

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**DIAGNÓSTICO POR BAJO DESEMPEÑO DE CAMIÓN MINERO
CATERPILLAR 785D, COMPARADO CON UN 785C EN LA MINA
SHOUGANG, MARCONA, ICA**

**Trabajo de suficiencia profesional para obtener el título profesional de
INGENIERO MECÁNICO**

AUTOR:

José Miguel Ecurra Rodríguez

ASESOR:

Arturo Alfredo Amaru Chungue

Lima, Noviembre, 2020

Resumen

El presente trabajo de titulación analiza y brinda una propuesta de solución, a través de una base teórica, al siguiente problema: la minera Shougang Hierro Perú se encarga de la explotación y procesamiento de hierro desde sus yacimientos en el distrito de Marcona, Nazca. Uno de los subcontratistas, se encarga de perforación, voladura y movimiento (carguío y acarreo) de mineral y desmonte. Debido a la ampliación del proyecto, decidieron adquirir camiones CAT 785D para incrementar la ya existente flota de camiones mineros 785C (el modelo predecesor). Estos deberían tener los mismos resultados de performance, agregándole mayor sostenibilidad, al tener motores con menores emisiones contaminantes; sin embargo, a inicios del año en curso, la empresa reporta una baja velocidad y desperfectos técnicos que les hacen percibir una reducción de potencia. A consecuencia de esto, existe una diferencia marcada de desempeño que afecta hasta el día de hoy la producción, ocasionando posiblemente una disminución anual en las ventas de movimiento de materiales de USD 1.25 millones. A raíz del mencionado problema, en este documento, se desarrolla un comparativo técnico entre los dos modelos de camiones, analizando el sistema motor y de tren de fuerza. Además, se evalúa el lugar, condiciones y parámetros reales de la operación. Finalmente se indican algunas causas probables del mal funcionamiento y sus respectivas soluciones o pruebas para resolver la contrariedad, utilizando la Metodología de Diagnóstico (o Método de los 10 Pasos) de Caterpillar, ya que es eficiente para solucionar desperfectos técnicos y evitar mayor pérdida de recursos. Debido a que la evaluación en campo -por parte del *dealer* de la marca- aún no puede realizarse a causa a la coyuntura, el alcance de este documento llega hasta la propuesta de causas y soluciones respectivas en esta metodología. Se concluye que, gracias a datos enviados por el subcontratista y bibliografía de consulta del fabricante, una baja presión de refuerzo por posible falta de hermeticidad en la admisión y una falla en el sistema eléctrico y/o hidráulico del embrague de traba del convertidor de par, causarían el bajo desempeño de estos camiones.

Dedicatoria

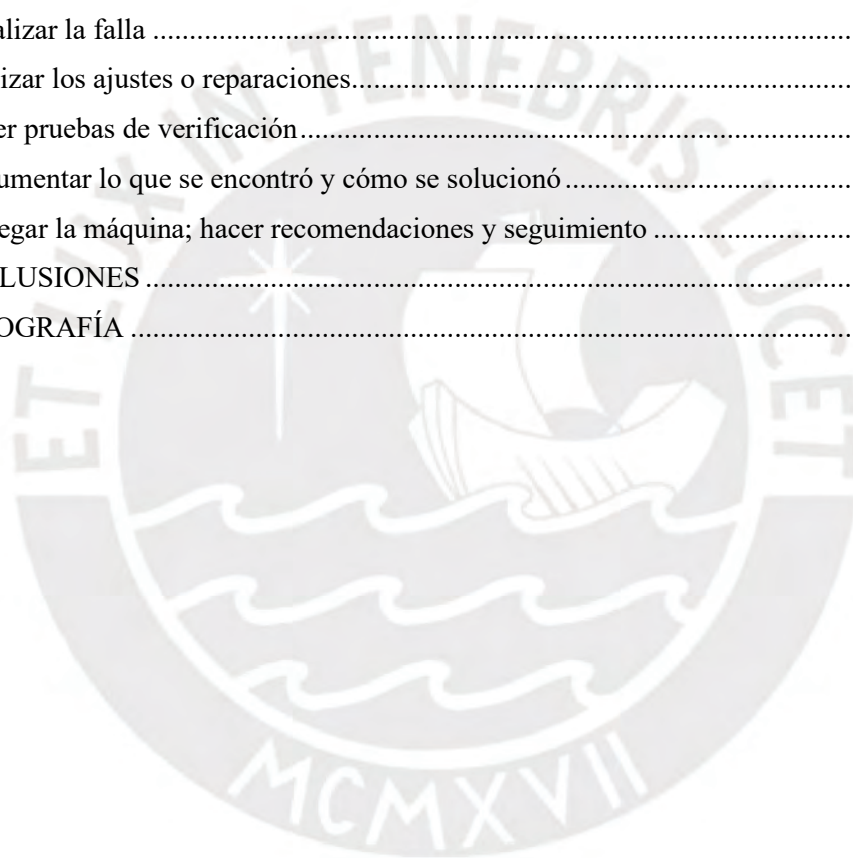
A mis padres, por su infinito apoyo en el transcurso de mi vida universitaria. Gracias por estar conmigo y apoyarme en los buenos, malos y difíciles momentos. Espero seguir siempre su ejemplo.



