado en

el turbocompresor comenzará a intercambiar más calor con el agua, ese calor finalmente se transfiere del agua al aire en el radiador, de forma similar a como sucede durante las pruebas del motor C32 en los camiones Caterpillar 777F; cuando el equipo está trabajando con carga, el aire que fluye desde el turbocompresor sale con elevadas temperaturas, este aire es refrigerado en el posenfriador que se usan durante las pruebas, el agua utilizada para este fin es enfriada a través de su recorrido por la torre de enfriamiento.

Dependiendo de la capacidad del sistema, del equipo posenfriador de aire, de la carga aplicada al motor y de la duración de la aceleración, puede haber un impacto en el incremento de la temperatura total del sistema. El uso continuo del motor en alta carga sobre un tiempo extendido tendría que ocurrir para que el sistema se estabilice y puedan registrarse los parámetros de operación del motor, pero esto podría significar que el agua del equipo posenfriador de aire y del radiador (o torre de enfriamiento) estén tan calientes como el aire de la carga, entonces el sistema sería dependiente solamente de la eficiencia del radiador del motor que extrae el calor del agua de refrigeración. Estas condiciones ocurren raramente.

En la prueba del motor con sistema de enfriamiento de aire con agua se observó que en determinado momento de la prueba, el sistema funcionaba con una presión en alza de 55,16 kPa (8 PSI), en aquel momento el sistema de sobrealimentación recibía mayor presión de combustión, esto se reflejaba en un incremento en la presión del aire

de carga y también en un incremento de la temperatura del aire de la carga, esta condición requería aproximadamente de 18 a 20 minutos para que el sistema se estabilice para poder registrar los parámetros bajo condiciones de carga y potencia en aquel punto. Incluso, el sistema posenfriador que se usaba había sido mejorado y también se realizó una limpieza de los conductos, debido a que anteriormente había sufrido recalentamiento en algunas pruebas en donde se pudo observar que la temperatura del agua del enfriador se elevaba así como se incrementaba la temperatura del aire de la carga, luego de este mantenimiento del equipo posenfriador es poco probable que esto suceda.

Todo este sistema de refrigeración es analizado como parte de los criterios del diseño de estos equipos de enfriamiento, reduciendo en lo posible las pérdidas de presión. Se recomienda el uso de un segundo intercambiador de calor e inclusive se sugiere uno más grande, éste vendría a ser radiador, para el rubro de equipos para trabajo pesado o en los que se desarrolle grandes potencias. Para los sistemas automotrices convencionales, estas ventajas permiten que nuestros diseñadores coloquen el posenfriador más compacto en una posición óptima, en una zona de la máquina que sea estratégico para las funciones que desarrolla. Para los usos de competición, se ha estado utilizando esta tecnología con éxito sin precedente, así como para los equipos que trabajen con gran demanda de potencia y sujeto grandes cargas.

2.4 SISTEMA POSENFRIADOR

Los motores de combustión interna de gasolina y diesel, requieren de un adecuado sistema de carga de aire, compuesto de uno o más elementos mecánicos, cuya función es la de incrementar su presión y su densidad. El sistema básico consiste en un compresor de aire o turbocompresor, accionado por los gases de escape del motor y un enfriador de aire o posenfriador (aftercooler), también conocido como enfriador de aire de carga (charge air cooler).

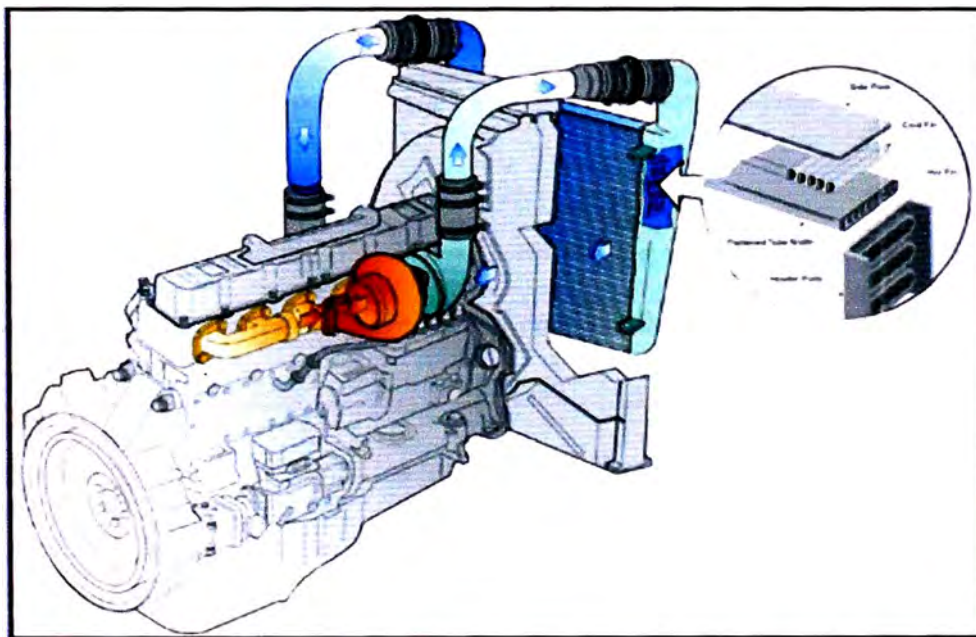


FIGURA 2.2 Vista de equipo posenfriador y los turbocompresores de un motor.

El turbocompresor aumenta la presión y la densidad del aire entregada al motor, llevando al máximo su par de torsión o potencia de salida. El posenfriador está localizado dentro de las líneas de aire a la salida del turbocompresor, extrae el calor

producido por la compresión y fricción de la carga de aire. Los posenfriadores aumentan la densidad del aire en la cámara de combustión y reducen su temperatura.

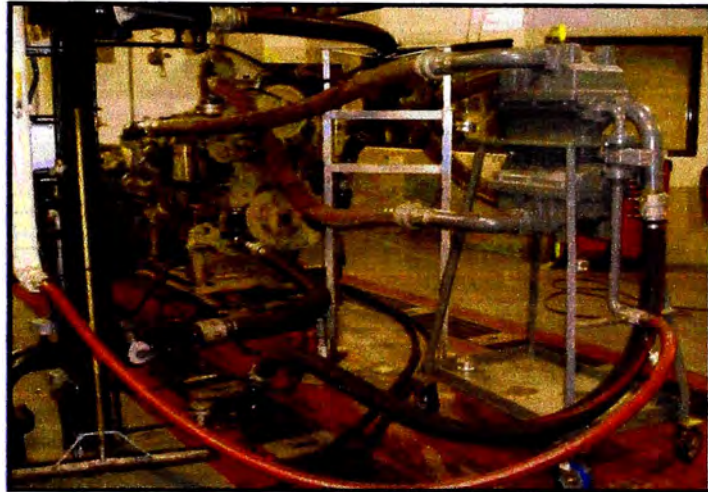


FIGURA 2.3 Equipo posenfriador de aire usado durante una prueba de motor.

Ambos elementos están igualados (adecuados) con precisión, para cumplir con los requisitos de funcionamiento y emisiones que el fabricante del motor ha establecido. En la actualidad, este sistema de carga de aire se utiliza en carros de pasajeros y de carreras, en aplicaciones comerciales diesel, ya sean camiones o autobuses, equipo agrícola, para la construcción, minería e incluso en equipo militar, de aviación y otras aplicaciones.

2.5 TERMINOLOGÍA

Un posenfriador es un intercambiador de calor colocado entre el compresor y la admisión del motor. Se utiliza el término posenfriador "aftercooler" debido a que está

después del compresor. Refiriéndose al interenfriador "intercooler", podemos indicar que simplemente significa un cambiador de calor colocado entre dos compresores en un sistema gradual. Los posenfriadores y los interenfriadores son ambos intercambiadores de calor llamados también enfriadores del aire de carga (charge air cooler).

En la terminología británica, el interenfriador (intercooler) es un intercambiador de calor situado tras las etapas de compresión de aire. Los norteamericanos a eso lo llamaban posenfriador (aftercooler), por estar después del sistema de compresión y antes del sistema de inducción a la entrada a los cilindros, término que también es usado frecuentemente en la industria nacional cuando se habla de refrigeración en la sobrealimentación.

En cambio, los norteamericanos llamaban interenfriador (intercooler), al intercambiador de calor (aire-aire), situado tras la etapa de turbocompresión de aire y antes de la última etapa de compresión/distribución mecánica.

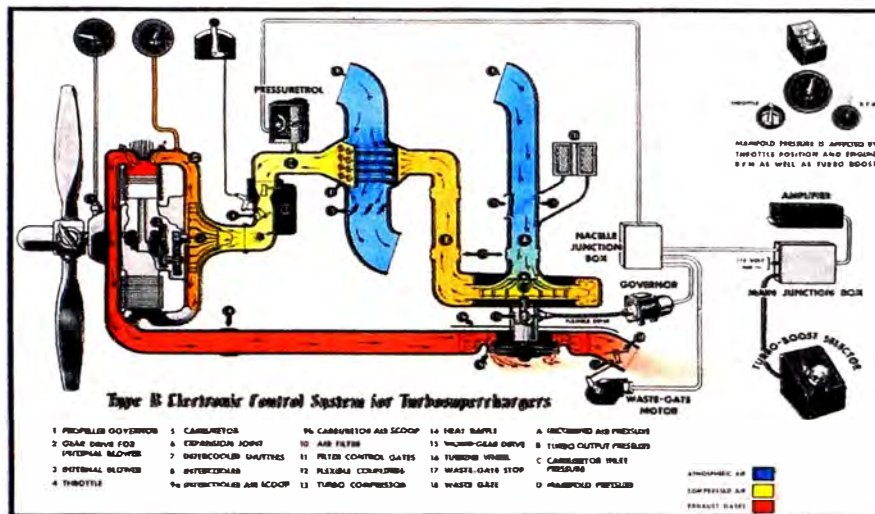


FIGURA 2.4 Esquema de la dirección del flujo de aire dentro de un sistema que opera con un equipo posenfriador de aire

En resumen, los posenfriadores de aire son un accesorio cada vez más común en los motores diesel, su función es enfriar el aire que va a los cilindros para incrementar su densidad. De esta manera, en un mismo cilindro se puede inyectar mayor cantidad de combustible, ya que hay más aire disponible para la mezcla. Así, se incrementa la potencia del motor y se reducen las emisiones contaminantes. Los fabricantes de posenfriadores recomiendan estos sistemas para evitar los cuatro problemas más comunes debidos a la inexistencia o mal funcionamiento del posenfriador:

- ✓ Mayor consumo de combustible
- ✓ Menor potencia del motor
- ✓ Sobrecalentamiento
- ✓ Emisiones nocivas

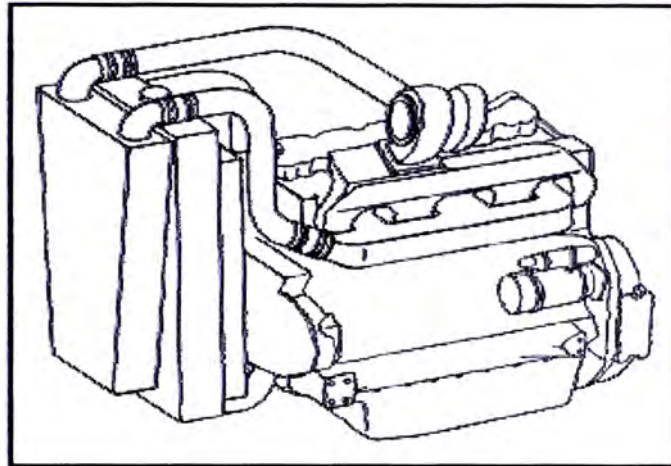


FIGURA 2.4 Esquema didáctico de un equipo posenfriador de aire en un motor con distribución lineal de cilindros.

2.6 MOTOR C32 PERTENECIENTE AL CAMIÓN CATERPILLAR 777F

El motor C32 de Caterpillar con tecnología ACERT (*) tiene mayor potencia, fiabilidad y eficiencia para brindar un rendimiento superior en las aplicaciones más rigurosas. Este motor optimiza el rendimiento del motor mientras cumple con las normas regulativas medio ambientales Tier 2 EPA (**) de los Estados Unidos. Esta tecnología ACERT ha sido aplicada con el objetivo de reducir las emisiones durante los procesos de combustión usando tecnología avanzada para los sistemas de aire y de combustible, junto con uso de la tecnología electrónica integrada. El fabricante Caterpillar cumple la normativa vigente de emisiones en la fuente de combustión en lugar de reciclar los gases de escape.

(*) Caterpillar introduce la tecnología ACERT, Tecnología en la reducción de emisiones de combustión (Advance Combustion Emission Reduction Technology), para la reducción de emisiones al medio ambiente y para cumplir las rigurosas normas de la EPA.

(**) Tier2 EPA: Norma de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency) de EUA para la reducción de contaminantes nocivos en las emisiones de gases de escape.

El motor C32 de Caterpillar usa tecnología ACERT y características específicas de diseño para entregar un mayor rendimiento y una vida útil prolongada, cumpliendo con las normas de emisiones Tier 2 EPA de los Estados Unidos, reduciendo las cantidades en emisiones de NOx en 27,5%, de 3,56 g/kW-h (4,8 g/bhp-h) hasta 2,24 g/kW-h (3,0 g/bhp-h), comparado con el 3508B (Motor Caterpillar similar).

Este tipo de motor maneja la compensación por altitud mediante un control electrónico de compensación automática por demanda de carga, dependiendo de las condiciones de gran altitud y arranque en frío.

