



Informe final de pasantía

“Proyecto Fénix”

Pablo Toro

Ingeniería Civil Mecánica

Nombre empresa: Holding ACAR

<https://www.acar.cl>

Contenido

1. Resumen ejecutivo.....	4
2. Introducción.....	5
3. Objetivos.....	9
3.1. Objetivo general.....	9
3.2. Objetivos específicos.....	9
4. Estado del arte.....	11
5. Soluciones propuestas.....	15
6. Propuesta de solución.....	18
7. Evaluación Económica.....	19
7.1. Costos de implementación.....	19
7.2. Evaluación cuantitativa.....	20
7.3. Tiempo de retorno de la inversión y TIR.....	22
8. Metodologías.....	23
9. Medidas de desempeño.....	25
10. Plan de implementación.....	26
11. Análisis de riesgo.....	27
12. Medidas de mitigación de riesgos:.....	28
13. Desarrollo del proyecto.....	29
13.1. Objetivo específico 1.....	29
13.1.1 Identificación del sistema de refrigeración.....	29
13.1.2 Mantenición.....	35
13.1.3 Pruebas Ralentí.....	36
13.1.4 Análisis teórico.....	38
13.1.5 Áreas de mejora potencial.....	46
13.2 Objetivo Específico 2.....	47
13.2.1 Revisión de Literatura Especializada en Transferencia de Calor.....	47
13.2.2 Consultas con Expertos en Transferencia de Calor.....	49
13.3 Objetivo Específico 3.....	50
13.3.1 Propuesta de solución diseño conceptual basado en la teoría de transferencia de calor.....	50
13.3.2 Validaciones teóricas del nuevo modelo.....	51
14. Resultados cualitativos y cuantitativos.....	52

15.	Conclusiones y discusión.....	54
16.	Referencias.	55
17.	Anexos.	56
17.1.	Anexo 1: Refrigeración por Líquido refrigerante.	56
17.2.	Anexo 2: Refrigeración por aire:.....	58
17.3.	Anexo 3: mejora sistema de refrigeración por líquido	60
17.4.	Anexo 4: Sistema VAG.	62
17.5.	Anexo 5: Supuestos para análisis teórico.	63
17.6.	Anexo 6: Velocidad de aire promedios.....	64
17.7.	Anexo 7: Proceso de mantención grúa AT880.....	64

1. Resumen ejecutivo.

El proyecto surge como respuesta a los problemas críticos de sobrecalentamiento en la grúa Grove AT880, originados por los altos costos de lucro cesante, falta de respuesta del fabricante y la ausencia de representación local. La solución propuesta se centra en mejorar el sistema de refrigeración a través de la modificación de la turbina de aire y la incorporación de deflectores. El objetivo principal es reducir la temperatura operativa del motor de 120 a 90 grados Celsius, por medio del aumento de la disipación de calor del sistema de refrigeración. Este enfoque teórico proyecta un aumento del 19,8% en la capacidad de disipar calor, mejorando significativamente el rendimiento anticipado de la grúa. Aunque la propuesta no ha sido implementada físicamente, se respalda mediante rigurosos análisis teóricos de transferencia de calor y masa. Más allá de asegurar el cumplimiento normativo, el proyecto destaca por su versatilidad y potencial aplicación en otros equipos de la flota de la empresa Acar. Los siguientes pasos incluyen validación experimental, ajustes iterativos y una implementación gradual para evaluar continuamente el rendimiento. Este proyecto no solo aborda desafíos técnicos inmediatos, sino que establece el fundamento para futuras mejoras en la gestión térmica de la flota de la empresa Acar.

The project arises in response to critical overheating issues in the AT880 crane, stemming from high costs of lost profit, manufacturer non-responsiveness, and the absence of local representation. The proposed solution focuses on enhancing the cooling system by modifying the air turbine and incorporating deflectors. The primary objective is to reduce the operating temperature of the engine from 120 to 90 degrees Celsius by increasing the heat dissipation of the cooling system. This theoretical approach anticipates a 19.8% increase in heat dissipation capacity, significantly enhancing the crane's anticipated performance. Although the proposal has not been physically implemented, it is supported by rigorous theoretical analyses of heat and mass transfer. Beyond ensuring regulatory compliance, the project stands out for its versatility and potential application to other vehicles in Acar's fleet. The next steps involve experimental validation, iterative adjustments, and a gradual implementation to continuously assess performance. This project addresses not only immediate technical challenges but also establishes the foundation for future improvements in the thermal management of Acar's fleet.

2. Introducción.

En el mundo de la construcción y el desarrollo de grandes obras, la empresa ACAR ha sido un actor destacado durante más de tres décadas. Bajo el nombre de "Holding ACAR", esta compañía se ha posicionado como un referente en el mercado gracias a su amplia flota de maquinaria y equipos pesados. Actualmente, como "Empresa ACAR" (www.acar.cl).

Dentro de su espectro de servicios, ACAR ofrece arriendos de camiones grúa, grúas horquilla de alto tonelaje, grúas plumas, contenedores, servicios de bodegaje y transporte terrestre, entre otros. Sin embargo, su compromiso no se limita solo al suministro de equipos, ya que ACAR también proporciona servicios de movimiento e instalación de cargas pesadas. Esta capacidad integral de desmontaje, movilización y montaje ha sido un sello distintivo de la empresa.

El presente trabajo se enfoca en uno de los principales activos en la flota de ACAR, la grúa Grove AT880 (ver imagen 1 y 2). Cuenta con un sistema hidráulico que trabaja en conjunto con pistones y cilindros (625 litros por minuto y 3000 PSI), dando un peso total de 54 toneladas y una altura máxima de 58 metros. Actualmente la maquina cuenta con la mayor capacidad de levantamiento dentro de ACAR, con una capacidad de levante de 80 toneladas, es uno de los activos más importantes para la empresa ya que no hay otro equipo que la pueda reemplazar.



Imagen 1: Grúa Grove AT880. Fuente Propia.

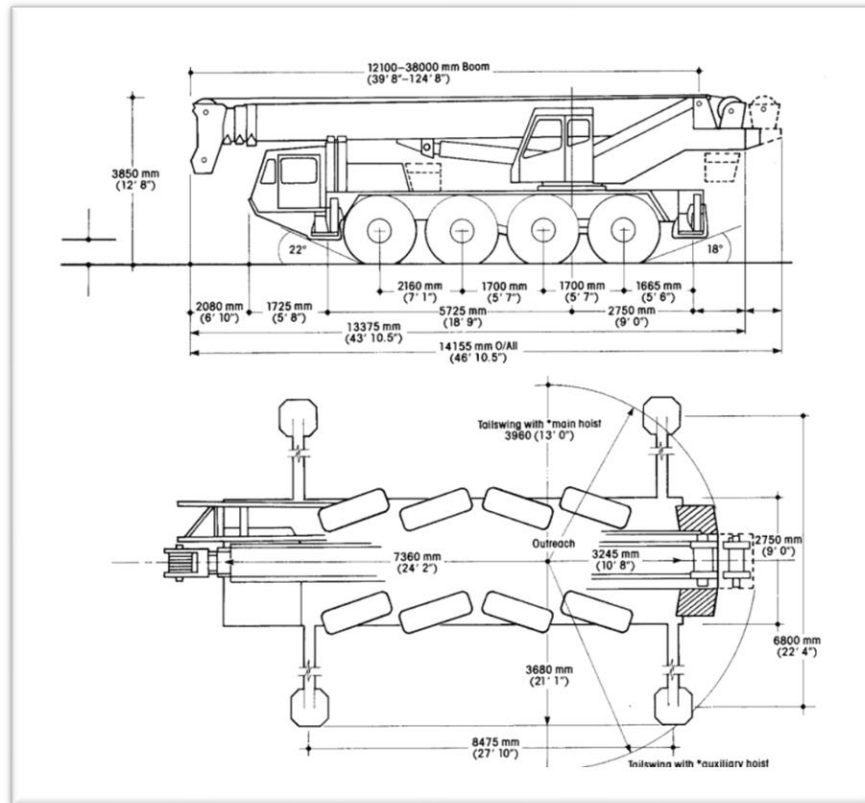


Imagen 2: Plano Grúa AT880.
Manual grúa AT880

En la actualidad la Grove AT880 se encuentra inoperativa debido a una situación: el sobrecalentamiento del motor, el cual es refrigerado por medio de una turbina y usa como fluido principal el aire. También cuenta con intercambiadores de calor aire-aceite. Las pruebas realizadas durante 2 horas en estado ralenti revelaron que el motor alcanza los 120 grados Celsius (°C), condición anormal sugerida por el fabricante de 90 °C. Este sobrecalentamiento no solo afecta la eficiencia del motor, sino que también puede ocasionar daños graves dentro de la estructura del motor como la expansión excesiva de las piezas y la rápida degradación, según lo indicado en el libro "Motores térmicos y sus sistemas auxiliares" (Calleja, 2015). Lo anterior ha llevado a una paralización repetida de la grúa.

A pesar de las mantenciones realizadas, la limpieza de partes del motor y las verificaciones meticulosas de presión de aceite y temperatura aceite, todos dentro de los rangos recomendados por el fabricante (0.5 bar y 100°C, para el aceite), sigue existiendo una brecha en la refrigeración del motor. El aire que ingresa al motor esta entre 5 a 20 metros por segundo, este es únicamente para enfriar algunos componentes dentro del motor, como los cilindros y las culatas. Sin embargo, este aire no es suficiente para mantener el rango de temperatura en todo el motor, según su fabricante (alrededor de 90 °C). Además, se observó un flujo de aire deficiente alrededor del motor (entre 0,2 y 1,9 metros por segundo). Este factor puede dar explicación a las necesidades de mayor flujo de aire refrigerante, sobre todo en las superficies exteriores como las del bloque del motor, donde se concentran las temperaturas más elevadas, arriba de los 120°C.

El impacto de este problema trasciende lo mecánico, afectando directamente los resultados financieros de ACAR. La inmovilización de la grúa AT880 ha generado pérdidas monetarias y obstaculizado la capacidad de la empresa para satisfacer la demanda de una grúa de alta capacidad. Esta demanda, se registró en un promedio de tres llamadas de clientes potenciales, con un cobro por servicio estimado de 1.600.000 pesos chilenos (CLP), traduciéndose en un lucro cesante mensual de 19.200.000 CLP aprox. Según registros históricos en base a los ingresos mensuales en el año anterior, la cifra anterior representaría un 11,8% de los ingresos mensuales totales de ACAR (ver imagen 3), que se dejan de ganar (costo lucro cesante). Por otro lado, en cuanto a lo cualitativo, la pérdida de 3 clientes a la semana impacta en la visibilidad de ACAR como empresa en el mercado de las grúas. La mayoría de los clientes no vuelven a contactar, debido a la insatisfacción de no poder concretar el servicio que necesitan.

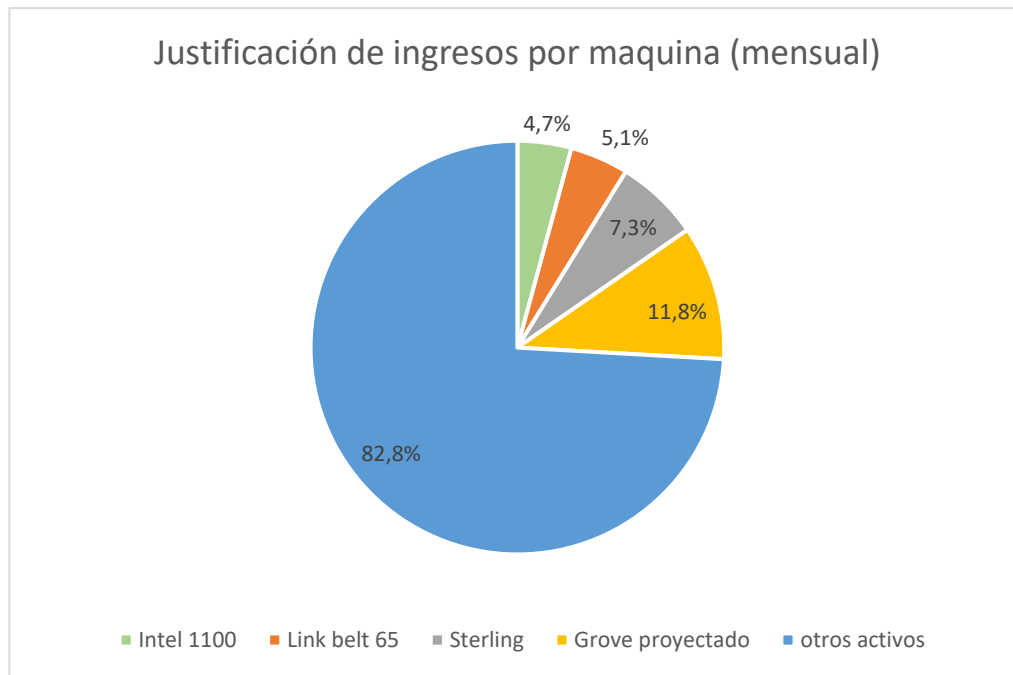


Imagen 3: Ingresos mensuales en porciones porcentuales. Incluye el ingreso proyectado de la grúa Grove.

El objetivo del presente informe es analizar, desde un enfoque teórico, el sistema de refrigeración actual y sus capacidades en cuanto a la disipación de calor en la grúa Grove AT880. Para luego, siguiendo la misma línea teórica, plantear una propuesta de solución al sistema de refrigeración. Todo lo anterior se fundamenta a través de la teoría de transferencia de calor y masa, en conjunto con pruebas controladas realizadas al activo.

3. Objetivos.

3.1. Objetivo general.

El objetivo general de este proyecto es desarrollar una propuesta de mejora para el sistema de refrigeración existente en la grúa AT880, fundamentada en los principios de transferencia de calor y masa. Este objetivo se orienta a validar teóricamente un incremento en la capacidad de disipar calor, con el propósito de reducir la temperatura operativa actual de 120 grados Celsius a 90 grados Celsius en un plazo de 4 meses.

3.2. Objetivos específicos.

- **Objetivo específico 1: comprender el funcionamiento actual del sistema de refrigeración mediante plano del sistema actual, análisis teórico, pruebas de ralenti y la identificación de áreas de mejora:** en este objetivo se identificará sus componentes claves y será representado mediante un plano. Además, se aplicarán los principios de transferencia de calor y masa para evaluar la capacidad de disipación de calor del sistema. Para facilitar el análisis teórico, se llevarán a cabo pruebas de ralenti controladas en la grúa AT880, permitiendo recopilar datos en condiciones reales. Los resultados de estas pruebas permitirán identificar áreas específicas de mejora en el sistema actual.
- **Objetivo específico 2: investigar alternativas de mejora basadas en la teoría de transferencia de calor:** este objetivo se enfoca en investigar posibles mejoras para el sistema de refrigeración de la grúa AT880, basadas en la teoría de transferencia de calor y masa. Se realizará una revisión de la literatura en transferencia de calor, centrándose en métodos aplicables a sistemas de refrigeración de maquinaria pesada. Además, se programarán consultas y reuniones con expertos en transferencia de calor y masa, para explorar teorías y enfoques relacionados con la mejora de la capacidad de transferencia de calor en sistemas de refrigeración por aire.