Tabla de Contenidos

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Introducción | 1 |
| 2. | Objetivos | 2 |
| 2.1 | Objetivo principal | 2 |
| 2.2 | Objetivos específicos | 2 |
| 3. | Estado del Arte..... | 3 |
| 3.1 | Camiones Mineros por Evaluar..... | 3 |
| 3.2 | Comparación de Componentes y Precios..... | 7 |
| 3.3 | Uso de la Metodología de Diagnóstico de Caterpillar | 8 |
| 3.4 | Localización y Características de la Operación Minera..... | 9 |
| 4. | Comparación y Análisis de Motores..... | 11 |
| 4.1 | Comparación de Performances de Dos Motores, 3512B y 3512C..... | 11 |
| 4.1.1 | Consumo específico de combustible (cec) y rendimiento efectivo (η_e) | 14 |
| 4.1.2 | Presión media efectiva (pme)..... | 15 |
| 4.1.3 | Fuerzas y torques en el cigüeñal | 15 |
| 4.2 | Comparación de Emisiones de Dos Motores, 3512B y 3512C..... | 18 |
| 4.2.1 | Especificaciones técnicas (TIER) | 18 |
| 4.2.2 | Emisiones en pruebas de banco | 18 |
| 5. | Análisis del Tren de Fuerza | 19 |
| 5.1 | Convertidor de Torque..... | 21 |
| 5.1.1 | Embrague de traba (<i>lockup clutch</i>) | 23 |
| 5.2 | Eje Central y Engranajes de Transferencia..... | 24 |
| 5.3 | Transmisión..... | 25 |
| 5.4 | Diferencial y Semi Ejes | 27 |
| 5.5 | Mandos Finales y Frenos | 28 |
| 6. | Análisis del Sistema de Control Electrónico..... | 29 |
| 7. | Comparación de la Estructura Principal y Cabina del Operador | 31 |
| 8. | Comparación de Datos Operacionales | 33 |
| 8.2 | Pesos y Tolvas..... | 34 |
| 8.2.1 | Política 10/10/20 de Caterpillar | 35 |
| 8.3 | Neumáticos | 35 |
| 8.4 | Curvas <i>Rimpull</i> | 36 |
| 8.5 | Rutas de la Operación | 37 |
| 8.6 | Parámetros y valores de la operación..... | 39 |
| 8.6.1 | Velocidades promedio..... | 39 |

| | |
|---|----|
| 8.6.2 Cargas promedio de camiones en la operación (<i>payload</i>)..... | 39 |
| 8.6.3 Consumo de combustible..... | 39 |
| 8.6.4 Otros datos de operación..... | 40 |
| 8.6.5 Afectación del bajo rendimiento en la producción: | 40 |
| 9. APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA DE BAJO DESEMPEÑO..... | 42 |
| 9.1 Reclamación del cliente | 42 |
| 9.2 Realizar una inspección visual..... | 43 |
| 9.3 Confirmación de la falla..... | 44 |
| 9.4 Determinar las causas más probables..... | 45 |
| 9.5 Realizar evaluación con instrumentos..... | 46 |
| 9.6 Localizar la falla | 48 |
| 9.7 Realizar los ajustes o reparaciones..... | 48 |
| 9.8 Hacer pruebas de verificación..... | 49 |
| 9.9 Documentar lo que se encontró y cómo se solucionó | 49 |
| 9.10 Entregar la máquina; hacer recomendaciones y seguimiento | 49 |
| 10. CONCLUSIONES | 50 |
| 11. BIBLIOGRAFÍA | 52 |



Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Flota de camiones mineros del subcontratista..... | 3 |
| Tabla 2 Comparación general de camiones 785C y 785D..... | 5 |
| Tabla 3 Comparación de principales dimensiones de camiones 785C y 785D..... | 6 |
| Tabla 4 Comparación de números de parte de algunos componentes de camiones 785C y 785D..... | 7 |
| Tabla 5 Comparación de precios de algunos componentes mayores de camiones 785C y 785D..... | 7 |
| Tabla 6 Parámetros geométricos de un motor de 785C y 785D..... | 11 |
| Tabla 7 Otros parámetros a plena carga de un motor de u 785C y un 785Dde u 785C y un 785D..... | 12 |
| Tabla 8 Otros parámetros de un motor 3512B y 3512C..... | 12 |
| Tabla 9 Estándar de emisiones para motores diésel no viales..... | 18 |
| Tabla 10 Resultados de emisiones contaminantes durante las pruebas de banco de los motores..... | 18 |
| Tabla 11 Paquetes de embrague y modos de operación de convertidor por marcha de la transmisión | 26 |
| Tabla 12 Variación de ECMs de camión 785C y 785D..... | 30 |
| Tabla 13 Parámetros de pesos de camiones 785C y 785D..... | 34 |
| Tabla 14 Payloads con tolvas originales y aligeradas para los camiones 785C y 785D, según la contratista..... | 34 |
| Tabla 15 Distribución de pesos y TKPH de neumáticos de la operación..... | 36 |
| Tabla 16 Distribución de materiales, canchas y distancias por palas..... | 38 |
| Tabla 17 Velocidades promedio por modelo de camión en la operación..... | 39 |
| Tabla 18 <i>Payloads</i> promedio por modelo de camión en la operación..... | 39 |
| Tabla 19 Consumo de combustible teórico, en función del grado de carga..... | 39 |
| Tabla 20 Consumo de combustible promedio en la operación, por modelo de camión..... | 40 |
| Tabla 21 Impacto en la producción por baja performance de camiones 785D..... | 40 |
| Tabla 22 Impacto en la eficiencia de combustible por baja performance de camiones 785D..... | 41 |
| Tabla 23 Comparación de resultados en prueba operacional de ambos modelos de camiones..... | 43 |
| Tabla 24 Causas y soluciones/verificaciones para el problema a..... | 45 |
| Tabla 25 Causas y soluciones/verificaciones para el problema b..... | 45 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Camión minero CATERPILLAR 785C descrito..... | 4 |
| Figura 2. Camión minero CATERPILLAR 785D descrito..... | 4 |
| Figura 3. Camión minero CATERPILLAR 785C o 785D (imagen referencial) | 6 |
| Figura 4. Diagrama de flujo de la Metodología de Diagnóstico | 9 |
| Figura 5. Operación minera de Shougang..... | 10 |
| Figura 6. Motor 3512B de un 785C (izquierda) y motor 3512C de un 785D (derecha)..... | 11 |
| Figura 7. Curvas Potencia vs. Velocidad. | 13 |
| Figura 8. Curvas Torque vs. Velocidad. | 13 |
| Figura 9. Curvas Consumo específico de combustible vs. Velocidad. | 14 |
| Figura 10. Esquema de fuerzas en el mecanismo pistón – biela – manivela del cigüeñal. | 16 |
| Figura 11. Relación de fuerzas sobre el pistón, durante la combustión, entre los motores 3512B y 3512C..... | 17 |
| Figura 12. Sistema de filtración continua del eje posterior del camión 785D | 19 |
| Figura 13. Sistema de filtración continua del eje posterior del camión 785D | 19 |
| Figura 14. Sistema de filtración del eje posterior del camión 785C | 20 |
| Figura 15. Esquema de tren de potencia mecánico de un OHT | 21 |
| Figura 16. Convertidor de torque de camión minero | 22 |
| Figura 17. Esquema de un convertidor de torque | 23 |
| Figura 18. Ubicación de válvula solenoide del embrague de traba..... | 24 |
| Figura 19. Esquema de eje central | 24 |
| Figura 20. Vista de corte de engranajes de transferencia..... | 25 |
| Figura 21. Transmisión Power Shift planetaria de camión minero..... | 26 |
| Figura 22. Esquema de vista de corte de la transmisión | 27 |
| Figura 23. Esquema de componentes del diferencial..... | 27 |
| Figura 24. Esquema de vista de corte de mando final..... | 28 |
| Figura 25. Control electrónico del camión minero | 30 |
| Figura 26. ECM del motor | 30 |
| Figura 27. Estructura o chasis del camión 785D..... | 31 |
| Figura 28. Vista frontal del camión minero | 32 |
| Figura 29. Ciclo de producción típico de camión minero | 33 |
| Figura 30. Pesos y payloads de camión 785D con tolva aligerada | 35 |
| Figura 31. Curvas rimpull de camiones 785C y 785D..... | 37 |
| Figura 32. Mapa de minas y botaderos en la operación de empresa contratista | 38 |
| Figura 33. Mapa de minas y botaderos en la operación de empresa contratista, de plan de minado | 43 |
| Figura 34. Ubicación del sensor de presión de refuerzo en motor 3512C | 47 |
| Figura 35. Ubicación de solenoide de activación de embrague de traba | 47 |
| Figura 36. Ubicación de taps para medir presiones relacionadas al embrague de traba | 48 |