El diseño del pistón marca una diferencia ante los pistones de otros motores similares que ofrecen la misma potencia, estos pistones son de acero forjado de una sola pieza y con faldón de acero forjado, que son más resistentes a las presiones y temperaturas altas del motor, mejoran la combustión y eficiencia del combustible y reducen las emisiones. El anillo superior de acero inoxidable, resistente a la corrosión, reduce el desgaste del anillo, de la ranura y de la camisa, lo que proporciona mayor fiabilidad y duración.

El MEUI, que significa: Inyector Unitario Electrónico de Accionamiento Mecánico (Mechanically Actuated Electronic Unit Injection), es la tecnología usada en sistema de combustible y consiste en que la entrega de combustible proporcionada por este sistema involucra un alto grado de precisión. La programación precisa del ciclo de

combustión reduce las temperaturas de la cámara de combustión, genera menos emisiones y optimiza la combustión. El sistema detecta las condiciones de operación y regula la entrega de combustible, para proporcionar eficiencia máxima de combustible, tiempos de respuesta mejorados, menores emisiones y baja emisión de humo.

El ECM, que significa: Módulo de Control Electrónico (Electronic Control Module), usa el software de administración avanzada del motor para vigilar, controlar y proteger el motor, mediante sensores electrónicos de auto diagnóstico. El sistema computarizado evalúa las condiciones de operación y los requerimientos de potencia, y ajusta el motor para proporcionar el máximo rendimiento y la operación más eficiente posibles. Adicional a esta tecnología, también se emplea el Controlador ADEM, que significa: Administración Avanzada del Motor Diesel (Advanced Diesel Engine Management), que consiste en la entrega de un rendimiento de combustible óptimo. El sistema de administración del motor proporciona una distribución flexible de combustible, lo que permite que el motor responda rápidamente a las necesidades variables de la aplicación. Este sistema hace seguimiento a las condiciones del motor y de la máquina, y mantiene el motor funcionando con eficiencia máxima.

Además, este tipo de motores cuenta con el sistema ORS, que significa: Sistema de Renovación del Aceite (Oil Renewal System), este sistema mide e inyecta aceite usado del motor desde el cárter a la tubería de retorno de combustible del motor,

prolongando los intervalos de cambio de aceite y aumentando la disponibilidad y productividad de la máquina.

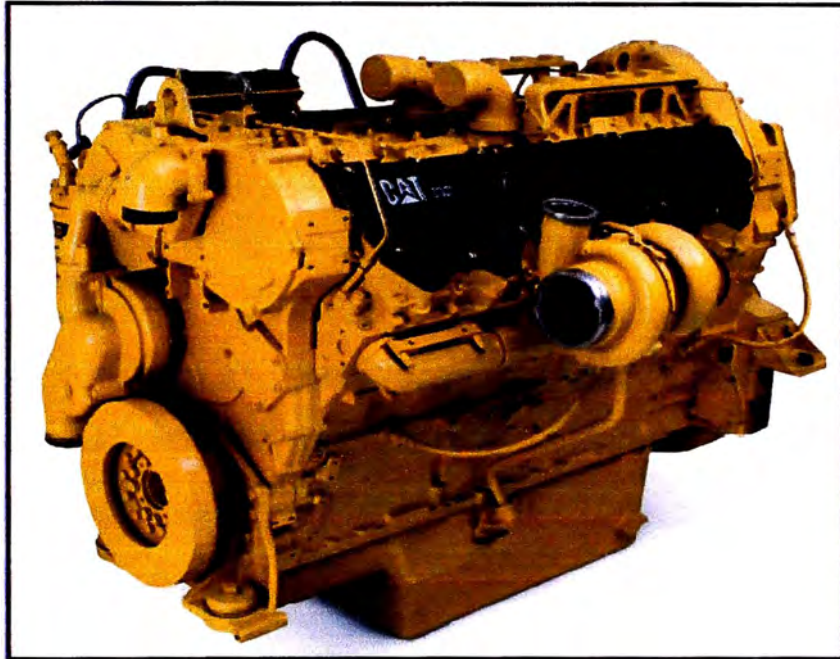


FIGURA 2.5 Vista de un motor Caterpillar modelo C32 que usa la máquina Caterpillar 777F.

TABLA 2.1 Especificaciones técnicas del motor Caterpillar modelo C32.

Motor	
Modelo de motor	Cat® C32 ACERT™
Potencia neta	939 hp 700.5 kW
Potencia neta - Cat	938.7 hp 700.2 kW
Potencia neta - ISO 9249	938.7 hp 700.2 kW
Potencia neta - 80/1269/EEC	938.7 hp 700.2 kW
Calibre	5.7 pulg 14.478 cm
Carrera	6.4 pulg 16.256 cm
Cilindrada	1959 pulg ³ 32.1 litros
Potencia bruta SAE J1995	1016 hp 757.9 kW
Potencia neta - SAE J1349	938.7 hp 700.2 kW

CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para las pruebas de los motores Caterpillar C32 en el dinamómetro de la sala número 2, existe una incapacidad en cuanto al sistema de enfriamiento del aire de carga, el cual depende de un posenfriador externo que el CRC eligió hace un tiempo para poder refrigerar la carga de aire que fluye del turbocompresor hacia el múltiple de admisión del motor. Desde hace un tiempo se ha notado que este equipo de enfriamiento de aire no tiene la capacidad para poder refrigerar el aire que ingresa a las cámaras de combustión cuando el motor desarrolla su máxima potencia. Por tanto, el objetivo del presente estudio es reemplazar el equipo existente por uno que cumpla con las exigencias de estas pruebas y demás requerimientos que establezca la gerencia del CRC.

Primero, se da a conocer ciertas características de estos motores C32 del fabricante Caterpillar para camiones 777F:

- ✓ Potencia bruta: 757,9 kW (1016 HP)
- ✓ Potencia neta: 700,2 kW (938 HP)
- ✓ Cilindrada: 0,0321 m³ (32,1 Lt)
- ✓ Calibre: 145 mm (5,7”)
- ✓ Carrera: 162 mm (6,4”)

A continuación se mencionan las diversas opciones de enfriadores que se tienen, estos equipos son sugerencias de diferentes distribuidores de equipos Caterpillar alrededor del mundo que actualmente usan estos equipos para estas pruebas, también se ha recibido la sugerencia de un equipo poseenfriador por parte de Caterpillar y, adicionalmente a esto, se ha recibido la sugerencia del proveedor del dinamómetro que el CRC utiliza para estas pruebas.

3.1.1 Herramienta propuesta por Caterpillar

El fabricante, en una comunicación remitida a la Gerencia del CRC sugiere, en idioma inglés, lo siguiente (traducida en el siguiente párrafo):

“In hot ambient temperatures, dynamometer tests for models with an air-to-air aftercooler can add a greater heat load to the jacket water cooling system. Therefore, the jacket water cooling system's temperature must be monitored. The following measurements may also need a power correction factor: Inlet air temperature, fuel API rating, fuel temperature and barometric pressure. With dynamometer tests for engines, use the FT-1438 Aftercooler Gp (Dynamometer Test). This tool provides a water cooled aftercooler in order to control the inlet air temperature to 50 °C (122 °F). ”

“En ambientes de temperaturas altas, las pruebas de dinamómetro para modelos con poseenfriadores aire - aire pueden añadir carga térmica al sistema de enfriamiento con agua. Por lo tanto, la temperatura del sistema de enfriamiento con agua deberá ser monitoreada. Las siguientes variables necesitarían un factor

de corrección de potencia: Temperatura del aire de entrada, densidad API del combustible, temperatura del combustible y presión barométrica. Para pruebas en dinamómetro de motores C32, usar el posenfriador FT-1438. Esta herramienta provee un enfriamiento con agua para controlar que la temperatura de entrada esté en 50°C (122°F).”

El modelo FT1438 Posenfriador para pruebas de dinamómetro contiene las especificaciones que se muestran a continuación.

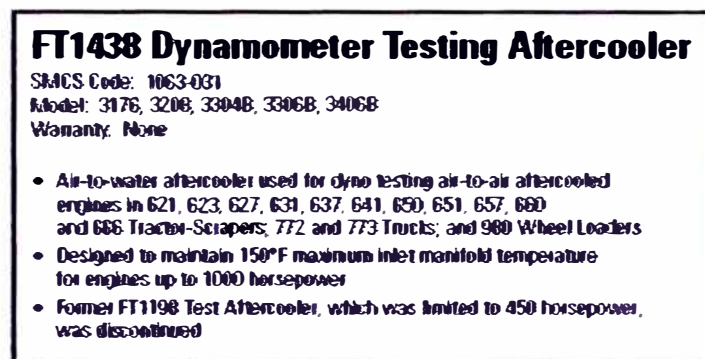


FIGURA 3.1 Se indica las características del equipo posenfriador de aire FT1438 sugerido por Caterpillar.

En las características mencionadas arriba, se observa que el posenfriador de aire con agua es usado también en pruebas de dinamómetro de motores Caterpillar para algunas máquinas como: Tractores excavadores, camiones y cargadores frontales. El equipo posenfriador está diseñado para mantener una temperatura máxima de 65,5 °C (150 °F) en motores con potencias que superan los 745,7 kW (1000 HP) de potencia. Menciona también que el equipo posenfriador

de aire FT1198 ha sido retirado del mercado ya que sólo tenía capacidad para soportar pruebas en motores de 335,6 kW (450 HP).

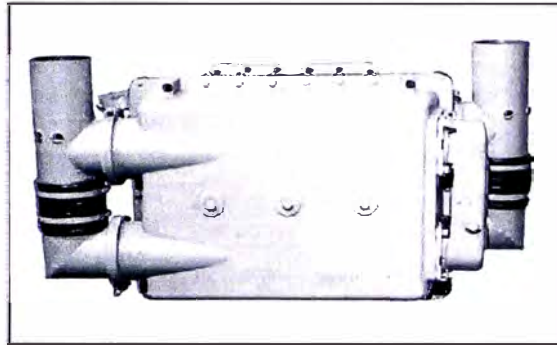


FIGURA 3.2 Vista del equipo posenfriador FT1438.

3.1.2 Equipo construido en Ferreyros SAA

Posenfriador construido en el CRC, basado en el uso de un posenfriador de aire original del motor de un equipo de generación eléctrica Caterpillar D398B de 727,8 kW (976 HP) de potencia, pero con algunas modificaciones. Este equipo corresponde al posenfriador con número de parte Caterpillar 6L-6292.



FIGURA 3.3 Vista del equipo posenfriador usado actualmente en el CRC para las pruebas de motor C32 Caterpillar.

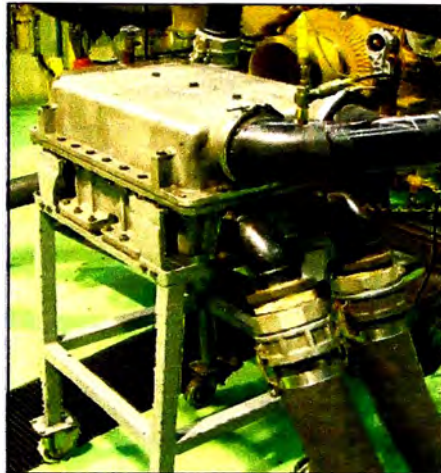


FIGURA 3.4 Vista del equipo posenfriador de aire usado actualmente en el CRC para las pruebas de motor C32 Caterpillar.

3.1.3 Equipos propuestos por otros distribuidores

A continuación se mencionan los equipos posenfriadores de aire usados por otros distribuidores de máquinas Caterpillar, estos distribuidores operan en otros países y atienden también a las pruebas de diversos motores que no son enviados con su propio posenfriador.

3.1.3.1 Finning Inglaterra

Este proveedor ha fabricado su propio posenfriador de aire en base al uso de dos posenfriadores (distribuidos en serie) de un modelo de motor Caterpillar 3412E, posenfriador con número de parte Caterpillar 129-6836.

Como se muestra en las imágenes.

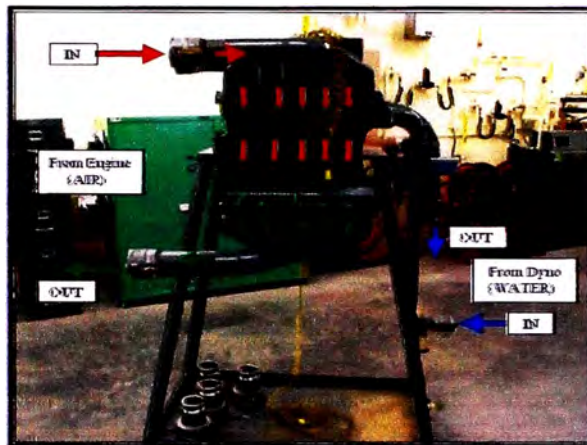


FIGURA 3.5 Vista lateral del equipo posenfriador de aire usado por el distribuidor Finning para pruebas de motores Caterpillar, en esta imagen se indica la dirección de los flujos de aire y de agua, así como las líneas de succión y descarga.

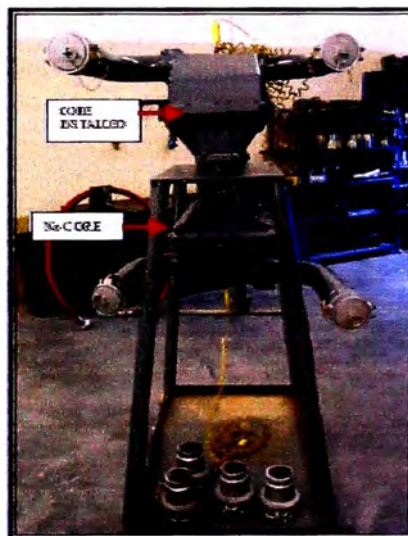


FIGURA 3.6 Vista frontal del equipo posenfriador de aire usado por el distribuidor Finning para pruebas de motores Caterpillar, en esta imagen se indica la posición del centro intercambiador de calor, que en este caso se encuentra en la parte superior del equipo.