- **Objetivo específico 3: plantear y justificar, en base a la teoría de transferencia de calor, una propuesta de mejora del sistema de refrigeración que aumente la disipación de calor para cumplir con la temperatura objetivo (90 grados Celsius):** entregar la propuesta de mejora para el sistema de refrigeración de la grúa AT880, en conjunto con la justificación teórica de como esta propuesta ayuda a mejorar la disipación de calor, y cumplir con la temperatura requerida por el fabricante de la grúa. Además, se entregará un diseño conceptual en forma de plano con respecto a la propuesta de mejora

4. Estado del arte.

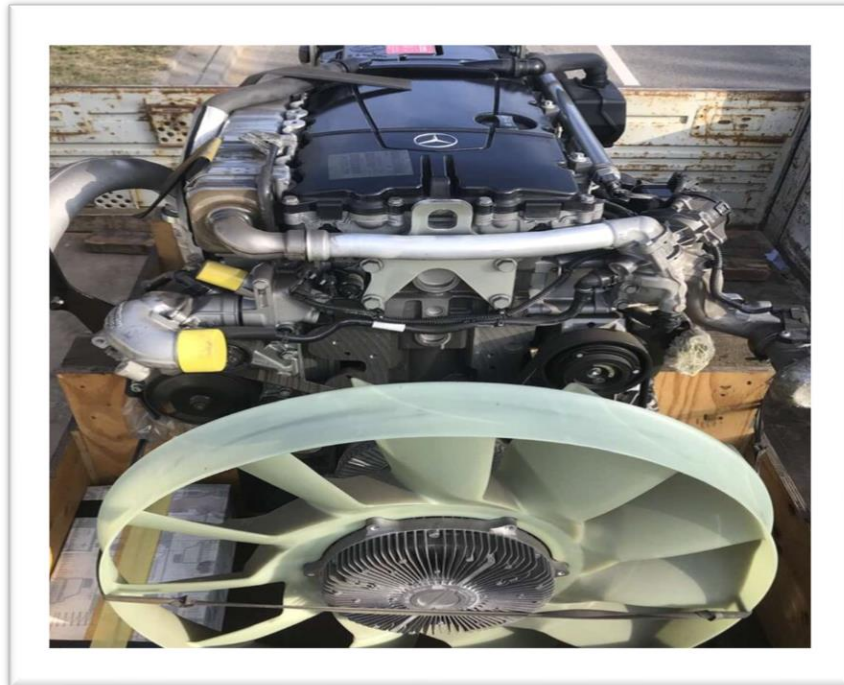
Hasta la fecha, la problemática específica de sobrecalentamiento en motores de refrigeración por aire, particularmente en el caso de la grúa Grove AT880, no ha sido identificada en la literatura o en experiencias prácticas de otras empresas o individuos. Este hecho puede ser atribuido a la preferencia generalizada por sistemas de refrigeración líquida en motores de maquinaria pesada, una tendencia seguida tanto por el fabricante de la grúa AT880, Grove (Manitowoc, s.f.), como por sus competidores como grúas Liebherr. Además, Calleja, 2015, menciona en su libro “Motores térmico y sus sistemas auxiliares” que la refrigeración por aire se ha relegado principalmente a motores más pequeños, como los utilizados en motocicletas menos sofisticadas, así como en productos domésticos e industriales, como podadoras de césped y motosierras (Calleja, 2015).

La refrigeración por líquido ha sido la norma en la industria, y motores como los empleados para la grúa AT880, han seguido esta dirección, un ejemplo de esto es la grúa similar de la casa Grove, la GMK 4080 (Manitowoc, s.f.), la cual cuenta con un motor Mercedes Benz OM936 con sistema de refrigeración por líquido. A continuación, se muestran las imágenes de referencia de los dos tipos de motores mencionados:



*Imagen 4: motor grúa Grove AT880, Deutz BF8L513.
Truck1, 2023*

En la imagen 4 se aprecia el motor original Deutz BF8L513 de la grúa Grove AT880, con refrigeración por aire forzado. Se logra ver la turbina que es la encargada de inyectar el aire forzadamente.



*Imagen 5: Motor Mercedes Benz OM936.
Fuente Autoline, s.f.*

En la imagen 5 se aprecia el nuevo motor mercedes utilizado en la grúa Grove GMK 4080. Su sistema de refrigeración líquido.

Por otro lado, en la literatura se logró identificar 2 tipos de sistemas de refrigeración para motores de combustión interna, son los mencionados anteriormente, la refrigeración por líquido y la refrigeración por aire. En primer lugar, la refrigeración por líquido utiliza fluido en estado líquido, el cual envuelve por medio de tuberías los cilindros y pasa por conductos a través del bloque motor, luego se dirige hacia el radiador, donde se produce la transferencia o sesión del calor (Calleja 2015). En segundo lugar, la refrigeración por aire utiliza el fluido en movimiento, en este caso el aire, que entra en contacto directo con el motor y fluye por sus superficies (Calleja 2015). Ver anexos 1 y 2 sobre las tecnologías de refrigeración en motores de combustión interna. A continuación, en la tabla 1 se aprecia una comparativa entre ambas tecnologías:

Características	Refrigeración por líquido	Refrigeración por aire
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor control sobre la temperatura. • Mayor tasa de transferencia de calor (más capacidad calorífica del fluido). • Menor ruido motor, por capa de líquido en las camisas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rapidez en alcanzar la temperatura de régimen. • Menos componentes, menos probabilidad de fallas. • Menor peso del motor. • Construcción más sencilla por menos elementos.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Más componentes críticos (bomba, radiador, termostatos). Aumentan la probabilidad de falla. • Incremento de peso por mayor número de componentes. • Más componentes igual a un mayor costo de fabricación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad en regular la temperatura de régimen. • Necesidad de instalar un refrigerador de aceite para su enfriamiento. • Aumento del ruido del motor debido a las aletas.

Tabla 1: comparación tecnologías de refrigeración para motores de combustión interna.

A modo de seguir las tendencias actuales del mercado, los estudios revisados coinciden en que los sistemas de refrigeración por líquido responden de manera más ajustada a las necesidades de temperatura específicas de los motores en determinado momento (Calleja, 2015). Esto se puede

explicar ya que el fluido que se emplea, agua en estado líquido, circula a través de un circuito cerrado y además cuenta con una capacidad de absorber calor mucho más alto que el aire como fluido refrigerante. En particular $4,22 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ para agua y $1,005 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ para el aire. (Cengel, 2011). Esta mejor prestación del líquido como refrigerante, ha conllevado a los fabricantes a invertir en el desarrollo de esta tecnología, y en la búsqueda de automatizar y hacerlo más eficiente. Algunas mejoras han sido los termostatos de 2 válvulas, termostatos regulados electrónicamente y el electroventilador. Ver anexo 3

En los nuevos motores de maquinarias pesadas similares al Deutz BF8L513, se dispone de un sistema de refrigeración por líquido, con varios circuitos de conducción a través del motor, en los cuales el líquido refrigerante es conducido por separado, todo en función de la temperatura, dependiendo de las necesidades del motor (Calleja 2015). Un ejemplo de este sistema es el usado en algunos vehículos del grupo VAG (Volkswagen Audi Group), en el anexo 4 se detalla la tecnología. Este sistema es de libre uso en el mercado y varias compañías, como en el caso de VAG, se inclinan por ella.

El uso de la refrigeración por líquido es la tecnología que más se usa en los motores de combustión interna, se puede apreciar actualmente que la mayoría de los vehículos motorizados la llevan en su sistema. Sin embargo, la refrigeración por aire continúa teniendo representación, pero en menor parte. El motivo es que la tecnología de aire usa un número reducido de elementos (turbina, conductos y aletas), que disminuyen las averías y las operaciones de mantenimiento, esto a su vez, se traduce en menor costos de fabricación y mantenimiento.

5. Soluciones propuestas

- **Solución 1: Cambio del motor (Mercedes Benz OM936).**

Esta solución implica reemplazar el motor actual por un motor Mercedes Benz OM936 de 6 cilindros con refrigeración por líquido (Manitowoc, s.f.) ver imagen 5, en el estado del arte. Este motor es más eficiente en el control de la temperatura debido a la refrigeración por líquido, también ofrece un mejor rendimiento con un menor consumo de combustible, en comparación con el motor actual por su menor cilindrada (de 8 cilindros a 6). Sin embargo, el costo total, incluyendo la adquisición, impuestos y adaptación, se estima en alrededor de 23,8 millones de pesos chilenos (Truck1, 2003-2023), lo que se considera costoso para Acar. Además, la adaptación es altamente compleja, debido a la gran cantidad de componentes electrónicos de la grúa y el riesgo de incompatibilidad de algunos conectores y señales.

- **Solución 2: modificación del motor actual (BF8L413).**

Esta solución propone la modificación del motor Deutz BF8L413 existente para incorporar un sistema de refrigeración por líquido, mejorando así el control de la temperatura. Para llevar a cabo esta modificación, es necesario realizar perforaciones en el bloque del motor como los de la imagen 6, creando conductos para el flujo del líquido. Además, se requerirá más espacio para alojar elementos adicionales como un radiador y una bomba hidráulica. Todos estos ajustes comprometerán la resistencia mecánica del motor, potencialmente causando daños irreversibles.

Es crucial tener en cuenta que el motor ha sido diseñado específicamente para un tipo de refrigeración, y cambiar el sistema no garantiza su rendimiento óptimo, lo que plantea serias dudas sobre su viabilidad.

Además, la inclusión de componentes como una bomba de líquido refrigerante y un electroventilador presenta desafíos técnicos significativos. Durante las discusiones, tanto el gerente de la planta como los mecánicos expresaron sus reservas debido a las razones

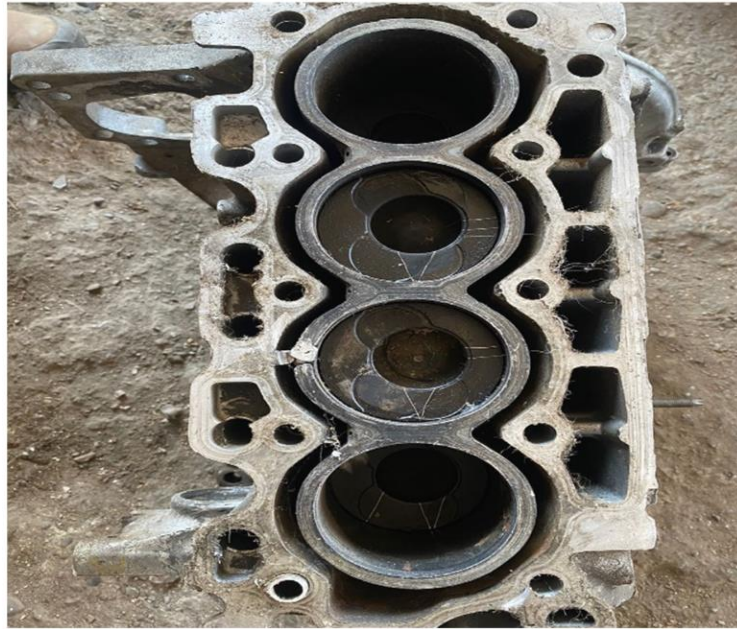
mencionadas anteriormente, y resaltaron la escasa experiencia en proyectos de modificación de sistemas de refrigeración. En sus palabras, manifestaron una preferencia por la solución 1, que consiste en el cambio completo del motor.

En el caso de la refrigeración por líquido, la estructura del bloque de motor cambia, como se observa en la imagen 6, donde se destacan perforaciones cilíndricas alrededor de la circunferencia para permitir el flujo del líquido refrigerante. Por otro lado, en la imagen 7 se muestra un bloque de refrigeración por aire sin las mencionadas perforaciones cilíndricas.

- **Solución 3: aumentar la velocidad del flujo de aire.**

Esta solución implica incrementar el flujo de aire alrededor de áreas críticas para la refrigeración, como la culata, cilindro, bloque del motor y superficies exteriores. Este aumento se logrará mediante la modificación de la turbina para mejorar su capacidad de dirigir el aire hacia las zonas cruciales. Aunque presenta algunos posibles inconvenientes, como el aumento de peso del vehículo y el incremento del ruido, debido a nuevos ventiladores, es la opción de menor costo y mayor factibilidad técnica, con un estimado de alrededor de 3 millones de pesos chilenos.

Un punto adicional que considerar en esta solución, es que las modificaciones se centran en elementos como la turbina, que tienen un impacto estructural menor en comparación con el bloque del motor.



*Imagen 6: Bloque de motor refrigerada por líquido.
Fuente propia.*



*Imagen 7: bloque de motor refrigerado por aire.
Fuente mundo del motor, s.f.*

6. Propuesta de solución.

Se ha optado por proponer como solución la modificación de la capacidad de la turbina, para obtener más velocidad de aire en el sistema de refrigeración. Uno de los factores es que esta solución es un 88% más económica que la solución de cambiar el motor completo (\$3,132.000 versus \$23,800.000 CLP). Asimismo, esta opción es técnicamente más factible que las otras dos opciones, primero por el conocimiento que ya tiene ACAR sobre el sistema de refrigeración por aire, segundo por la barrera grande que implica no tener conocimientos sobre proyectos de modificación de motor, por cambios en el sistema de refrigeración de aire a líquido.

La validación de esta solución se identifica mediante el siguiente ejercicio que se realizó al incrementar la velocidad del aire promedio en la superficie exterior del motor en 5 m/s. Mediante cálculos teóricos, que se destacan en el desarrollo del proyecto, se logró un aumento del 89,69 por ciento (%) en la capacidad de disipación de calor. En números concretos, la disipación pasó de 1502.59 W a 2850.33 W, lo que demuestra en primeras instancias que es posible lograr el objetivo del proyecto de aumentar la disipación de calor y lograr recuperar la temperatura de régimen de 90 °C.

7. Evaluación Económica.

Una vez identificada una propuesta de solución, se puede lograr una estimación económica esta. El objetivo en este apartado es analizar la viabilidad económica por medio del costo de llevar a cabo la solución de manera física. Lo anterior se realizará por medio del valor presente neto (VPN) y el tiempo de retorno de la inversión. En resumen, el análisis se centrará en determinar si la inversión en la implementación de la solución permitirá justificar el costo, y además, adquirir beneficios financieros y cualitativos para la empresa.

7.1. Costos de implementación

El costo de cada implemento será cotizado en el mercado de manera online, este puede variar, por lo que serán estimaciones promediadas. Los elementos principales y costos de la inversión inicial son los siguientes:

Ítem	Detalle	Costo (CLP)
Turbina	1 (kit de turbina original referencia)	1.557.000
Kit de rodamientos	1	80.000
Remaches	-	20.000
Aluminio	5 metros	175.000
Instalación	Mano de obra y materiales	300.000
Contingencias	Estimación conjunto al gerente en base a riesgos identificados.	1.000.000
Total	-	3.132.000

Tabla 2: detalle costos inversión proyecto.