1. Introducción

La tecnología y eficiencia de equipos de minería juegan un papel muy valioso en la empresa operadora de este rubro. No solo puede ocasionar grandes ganancias de dinero por su productividad (menor costo por material movido); sino también, pérdidas cuantiosas al estar estos averiados o presentar bajo desempeño. Esto hace que los fabricantes de equipos mineros inviertan varios recursos en el desarrollo de nuevos productos que puedan superar la competencia, ofreciéndole al cliente operador menores costos de operación. La minera Shougang Hierro Perú no es ajena esto; sin embargo, para la explotación de sus minas, subcontrata otras empresas que realicen el trabajo de perforación, voladura, carguío y acarreo de material, valorizándoles cada tonelada movida en espacio de tiempo.

En este documento se tratará de dar a conocer los puntos técnicos más relevantes de los activos de uno de estos subcontratistas: los camiones mineros 785C y 785D. Los 785D son una reciente adquisición de la empresa y se espera que tengan performances iguales o mejores a las de los 785C (su versión predecesora); no obstante, esto no está ocurriendo. Por tal motivo se realizará una descripción técnica de los puntos en común y distintos de estos dos modelos de camiones y brindar una noción al lector de la operación mencionada, con el fin de aplicar la Metodología de Diagnóstico de Caterpillar para poder llegar a una solución al problema.

2. Objetivos

2.1 Objetivo principal

- Desarrollar un análisis técnico sobre las especificaciones de camiones mineros 785C y 785D para lograr entender las diferencias más importantes y brindar propuestas de solución al pobre performance de los 785D en la mina Shougang.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar técnicamente los camiones mineros 785C y 785D, analizando las especificaciones de motor y tren de fuerza.
- Indicar y analizar los datos operacionales más importantes para ver cómo el bajo desempeño de los camiones 785D afecta a la producción, económicamente, inclusive.
- Evaluar y analizar las posibles causas del bajo desempeño de los dos camiones 785D en la operación de Marcona, utilizando la Metodología de Diagnóstico de Caterpillar.
- Plantear, a través de la Metodología de Diagnóstico de Caterpillar, los parámetros a medir, pruebas a realizar e indicar las soluciones posibles para resolver el problema cuando se haga la visita e inspección técnica en campo.

3. Estado del Arte

En esta sección se hará una breve descripción de la flota de equipos de la empresa, así como una comparación de especificaciones generales de los dos modelos de camiones: 785C y 785D. Finalmente, se describirá la localidad de la operación minera.