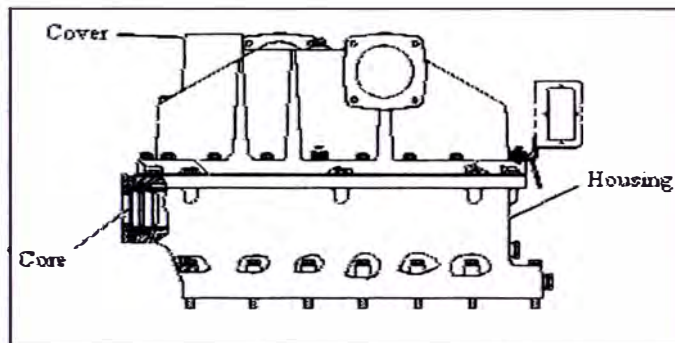


FIGURA 3.7 Vista descriptiva del equipo posenfriador de aire usado por el distribuidor Finning para pruebas de motores Caterpillar, en esta imagen se indica la posición del centro intercambiador de calor (Core), de la tapa del intercambiador (Cover), así como la carcasa(Housing).

3.1.3.2 Walker Machinery (Virginia)

Según información recibida del comunicador técnico del CRC de Walker Machinery, Ed Pugh (tecnicah comunicator of CRC - WM), ellos han fabricado un equipo posenfriador para pruebas de motor usando un posenfriador original de un motor de un cargador frontal Caterpillar modelo 992, además se usaron dos cajas empernadas y algunas tuberías. Este posenfriador de aire original, tiene un número de parte Caterpillar 4N-8099, este posenfriador es similar al construido por el distribuidor Finning ya que usa un intercambiador de calor similar (n/p Caterpillar 129-6836).

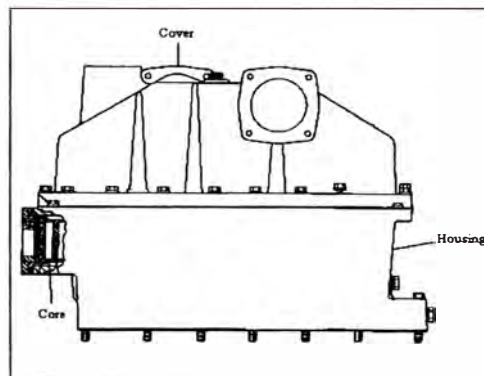


FIGURA 3.8 Vista descriptiva del equipo posefriador de aire usado por el distribuidor Walker Machinery para pruebas de motores Caterpillar, en esta imagen se indica la posición del centro intercambiador de calor (Core), de la tapa del intercambiador (Cover), así como la carcasa(Housing).

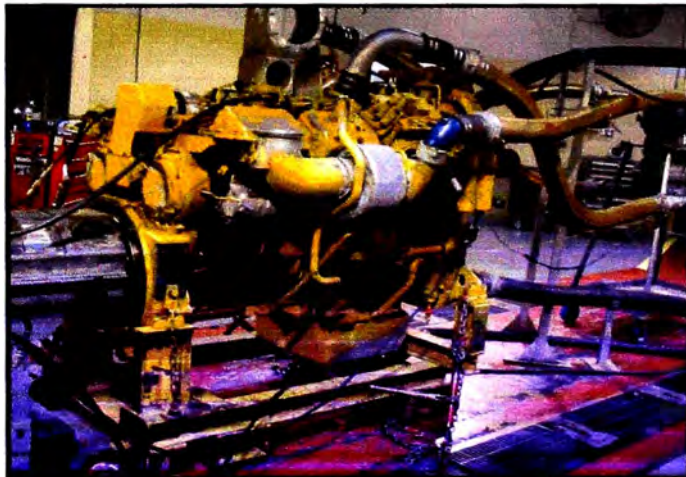


FIGURA 3.9 Vista de las conexiones de equipo posefriador de aire con un motor Caterpillar instalado en banco de pruebas en el dinamómetro del distribuidor Walker Machinery.



FIGURA 3.10 Vista lateral del equipo posenfriador de aire usado por el distribuidor WM para pruebas de motores Caterpillar, en esta imagen se indica las líneas de succión y descarga de aire y agua.

3.1.3.3 Gecolsa

La información recibida de este distribuidor nos indica que se utilizan dos posenfriadores originales con número de parte Caterpillar 107-7194 (el centro intercambiador de calor tienen el número de parte Caterpillar 113-4655), colocados en paralelo; acondicionando las entradas tanto de aire como de agua. El funcionamiento se basa en que a cada posenfriador le corresponde una línea de aire de un turbo. Por otro lado, el control de ingreso de agua para mantener la temperatura se realiza de forma manual. Este posenfriador es original del motor del camión Caterpillar modelo 785C.



FIGURA 3.11 Vista del equipo posenfriador de aire usado por el distribuidor Gecolsa para pruebas de motores Caterpillar, en esta imagen se indica las líneas de succión y descarga de aire y agua, así como se observa que los centros intercambiadores de calor están en paralelo o en serie dependiendo de las conexiones de las líneas.



FIGURA 3.12 Vista lateral del equipo posenfriador de aire usado por el distribuidor Gecolsa para pruebas de motores Caterpillar, en esta imagen se puede apreciar las tomas de aire y agua para las líneas que se deban instalar.

3.1.3.4 Propuesta por Power Test

Es un accesorio que el proveedor del dinamómetro Power Test sugiere para las pruebas de motores Caterpillar que se hagan con el dinamómetro de su fabricación, Power Test es el fabricante de los 2 dinamómetros con los que cuenta el CRC para las pruebas de motores.

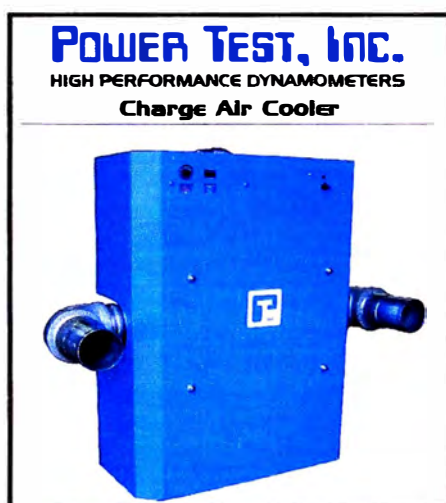


FIGURA 3.12 Vista frontal del equipo posefriador de aire sugerido por el proveedor Power Test, para pruebas de motores Caterpillar, en esta imagen se puede apreciar la toma de aire de carga.

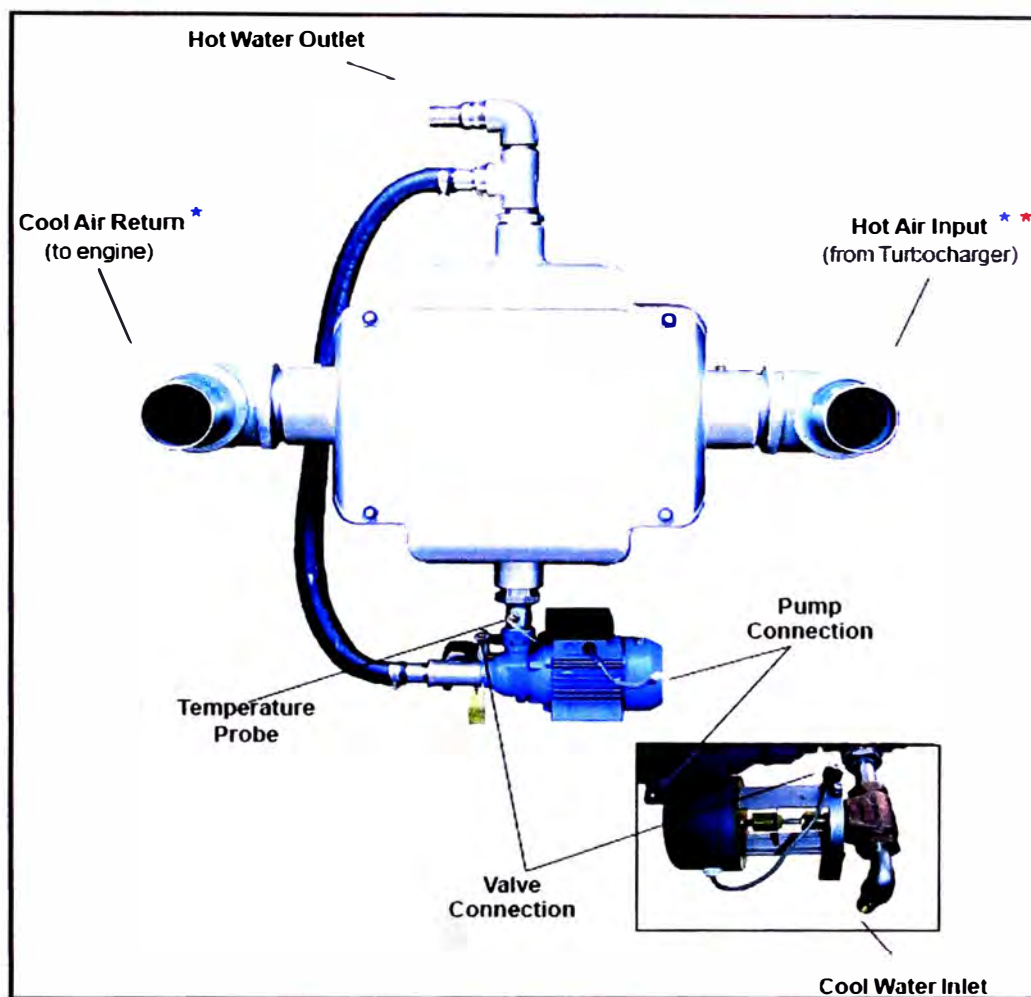


FIGURA 3.13 Vista de los componentes internos del equipo poseñador de aire sugerido por el proveedor Power Test, en esta imagen se puede apreciar el sistema de bombeo de agua para refrigeración, la toma de agua fresca de esta bomba (Cool wáter inlet), un sensor de temperatura de agua (Temperature probe), conexiones de la bomba y de válvulas (Pump & valve connection), la línea de ingreso de aire caliente de carga (Hot air input), la salida del aire frío de carga (Cool air return) y la línea de salida del agua caliente (Hot wáter outlet).

3.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Se comenzará realizando el cálculo de la capacidad requerida para el enfriador a elegir y que este logre satisfacer la necesidad de enfriamiento del aire luego de generarse un incremento en la temperatura de éste, debido al calentamiento durante su paso a través del turbocompresor cuando la potencia desarrollada por el motor sea mayor.

No se considerará el diseño de un posenfriador para futuras pruebas, lo que cuenta en este cálculo es identificar la capacidad de enfriamiento cuando el motor esté trabajando a máxima potencia, para esto nos basaremos en datos registrados en las pruebas de motores Caterpillar C32 realizadas en el banco de pruebas del CRC de Ferreyros SAA.

Se deben tener presentes las siguientes condiciones para esta selección:

- ✓ El equipo posenfriador deberá enfriar el aire de la carga con agua.
- ✓ El intercambio de calor no implica un cambio de fase en ninguno de los fluidos.

Para obtener la capacidad de enfriamiento del equipo posenfriador, se realizarán los cálculos en base a los datos que se han registrado en las pruebas de motores C32 Caterpillar atendidos en el CRC, estos datos corresponden a pruebas en los últimos motores reparados en el CRC, luego de obtener estos datos, que nos servirán para el cálculo de la carga térmica, se presentará la forma en que éstos se usarán en la ecuación de transferencia de calor que más se ajuste al comportamiento de los fluidos.

A continuación se presenta la metodología de obtención de los parámetros así como el planteamiento que deberá seguirse para los cálculos. En el siguiente capítulo se presentarán los cálculos en base a los parámetros y ecuaciones que se describirán en el presente capítulo.

3.2.1 Verificar Historial

Se revisaron las órdenes de trabajo (en adelante “OT”) de reparaciones en el CRC de Ferreyros para motores C32, para cada OT encontrada se ubicó el registro de los valores de las pruebas de salida, con estos datos se podrá realizar el cálculo de la temperatura del aire a la entrada del posenfriador cuando el motor se encuentra a la máxima potencia en la prueba y con esto se podrá realizar el cálculo del calor en el aire que deberá ser dispersado por el posenfriador.