7.2. Evaluación cuantitativa.

En este apartado se hará la evaluación del proyecto por medio del Valor Presente Neto. El Valor Presente Neto (VPN) es una medida financiera que se utiliza para evaluar la rentabilidad de un proyecto o inversión a lo largo del tiempo. Para calcular este valor, se requiere de una tasa de descuento (r), la cual representa la tasa de retorno mínima requerida que se utiliza para descontar los flujos efectivos futuros al valor presente. Esta tasa además refleja el costo de oportunidad y el riesgo asociado al proyecto. Según el rubro de la empresa, Acar determino que su tasa de descuento es de 7,3%.

Para el análisis de la viabilidad económica del proyecto se definió un horizonte de tiempo mensual durante dos años, ya que es el límite establecido por la empresa Acar para los proyectos en sus activos. También se consideró el peor escenario para la grúa, tener un servicio al mes estimado por Acar en base a sus registros de 1.600.000 millones de pesos chilenos.

El flujo se muestra en la tabla 3. El período 0 representa el momento en el cual se realiza la inversión y se reactivan las operaciones de la grúa.

Período (mensual)	Flujo	VPN (tasa 7,3%)	Retorno inversión
0	\$ -3.132.000	\$-3.132.000,00	\$-3.132.000,00
1	\$1.600.000	\$1.491.841,49	\$-1.640.158,51
2	\$1.600.000	\$1.390.994,40	\$-249.164,11
3	\$1.600.000	\$1.296.964,47	\$1.047.800,36
4	\$1.600.000	\$1.209.290,88	\$2.257.091,25
5	\$1.600.000	\$1.127.543,95	\$3.384.635,20
6	\$1.600.000	\$1.051.323,03	\$4.435.958,22
7	\$1.600.000	\$980.254,57	\$5.416.212,80
8	\$1.600.000	\$913.990,28	\$6.330.203,07
9	\$1.600.000	\$852.205,39	\$7.182.408,46
10	\$1.600.000	\$794.597,10	\$7.977.005,56
11	\$1.600.000	\$740.883,07	\$8.717.888,63
12	\$1.600.000	\$690.800,07	\$9.408.688,70
13	\$1.600.000	\$644.102,63	\$10.052.791,33
14	\$1.600.000	\$600.561,89	\$10.653.353,22
15	\$1.600.000	\$559.964,47	\$11.213.317,69
16	\$1.600.000	\$522.111,39	\$11.735.429,08
17	\$1.600.000	\$486.817,15	\$12.222.246,23
18	\$1.600.000	\$453.908,76	\$12.676.154,99
19	\$1.600.000	\$423.224,95	\$13.099.379,95
20	\$1.600.000	\$394.615,34	\$13.493.995,29
21	\$1.600.000	\$367.939,71	\$13.861.935,00
22	\$1.600.000	\$343.067,33	\$14.205.002,33
23	\$1.600.000	\$319.876,30	\$14.524.878,63
24	\$1.600.000	\$298.252,96	\$14.823.131,59
		\$14.823.131,59	VAN

Tabla 3: VAN proyecto grúa AT880

En este análisis lo importante es el Valor Actual Neto (VAN), el VAN ayuda a responder la pregunta: "¿Cuál es el valor actual de los ingresos o beneficios futuros que se esperan de una inversión, descontados a una tasa de interés o tasa de descuento específica?" La propuesta planteada obtuvo un VAN de \$14.823.131 CLP, al ser un valor positivo indica que la inversión es rentable, ya que los beneficios futuros superan el costo de la inversión final.

7.3. Tiempo de retorno de la inversión y TIR.

Otro factor relevante para Acar es el tiempo en el cual la inversión del proyecto se retorna. Es útil para la empresa saber cuándo debería retornar el dinero invertido, y comenzar a generar ganancias. Esta cifra se muestra a partir del segundo mes, como se indica en la siguiente tabla:

Periodo (mensual)	VPN (tasa 7,3%)	Retorno Inversion	
0	\$-1.919.000,00	\$-1.919.000,00	
1	\$1.491.841,49	\$-427.158,51	
2	\$1.390.994,40	\$963.835,89	retorno
3	\$1.296.964,47	\$2.260.800,36	

Por otro lado, el TIR del proyecto (tasa interna de retorno) es de 51%. Este es el porcentaje de ingresos que se obtiene periódicamente debido a la inversión.

8. Metodologías.

Para lograr los objetivos planteados se basó en los principios y simplificaciones teóricas presentados en el libro "Transferencia de Calor y Masa" de Cengel y Ghajar, cuarta edición, 2011, así como en el libro "Motores Térmicos y sus Sistemas Auxiliares" de Calleja, 2015. La revisión de estos trabajos respalda la relevancia de abordar los problemas de temperatura en motores de combustión interna, demostrando que la gestión del calor es una preocupación real y esencial para garantizar el correcto funcionamiento de los motores según sus parámetros de operación.

Metodología objetivo específico 1

1. Identificación de componentes, esquema del sistema actual y mantención del equipo:
 - Identificar los componentes clave del sistema de refrigeración actual de la grúa AT880.
 - Plano que represente la disposición y la interacción de estos componentes.
2. Mantención básica a la grúa:
 - Mantención básica al equipo.
 - Mantención al sistema de refrigeración.
3. Pruebas de ralentí:
 - identificar dispositivos de medición a ser utilizados.
 - Realizar pruebas de ralentí controladas en la grúa AT880 para recopilar datos de funcionamiento en condiciones reales.
4. Análisis teórico fundamentado en transferencia de calor:
 - Basándonos en la metodología transferencia de calor (Cengel, 2011), realizar un análisis teórico del sistema de refrigeración actual de la grúa AT880.
 - Aplicar principios de transferencia de calor y masa para evaluar la capacidad de disipación de calor del sistema actual.
5. Identificación de áreas de mejora potencial:
 - Utilizar los resultados del análisis teórico y las pruebas de ralentí para identificar áreas específicas

Metodología objetivo específico 2:

1. Revisión de literatura especializada en transferencia de calor:
 - Realizar una revisión de la literatura técnica relacionada con la transferencia de calor en sistemas de refrigeración de maquinaria pesada.
2. Consultas con expertos en transferencia de calor:
 - Programar reuniones y consultas con expertos en transferencia de calor y masa para explorar teorías y enfoques relacionados con la mejora del sistema de refrigeración.

Metodología objetivo específico 3:

1. Diseño conceptual propuesto:
 - Desarrollar un diseño conceptual relacionado con la mejora del sistema de refrigeración de la grúa AT880.
2. Análisis teórico del nuevo sistema:
 - Evaluar la nueva capacidad del diseño conceptual según la teoría.
 - Evaluar cuantitativamente la reducción de la brecha en términos de capacidad de disipación de calor para demostrar la eficacia del diseño propuesto.

9. Medidas de desempeño

1. Memoria de cálculos:

Se logra entregar una serie de esquemas o planos en los cuales se representa el sistema actual y el sistema propuesto. Además, la metodología y ecuaciones usadas en el desarrollo con el objetivo de algún futuro estudio en otros sistemas de refrigeración de cualquier maquinaria en Acar.

2. Aumento de la Capacidad de Disipación de Calor:

Mide el incremento en la capacidad para disipar calor teóricamente del sistema actual, versus la propuesta del nuevo sistema. Esto puede expresarse en términos de porcentaje o en Watt.

3. Reducción de la Temperatura Máxima del Motor:

Esta métrica cuantificaría la disminución de la temperatura máxima alcanzada por el motor de la grúa AT880 después de implementar las mejoras en el sistema de refrigeración. Esta reducción se expresa en grados Celsius o Fahrenheit.

10. Plan de implementación.

Se muestra cada etapa en la siguiente tabla:

Etapa 1: Análisis del sistema actual.	En esta etapa del proyecto se pretende comprender el funcionamiento actual del sistema, analizar componentes y factores que pueden estar afectando el sistema de refrigeración. Será clave el uso de la metodología de transferencia de calor y masa, en conjunto a esquemas representativos del sistema.
Etapa 2: Investigación literatura especializada.	Esta etapa se busca comprender que estrategias de transferencia de calor se emplean en el tipo de máquina del proyecto, además el apoyo y opinión de especialistas en esta materia aportara una gran base.
Etapa 3: Diseño conceptual de propuesta de mejora.	En esta etapa de cierre se pretende entregar una propuesta sólida que se fundamente teóricamente, además de entregar un diseño conceptual de aquella propuesta.
Etapa 4: Definición del presupuesto y adquisición de elementos necesarios.	En esta etapa se define específicamente el presupuesto final y se procede a la adquisición de los elementos necesarios para la implementación del nuevo sistema. También se identifican los requerimientos técnicos y se reconoce la lista de materiales necesarios.
Etapa 5: Montaje mecánico y eléctrico del sistema.	En esta etapa se lleva a cabo el montaje tanto mecánico como eléctrico del sistema. Se instalan los componentes de acuerdo con el diseño conceptual previamente elaborado.

Tabla 4: plan de implementación proyecto.

11. Análisis de riesgo.

Primero se identifican y numeran todos los posibles riesgos dentro del proyecto, teniendo en cuenta todas las partes, como la financiera, técnica, tiempo, etc. A continuación, estos riesgos son:

1. Puede haber una diferencia significativa entre los resultados teóricos y los resultados reales después de implementar el proyecto. Estos se cuantifican en la diferencia de disipación de calor. (40%)
2. Modificar el motor puede provocar fallas a un futuro. Se puede cuantificar con el indicador de tiempo medio entre fallas. (20%)
3. Duración del proyecto. Ya que, requiere de un alto grado de investigación y el espacio de mejora es proporcional a medida que se indaga más en el problema. (10%)
4. Lograr encontrar en el mercado los elementos con los requerimientos necesarios para la solución. (10%)

Estos riesgos se evalúan según la siguiente escala proveniente de la empresa Safety Culture:

		Impacto ¿Qué tan severos serían los resultados si ocurriera el riesgo?				
		Insignificante 1	Menor 2	Significativo 3	Mayor 4	Severo 5
Probabilidad ¿Cuál es la probabilidad de que ocurra el riesgo?	5 Casi seguro	Medio 5	Alto 10	Muy alto 15	Extremo 20	Extremo 25
	4 Probable	Medio 4	Medio 8	Alto 12	Muy alto 16	Extremo 20
	3 Moderado	Bajo 3	Medio 6	Medio 9	Alto 12	Muy alto 15
	2 Poco probable	Muy bajo 2	Bajo 4	Medio 6	Medio 8	Alto 10
	1 Raro	Muy bajo 1	Muy bajo 2	Bajo 3	Medio 4	Medio 5

SafetyCulture

Imagen 8
Matriz de riesgo 5x5
Safety Culture 2023

Ahora, se calcula el impacto de los 5 riesgos identificados anteriormente quedando en el siguiente orden de mayor a menor:

- Riesgo 1: el impacto es significativo (3) y la probabilidad es moderada (3). Lo que da un total de 9 puntos, entrando en la etiqueta de un riesgo medio. Multiplicado por su porcentaje de impacto en el proyecto da 3,6.
- Riesgo 2: el impacto es mayor (4) y la probabilidad es poco probable (2). Debido a que la propuesta solución no requiere de un grado alto de modificación en el motor. La etiqueta que tiene este, es riesgo medio 8 puntos. Multiplicado por su porcentaje de impacto en el proyecto da 1,6.
- Riesgo 3: el impacto es significativo (4) y la probabilidad es probable (2). Es probable que se necesite más estudio en la problemática de la grúa y más tiempo. Entrando en la categoría de riesgo medio, 8 puntos. Multiplicado por su porcentaje de impacto en el proyecto da 0,8.
- Riesgo 4: el impacto es menor (2) y la probabilidad es poco probable (2). Entrando en la etiqueta de riesgo bajo, 4 puntos. Multiplicado por su porcentaje de impacto en el proyecto da 0.4.

12. Medidas de mitigación de riesgos:

- Riesgo 1: con conocimiento en transferencia de calor y masa. De esta manera considerar los supuestos correctos en la teoría.
- Riesgo 2: la solución propuesta evitara la modificación en piezas críticas del motor, como los cilindros, el cigüeñal o eje motriz.
- Riesgo 3: en la medida de lo posible y durante el tiempo asignado al proyecto, se debe dar énfasis en estudios académicos ya realizados. Además, es importante documentar de manera correcta los avances, para futuros proyectos.
- Riesgo 4: basar la solución en elementos comunes y que sean muy comerciales, en la medida de lo posible.

13. Desarrollo del proyecto.

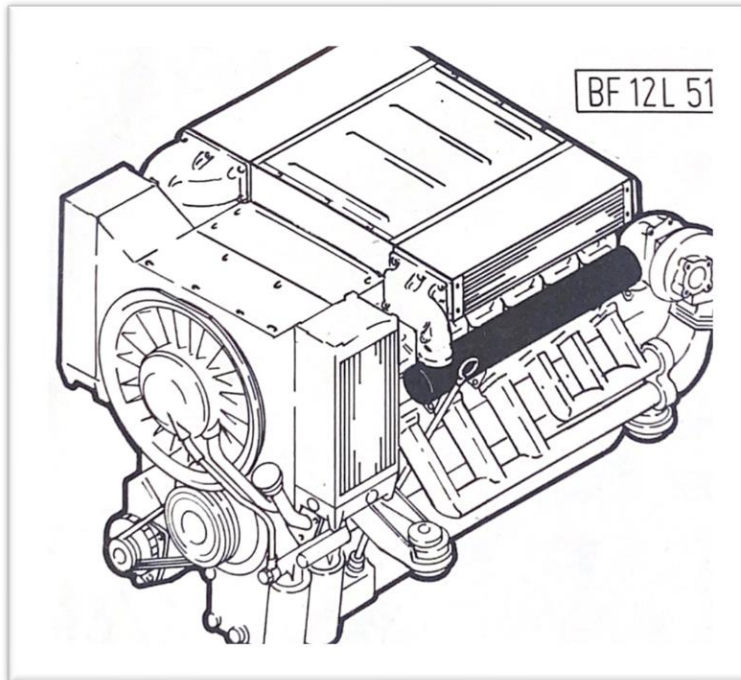
Para esta etapa del proyecto es de gran importancia la metodología del libro "Transferencia de Calor y Masa" de Cengel y Ghajar, cuarta edición, 2011. Este aporta a modo guía suposiciones y leyes para fundamentar lo que esta ocurriendo en la práctica con el sistema de refrigeración de la grúa en términos de disipación de calor.

El proyecto se desarrollará de manera estructurada, siguiendo pasos recomendados y cuidadosamente diseñados en el libro de Cengel, para abordar tanto los aspectos teóricos como prácticos del sistema de refrigeración.