3.1 Camiones Mineros por Evaluar

Los camiones mineros (OHT) por evaluar y comparar son los pertenecientes a un subcontratista de operación (movimiento de tierras) de la minera Shougang Hierro. Estos son Caterpillar 785C (24 unidades) y 785D (2 unidades), teniendo estos últimos indicadores de baja performance. Los 785C se encuentran en proceso de realización de su primer *overhaul* (OH). Los camiones, sus números de serie y horómetros se muestran en la Tabla 1; así como las imágenes de referencia en las Figuras 1 y 2.

Tabla 1

Flota de camiones mineros del subcontratista

| Ítem | Código | Descripción | Modelo | Versión | Serie | Horómetro |
|------|-----------|---------------|--------|---------|----------|-----------|
| 1 | M56001001 | camión minero | 785C | 2013 | APX02218 | 26 765 |
| 2 | M56001002 | camión minero | 785C | 2013 | APX02305 | 27 564 |
| 3 | M56001003 | camión minero | 785C | 2013 | APX02309 | 27 490 |
| 4 | M56001004 | camión minero | 785C | 2013 | APX02310 | 27 119 |
| 5 | M56001005 | camión minero | 785C | 2013 | APX02311 | 27 722 |
| 6 | M56001006 | camión minero | 785C | 2013 | APX02312 | 27 926 |
| 7 | M56001007 | camión minero | 785C | 2013 | APX02313 | 25 311 |
| 8 | M56001008 | camión minero | 785C | 2013 | APX02314 | 27 072 |
| 9 | M56001009 | camión minero | 785C | 2013 | APX02329 | 26 936 |
| 10 | M56001010 | camión minero | 785C | 2013 | APX02327 | 25 762 |
| 11 | M56001011 | camión minero | 785C | 2013 | APX02328 | 26 064 |
| 12 | M56001012 | camión minero | 785C | 2013 | APX02330 | 25 639 |
| 13 | M56001013 | camión minero | 785C | 2013 | APX02331 | 24 848 |
| 14 | M56001014 | camión minero | 785C | 2013 | APX02332 | 25 907 |
| 15 | M56001015 | camión minero | 785C | 2013 | APX02333 | 23 904 |
| 16 | M56001016 | camión minero | 785C | 2013 | APX02346 | 25 680 |
| 17 | M56001017 | camión minero | 785C | 2013 | APX02347 | 25 285 |
| 18 | M56001018 | camión minero | 785C | 2013 | APX02349 | 22 830 |
| 19 | M56001019 | camión minero | 785C | 2013 | APX02356 | 25 960 |
| 20 | M56001020 | camión minero | 785C | 2013 | APX02357 | 24 993 |
| 21 | M56001021 | camión minero | 785C | 2006 | APX00851 | 40 698 |
| 22 | M56001022 | camión minero | 785C | 2006 | APX00951 | 37 656 |
| 23 | M56001023 | camión minero | 785C | 2006 | APX00952 | 37 632 |
| 24 | M56001024 | camión minero | 785C | 2007 | APX01149 | 36 888 |
| 25 | M56002001 | camión minero | 785D | 2014 | MSY00650 | 23 903 |
| 26 | M56002002 | camión minero | 785D | 2014 | MSY00654 | 23 587 |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data del cliente en febrero de 2020.



Figura 1. Camión minero CATERPILLAR 785C descrito.

Tomado de CATERPILLAR (2010) CAT 785C Specalog



Figura 2. Camión minero CATERPILLAR 785D descrito.

Tomado de CATERPILLAR (2010) CAT 785D Specalog

A continuación, se compararán las especificaciones generales de ambos modelos de camiones, en la Tabla 2.