Se tienen como muestra, 5 pruebas en dinamómetro de motores C32 Caterpillar para camiones 777F, cada valor de temperatura, presión y potencia es registrado por la computadora del motor (ECM), esta computadora recibe las señales de cada sensor ubicados en puntos estratégicos del motor que permiten tener una lectura en tiempo real de estos parámetros del motor, dichos sensores forman parte del arreglo del motor, es decir, no son elementos externos que se le instalen adicionalmente. Durante las pruebas de motor, estos parámetros también se visualizan en el monitor de la computadora en la sala del dinamómetro, esta computadora registra los mismos datos que se envían al ECM del motor. A

continuación se adjunta una vista, como ejemplo, de las pantallas del monitor cuando se prueban los motores en el dinamómetro:

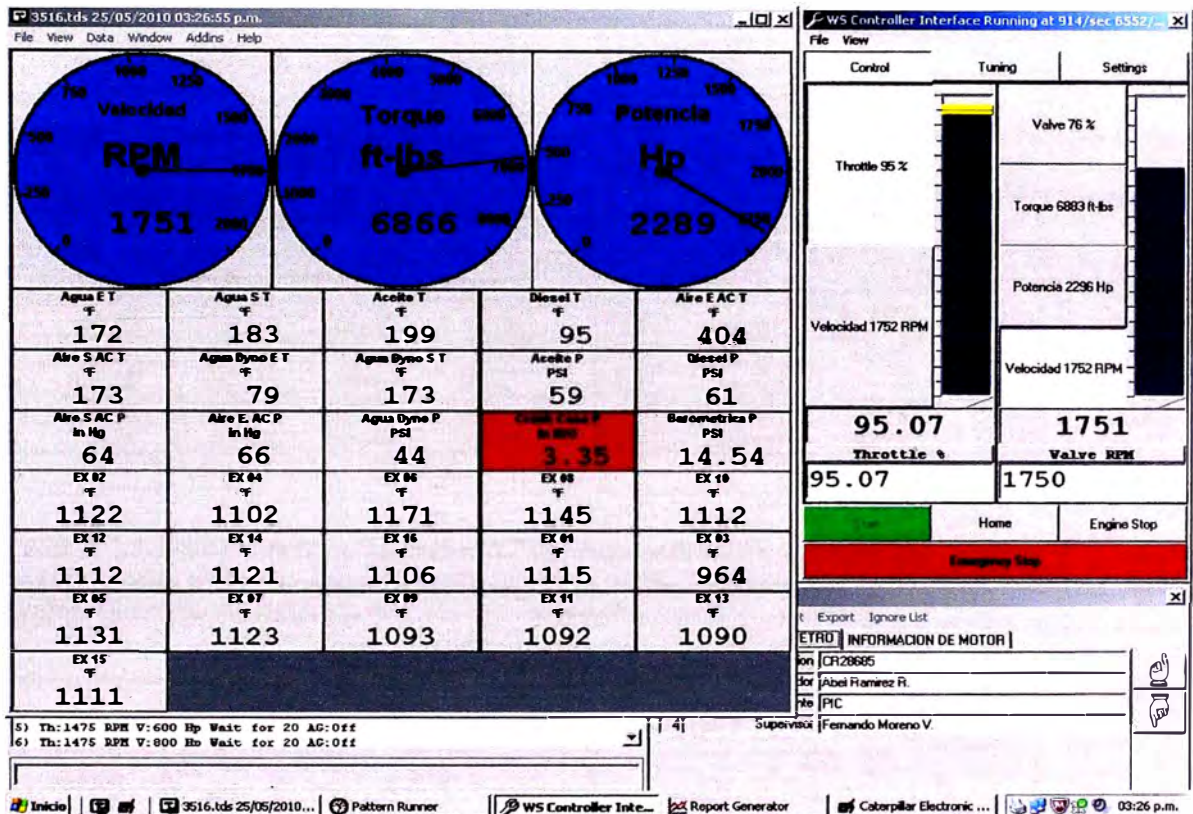


FIGURA 3.14 Vista del monitor de la computadora que recibe los valores que el ECM del motor registra para cada régimen de potencia durante las pruebas en dinamómetro. En este caso se registra que el motor está desarrollando 2.228 HP de potencia; un torque de 6.686 Lb-Ft; una velocidad del motor de 1.752 RPM; también se registran los valores de temperatura y presión del agua, del aire, del aceite, del combustible, temperaturas de los gases de escape de cada cilindro, etc.

Se tienen como muestra, 5 pruebas de motores que han sido clasificadas por orden de trabajo en cada reparación de motores C32 Caterpillar; los resultados se adjuntan a continuación:

➤ Reparación con orden de trabajo CR25527.

TABLA 3.1 Lista de valores de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR25527, las unidades son acordes al sistema internacional

Pot (KW)	Temp. agua de motor ingreso (K)	Temp. agua de motor salida (K)	Temp. aceite (K)	Temp. diesel (K)	Temp. aire ingreso (K)	Temp. aire salida (K)	Temp. agua posenfri. ingreso (K)	Temp. Agua posenfri. salida (K)
149.14	339.11	343.00	354.67	306.89	350.78	326.89	300.78	326.33
298.28	338.56	343.56	354.67	306.89	368.56	325.78	301.33	328.56
448.17	338.56	344.67	355.22	306.89	400.22	331.33	301.89	333.00
596.56	338.00	345.22	356.33	306.89	429.67	340.78	301.89	337.44
739.73	336.33	345.22	357.44	307.44	452.44	351.89	302.44	341.33

TABLA 3.2 Lista de valores (en unidades originales registradas por el ECM del motor que figuran en los reportes técnicos obtenidos de las pruebas en el dinamómetro) de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR25527

TEMPERATURA DE FLUIDOS								
Potencia (Hp)	Agua E T(°F)	Agua S T(°F)	Aceite T(°F)	Diesel T (°F)	Aire E AC T° (°F)	Aire S AC T° (°F)	Agua Dyno E T(°F)	Agua Dyno S T(°F)
200	151	158	179	93	172	129	82	128
400	150	159	179	93	204	127	83	132
601	150	161	180	93	261	137	84	140
800	149	162	182	93	314	154	84	148
992	146	162	184	94	355	174	85	155

➤ Reparación con orden de trabajo CR26340.

TABLA 3.3 Lista de valores de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR26340, las unidades son acordes al sistema internacional

Pot (KW)	Temp. agua de motor ingreso (K)	Temp. agua de motor salida (K)	Temp. aceite (K)	Temp. diesel (K)	Temp. aire ingreso (K)	Temp. aire salida (K)	Temp. agua posenfri. ingreso (K)	Temp. Agua posenfri. salida (K)
175.99	353.00	358.56	368.56	300.78	365.22	318.00	295.22	321.89
372.85	351.89	358.56	369.67	300.78	389.11	329.11	295.22	323.00
512.30	351.89	359.67	369.67	301.89	436.89	351.89	295.78	329.67
596.56	351.33	359.67	369.67	301.89	445.22	355.78	296.33	331.89
736.75	351.89	359.67	365.78	302.44	448.56	355.78	299.67	338.00

TABLA 3.4 Lista de valores (en unidades originales registradas por el ECM del motor que figuran en los reportes técnicos obtenidos de las pruebas en el dinamómetro) de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR26340

TEMPERATURA DE FLUIDOS								
Potencia (Hp)	Agua E T(°F)	Agua S T(°F)	Aceite T(°F)	Diesel T (°F)	Aire E AC T° (°F)	Aire S AC T° (°F)	Agua Dyno E T(°F)	Agua Dyno S T(°F)
236	176	186	204	82	198	113	72	120
500	174	186	206	82	241	133	72	122
687	174	188	206	84	327	174	73	134
800	173	188	206	84	342	181	74	138
988	174	188	199	85	348	181	80	149

➤ Reparación con orden de trabajo CR27888.

TABLA 3.5 Lista de valores de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR27888, las unidades son acordes al sistema internacional

Pot (KW)	Temp. agua de motor ingreso (K)	Temp. agua de motor salida (K)	Temp. aceite (K)	Temp. diesel (K)	Temp. aire ingreso (K)	Temp. aire salida (K)	Temp. agua posenfri. ingreso (K)	Temp. Agua posenfri. salida (K)
149.14	344.11	346.89	345.78	305.78	365.78	330.78	299.67	325.78
300.52	349.11	352.44	351.33	306.33	371.89	326.33	299.67	326.89
445.18	352.44	355.78	353.56	306.89	404.67	333.00	300.22	331.33
601.03	359.11	363.56	358.56	306.89	444.11	346.89	300.22	336.33
744.95	349.11	354.67	356.33	314.67	453.00	350.22	303.00	341.89

TABLA 3.6 Lista de valores (en unidades originales registradas por el ECM del motor que figuran en los reportes técnicos obtenidos de las pruebas en el dinamómetro) de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR27888

TEMPERATURA DE FLUIDOS								
Potencia (Hp)	Agua E T(°F)	Agua S T(°F)	Aceite T(°F)	Diesel T (°F)	Aire E AC T° (°F)	Aire S AC T° (°F)	Agua Dyno E T(°F)	Agua Dyno S T(°F)
200	160	165	163	91	199	136	80	127
403	169	175	173	92	210	128	80	129
597	175	181	177	93	26	140	81	137
806	187	195	186	93	340	165	81	146
999	169	179	182	107	356	171	86	156

➤ Reparación con orden de trabajo CR28119.

TABLA 3.7 Lista de valores de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR28119, las unidades son acordes al sistema internacional

Pot (KW)	Temp. agua de motor ingreso (K)	Temp. agua de motor salida (K)	Temp. aceite (K)	Temp. diesel (K)	Temp. aire ingreso (K)	Temp. aire salida (K)	Temp. agua posefri. ingreso (K)	Temp. Agua posefri. salida (K)
149.14	354.11	356.89	363.56	305.78	348.56	316.33	300.78	323.00
298.28	353.56	356.89	364.11	305.78	370.78	325.22	300.78	326.89
447.42	352.44	357.44	365.78	306.33	420.22	348.00	299.67	331.33
596.56	353.00	358.00	365.22	306.33	418.56	349.11	299.11	332.44
746.45	351.89	358.56	365.22	306.89	449.11	365.22	301.33	338.00

TABLA 3.8 Lista de valores (en unidades originales registradas por el ECM del motor que figuran en los reportes técnicos obtenidos de las pruebas en el dinamómetro) de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR28119

TEMPERATURA DE FLUIDOS								
Potencia (Hp)	Agua E T(°F)	Agua S T(°F)	Aceite T(°F)	Diesel T (°F)	Aire E AC T° (°F)	Aire S AC T° (°F)	Agua Dyno E T(°F)	Agua Dyno S T(°F)
200	178	183	195	91	168	110	82	122
400	177	183	196	91	208	126	82	129
600	175	184	199	92	297	167	80	137
800	176	185	198	92	294	169	79	139
1001	174	186	198	93	349	198	83	149

➤ Reparación con orden de trabajo CR28470.

TABLA 3.9 Lista de valores de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR28470, las unidades son acordes al sistema internacional

Pot (KW)	Temp. agua de motor ingreso (K)	Temp. agua de motor salida (K)	Temp. aceite (K)	Temp. diesel (K)	Temp. aire ingreso (K)	Temp. aire salida (K)	Temp. agua posenfri. ingreso (K)	Temp. Agua posenfri. salida (K)
149.14	353.56	355.78	359.11	306.89	338.56	316.89	300.22	322.44
298.28	351.89	355.78	360.78	306.89	362.44	320.78	299.67	325.22
447.42	351.89	356.89	364.11	306.33	413.56	338.56	299.67	331.33
596.56	350.78	356.89	364.67	306.89	439.11	346.89	299.67	334.67
751.67	350.22	358.56	366.33	309.11	448.56	350.22	300.22	336.33

TABLA 3.10 Lista de valores (en unidades originales registradas por el ECM del motor que figuran en los reportes técnicos obtenidos de las pruebas en el dinamómetro) de temperaturas en el motor durante la prueba en dinamómetro, para la reparación con orden de trabajo CR28470

TEMPERATURA DE FLUIDOS								
Potencia (Hp)	Agua E T(° F)	Agua S T(° F)	Aceite T(°F)	Diesel T (°F)	Aire E AC T° (°F)	Aire S AC T° (°F)	Agua Dyno E T(° F)	Agua Dyno S T(° F)
200	177	181	187	93	150	111	81	121
400	174	181	190	93	193	118	80	126
600	174	183	196	92	285	150	80	137
800	172	183	197	93	331	165	80	143
1008	171	186	200	97	348	171	81	146

De las muestras, se puede observar que el motor no ha podido ser probado a la máxima potencia de 758 kW (1016HP), esto debido al problema de calentamiento generado durante estas pruebas por la utilización de un posenfriador que no es original del equipo, esto es objeto de estudio en el presente informe.

3.2.2 Calor del aire que ingresa al posenfriador

Como sabemos, por conceptos de transferencia de calor, la energía térmica transferida de un fluido está en función de su flujo másico, del calor específico del

fluido y de la variación de temperatura a la que es sujeto, a continuación se muestra la fórmula que lo representa:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{p_c} \Delta T_c \quad (3.1)$$

Donde:

\dot{Q} : Flujo de calor que debe perder el aire que ingresa al enfriador

\dot{m}_c : Flujo másico del aire que ingresa al enfriador

C_{p_c} : Calor específico del aire

ΔT_c : Reducción de la temperatura del aire luego de atravesar el enfriador

Pero, como en nuestro caso se trabajará con el aire a elevadas temperaturas, se debe tener presente que el calor específico (C_{p_c}) depende de la temperatura, por lo tanto, la fórmula mencionada anteriormente que representa el comportamiento del flujo de calor que el posenfriador de aire debe ser capaz de disipar durante las pruebas, deberá considerarse de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \int_{T_i}^{T_f} C_{p_c} dT \quad (3.2)$$

De esta fórmula se deduce que el flujo de calor depende directamente de la integración del calor específico por el diferencial de temperatura, integración

que va desde el valor de la temperatura de entrada (T_i) al posenfriador hasta la temperatura de salida del enfriador (T_f).

Por lo descrito, se deberá identificar los valores mencionados anteriormente para poder determinar el calor que debe ser capaz de disipar dicho posenfriador del aire para la situación más crítica, que es cuando el motor se encuentra trabajando a su potencia máxima dentro del banco de pruebas, para esto se tendrá que calcular o identificar los siguientes parámetros: flujo másico de aire, calor específico de aire y la variación de temperatura del aire.