13.1. Objetivo específico 1.

13.1.1 Identificación del sistema de refrigeración.

La grúa Grove AT880 incorpora un sistema de refrigeración por aire forzado, propulsado por una turbina (ver Imagen 9). Esta turbina, óleo hidráulica, conectada al eje transmisor de la potencia del motor, ajusta su velocidad de giro en proporción a las revoluciones por minuto (rpm) del motor. Con revoluciones que oscilan entre 0 y 2300 rpm, la turbina, con un diámetro de 42 cm, regula el flujo de aire inyectado en el compartimento de refrigeración. En la Imagen 10, se muestra una turbina previamente reemplazada, mientras que en la Imagen 11, se ilustra la turbina despiezada del manual. Seguidamente en la imagen 12 se presenta un esquema del sistema de la turbina proporcionado por el fabricante, detallando los elementos esenciales para su funcionamiento.



*Imagen 9: Motor grúa Grove AT880 para apreciar su turbina frontal.
Fuente manual Deutz*



*Imagen 10: turbina reemplazada.
Fuente propia*

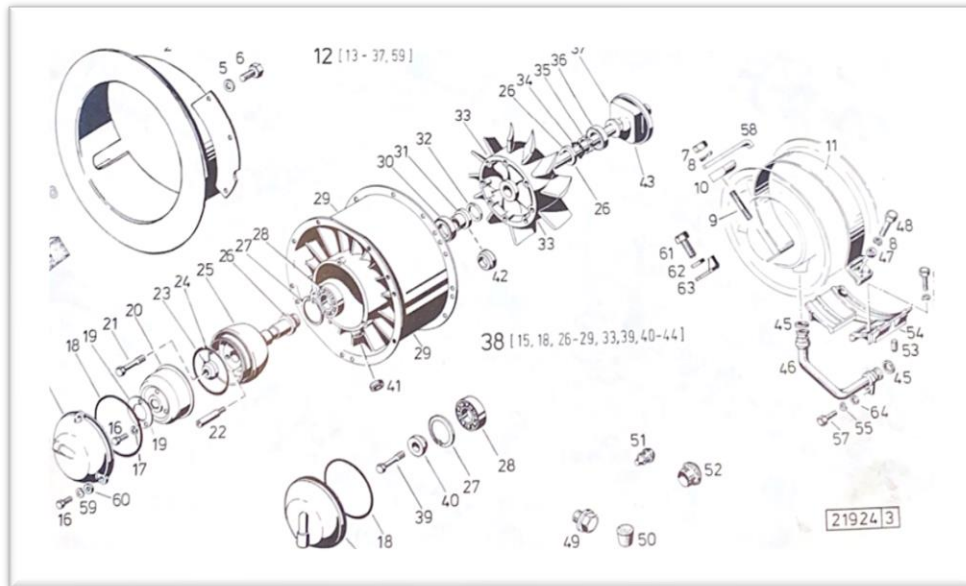


Imagen 11: despiece turbina motor grúa AT880.
Fuente manual Deutz

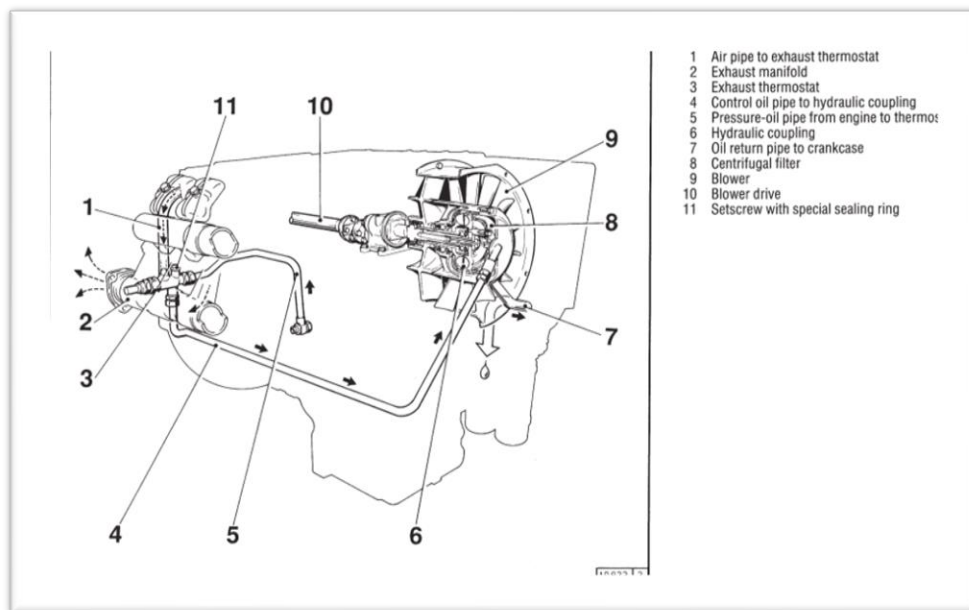


Imagen 12: Sistema de la turbina del motor grúa AT880.
Fuente manual Deutz.

El recorrido del aire inyectado lleva al compartimento con tapas, direccionándolo hacia las culatas y cilindros (ver Imagen 13 y 14). Este compartimento, no totalmente cerrado, permite que el aire fluya por el interior y en menor porción por las paredes exteriores del motor. Además, el aire circula a través de tres intercambiadores de calor (ver Imagen 15) para enfriar el aceite lubricante que se desplaza a través motor.

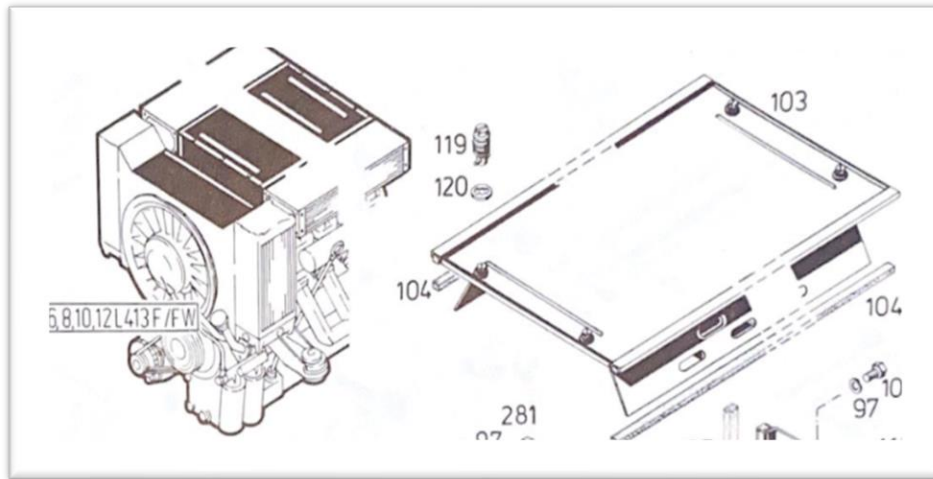
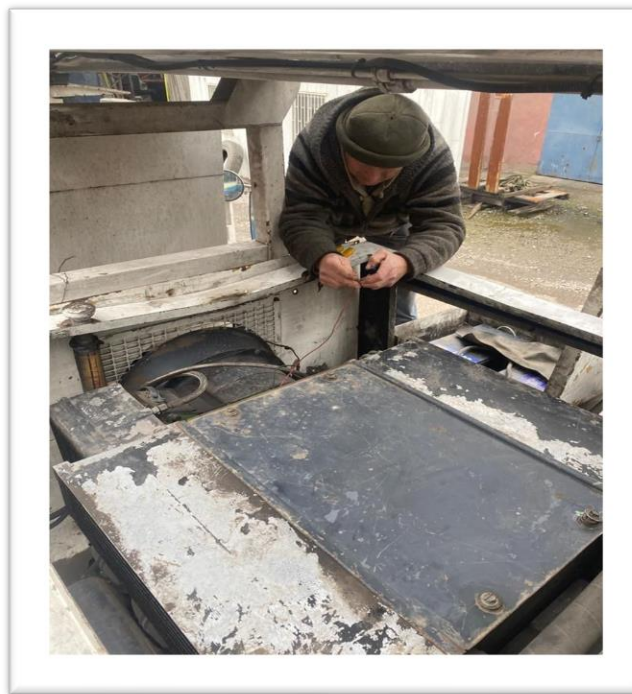


Imagen 13: Compartimento del motor. Fuente manual Deutz



*Imagen 14: Tapa negra compartimento interior del motor.
Fuente propia.*



Imagen 15: intercambiador de calor aceite-aire.
Fuente propia.

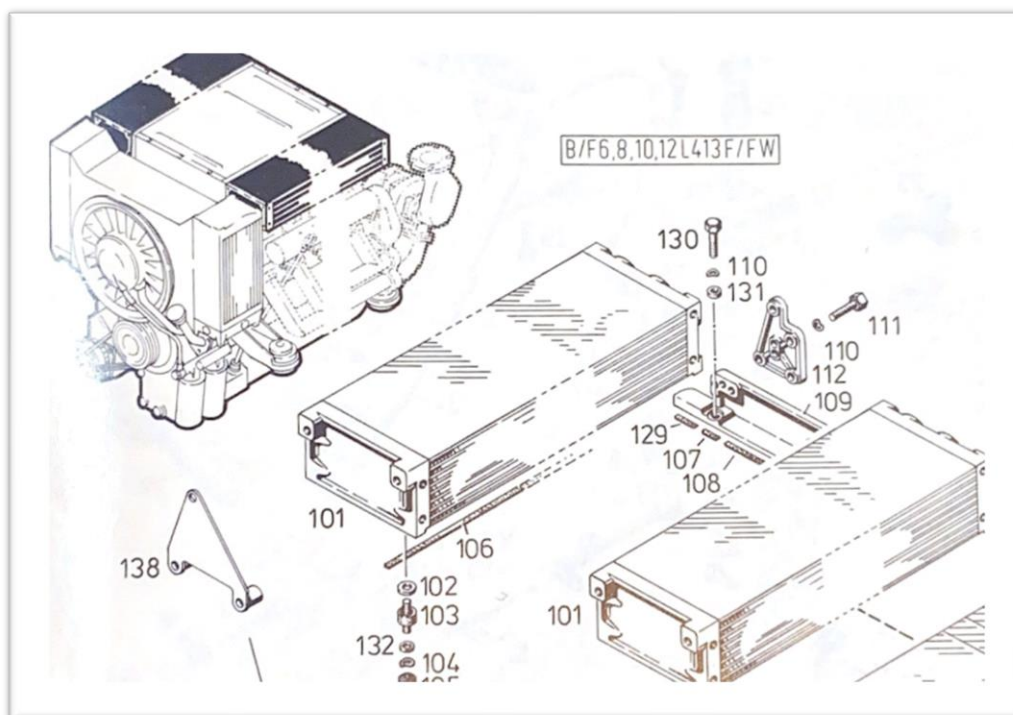


Imagen 16: intercambiador de calor aceite-aire manual Deutz.
Fuente manual Deutz.

Para ofrecer una visión completa, se empleó AutoCAD para esquematizar el sistema de refrigeración de la grúa AT880 (ver Imagen 16). En este esquema, la turbina inyecta aire en el punto 1, dirigiéndolo al compartimento en el punto 2. El aire interactúa con las superficies de las ocho culatas y cilindros, y se desplaza hacia arriba, alcanzando los dos intercambiadores de aceite en los puntos 3 y 4, donde el aire escapa hacia las superficies exteriores del motor. El punto 5 ilustra las pérdidas bidireccionales del aire hacia el bloque del motor y también paredes exteriores.

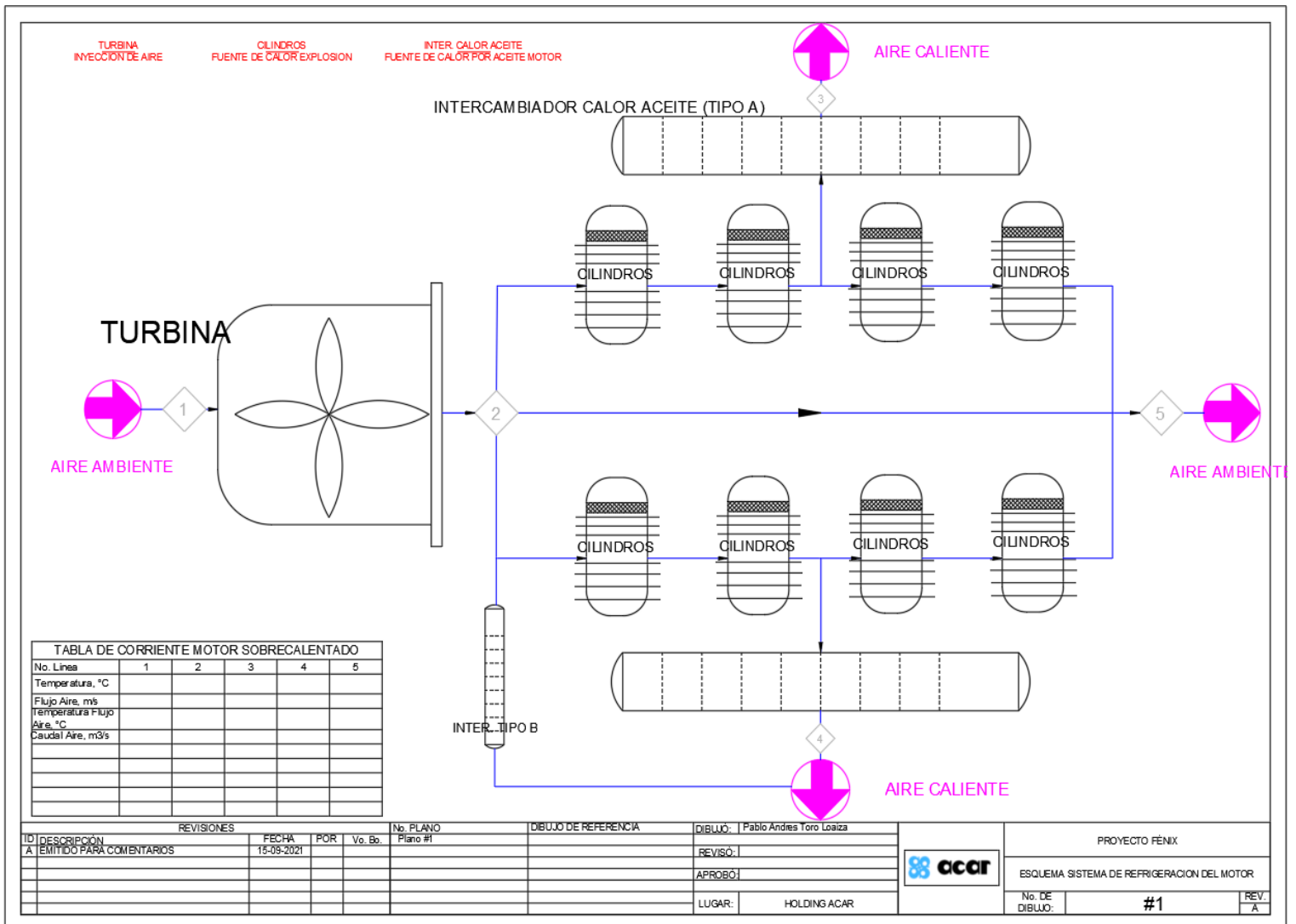


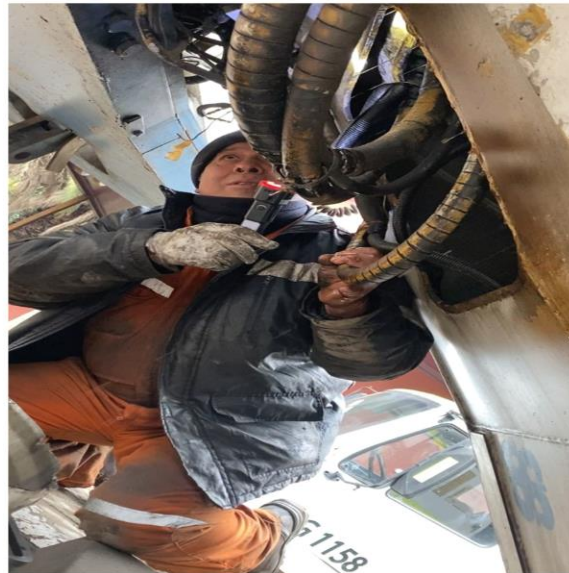
Imagen 17: Esquema AutoCAD sistema de refrigeración motor grúa AT880.
Fuente propia.