Tabla 2

Comparación general de camiones 785C y 785D

| Característica\OHT | 785C | 785D |
|---|---------------------------------------|--|
| Motor | 3512B - EUI | 3512C - HD EUI |
| Potencia neta (kW/hp) @1 750 rpm* | 980/1 313 | 980/1 313 |
| Diámetro (mm) | 170 | 170 |
| Carrera (mm) | 190 | 215 |
| Desplazamiento (L) | 51,80 | 58,56 |
| Arreglo | V12 | V12 |
| Compensación de altitud hasta | 3 048 m.s.n.m. | 4 267 m.s.n.m. |
| Sobrealimentación (medio de enfriamiento) | Twin-turbo, aftercooler (SCAC - agua) | Quad-turbo, aftercooler (ATAAC - aire) |
| CEC (g/kW-h) | 211,3 | 210,4 |
| PME (kPa) | 1 583 | 1 267 |
| Payload (TM) | 134 | 133 |
| GVW (kg) | 249 480 | 249 476 |
| Velocidad máxima (km/h) Forward 1 | 12,1 | 12,1 |
| Velocidad máxima (km/h) Forward 2 | 16,3 | 16,3 |
| Velocidad máxima (km/h) Forward 3 | 22,2 | 22,2 |
| Velocidad máxima (km/h) Forward 4 | 29,9 | 29,9 |
| Velocidad máxima (km/h) Forward 5 | 40,6 | 40,6 |
| Velocidad máxima (km/h) Forward 6 | 54,8 | 54,8 |
| Velocidad máxima (km/h) Reverse | 11,0 | 11,0 |
| Transmisión | Power shift - 6 velocidades | Power shift - 6 velocidades |
| Convertidor de par | Con embrague de traba | Con embrague de traba |
| Neumáticos estándar | 33,00-R51 | 33,00-R51 |
| Consumo combustible (gal/h) en baja carga (20-30%) | 14,2 - 21,3 | 14,3 - 21,5 |
| Consumo combustible (gal/h) en media carga (30-40%) | 21,3 - 28,4 | 21,5 - 28,7 |
| Consumo combustible (gal/h) en alta carga (40-50%) | 28,4 - 35,5 | 28,7 - 35,8 |
| Capacidad tolva estándar (m ³) | 78 | 78 |
| Tiempo de elevación (raise) (s) | 15,2 | 15,2 |
| Tiempo de bajada (lower) (s) | 15,9 | 15,9 |
| Ángulo de giro (°) | 36 | 36 |
| Capacidad del tanque (gal) | 500 | 500 |
| Precio aproximado (USD MM) | 2,6 | 2,7 |

Los datos de motores se cumplen en las siguientes condiciones:

- Combustible diésel: 35 grados API a 16°C (850 kg/m³) y PCI de 42,78 MJ/kg
- Condiciones ambientales. 25°C y 1 atm

Nota. Tabla elaborada a partir de la data CATERPILLAR (2010) CAT 785C y785D Specalogs

Además, se muestran las dimensiones principales de ambos camiones, en la Figura 3 y en la Tabla 3, resaltando las principales y sus diferencias entre modelos:

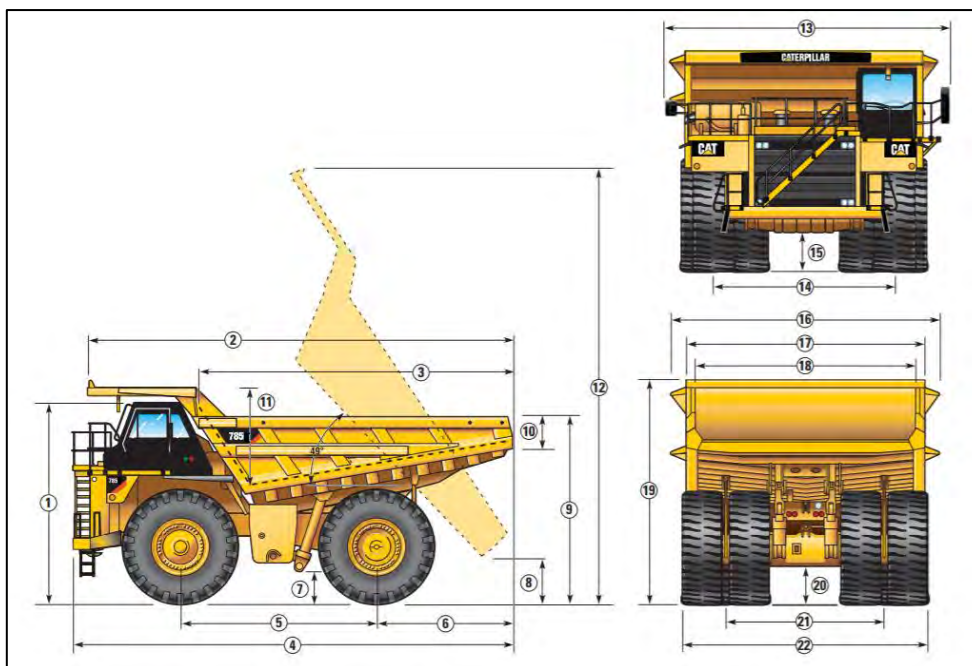


Figura 3. Camión minero CATERPILLAR 785C o 785D (imagen referencial)