Adicionalmente se tiene, por especificaciones de Caterpillar, los siguientes datos que se deben cumplir durante el funcionamiento del motor en el banco de pruebas:

- Temperatura del aire de ingreso al motor (T_f) cuando éste trabaja a plena carga: 50°C (122 °F).
- La caída de presión del aire entre la salida del compresor y el ingreso al motor cuando éste trabaja a plena carga: 4 kPa (1,18 pulgadas de Hg).

3.3 CÁLCULOS Y RESULTADOS

En este capítulo del informe se presentan los cálculos y resultados que permitirán obtener el valor de transferencia de calor necesario del equipo posenfriador para poder

disipar el calor del aire cargado proveniente del turbocompresor y que debe ingresar a los 12 cilindros del motor C32 que pertenece al camión minero Caterpillar modelo 777F.

Los siguientes puntos se han evaluado en función a lo presentado en el capítulo anterior, en el que se indica la descripción del problema y el procedimiento que se debe seguir, con el objetivo de poder encontrar el valor del calor que deberá ser capaz de disipar el posenfriador de aire, con el objetivo de evitar sobrecalentamientos en este equipo, así como el desarrollo de las pruebas del motor trabajando a su máxima potencia de 758 kW (1016 HP).

3.3.1 Cálculo de la temperatura de aire antes de ingresa al posenfriador (T_i)

Se utilizará la data según el historial registrado de pruebas de los 5 motores analizados en banco, se identificará la temperatura máxima de aire a la entrada del posenfriador mediante una aproximación basada en el comportamiento de la temperatura del aire y de la potencia del motor obtenidas durante las pruebas en el banco, se analizará la tendencia del comportamiento de la temperatura versus la potencia que desarrolla el motor.

Se adjunta los valores de temperatura de aire a la entrada del posenfriador y los valores de potencia desarrollada por el motor, obtenidos durante las pruebas de los motores, para establecer el valor de temperatura que tendría el aire cuando el motor trabaje en un régimen de 758 kW (1016 HP):

TABLA 3.11 Valores para el motor 1

Motor 1	
T (K) entrada aire	Potencia (kW)
350.8	149.1
368.6	298.3
400.2	448.2
429.7	596.6
452.4	739.7

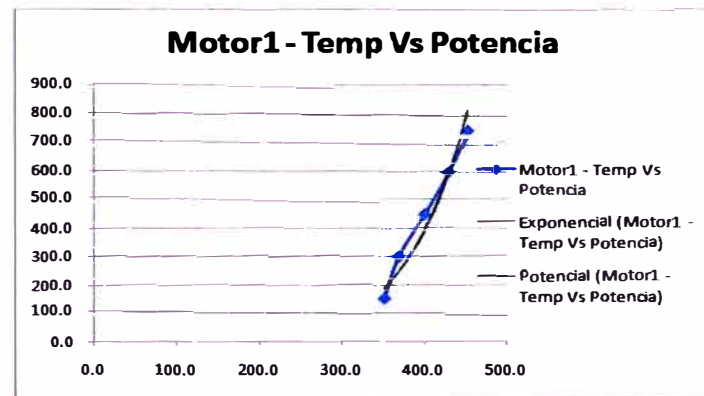


FIGURA 3.15 Tendencia de la temperatura (K) frente a la potencia (kW)

TABLA 3.12 Valores para el motor 2

Motor 2	
T (K) entrada aire	Potencia (kW)
365.2	176.0
389.1	372.9
436.9	512.3
445.2	596.6
448.6	736.8

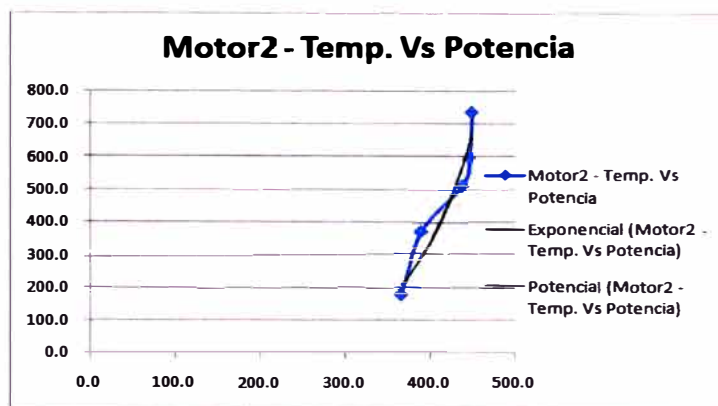


FIGURA 3.16 Tendencia de la temperatura (K) frente a la potencia (kW)

TABLA 3.13 Valores para el motor 3

Motor 3	
T (K) entrada aire	Potencia (kW)
365.8	149.1
371.9	300.5
404.7	445.2
444.1	601.0
453.0	745.0

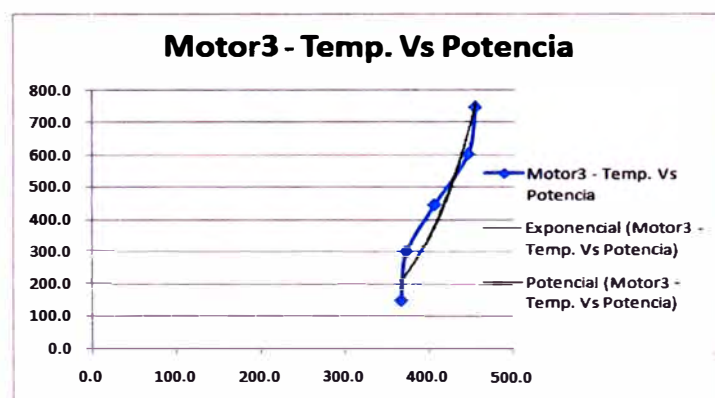


FIGURA 3.17 Tendencia de la temperatura (K) frente a la potencia (kW)

TABLA 3.14 Valores para el motor 4

Motor 4	
T (K) entrada aire	Potencia (kW)
348.6	149.1
370.8	298.3
420.2	447.4
418.6	596.6
449.1	746.4

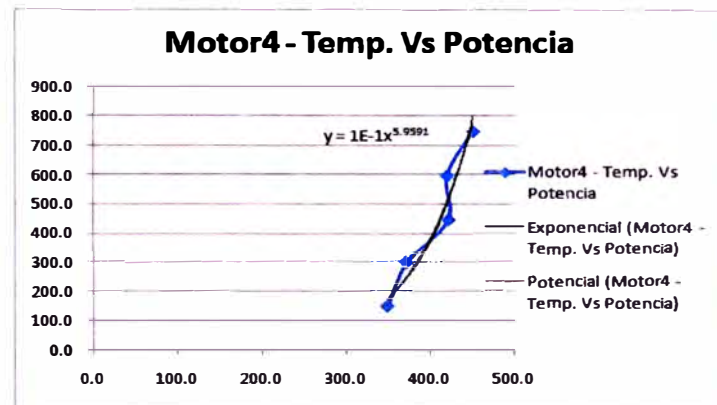


FIGURA 3.18 Tendencia de la temperatura (K) frente a la potencia (kW)

TABLA 3.15 Valores para el motor 5

Motor 5	
T (K) entrada aire	Potencia (kW)
338.6	149.1
362.4	298.3
413.6	447.4
439.1	596.6
448.6	751.7

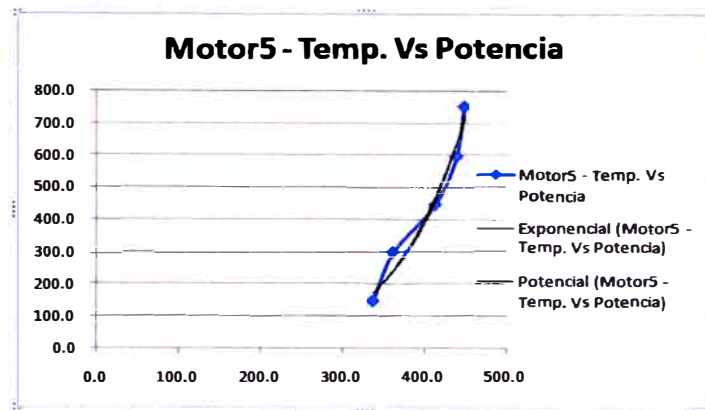


FIGURA 3.19 Tendencia de la temperatura (K) frente a la potencia (kW)

Según lo descrito anteriormente, se realizó la aproximación del valor promedio de la temperatura de aire al ingreso del posenfriador cuando el motor esté trabajando a su máxima potencia, este valor ha sido el resultado luego de evaluar la tendencia del comportamiento de la potencia del motor con el incremento de la temperatura del aire de ingreso al posenfriador, el valor encontrado es de 455,05 K (359,69 °F).

3.3.2 Cálculo del flujo de aire que ingresa al posenfriador (Q_a)

Se realizaron mediciones durante las pruebas de los 5 motores. Durante estas pruebas se midió el flujo de aire a la salida del turbo cuando el motor trabaja a su máxima carga para el banco izquierdo y derecho, los resultados se adjuntan a continuación.

Se han tomado mediciones del flujo de aire que sale del turbocompresor y va al posenfriador, debido a que en cada lado del motor se tiene una línea de aire

de carga es que se ha separado los valores por bancos del motor (por lados), se ha medido los flujos de aire del banco izquierdo y del banco derecho del motor, estos flujos se registraron justo cuando los motores desarrollaban la potencia más elevada registrada durante las pruebas, con esta data se realizó una aproximación en la tendencia del flujo de aire para cuando el motor desarrolló los 758KW de potencia, hay que recordar que el flujo total de aire que ingresa al equipo posenfriador es la suma de los flujos obtenidos por cada banco.

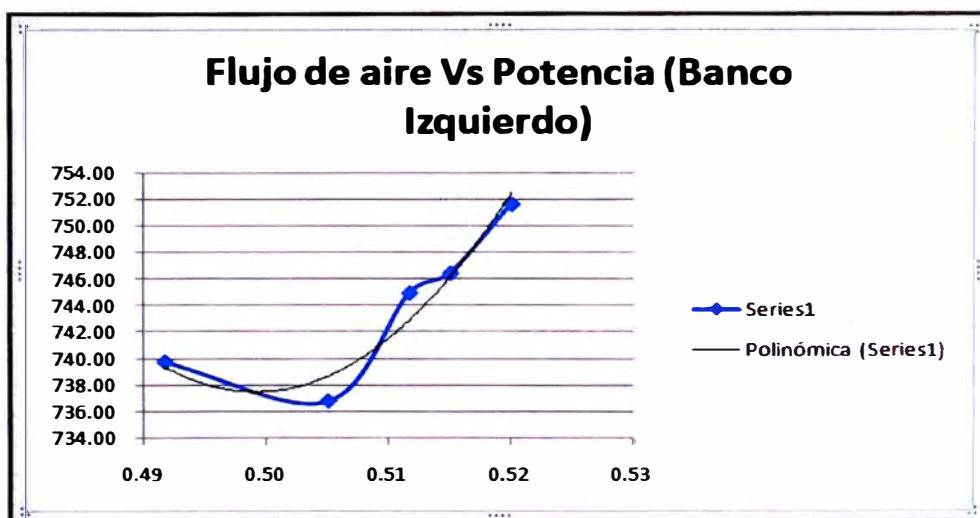
TABLA 3.16 Flujos de aire, lado izquierdo, en los 5 motores

Banco izquierdo	
Flujo (m³/seg)	Potencia (KW)
0.49	739.73
0.51	736.75
0.51	744.95
0.52	746.45
0.52	751.67
Qi	757.9

TABLA 3.17 Flujos de aire, lado derecho, en los 5 motores

Banco derecho	
Flujo (m³/seg)	Potencia (KW)
0.48	739.73
0.50	736.75
0.51	744.95
0.51	746.45
0.52	751.67
Qd	757.9

Se ajustaron estos valores analizando la tendencia del comportamiento del flujo de aire de cada banco frente a la potencia máxima desarrollada por los 5 motores durante las pruebas para obtener el valor estimado para los caudales del banco izquierdo (Q_i) y para el banco derecho (Q_d), las tendencias se muestran en los siguientes gráficos:

FIGURA 3.20 Tendencia del flujo de aire (m³/s) frente a la potencia (kW)

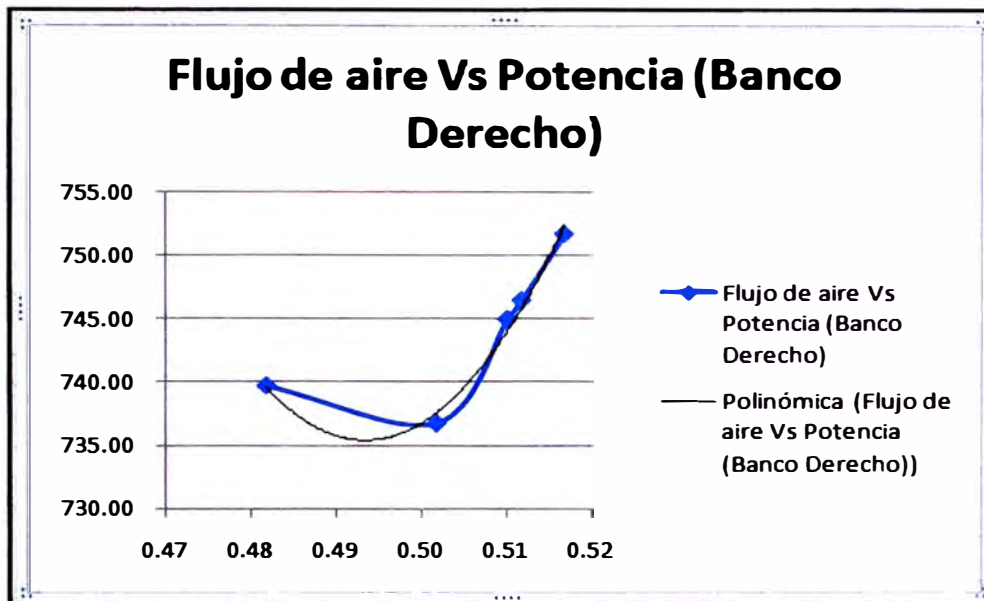


FIGURA 3.21 Tendencia del flujo de aire (m^3/s) frente a la potencia (kW)

El ajuste de la tendencia del banco izquierdo, arroja el valor de $0,525 \text{ m}^3/\text{s}$ ($31,51 \text{ m}^3/\text{min}$) para Q_i .