13.1.2 Mantenición.

En el anexo 7 se muestra el proceso de mantenimiento más detallado. A continuación, se puede ver en las imágenes 18 a 21 el cambio de baterías, inspección del motor y sistema hidráulico, y por último la máquina operando sin carga:



*Imagen 19: instalación de 2 baterías de 12 voltios.
Fuente propia.*



*Imagen 18: inspección sistema hidráulico.
Fuente propia.*



*Imagen 21 y 21: grúa AT880 posterior a mantenimiento y
prueba en vacío con estabilizadores afuera.
Fuente propia.*

13.1.3 Pruebas Ralentí.

Se procedió primero a la definición y adquisición de los elementos necesarios para llevar a cabo las pruebas. En primer lugar, se adquirió una pistola termómetro infrarrojo láser de la marca Njty (ver imagen 22), la cual permite medir la temperatura superficial de objetos en grados Celsius o Fahrenheit. En segundo lugar, se incorporó un anemómetro UT363 de la marca UNI-T (imagen 23), que tiene la capacidad de medir la velocidad instantánea del flujo de aire y la temperatura, además de funciones para calcular promedios y mostrar velocidades máximas registradas.



*Imagen 22 y 23: Termómetro infrarrojo y anemómetro respectivamente.
Fuente propia.*

En conjunto a los equipos, se llevaron a cabo las pruebas en ralentí, variando los rpm entre 700 y 2000. Se tomaron mediciones a lo largo de 2 horas de operación en dichas condiciones. Los valores registrados durante estas pruebas se presentan en la siguiente tabla:

	Unidades	5 (min)	15 (min)	30 (min)	45 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	140 (min)	Promedios
Temperatura cilindros	°C	47	55,3	63,9	70,6	75,8	80,2	81,7	90,3	70,6
Temperatura Bloque motor	°C	50	60,2	69,8	80,1	88,4	95,3	115	123,1	85,2
Temperatura aire salida motor	°C	23,1	26,5	26,5	33,5	34,8	38,8	43,6	45,2	34,0
Velocidad entrada aire	m/s	11,1	11,3	11,4	11,6	11,9	12,5	12,6	12,6	11,9
Velocidad salida aire	m/s	6,1	6,1	6,5	5,6	6,5	6,1	5	5,7	5,95

Tabla 5: resultados pruebas ralentí.

En la tabla anterior, se evidencia que la temperatura de los cilindros, dentro de rangos normales para motores Diesel según la referencia de Calleja (2015), alcanzó un máximo de 90.3 °C en la prueba controlada de la grúa AT880, tendiendo a aumentar con el tiempo. Calleja establece un límite máximo de 190 °C para la temperatura superficial de los cilindros, y el valor obtenido se mantiene dentro de los estándares aceptables.

En cuanto a la temperatura del bloque del motor, que superó ligeramente el límite de 120 grados Celsius establecido por el fabricante (considerado anormal según las especificaciones), en la prueba el motor alcanza 123,1 °C en 2 horas y 20 minutos de operación controlada.

Estos datos son fundamentales en los cálculos teóricos de transferencia de calor, como se detallará en el siguiente apartado.

13.1.4 Análisis teórico.

En la continuación del proyecto y tras la recopilación de los datos esenciales para realizar los cálculos, se procede a la evaluación teórica de la capacidad de disipación de calor del sistema de refrigeración del motor de la grúa AT880. Estos cálculos teóricos se fundamentan en los principios de transferencia de calor y masa, extraídos del libro "Transferencia de Calor y Masa" de Cengel y Ghajar, cuarta edición, 2011.

Debido a la complejidad geométrica del motor, se realizaron supuestos sugeridos por Cengel para simplificar los cálculos ver anexo 5. Con estos supuestos establecidos, se llevaron a cabo los cálculos del sistema en tres partes. En el primer cálculo, se aplicó un volumen de control al habitáculo o compartimiento interior del motor donde circula el aire refrigerante para calcular su capacidad de disipación en las condiciones actuales. En el segundo, se calculó la disipación de calor alrededor del motor, asumiendo las paredes como superficies planas. Finalmente, se analizó la capacidad de disipación de calor de los tres intercambiadores de calor aceite-aire presentes en el motor.

Todo este análisis se ejecutó mediante el principio de convección forzada, término empleado cuando la transferencia de calor tiene lugar entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, en este caso, el aire. Además, se denomina "forzada" debido a la presencia de un mecanismo, la turbina en este caso, que introduce aire al sistema de manera forzada.

13.1.4.1. Calculo transferencia de calor por volumen de control.

En una primera etapa, se elaboró un diagrama que permitiera comprender las variables que inciden en el volumen de control, como se ilustra en la imagen 25 y (en anexo la ubicación de este en el motor). Este diagrama se basa en un balance de energía para un sistema de flujo estacionario, conforme a la metodología de Cengel (2011). El balance de energía se expresa mediante la ecuación [1]:

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_2 - T_1) \quad [1]$$

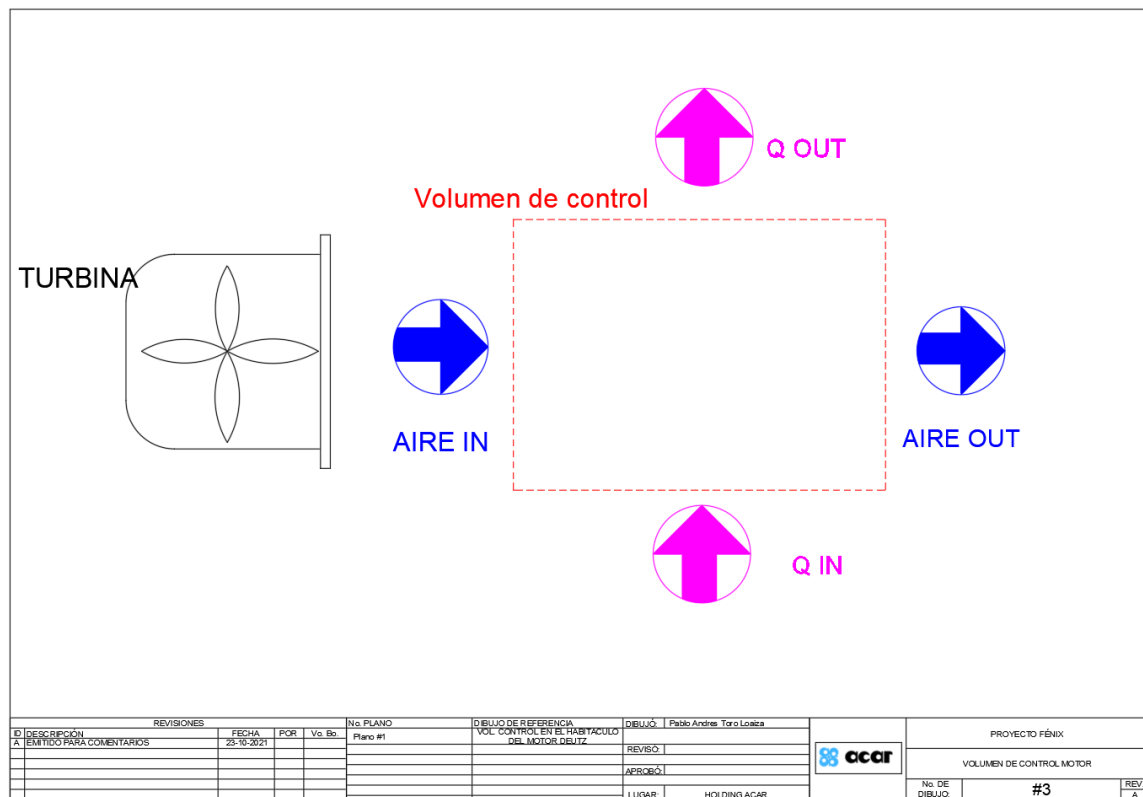


Imagen 25: volumen de control compartimento o habitáculo interior motor.
Fuente propia.

Donde \dot{Q} es la razón de la transferencia neta de calor hacia adentro (IN) y hacia afuera (OUT) del volumen de control en $[\frac{kJ}{s} \text{ o } kW]$, \dot{m} es el gasto de masa o razón de transferencia de masa en $[kg/s]$, C_p es la capacidad calorífica a presión constante expresada en $[\frac{J}{kg^\circ K}]$, T_1 la temperatura de entrada aire y T_2 la temperatura de salida del aire.

Los valores de las variables teniendo en cuenta la tabla obtenida de las pruebas ralenti y la geometría real del sistema físico, como la turbina, da un resultado de la razón de transferencia neta de calor de 20,65 $[kW]$.

13.1.4.2 Cálculo de disipación de calor superficies exteriores.

En el análisis, el motor de la grúa AT880 se simplificó visualmente como un rectángulo con paredes de superficie plana. La geometría propuesta fue desglosada en seis caras, cada una con parámetros específicos de temperatura superficial y velocidad de aire que se midieron en las pruebas controladas y se ilustra en la tabla 5. Las propiedades del aire, consideradas a una temperatura promedio de 27 grados Celsius (°C), se utilizaron en los cálculos de la tasa de transferencia de calor por convección forzada. El método aplicado se basó en la ley de enfriamiento de Newton ecuación [2].

Superficies exteriores	Velocidad promedio aire m/s	Temperatura máxima °C
Paredes laterales	1,9	120
Superficie superior	0,5	100
Superficie inferior	0,2	100
Superficie frontal	0,5	120
Superficie trasera	1,2	120

Tabla 6: velocidad promedio y temperatura máxima en superficies exteriores del motor durante pruebas controladas.
Fuente propia.

$$\dot{Q}[w] = A_s h_{convectivo} \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad [2]$$

Donde, A_s es el área superficial de la cara en m^2 , h es el coeficiente convectivo en $[\frac{W}{m^2} \cdot K]$, T_s la temperatura superficial de la cara y T_{∞} la temperatura en el medio circundante.

Se determinaron los coeficientes convectivos considerando los números adimensionales de Reynolds (Re) ecuación [3] y Nusselt (Nu) ecuación [4], que describen la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas del fluido en movimiento y la transferencia de calor por convección y conducción, respectivamente. Las ecuaciones características incluyeron:

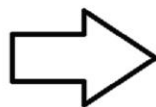
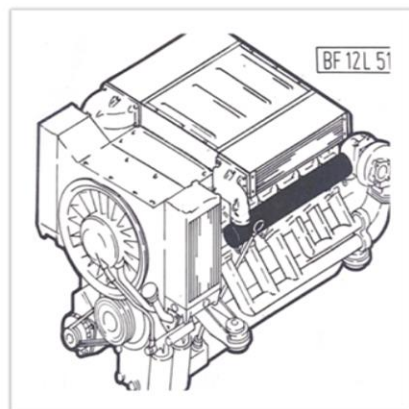
$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad [3]$$

$$Nu = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad [4]$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad [5]$$

Donde k conductividad térmica en $[\frac{W}{m \cdot K}]$, Pr número Prandtl propiedad del fluido adimensional y L el largo característico de la cara en m .

Estos cálculos se aplicaron a cada una de las seis caras de la geometría simplificada, obteniendo la tasa de transferencia de calor por convección forzada $\dot{Q}_{convectivo}$ en Watts para cada cara. La sumatoria de estas tasas proporcionó una disipación total de 1502,59 Watts. La visualización de este análisis se presenta en el siguiente esquema. A continuación, en la imagen 26 se puede observar un bosquejo del análisis del motor con su geometría simplificada.



Flujo de aire

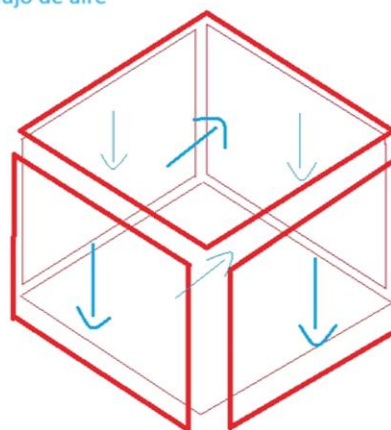


Imagen 26: bosquejo geometría simplificada del motor.

13.1.4.3 Cálculo disipación intercambiadores.

Para el análisis de la disipación de calor de los intercambiadores de aire y aceite, se introdujeron supuestos adicionales para simplificar los cálculos. Inicialmente, se consideró que los intercambiadores están perfectamente aislados, y que las propiedades del aceite y el aire permanecen constantes a lo largo de los intercambiadores, estado estacionario.

El sistema consta de dos tipos de intercambiadores: el tipo A, de dimensiones 63 cm de largo, 23 cm de ancho y 12 cm de alto, con dos unidades en el sistema; y el tipo B, de dimensiones 23 cm de largo, 15 cm de ancho y 36 cm de alto. Ver imagen 27.



*Imagen 27: Intercambiador tipo B lado izquierdo, y tipo A lado derecho superior.
Fuente propia.*

El cálculo de la disipación de calor para estos elementos se basa en la metodología de Cengel. La tasa de transferencia de calor \dot{Q} se determina mediante la fórmula:

$$\dot{Q} = U * A_s * \Delta T_{ml} \quad [6]$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad [7]$$

Donde U es el coeficiente global de transferencia de calor entre un fluido caliente y uno frío en $\left[\frac{W}{m^2} * ^\circ K\right]$, A_s es el área superficial del intercambiador que entra en contacto con el aire en $[m^2]$, y por último ΔT_{ml} la temperatura diferencia media logarítmica en $[^\circ K]$, utilizada para calcular la transferencia de calor en sistemas de flujo, especialmente en intercambiadores (Cengel, 2011).

Las temperaturas dentro de los intercambiadores se midieron hacia el final de las pruebas, donde se registraron los valores más elevados. En este caso, el fluido caliente ingresa a 100°C y sale a 98°C, mientras que el aire entra a 20°C y sale a 34.14°C. Además, se midieron las velocidades de los fluidos durante este proceso, siendo la velocidad del aire de 5.95 m/s y la del aceite de 14.04 m/s.

Los cálculos de transferencia de calor para los dos tipos de intercambiadores dan los siguientes resultados: el intercambiador tipo A mostró una capacidad de disipación de calor de 39,111 [kW], mientras que el intercambiador tipo B dispó un total de 61,931 [kW].

13.1.5 Áreas de mejora potencial.

Con base en los resultados obtenidos, se identifican dos áreas clave para mejoras en el sistema de refrigeración de la grúa AT880. La primera área de mejora se centra en la geometría del sistema, en concreto aumentar las superficies de contacto entre el motor y el aire refrigerante conduciendo a un aumento en el área superficial (A_s) y, por ende, en el coeficiente convectivo (h) ecuación [5], mejorando así la capacidad de disipación de calor del sistema.

La segunda área de mejora se enfoca en incrementar la velocidad del aire inyectado al sistema. Al observar la dependencia de la ley de enfriamiento de Newton [2] por medio del coeficiente convectivo, se deduce que aumentar la velocidad del aire (V) impacta crecientemente en el número de Reynolds (Re), lo que, a su vez, influirá positivamente en el número Nusselt (Nu) y, finalmente, en el coeficiente convectivo (h). El incremento en la velocidad del aire podría mejorar significativamente la transferencia de calor, contribuyendo así a una reducción efectiva en la temperatura del motor.

13.2 Objetivo Específico 2.

13.2.1 Revisión de Literatura Especializada en Transferencia de Calor.

Dentro del desarrollo del proyecto, se llevó a cabo investigación bibliográfica sobre los sistemas de gestión térmica disponibles para motores de combustión interna, centrandose especialmente en la maquinaria pesada. Como se mencionó anteriormente, el trabajo de Calleja en "Motores y sus Sistemas Auxiliares" permitió comprender las tecnologías disponibles para la refrigeración en motores, contribuyendo especialmente en el estado del arte en los sistemas de refrigeración para motores de combustión interna, incluyendo sus tendencias futuras.

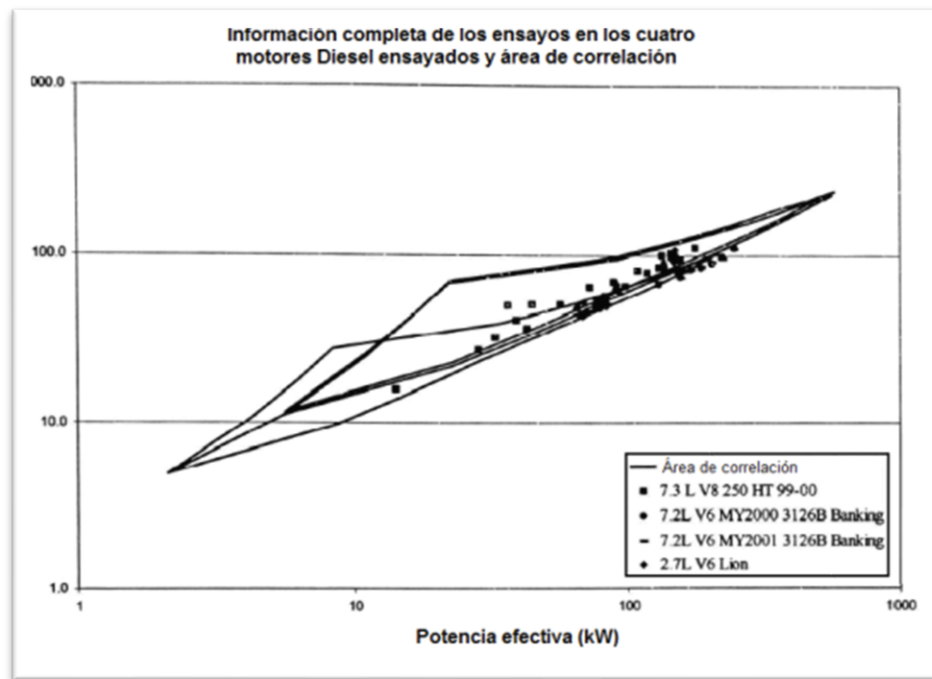
Además, se encontró y se destacó el trabajo de Romero C. en 2009, titulado "Contribución al Conocimiento del Comportamiento Térmico y la Gestión Térmica de Motores de Combustión Interna Alternativos". Esta investigación aportó al proyecto de varias formas, siendo la primera de ellas el modelo empírico que permiten evaluar la disipación de calor cedido al sistema de refrigeración en términos de $\dot{Q}_{refrigeración}$. Esta es la correlación empírica de Lahvic, aplicable a motores Diesel y obtenida tras estudiar la disipación de calor en varios motores Ford de camiones (Romero C. 2009). La fórmula empírica para el calor disipado al sistema de refrigeración es la siguiente:

$$\dot{Q}_{refr} [kW] = \frac{(8,66*V_d*n+108,93*M_T+1119.74*N_e-1010*V_d+2890)}{3412,2} \quad [8]$$

Donde:

- V_d : cilindrada del motor a evaluar, en caso de la grúa 12.8 litros.
- n : revoluciones por minuto (rpm), correspondientes al régimen del motor.
Para la grúa, 2300 rpm.
- M_T : par motor en Newton por metro (Nm). Para la grúa, 1170 Nm.
- N_e : potencia efectiva del motor, en este caso 243 kW.
- Datos obtenidos del manual del fabricante del motor Deutz.

El resultado del modelo fue un valor de 188 kW, indicando la cantidad de calor que debe disiparse a través del sistema de refrigeración. Este valor se establece como referencia y objetivo en la solución al problema. Además, Romero C. proporcionó una gráfica con información experimental suministrada por un experto, analizando las tendencias de calor disipado en motores Diesel de marcas como Perkins, Volvo, Caterpillar, Cummins, General Motors, John Deere y Detroit Diesel, motores similares a la grúa AT880. La siguiente gráfica ofrece información sobre el calor disipado versus la potencia efectiva de cuatro motores Diesel durante ensayos:



*Imagen 28: Ensayos en 4 motores Diesel. Eje horizontal potencia efectiva y eje vertical calor disipado al sistema de refrigeración en kW.
Fuente Romero C. 2009*

En nuestro caso, el valor de 188 kW se ajusta perfectamente en la gráfica anterior, ubicándose dentro de los valores experimentales reales observados en motores y máquinas similares.

13.2.2. Consultas con Expertos en Transferencia de Calor.

En las etapas iniciales del proyecto, se buscó establecer comunicación con el fabricante local del motor Deutz; sin embargo, al no contar con representación local, se optó por contactar al fabricante a nivel internacional. Se envió un correo electrónico detallando el problema experimentado en la grúa AT880 equipada con el motor Deutz. A pesar de varios intentos, lamentablemente, no se recibió respuesta por parte del fabricante.

Ante esta situación, se procuró asesoramiento de docentes de la facultad, quienes brindaron valiosas recomendaciones para simplificar y enfocar los cálculos. Uno de los aspectos clave sugeridos fue asumir un estado estable o estacionario en los análisis. Asimismo, se propuso simplificar la geometría. Como última sugerencia fue basar los parámetros iniciales en base a la información proporcionada por el fabricante. Por lo que se llevó a cabo una búsqueda de manuales, tanto virtuales como presenciales, para recopilar todos los detalles técnicos relevantes, que se convirtieron en fundamentos clave para los cálculos teóricos.

13.3 Objetivo Específico 3.

13.3.1 Propuesta de solución diseño conceptual basado en la teoría de transferencia de calor.

Como respuesta a la problemática, se presenta una solución de diseño conceptual. La propuesta implica la modificación de la turbina de aire para aumentar la velocidad del aire refrigerante. Simultáneamente, se incorporarán deflectores de aire para garantizar la velocidad necesaria en el flujo de aire sobre las superficies del motor, cuyo valor se detalla en la siguiente sección. El diseño conceptual propuesto se visualiza en el plano adjunto:

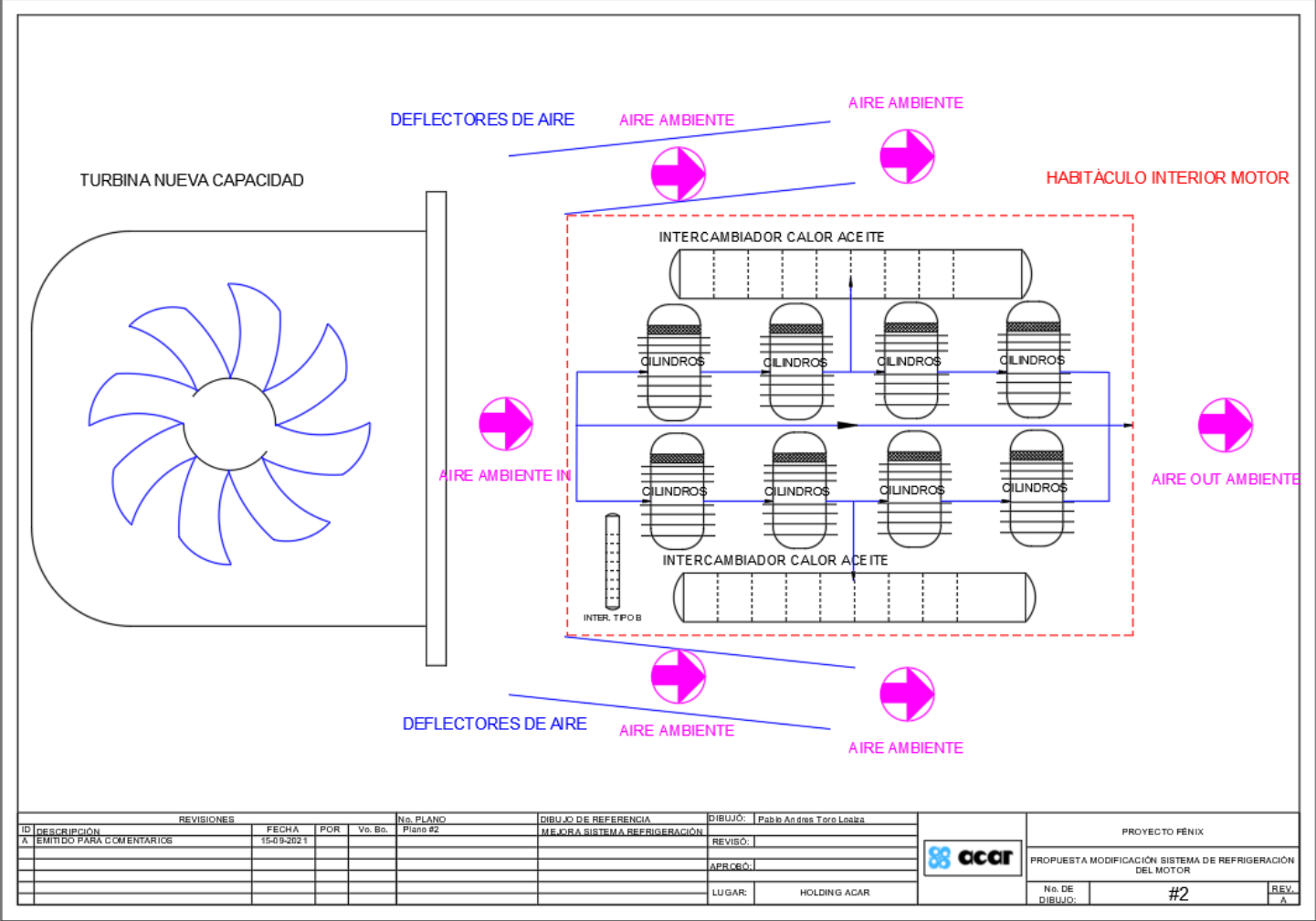


Imagen 29: diseño conceptual de la propuesta de mejora al sistema de refrigeración del motor de la grúa AT880. Fuente propia.

En el concepto anterior, se destacan los tres elementos clave de este diseño conceptual. En primer lugar, la turbina de aire con una capacidad mejorada (esta capacidad se aborda en los resultados capítulo 13). En segundo lugar, los deflectores de aire, representados en azul, que consisten en placas de aluminio diseñadas para dirigir parte del aire de la turbina hacia las superficies exteriores del motor. Por último, la línea punteada roja indica las áreas donde el aire interactúa en el interior del motor, específicamente en el compartimento mencionado en la sección 13.1.1 (identificación del sistema de refrigeración). Una porción del flujo de aire ingresa directamente al compartimento interior del motor, mientras que, gracias a los deflectores, otra parte del flujo se redirige hacia la superficie exterior del motor. Es importante destacar que, en vista a el objetivo general de reducir la temperatura de 120 a 90 grados Celsius, esta magnitud se estableció como constante únicamente para los cálculos asociados con la propuesta de solución (ver ecuación [9]). Esto se debe a que, en la búsqueda de cumplir con la meta global, es esencial asegurar que, en nuestros cálculos teóricos, la temperatura superficial del motor de la grúa se mantenga en la temperatura de régimen especificada por el fabricante de 90°C.

$$T_s = 90^{\circ}C = 363.15^{\circ}K = \left(\frac{\dot{Q}}{A_s * h_{conv}} \right) + T_{\infty}$$

13.3.2 Validaciones teóricas del nuevo modelo.

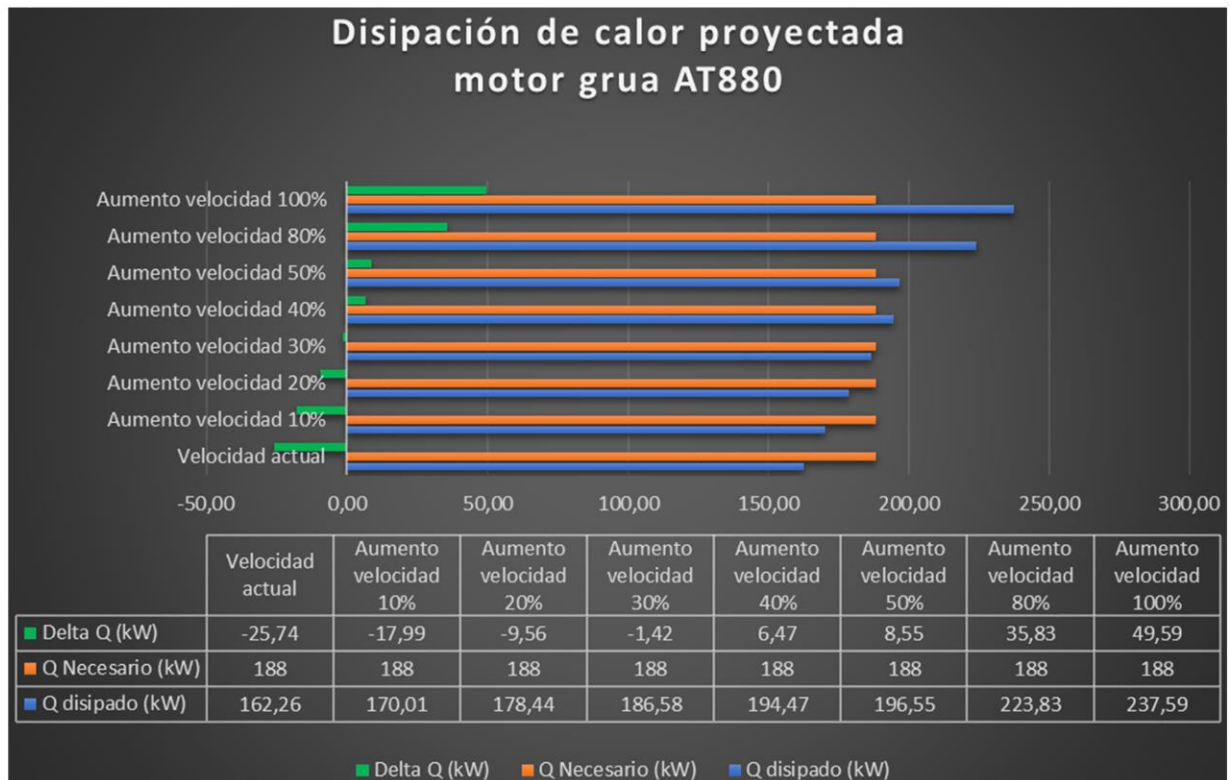
En cuanto a la validación desde el punto de vista teórico, los cálculos demuestran que aumentando la velocidad en un 40%, a partir de las velocidades actuales medidas en las pruebas ralenti en la sección 9.1.3, se logra el objetivo. En particular la nueva disipación de calor, siguiendo la misma metodología teórica anterior, da un resultado de una nueva disipación de calor de 194,47 (kW), quedando un remanente positivo en la disipación de calor de 6,47 kW en base a el valor obtenido de 188 kW en la formulación empírica de Lahvic en la sección 13.2.1.