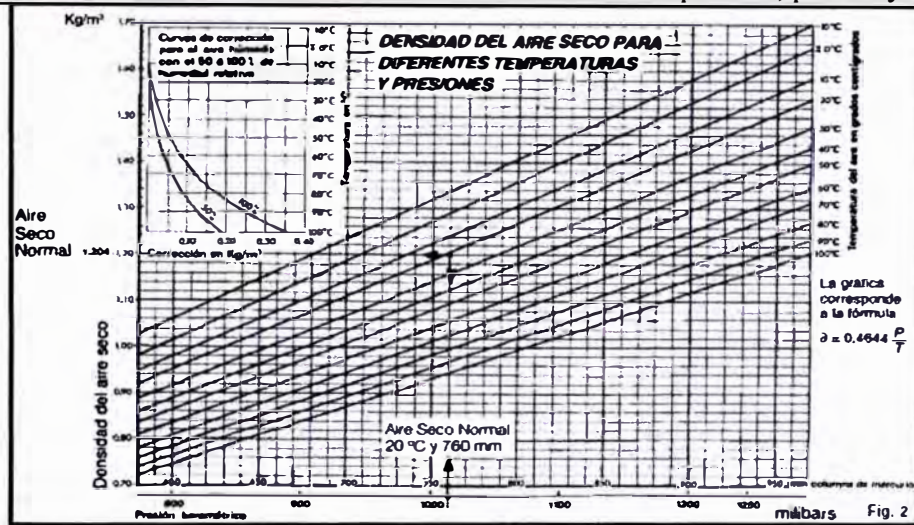
El ajuste de la tendencia del banco derecho, arroja el valor de $0,522 \text{ m}^3/\text{s}$ ($31,31 \text{ m}^3/\text{min}$) para Q_d .

Basado en esta aproximación, obtenemos el valor del flujo de aire que ingresa al posenfriador cuando el motor se encuentra en su potencia de 758 kW durante la prueba en banco, este valor es $1,047 \text{ m}^3/\text{s}$ (la suma de ambos bancos, $Q_i + Q_d$).

3.3.3 Cálculo de la densidad de aire (ρ)

En función a la presión, temperatura y humedad relativa del aire que atraviesa el enfriador, revisamos la tabla adjunta para determinar la densidad del aire.

TABLA 3.18 Densidad de aire en función a las condiciones de temperatura, presión y humedad relativa



Se considera como temperatura promedio del aire dentro del enfriador el valor de 389K (116 °C) entre la entrada T_i y salida T_f del posenfriador, se debe considerar una humedad relativa del 50% para la sala, ya que ese fue el valor promedio durante los días de pruebas con los 5 motores.

Un dato pendiente es el valor de la presión que se considerará para el aire que recorre el posenfriador, es que para este fin se presenta el cálculo del valor de la presión de aire a la entrada del enfriador para cuando el motor desarrolle 758 kW de potencia en la prueba, se realizará una aproximación de este valor ya que

no puede ser obtenido durante las pruebas en banco de los motores, a continuación se adjunta los cuadros de presión versus potencia de las pruebas realizadas:

TABLA 3.19 Presión de aire de entrada y potencia del motor 1

	POT (KW)	P. aire (KPa)
MOTOR 1	149.14	27.09
	298.28	60.96
	448.17	108.36
	596.56	152.39
	739.73	179.48

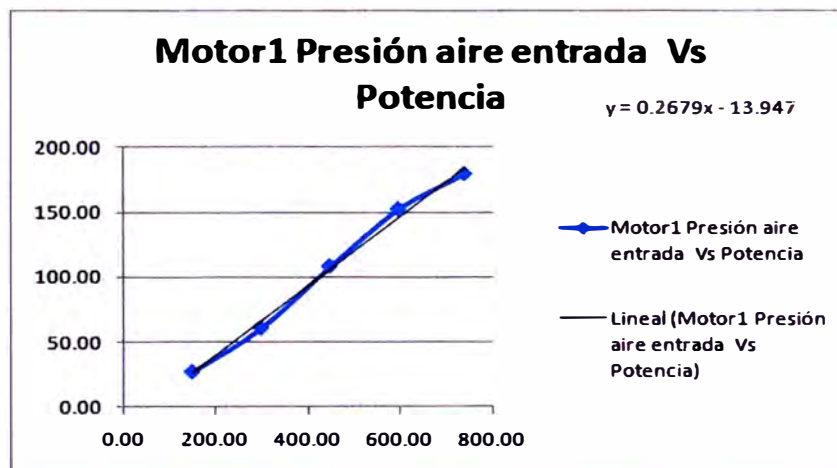


FIGURA 3.22 Tendencia de la presión de aire (kPa) frente a la potencia (kW)

TABLA 3.20 Presión de aire de entrada y potencia del motor 2

	POT (KW)	P. aire (KPa)
MOTOR 2	175.99	37.25
	372.85	88.05
	512.30	135.46
	596.56	152.39
	736.75	165.93

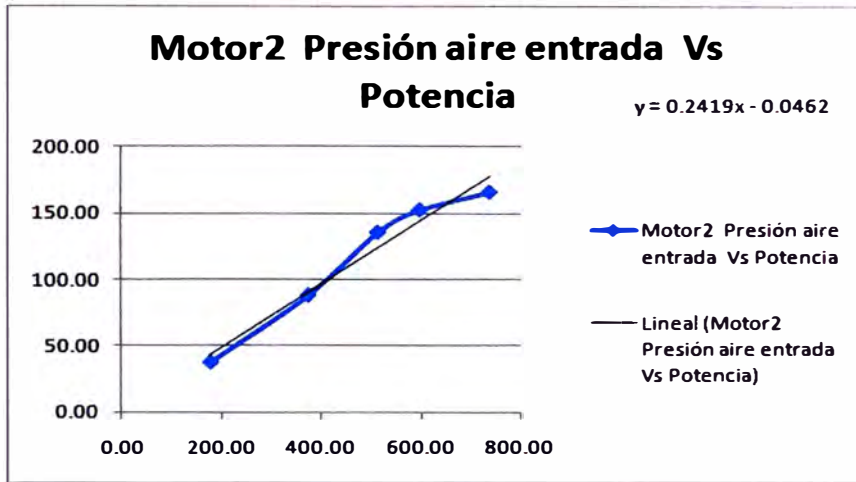


FIGURA 3.23 Tendencia de la presión de aire (kPa) frente a la potencia (kW)

TABLA 3.21 Presión de aire de entrada y potencia del motor 3

	POT (KW)	P. aire (KPa)
MOTOR 3	149.14	20.32
	300.52	47.41
	445.18	94.82
	601.03	138.84
	744.95	165.93

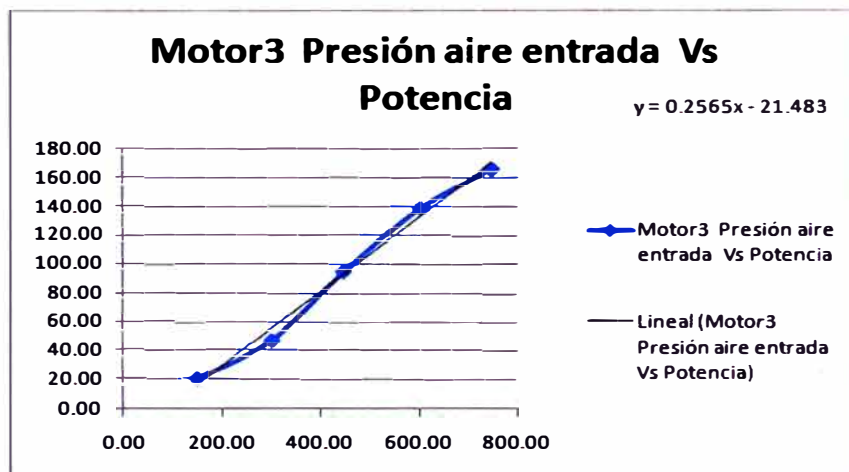


FIGURA 3.24 Tendencia de la presión de aire (kPa) frente a la potencia (kW)

TABLA 3.22 Presión de aire de entrada y potencia del motor 4

	POT (KW)	P. aire (KPa)
MOTOR 4	149.14	33.86
	298.28	67.73
	447.42	128.68
	596.56	165.93
	746.45	199.80

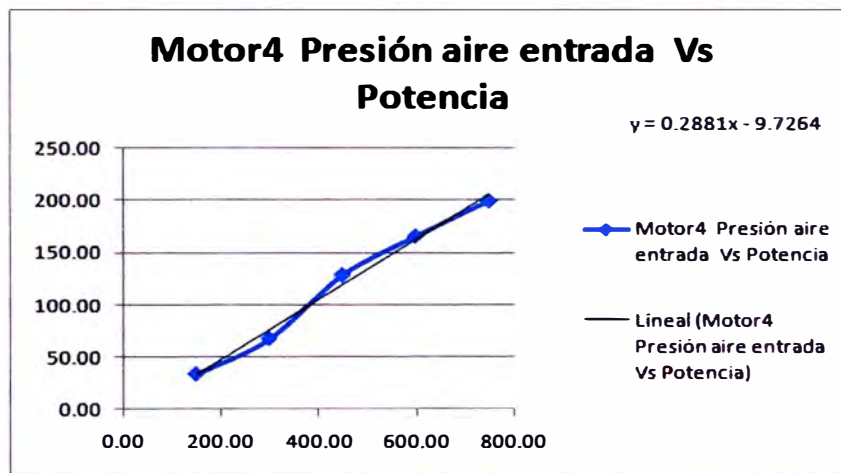


FIGURA 3.25 Tendencia de la presión de aire (kPa) frente a la potencia (kW)

TABLA 3.23 Presión de aire de entrada y potencia del motor 5

	POT (KW)	P. aire (KPa)
MOTOR 5	149.14	27.09
	298.28	54.18
	447.42	111.75
	596.56	155.77
	751.67	179.48

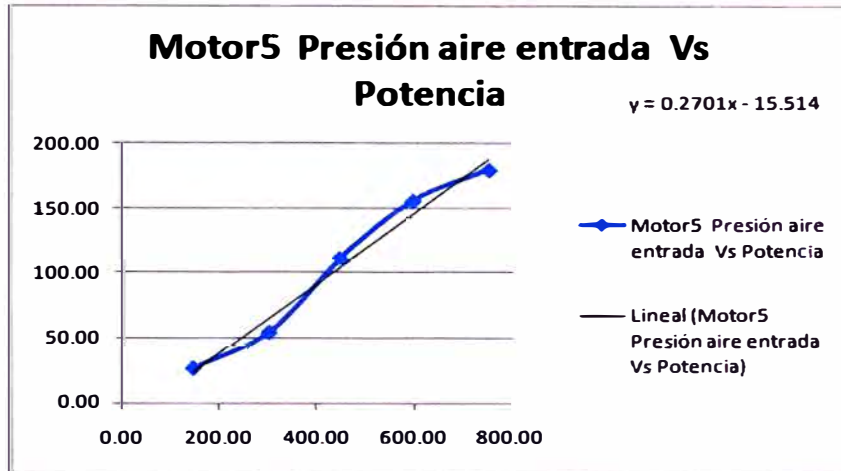


FIGURA 3.26 Tendencia de la presión de aire (kPa) frente a la potencia (kW)

Luego de evaluar la tendencia de la presión se obtiene que la presión promedio del aire que ingresa al posenfriador es de 183,487 kPa (54,29 pulgadas de Hg), también se ha considerado (de acuerdo al fabricante) que la caída de presión es de 3,99 kPa (1,18 pulgadas de Hg), por lo tanto, se tomará el valor promedio de la presión de aire en 181,78 kPa (53,79 pulgadas de Hg).

Con estos valores y realizando una proyección de la Tabla 3.18, se determinó que la densidad del aire (ρ) que se considera en los cálculos es 1,31 kg/m^3 .

TABLA 3.24 Cuadro de aproximación de la densidad del aire.