14. Resultados cualitativos y cuantitativos.

En cuanto a los resultados, se obtuvo primero el objetivo de disipación de calor por medio de la investigación de Romero C. 2007, el cual por medio de un modelo empírico se pudo determinar las necesidades de disipación de calor para nuestra grúa, la cual debe disipar como mínimo 188kW. Sin embargo, los cálculos iniciales en base a las pruebas controladas anteriormente indican un valor de 162.26 kW teniendo así una deuda de calor a disipar del sistema de 25,74 kW.

Por medio de la mejora propuesta teniendo en cuenta la temperatura objetivo de 90 grados Celsius, y asegurando un aumento de 40% en todas las velocidades promedio de aire medidas (ver anexo 6). Estas velocidades son de 16,7 (m/s) en promedio de aire en el compartimento interior del motor, 8,3 (m/s) de velocidad promedio en los intercambiadores de calor y una velocidad media en la superficie exterior que envuelve el motor de al menos 1,4 (m/s).

Con las nuevas características de aire se logra teóricamente una transferencia de 194,47 kW, contrastado con la disipación actual (162.26 kW), representa un aumento del 19,8%, logrando disipar el calor que requiere el motor Deutz de la grúa AT880. En el gráfico siguiente se ilustra como cambia la disipación de calor en base a aumentos porcentuales de las velocidades de aire en el sistema:



*Imagen 30: disipación de calor en función a aumentos porcentuales en la velocidad de aire.
Fuente propia.*

En la tabla previa, la disipación de calor (Q) se presenta de tres formas distintas. En primer lugar, se muestra el Q necesario a disipar (en color anaranjado) por el sistema de refrigeración, calculado mediante el modelo de Lahvic. En segundo lugar, se presenta el Q disipado (en color azul), el cual varía en función de las velocidades del aire. Por último, se exhibe el delta Q (en color verde), que representa la diferencia entre las dos tasas de transferencia mencionadas anteriormente (Q necesario y Q disipado).

15. Conclusiones y discusión.

En conclusión, el proyecto presenta una perspectiva integral sobre el abordaje de la problemática de sobrecalentamiento en la grúa AT880. La propuesta de aumentar la disipación de calor mediante la modificación de la turbina de aire y la incorporación de deflectores muestra resultados teóricos prometedores, destacando un incremento del 19,8% en la disipación de calor, cumpliendo con los estándares mínimos requeridos en formulaciones empíricas (Lahvic).

En cuanto a la viabilidad de la expansión del proyecto, se identifican oportunidades significativas para futuras mejoras en equipos deteriorados, aprovechando la escalabilidad de la base teórica y metodología desarrolladas, que son compatibles a todo tipo de sistemas de refrigeración. Este enfoque ofrece una solución aplicable a diversos activos en la flota de la empresa ACAR que tengan problemas en su refrigeración.

Desde la perspectiva de un ingeniero civil mecánico, es crucial reconocer la importancia de mantener equipos en cumplimiento con las normativas ambientales y de emisiones. La propuesta del proyecto, aunque teóricamente sólida, plantea desafíos prácticos y éticos, especialmente en el contexto de la necesidad de mejoras para asegurar el cumplimiento de las regulaciones ambientales chilenas. La aplicación efectiva de la propuesta requerirá una cuidadosa consideración de las implicaciones medioambientales y de salud.

En términos de la grúa AT880 como activo, la evaluación de la propuesta también destaca su valor estratégico dentro de la empresa, siendo la grúa con mayor capacidad y características únicas. La necesidad de mejoras y la posible inversión para la recuperación del activo subrayan la importancia de un enfoque equilibrado entre eficiencia operativa y cumplimiento normativo.

En resumen, mientras que la propuesta ofrece una dirección prometedora para abordar el sobrecalentamiento, la implementación efectiva requerirá una cuidadosa gestión de aspectos normativos, medioambientales y operativos para garantizar el éxito a largo plazo y la sostenibilidad del activo.

16. Referencias.

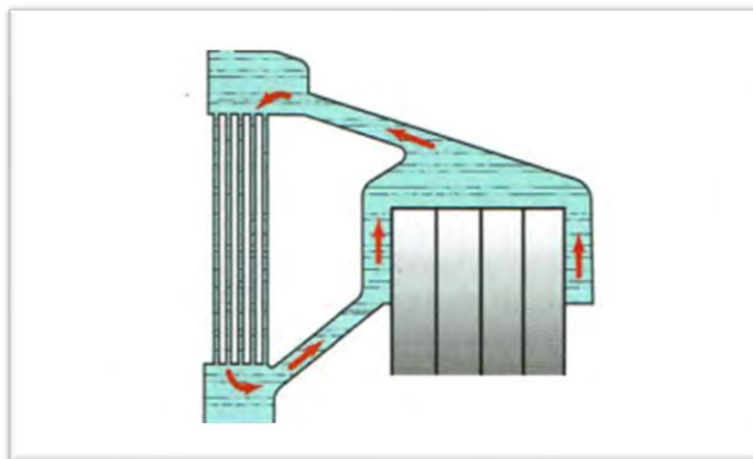
1. Manitowoc. (s.f.). GMK4080-3 - Grúas todo terreno. Manitowoc Cranes.
<https://www.manitowoc.com/es/grove/gruas-todo-terreno/gmk4080-3>
2. Liebherr. (s.f.). Grúas automotrices LTM 1070-4.2. Liebherr.
<https://www.liebherr.com/es/chl/productos/gr%C3%BAas-automotrices-y-sobre-orugas/gr%C3%BAas-automotrices/liebherr-gruas-automotrices/ltm-1070-4.2.html>
3. Truck1. (s.f.). Motores Mercedes OM936LA 270 Actros MP4. Truck1.
<https://www.truck1.es/recambios/motores/mercedes-om936la-270-actros-mp4-engine-mercedes-om936la-270-0020106500-a7737466.html>
4. Mundo del Motor. (s.f.). Bloque de motor. Mundo del Motor.
<https://www.mundodelmotor.net/bloque-de-motor/>
5. Truck1. (s.f.). Motores Deutz BF8L513. Truck1.
<https://www.truck1.es/recambios/motores/deutz-bf8l513-a5848907.html>
6. Autoline24. (s.f.). Motores para camión Mercedes-Benz OM 936. Autoline24.
<https://autoline24.cl/-/venta/motores/para-camion/Mercedes-Benz/OM-936--23091508214016075300>
7. Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa (4a ed.). México: McGraw-Hill.
8. Gonzales Calleja, D. (2015). Motores térmicos y sus sistemas auxiliares (2a ed.). España: Editorial Paraninfo.
9. Romero Piedrahita, C. A. (2009). Contribución al conocimiento del comportamiento térmico y la gestión térmica de los motores de combustión interna alternativos [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/32181>

17. Anexos.

17.1. Anexo 1: Refrigeración por Líquido refrigerante.

Este sistema utiliza fluido en estado líquido, el cual envuelve por medio de tuberías los cilindros y pasa por conductos a través del bloque motor, luego se dirige hacia el radiador, donde se produce la transferencia o sesión del calor.

La refrigeración por líquido se puede dar de dos maneras, una por termosifón, imagen 31, actualmente en desuso ya que su funcionamiento se basaba en las corrientes de convección generadas por la variación de temperatura del fluido refrigerante. La temperatura del motor se regula de forma automática pero el gran inconveniente es que la velocidad de movimiento del agua es reducida. La segunda manera es por medio de una bomba y de manera presurizada, en este caso la circulación del fluido líquido es forzada por medio de una bomba que es accionada por el motor, como se observa la imagen 32. Mediante este sistema se aumenta la velocidad del fluido y en consecuencia aumenta la transferencia de calor. Al mismo tiempo permite usar radiadores compactos y menos cantidad de fluido que el sistema de termosifón. Al ser un circuito presurizado se alcanzan presiones más altas que la atmosférica, esto con el objetivo de aumentar la temperatura de ebullición del líquido.



*Imagen 31: sistema de refrigeración por termosifón.
Fuente Calleja, 2015*

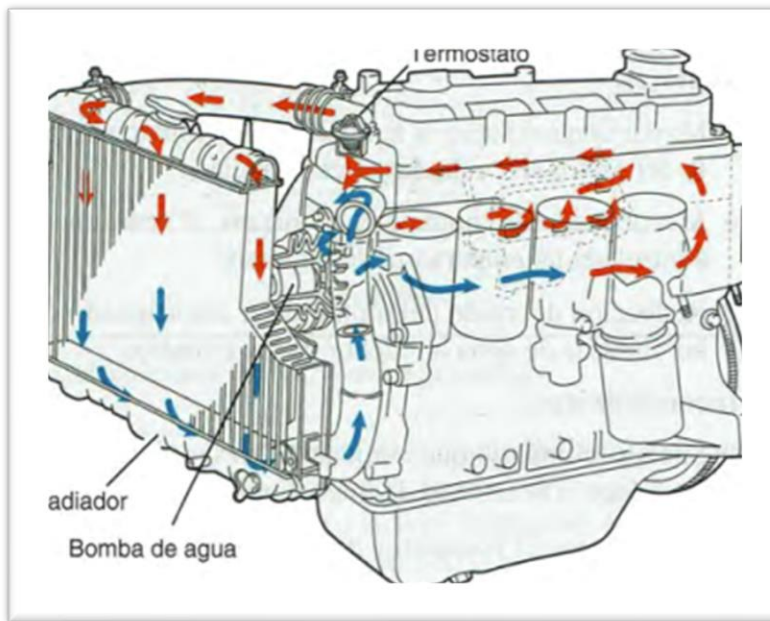


Imagen 32: Circuito de bomba hidráulica.
Fuente Calleja, 2015.

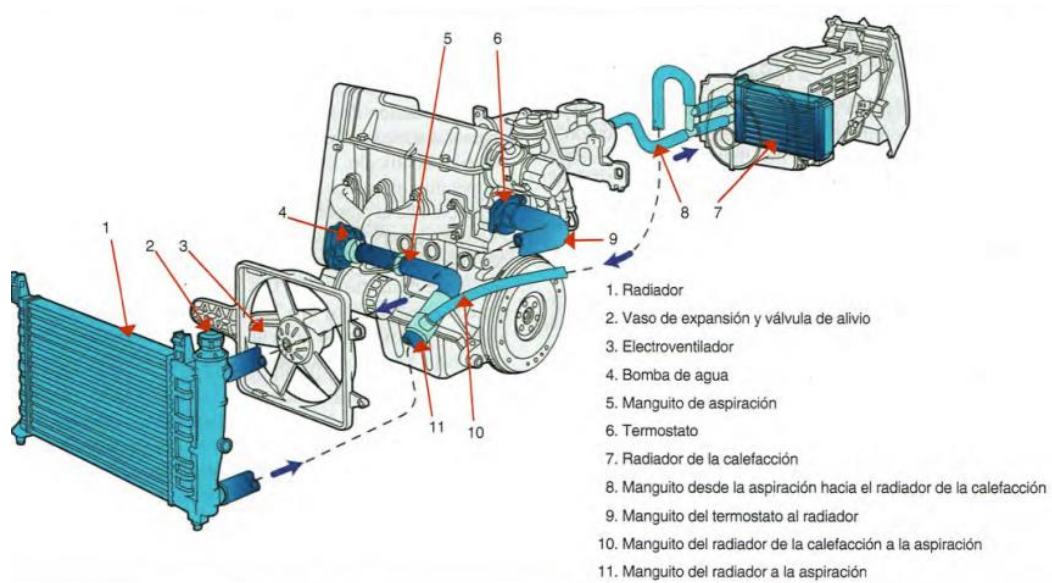


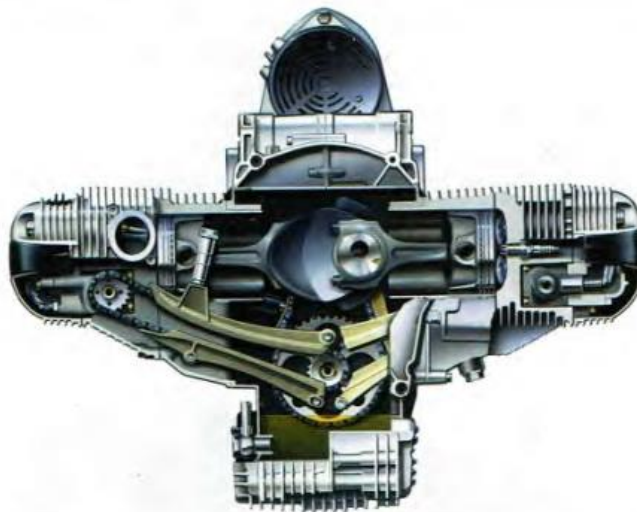
Imagen 28: Componentes sistema de refrigeración por líquido.
Fuente Calleja 2015.

17.2. Anexo 2: Refrigeración por aire:

En este sistema de refrigeración el fluido en movimiento entra en contacto directo con el motor y fluye por sus superficies. Algunos elementos del motor como los cilindros y culata cuentan con aletas en sus diseños, todo esto para aumentar la superficie de contacto con el aire y maximizar la transferencia de calor.

- Refrigeración por marcha propia del vehículo:

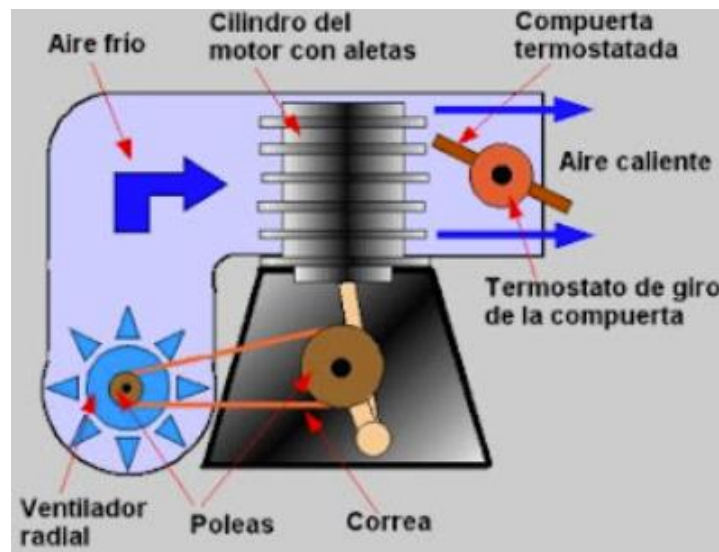
Este sistema funciona bien generalmente para los vehículos que tienen el motor expuesto o fuera de su carrocería. El aire entra en contacto directo con las aletas del motor, estando en función de la velocidad a la que se desplaza. Es un sistema relativamente sencillo y no cuenta con componentes en sí, esta todo en función a la velocidad en la que se desplace el vehículo, por lo que existen fluctuaciones altas de temperatura.



*Imagen 33: motor refrigerado por aire.
(Calleja, 2015)*

- Refrigeración por aire forzado:

En este sistema el motor se encuentra cerrado en alguna especie de compartimento en el vehículo, por lo que es necesario forzar el aire para que ingrese a el compartimento. Este flujo es provocado por un ventilador impulsado generalmente por el motor, este inyecta aire forzado. Los rpm del motor influyen en la velocidad del ventilador. En función a la temperatura, los deflectores del motor, que son superficies que dirigen el flujo, se orientan en distintas posiciones para llevar el aire a lugares donde se necesite, esto es gracias a termostatos. Este sistema lo usan algunos vehículos automóviles, muchos modelos de motocicletas y algunos motores industriales.

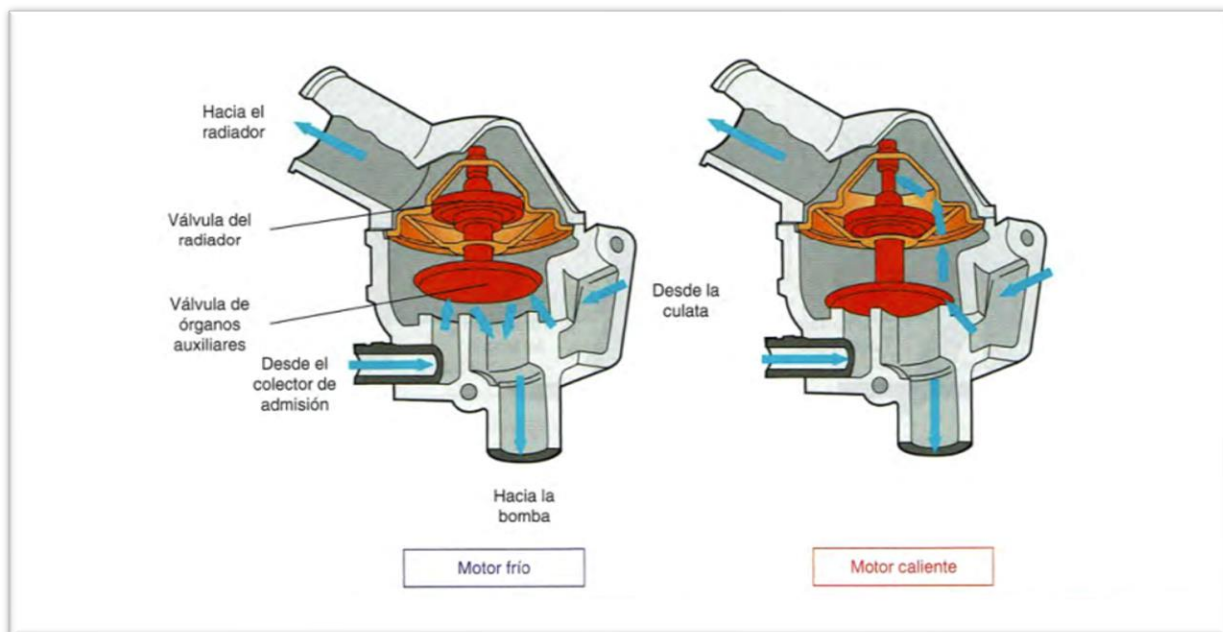


*Imagen 34: esquema sistema de refrigeración por aire
Fuente Calleja, 2015*

17.3. Anexo 3: mejora sistema de refrigeración por liquido

En el intento de lograr un sistema de refrigeración más eficiente o con mayor capacidad de regular y obtener temperaturas en régimen, el mercado se ha enfocado en mejorar algunos componentes de este sistema. Algunos de ellos son:

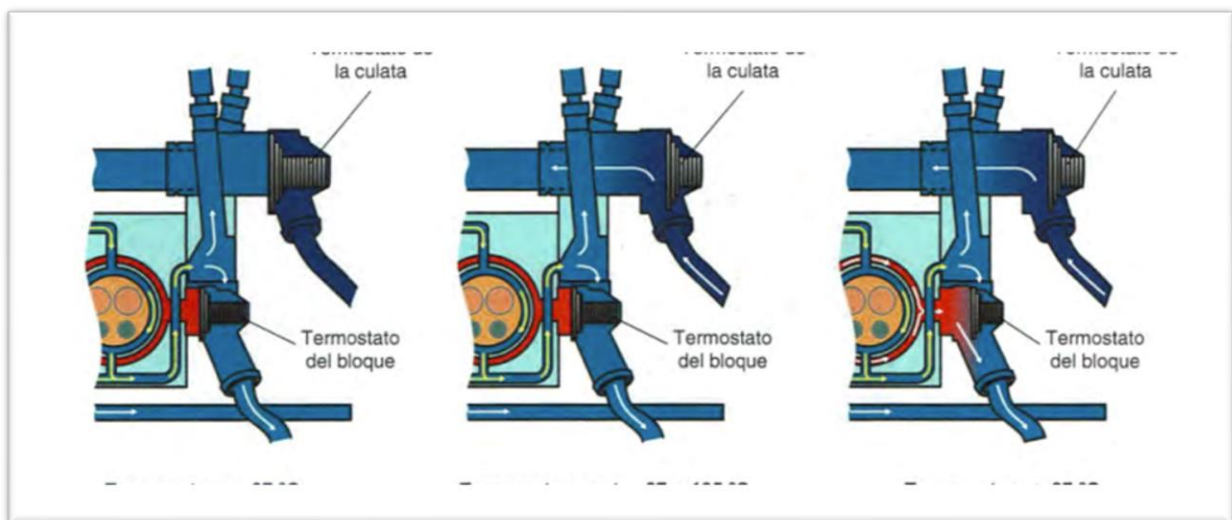
- Termostato de 2 válvulas (imagen 5):
Estos termostatos además de permitir el paso de líquido al radiador en función a la temperatura del motor, también controla la temperatura de otros sistemas auxiliares del motor.



*Imagen 35: Termostato de 2 válvulas.
Fuente Calleja, 2015.*

- Refrigeración doble circuito (imagen 36):

En este sistema el líquido refrigerante circula por 2 circuitos separados que pueden estar a distintas temperaturas. Generalmente es un circuito para la culata del motor y el otro para el bloque del motor. Este sistema se dispone así ya que las temperaturas de régimen teóricamente son diferentes para algunos elementos del motor. Las principales ventajas de este sistema es que el bloque de motor se calienta más rápido y que las cámaras de combustión se refrigeran mejor al disminuir la temperatura de funcionamiento en la culata.



*Imagen 36: Refrigeración doble circuito.
Fuente Calleja, 2015*

- Termostato regulado electrónicamente:

Cada vez son más los motores que usan este tipo de termostatos. Estos mejoran el rendimiento del motor ya que funcionan regulándose instantáneamente dependiendo de las condiciones del motor.

- Electroventilador:

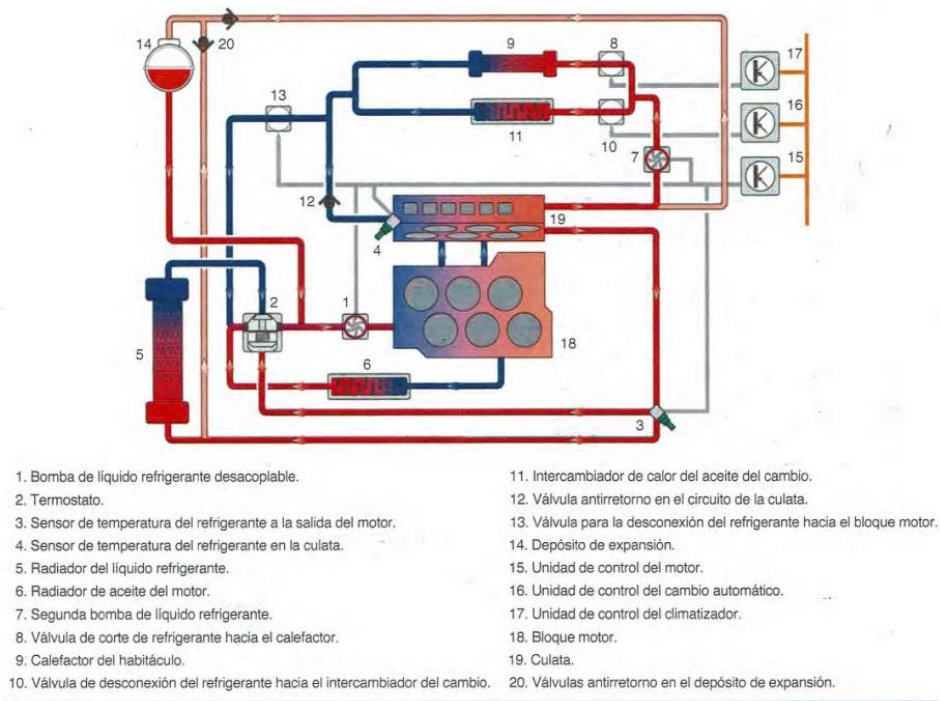
Este ventilador es movido por un motor eléctrico que a su vez es controlado por un termo contactó, el cual abre cuando el motor está adquiriendo temperatura y cierra cuando requiere aire para refrigerar el sistema.

Algunos de estos electroventiladores cuentan con un control electrónico, todo con el objetivo de mejorar el rendimiento del motor.

17.4. Anexo 4: Sistema VAG.

Este sistema se basa en la interconexión de las unidades de control del motor, la transmisión automática y el climatizador a través de una red con distintas posibilidades de circuitos. Algunos componentes particulares de este sistema son: bomba de líquido refrigerante desacoplable, segunda bomba de líquido refrigerante, electroválvulas, válvulas de antirretorno y sensores de temperatura.

El funcionamiento de este sistema es diferente para invierno y para el verano. En invierno, el sistema de gestión de refrigeración se enfoca en calentar rápidamente el motor y proporcionar calefacción en el habitáculo. Durante la fase de calentamiento, la bomba de líquido refrigerante desacoplable retiene el refrigerante en el bloque motor para calentarlo más rápido, y la segunda bomba impulsa el calor de la culata hacia el calefactor del habitáculo. Una vez que la temperatura de la culata alcanza los 75 °C, la bomba principal se activa de manera intermitente para una mezcla gradual de refrigerante frío y caliente. En verano, el sistema se ajusta para enfriar eficazmente el motor y la caja de cambios, con la segunda bomba redirigiendo todo el refrigerante hacia el intercambiador de calor del aceite de la caja de cambios, ya que no se requiere calefacción en el habitáculo. La optimización del sistema garantiza un equilibrio entre rendimiento y protección en diferentes condiciones climáticas. (imagen 7).



*Imagen 37: Sistema VAG.
 Fuente Calleja 2015.*

17.5. Anexo 5: Supuestos para análisis teórico.

Supuestos realizados para el análisis teórico para simplificar el problema, basados en el libro transferencia de calor y masa de Cengel, 2011:

- El sistema se encuentra en estado estacionario, lo que implica que no hay cambios de estado en el sistema.
- El aire se considera un gas ideal con propiedades constantes.
- La presión en el sistema es de 1 atmósfera.
- La transferencia de calor es unidireccional, en una única dirección.

17.6. Anexo 6: Velocidad de aire promedios.

	velocidad actual (m/s)	10%	20%	30%	40%	50%	80%	100%
Velocidad promedio habitáculo	11,9	13,1	14,3	15,5	16,7	17,9	21,4	23,8
Velocidad promedio intercambiadores	5,95	6,5	7,1	7,7	8,3	8,9	10,7	11,9
Velocidad promedio superficies exteriores	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,8	2,0

Esta tabla fue basada en la medición de velocidades de flujo de aire en distintos lugares del motor. Estas se llevaron a cabo en las pruebas controladas y se realizó un promedio de todos los registros obtenidos. La tabla anterior muestra el incremento porcentual de estas velocidades de aire promediadas con el objetivo de evaluar la mejora en la disipación de calor.

17.7. Anexo 7: Proceso de mantención grúa AT880.

En esta etapa se procedió a poner en funcionamiento la máquina mediante la conexión de dos baterías de 12 Voltios (V) en serie, logrando así el voltaje requerido de 24 V. Una vez movilizada la máquina, se llevó a cabo una limpieza, abarcando cada rincón de la grúa para eliminar cualquier acumulación de polvo o suciedad, especialmente en los intercambiadores de calor, la turbina de aire y los conductos de aire.

Posteriormente, se efectuó cambio de aceite y filtros en el motor. Para el sistema de refrigeración, se realizó una verificación manual en busca de sonidos anómalos o vibraciones según conocimiento de los mecánicos en ACAR. Adicionalmente, se llevó a cabo una inspección visual de la turbina y los intercambiadores.

En el último tramo del proceso de mantenimiento, se acopló el sistema hidráulico a él toma de fuerza del motor, encargado de transmitir la potencia a las bombas hidráulicas, sin presentar inconvenientes. Se realizaron pruebas “vacío” o sin carga para verificar el correcto funcionamiento de los movimientos de la pluma de la grúa y los estabilizadores. Todo este

procedimiento se documenta visualmente en las imágenes 18 a 21 en el apartado correspondiente.