Presión atmosférica:	1817.84	hPa
Temperatura ambiente:	116	°C
Humedad relativa en:	50	%
Densidad del aire:	1.3178	kg/m³

3.3.4 Cálculo del calor específico del aire a presión constante (C_{p_c})

Debido a las altas temperaturas del aire, es que el valor del calor específico del aire depende de la temperatura de la forma siguiente:

$$C_{p_c} = 0,917 + 1,432T/10^4 - 1,226T^2/10^8 \dots \text{kJ/kg-K} \dots (3.3)$$

$$C_{p_c} = 0,219 + 0,342T/10^4 - 0,293T^2/10^8 \dots \text{Btu/lb-R} (***)$$

En resumen, se tienen los siguientes datos para el cálculo de la transferencia de calor que debe disipar el posefriador que se debe seleccionar:

- ✓ Temperatura a la entrada del posefriador a la máxima potencia (T_i): 455,05K (182,05 °C).
- ✓ Temperatura a la salida del posefriador a la máxima potencia (T_f): Debería ser 323K (50 °C según fabricante).
- ✓ Flujo total de aire que atraviesa el posefriador es 1.047m³/s (62,82m³/min) (Q_a).
- ✓ Densidad promedio del aire (ρ) es 1,31 kg/m³ (bajo una temperatura promedio de 389 K, 181,78 kPa de presión promedio y 50% de humedad relativa promedio).
- ✓ Adicionalmente se indica la fórmula del calor específico del aire para estos cálculos $C_{p_c} = 0,917 + 1,432T/10^4 - 1,226T^2/10^8$ (kJ/kg-K)

(***) Expresión que resulta del estudio presentado en la Publicación de Spencer y Justice. (Tabla presentada en el libro TERMODINÁMICA de Virgil Moring Faires, VI Edición, año1,999)

3.3.5 Cálculo del flujo de calor que debe disipar el equipo posefriador de aire

De los datos obtenidos, se procede con el cálculo del flujo de calor que deberá ser disipado por el posefriador bajo estudio:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \int_{T_i}^{T_f} C_{p_c} dT \quad (3.2)$$

Donde:

$$\dot{m}_c = \rho_x Q_a \quad (3.4)$$

$$= 1,31 \text{ kg/m}^3 \times 62,82 \text{ m}^3/\text{min} \Rightarrow \mathbf{82,29 \text{ Kg/min} = \dot{m}_c}$$

También se tiene que:

$$T_i = 455,05 \text{ K (182,05 } ^\circ\text{C)}$$

$$T_f = 323 \text{ K (50 } ^\circ\text{C)}$$

En la ecuación del flujo de calor se tiene:

$$= (82,29 \text{ kg/min}) \times \int (0,917 + 1,432T/10^4 - 1,226T^2/10^8) dT$$

$$= (82,29 \text{ kg/min}) \times [0,219T + (1,71T^2/10^5) - (9,77T^3/10^{10})]$$

$$= (82,29 \text{ kg/min}) \times [[0,219(581,67) + (1,71(581,67)^2/10^5) - (9,77(581,67)^3/10^{10})] - [0,219(819,36) + (1,71(819,36)^2/10^5) - (9,77(819,36)^3/10^{10})]]$$

$$= (82,29 \text{ kg/min}) \times [132,97 - 190,38]$$

$$= (82,29 \text{ kg/min}) \times [-57,40] \text{ Btu / (lb } ^\circ\text{R)} \times (1.054,4 \text{ Joule/Btu}) \times (1 \text{ lb}/0,4536 \text{ kg}) \times (1 ^\circ\text{R)}$$

$$\boxed{\dot{Q} = 10.979,72104 \text{ kJ/min} \Rightarrow 182,99 \text{ kJ/s}}$$

De los cálculos anteriores se ha estimado el flujo de calor necesario que deberá disipar el equipo posenfriador, este valor resulta 182,99 kW.

Adicionalmente, como comentario, se puede mencionar que realizando el cálculo del flujo de calor, considerando que el calor específico del aire se mantiene constante (1.004,67 J/kg.K), se obtiene el siguiente valor: 181,95 kW (181,95 kJ/s).

Complementando este punto, se indica que se realizó el cálculo de la capacidad de transferencia de calor por unidad de tiempo del posenfriador que actualmente se viene usando, considerando los siguientes valores propios de las pruebas en banco:

- ✓ T° salida del posenfriador promedio = 355,2 K
- ✓ T° entrada del posenfriador promedio = 455,05 K
- ✓ Flujo total de aire que atraviesa el posenfriador es 1,047m³/s
- ✓ Densidad promedio del aire es 1,06 kg/m³ (bajo una temperatura promedio de 405 K, 181,78 kPa de presión promedio y 50% de humedad relativa promedio)
- ✓ Flujo másico = (1,047 x 1,06) = 0,987 kg/s (59,26 kg/min)...(Fórmula 3.4)

Reemplazando estos valores en la Fórmula 3.2, se obtiene que el flujo de calor que disipa el posenfriador que actualmente se usa en las pruebas de motores C32 Caterpillar es de 100,01 kW (100.01 kJ/s).

De este cálculo se puede observar que existe un déficit de 81,94 kW en el posefriador actual para poder cumplir con la exigencia durante las pruebas de los motores cuando estos trabajen en su máxima potencia.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO

En el capítulo anterior se ha calculado el flujo de energía calorífica del aire que ingresa al enfriador y que debe ser capaz de disipar el poseenfriador que sea elegido. En el presente capítulo se deberá realizar la comparación técnica y económica, evaluando las herramientas que ya existen, que han sido fabricados y que actualmente son usados por otros distribuidores de equipos Caterpillar, por el mismo fabricante Caterpillar o también se evaluará el equipo que nos sugiere el proveedor que fabricó el dinamómetro que se usa en el banco de pruebas.

En el presente informe se indicarán algunos detalles técnicos a los que se ha podido tener acceso para cada equipo poseenfriador que se evalúa, así como también el detalle de los presupuestos para la fabricación o adquisición de cada uno de los equipos propuestos. Un detalle técnico muy importante que servirá como elemento de comparación será la capacidad de enfriamiento de los equipos poseenfriadores sujetos a estudio, estas capacidades han sido recogidas de las propuestas técnicas.

4.1 POSENFRIADOR USADO POR EL DISTRIBUIDOR FINNING INGLATERRA



FIGURA 4.1 Vistas del equipo posenfriador que usa este distribuidor

4.1.1 Características técnicas

Este proveedor ha fabricado un posenfriador en base a dos posenfriador con número de parte (n/p) 129-6836 en serie, de un modelo de motor Caterpillar 3412E (Potencia 513,8 kW). Se ha informado que la capacidad de transferencia de calor que tiene esta herramienta durante las pruebas de motores en dinamómetro llega a los 185kW, esto se consigue mediante la regulación del caudal del agua del intercambiador hasta su valor máximo.

La regulación de este caudal se da a través de una electroválvula que permite el control del flujo de agua en función al comportamiento de la temperatura del aire (este parámetro también es sentido) dentro del posenfriador.

Contiene acoples que facilitan la instalación con cualquier tipo de manguera que se tenga en el dinamómetro dentro del sistema de líneas de aire entre el turbocompresor y el múltiple de admisión.

Es de fácil transporte, ya que está soportada en una mesa de 4 patas rígidas y resistentes que cuentan con ruedas que le dan estabilidad a la estructura. Puede trabajar con motores de distribución lineal de cilindros o distribución en V sin ningún inconveniente.

4.1.2 Partes y Costo de Fabricación

Para la fabricación de este accesorio de enfriamiento se necesita básicamente las siguientes partes:

TABLA 4.1 Detalle del costo de fabricación del equipo enfriador

Cnt	N/P	Descripcion	Precio US\$	Total US\$
2	255-4492	Cover		
2	4N-8472	Housing		
1	2W-6593	Core		
1	V47AR-1C	Control Valve		
1	-	Mesa		
				12780.23
Precio Final				US\$ 13500

El costo incluiría algunos accesorios como sensores y mangueras, además es necesario adicionar un costo por trámites de envío de las partes.

4.2 POSENFRIADOR USADO POR EL DISTRIBUIDOR WALKER MACHINERY

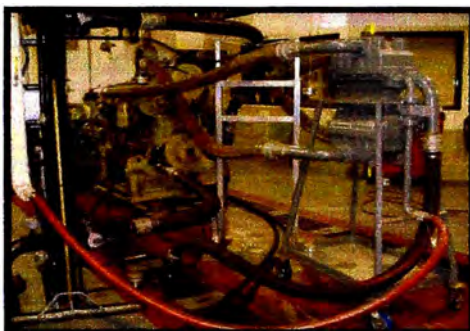


FIGURA 4.2 Vista del equipo posenfriador que usa este distribuidor

4.2.1 Características técnicas

Según información recibida de Ed Pugh, ellos han fabricado su enfriador para pruebas con un posenfriador y dos cajas empernadas de un motor de cargador frontal Caterpillar modelo 992C de 523.5 kW (Posenfriador n/p 4N-8099), con sus respectivas tuberías.

Presenta similares características que la herramienta fabricada por el distribuidor Finning, aunque la capacidad de transferencia que se tiene para este enfriador es 175 kW, creemos que esta diferencia está directamente relacionada con el proceso de fabricación de este distribuidor.

4.2.2 Partes y Costo de Fabricación

Para la fabricación de este accesorio de enfriamiento se necesita básicamente las siguientes partes:

TABLA 4.2 Detalle del costo de fabricación del equipo enfriador

Cnt	N/P	Descripcion	Precio US\$	Total US\$
2	255-4492	Cover		
2	4N-8472	Housing		
1	2W-6593	Core		
1	V47AR-1C	Control Valve		
1	-	Mesa		
				9497.53
			Precio Final	US\$ 10000

El costo incluiría algunos accesorios como sensores y mangueras, además es necesario adicionar un costo por trámites de envío de las partes.

4.3 POSENFRIADOR USADO POR EL DISTRIBUIDOR GECOLSA



FIGURA 4.3 Vista del equipo posenfriador que usa este distribuidor.

4.3.1 Características técnicas

La información recibida de este distribuidor nos indica que se utilizan dos posenfriadores con número de parte Caterpillar 107-7194 (los centros intercambiadores de calor tienen n/p 113-4655) de un motor de un camión

Caterpillar modelo 785C, de serie 5AZ (1.118,5 kW) colocados en paralelo o en serie; acondicionando las entradas tanto de aire como de agua. El funcionamiento se basa en que a cada posefriador le corresponde una línea de aire de un turbocompresor.

Este equipo tiene una capacidad de 250 kW, según la información de este distribuidor, esto se consigue mediante la regulación del caudal del agua del intercambiador hasta su valor máximo, pero el control de ingreso de agua para mantener la temperatura se realiza de forma manual.

Este equipo puede trabajar en serie o en paralelo, dependiendo del requerimiento de transferencia de energía que se tenga para determinada prueba de motor. Puede usarse en pruebas de motores que alcancen los 1491,4 kW de potencia. Para el caso de fabricación de las tapas, estas son de un material de acero inoxidable.

Tiene puertos de termocuplas para el mejor control de la temperatura de los fluidos, ya sea en los compartimentos de agua o líneas de aire. Es de fácil transporte, ya que está soportada en una mesa de 4 patas rígidas y resistentes que cuentan con ruedas de 15.24 centímetros de diámetro que le dan mejor estabilidad a la estructura. Puede trabajar con motores de distribución lineal de cilindros o distribución en V si ningún inconveniente.

4.3.2 Partes y Costo de Fabricación

Para la fabricación de este accesorio de enfriamiento se necesita básicamente las siguientes partes:

- ✓ Fabricación utilizando tapas (no son de Caterpillar), hechos según modelo del distribuidor.

TABLA 4.3 Detalle del costo de fabricación del equipo enfriador con tapas hechizas

Modelo		785C - 5AZ		Motor		3516	
Cnt	N/P	Descripcion	Precio US\$	Total US\$			
2	113-4655	Core					
4	-	Tapas					
1	-	Mesa					
8	-	Tubos					
						14392.34	
				Precio Final		US\$ 15000	

- ✓ Fabricación utilizando tapas (covers) Caterpillar.

TABLA 4.4 Detalle del costo de fabricación del equipo enfriador con tapas marca Caterpillar

Modelo		785C - 5AZ		Motor		3516	
Cnt	N/P	Descripcion	Precio US\$	Total US\$			
2	113-4655	Core					
4	112-3591	Cover					
1	-	Mesa					
8	-	Tubos					
						24875.54	
				Precio Final		US\$ 25000	

El costo incluiría algunos accesorios como sensores y mangueras, además es necesario adicionar un costo por trámites de envío de las partes.

4.4 POSENFRIADOR RECOMENDADO POR PROVEEDOR DEL DINAMÓMETRO, POWER TEST

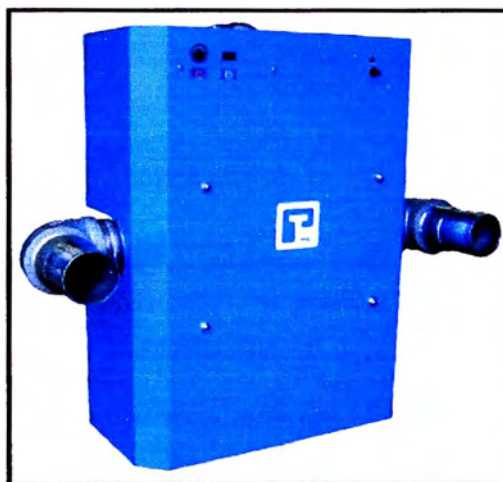


FIGURA 4.4 Vista del equipo posenfriador que sugiere este proveedor.

4.4.1 Características técnicas

Trabaja con energía eléctrica de 120 V AC, energía que requiere la bomba que hace circular el agua dentro del enfriador. Tiene una capacidad de transferencia de calor de 300 kW. Puede trabajar en pruebas de motores en las que se alcancen los 2.237,1 kW de potencia.

Se detalla que la temperatura del agua no debe superar los 38 °C, se debe mantener cebada la bomba antes de su uso. La temperatura del agua está regulada mediante una válvula electromecánica, la posición de esta válvula está “seteada” en el equipo para una determinada prueba.

No es muy versátil ya que la forma se acomoda más para el uso de una sola línea de aire, propio de un cilindro en V. Pesa 68 kg y no cuenta con una estructura de soporte por lo que se complica su traslado.

4.4.2 Partes y Costo de Fabricación

TABLA 4.5 Detalle del costo de un equipo posefriador nuevo

CAC-3k	1 Charge Air Cooler		\$ 21,950.00	\$ 21,950.00
	<ul style="list-style-type: none"> • Simulates an Air-To-Air Aftercooler for ATTAC engines. • Thermostatically Controlled • Sized for use with engines up to 3,000 HP 			

Los costos de esta herramienta sumarían los US\$ 23.000 incluyendo los costos de envío e instalación.

4.5 POSENFRIADOR RECOMENDADO POR CATERPILLAR

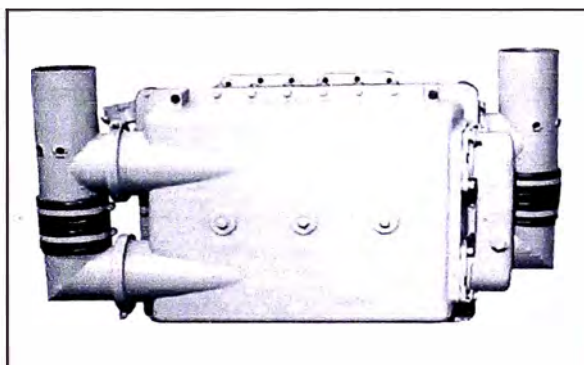


FIGURA 4.5 Vista del equipo posefriador que sugiere Caterpillar

4.5.1 Características técnicas

Para pruebas en dinamómetro de motores C32 Caterpillar usar el posefriador FT-1438. Este equipo provee un enfriamiento con agua para controlar que la temperatura de entrada del aire no supere los 338,5 K para motores que superen los 745,7 kW.

Tiene una capacidad de transferencia de calor de 200 kW, esto se consigue mediante la regulación del caudal del agua del intercambiador hasta su valor máximo, pero el control de ingreso de agua para mantener la temperatura se realiza de forma manual. Tiene puertos de termocuplas para el mejor control de la temperatura de los fluidos.

La forma básica no considera una estructura de soporte para el enfriador. Desde el punto de vista de su instalación se considera que no es muy adaptable o versátil para las pruebas de motores.

4.5.2 Partes y Costo de Fabricación

Esta herramienta se encuentra valorizada en US\$ 15.000 (incluye costos de envío e instalación).

4.6 MATRIZ DE TOMA DE DECISIONES

Luego de evaluar las diferentes alternativas que se tienen disponibles, en función a las características e importancia de cada una de ellas para Ferreyros, se ha determinado la mejor opción del equipo posefriador de aire con agua que se elegirá, esta decisión ha sido soportada en base a prioridades y puntajes de las características que presentan cada una de las alternativas.

A continuación se adjunta la matriz que ha permitido determinar la mejor opción del equipo enfriador de aire, en donde el puntaje para cada fabricante va desde 0 puntos hasta 5 puntos en función de las características del equipo. La prioridad de las características ha sido determinada en consenso por el personal del banco de pruebas, personal de programación, personal de soporte técnico del taller CRC y de la gerencia del CRC, éstas van desde el peso 1 hasta el peso 10.

Esta ponderación puede resultar un tanto subjetiva pero ha sido determinada en función a la necesidad de las áreas involucradas y que son usuarias de este equipo, el peso uno (1) indica que es una característica del equipo que resulta muy poco relevante para las necesidades de la empresa, por otro lado, el peso diez (10) indica que es una característica muy importante con la que el equipo debe contar para la empresa, de esa forma se han definido las prioridades u orden de importancia entre las características del equipo sujeto a evaluación. Las características que se han considerado como prioritarias en este consenso han sido en el siguiente orden:

- ✓ La capacidad de enfriamiento, se necesita eliminar el problema de recalentamiento de este equipo, por lo tanto el equipo necesita contar con una capacidad de enfriamiento superior a la demanda.
- ✓ Versatilidad, se requiere de un equipo que tenga esa adaptabilidad para pruebas en motores con distribución de cilindros en V o distribución lineal.
- ✓ Control de variables, se necesita de un equipo que pueda tener pleno control y lectura en tiempo real de las variables siguientes: Temperatura del aire,

temperatura del agua que lo refrigera, flujo de agua, caída de presión del aire, etc.

- ✓ Costo, una empresa siempre ve que sus costos sean los más reducidos posibles, sin dejar de elegir equipos de calidad.
- ✓ Instalación, se busca que el equipo sea fácil de instalar y conectarlo al motor durante las pruebas de dinamómetro.
- ✓ Transporte, debido a que el equipo es portátil, debe ser fácil de trasladar.
- ✓ Fuente de energía, se considera también que el equipo no deba depender de una fuente de alimentación de energía para su funcionamiento, pero este costo sería muy inferior comparado con los costos que implica probar el motor (combustible, energía eléctrica, horas-hombre, etc).

Los puntajes van desde cero puntos (0) a cinco puntos (5), cero significa que la alternativa no cuenta con la característica que está siendo sujeto de evaluación y cinco significa que la alternativa cumple completamente con la característica que está siendo evaluada. Es importante señalar que los pesos han sido definidos como resultado de la reunión de todas las áreas involucradas y en consenso quedaron establecidas.

Cabe resaltar que la selección del posenfriador más adecuado no es una mejora que pueda medirse por su impacto económico en este momento, sabemos que esta mejora eleva la calidad en las pruebas de motores C32 y permite que los motores puedan ser probados desarrollando su máxima potencia, de esta forma se puede asegurar la

confiabilidad y operatividad del motor reparado en el CRC, pero también se sabe que existirá un ahorro en consumo de combustible ya que la mezcla de aire y combustible es más óptima.

Un estudio posterior a este podría considerar los nuevos parámetros de operación una vez instalado el nuevo equipo posenfriador, de esta forma se podría comparar los consumos de combustible en las pruebas de dinamómetro con el posenfriador anterior y con el posenfriador nuevo, la diferencia entre éstos sería el ahorro en combustible que puede representarse en valores económicos, con estos datos se podrá realizar el cálculo del retorno de la inversión.

A continuación se presenta el cuadro ponderado:

ALTERNATIVAS DE AFTERCOOLERS POR DISTRIBUIDOR O FABRICANTE						
CARACTERISTICAS	PRIORIDAD o PESO	FINNING	WALKER MACHINERY	GECOLSA	POWER TEST	CATERPILLAR
Capacidad de transferencia de calor	10	2	0	4.5	5	3
Facilidad de instalación	7	4	4	4	5	2
Mejor control de caudal de agua	8	5	5	2	5	0
Mejor control de temperatura de los fluidos	8	4	4	4	4	4
Facilidad de traslado	5	4	4	4	3	3
Versatilidad	9	3	3	4	3	2
Buen precio	7	4	4.5	2.5	1.5	3.5
Independencia de Energía adicional para su	2	4	4	4	0	4
	PUNTAJE	203	186.5	202.5	209.5	141.5

4.7 SELECCIÓN DEL EQUIPO POSENFRIADOR DE AIRE

Luego de evaluar los valores ponderados en la matriz de decisiones durante una reunión entre las áreas involucradas (área de dinamómetro, área de producción, soporte técnico del CRC, representante de la gerencia del CRC), se ha analizado los aspectos técnicos (comparando capacidades), versatilidad del equipo, costos, operabilidad en esta matriz y se ha elegido como equipo posenfriador de aire al que ofrece nuestro proveedor Power

Test, dicho proveedor es además el fabricante de los dos dinamómetros que posee el CRC.

Entre otros detalles, los más relevantes son:

- ✓ Capacidad de transferencia de calor del equipo que se adquirirá = 300 kW.
- ✓ El precio del equipo es US\$23.000; incluidos los costos de instalación y envío.

CONCLUSIONES

- 1) Mediante este estudio se obtiene una metodología que funciona como estrategia para la obtención de la capacidad de enfriamiento para un equipo posenfriador de aire, esta estrategia depende mucho de los valores de temperatura, presión, densidad, capacidad calorífica del fluido a enfriar, además de que es muy importante que estos valores sean los más precisos posibles para obtener el flujo de energía que será necesario disipar.
- 2) De este estudio y gracias a los cálculos realizados, se puede indicar que la capacidad de enfriamiento del equipo posenfriador anteriormente utilizado era insuficiente para las pruebas del motor cuando éste desarrolla mayores potencias en el banco de pruebas, esta insuficiencia se refleja en los 81,94 kW de flujo de energía que el posenfriador actual necesitaba adicionalmente para poder atender la demanda que se generaba en las pruebas de motores C32 Caterpillar cuando estos desarrollaban su máxima potencia.
- 3) Debido a que para el caso del aire a temperaturas y presiones elevadas, el valor del calor específico no es constante ante la variación de estos parámetros, si no que

existe un comportamiento que depende del cambio en estos parámetros, tal es así que se realizó el cálculo del flujo de calor que debía disipar el posenfriador, en este cálculo se consideró que el calor específico del aire es variable en función de la temperatura, luego se comparó este flujo con el flujo de calor si hubiéramos realizado los cálculos considerando que el calor específico del aire fuese constante, esta diferencia resultó ser 1,04 kW, lo que nos dice que considerar la capacidad calorífica en función de la temperatura es una buena herramienta para obtener resultados más precisos cuando el aire trabaja bajo condiciones elevadas de presión y temperatura.

- 4) La selección del equipo posenfriador de aire que más se acomode a las necesidades del CRC no tuvo como criterio determinante los valores técnicos y de costos únicamente, se entiende que la industria es cambiante y que ahora los criterios para seleccionar los equipos no sólo sean valores técnicos y económicos que tengan que compararse, si no que se pueden evaluar factores como seguridad para el trabajador y el medio ambiente, versatilidad, operabilidad, facilidad de transporte si se trata de un equipo portátil, etc. En este caso, por iniciativa de la gerencia del CRC, se solicitó la presencia de todas las áreas involucradas y por medio de un consenso, se pueda elegir el equipo posenfriador que más se ajuste a las necesidades de los usuarios, es por eso que se usó una matriz que establezca involucren esos criterios y que los pondere en función de las necesidades de cada área del CRC que será usuario de este equipo posenfriador.

- 5) Es importante tener en cuenta que la selección de un equipo debe estar sustentado técnicamente, debemos tener un registro de que se realizaron los cálculos y provisiones para un futuro, esto debido a que el equipo poseenfriador de aire actual fue elegido en base a una sugerencia y que esta alternativa no fue evaluada técnicamente en su momento, esta es la razón por la cual se han presentado los mismo problemas de recalentamiento en el enfriador, problemas que comenzaron a manifestarse cuando los motores eran probados cada vez a mayores potencias.
- 6) La selección de un equipo poseenfriador de aire que usa agua para refrigerar el aire de la carga está sustentado en el hecho de que la sala de pruebas del dinamómetro es un ambiente cerrado (para reducir el nivel de ruido) en el que el calor irradiado por el motor eleva la temperatura de la sala, esta condición no permitiría poder contar con un ventilador que enfríe el poseenfriador con aire de la sala ya que este aire no es fresco, tal como lo hace cuando el motor trabaja en el camión, en este caso el camión se encuentra en ambientes abiertos con un aire fresco que pueda refrigerar el poseenfriador con un flujo de aire generado por el ventilador del motor. La decisión de usar un poseenfriador refrigerado con agua está sustentada en lo mencionado anteriormente.
- 7) Las diferencias en las denominaciones para estos equipos es básicamente regional, mientras que en América se usa frecuentemente el nombre de poseenfriador de aire, debido a que se encuentra después del sobrealimentador de carga y en Europa se usa el término interenfriador de aire, debido a que está entre el múltiple de admisión y el

sobrealimentador de carga. Esta diferencia en términos se explica por esa simple razón. Adicionalmente, se indica que en América se conoce con el nombre de interenfriador de aire al equipo que se encuentra entre 2 etapas en un compresor de aire.

- 8) Es importante mencionar que el registro del historial de las intervenciones y pruebas en los componentes que se reparan en el CRC es de suma ayuda e importancia para poder desarrollar estrategias de mejora, esto por el simple hecho de que no se puede mejorar lo que no se puede medir o registrar. En el presente informe fue de vital importancia contar con registros de las pruebas de motores que se repararon y probaron en el CRC anteriormente.

RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda que para los cálculos que involucren el calor específico del aire, se debe considerar que este valor depende de la temperatura y presión a la que el aire está sujeto, principalmente cuando el aire se encuentra a altas temperaturas y presiones, con igual criterio se debe evaluar a la densidad del aire.
- 2) Se sugiere que los valores considerados deben ser los más precisos posibles para evitar una insuficiencia o sobredimensión en el equipo, esto genera a la larga problemas como es el que se presenta en el presente informe, ya que existe una insuficiencia en la capacidad de enfriamiento del posenfriador.
- 3) Para el cálculo de las capacidades de un equipo posenfriador, se sugiere que se acceda a una base de datos más enriquecida que la que se usó en el análisis de este informe, la razón principal es que no se tienen reportes históricos de estas pruebas, sólo se pudo tener acceso a los reportes que pudieron ser encontrados en la base de datos. Con este criterio se podrá obtener valores más cercanos a lo que se busca.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Análisis y Optimización del Sistema de Refrigeración de Motores Marinos de Embarcaciones Petroleras**
Silvano Florencio Cardenas, publicado año 1998.
2. **Caterpillar Performance Handbook**
Caterpillar Inc, publicado año 2004, edición 35.
3. **Termodinámica**
Virgil Moring Faires, publicado año 1999, VI Edición.
4. **777F Off-Highway Truck specifications**
Caterpillar Inc, publicado año 2007, primera edición.
5. **Portal de Caterpillar Inc**
<http://www.cat.com>
6. **Portal de Ferreyros S.A.A.**
<http://www.ferreyros.com.pe/portal/index.html>
7. **Portal del cálculo de la densidad de aire**
[http://www.dolzhnos.com.ar/htm/densidad del aire.htm](http://www.dolzhnos.com.ar/htm/densidad_del_aire.htm)