Tomado de CATERPILLAR (2010) CAT 785D Specalog

Tabla 3

Principales dimensiones de camión minero 785D

Comparación de principales dimensiones de camiones 785C y 785D

| Ítem | Dimensión 785C (mm) | Dimensión 785D (mm) | Diferencia 785D-785C (mm) |
|------|---------------------|---------------------|---------------------------|
| (1) | 5 122 | 5 122 | 0 |
| (2) | 10 615 | 11 550 | 935 |
| (3) | 7 652 | 7 652 | 0 |
| (4) | 11 024 | 11 548 | 524 |
| (5) | 5 182 | 5 180 | -2 |
| (6) | 3 410 | 3 410 | 0 |
| (7) | 987 | 987 | 0 |
| (8) | 1 284 | 1 200 | -84 |
| (9) | 4 968 | 4 968 | 0 |
| (10) | 906 | 906 | 0 |
| (11) | 2 132 | 2 132 | 0 |
| (12) | 11 207 | 11 809 | 602 |
| (13) | 6 640 | 7 061 | 421 |
| (14) | 4 850 | 4 850 | 0 |
| (15) | 1 057 | 1 057 | 0 |
| (16) | 6 200 | 6 747 | 547 |
| (17) | 5 890 | 5 894 | 4 |
| (18) | 5 510 | 5 510 | 0 |
| (19) | 5 769 | 5 679 | -90 |
| (20) | 1 080 | 1 080 | 0 |
| (21) | 4 285 | 4 285 | 0 |
| (22) | 6 274 | 6 277 | 3 |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data CATERPILLAR (2010) CAT 785D Specalog

3.2 Comparación de Componentes y Precios

En seguida, se muestra la Tabla 4 en la que se realiza una comparación de algunos componentes importantes de ambos camiones, por número de parte. Se ve que, en muchos casos, estos no han variado.

Tabla 4

Comparación de números de parte de algunos componentes de camiones 785C y 785D

| Ítem | Componente | Nº parte 785C | Nº parte 785D | ¿Varió? |
|------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 1. | <i>Conjunto motor</i> | <i>175-5285</i> | <i>278-0555</i> | <i>SÍ</i> |
| 1.1 | turbocompresor | 305-2681 | 316-6332 | SÍ |
| 1.2 | inyector | 376-0510 | 376-0514 | SÍ |
| 1.3 | bomba de transferencia | 377-5900 | 377-5900 | NO |
| 1.4 | camisas cilindro | 465-1386 | 211-7826 | SÍ |
| 1.5 | pistón y biela | 223-6363 | 249-5671 | SÍ |
| 1.6 | cigüeñal | 8N-7103 | 161-6926 | SÍ |
| 1.7 | árbol de levas | 382-3100 | 382-3100 | NO |
| 1.8 | ECM | 488-9091 | 488-9091 | NO |
| 2. | <i>Tren de fuerza</i> | <i>370-0007</i> | <i>285-0763</i> | <i>SÍ</i> |
| 2.1 | convertidor de torque | 117-3357 | 117-3357 | NO |
| 2.2 | eje cardán | 8X-0498 | 8X-0498 | NO |
| 2.3 | engranajes de transferencia | 6Y-5643 | 6Y-5643 | NO |
| 2.4 | transmisión | 3T-0034 | 3T-0034 | NO |
| 2.5 | grupo diferencial | 8W-9544 | 8W-9544 | NO |
| 2.6 | mandos finales y frenos | 309-9208 | 309-9208 | NO |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data de CATERPILLAR SIS 2.0

Ahora se mostrarán los precios de los componentes principales de los camiones y su comparación.

Esto es importante para los OH, en caso se opten por componentes nuevos.

Tabla 5

Comparación de precios de algunos componentes mayores de camiones 785C y 785D

| Ítem | Componente | Precio unitario 785C (USD) | Precio unitario 785D (USD) |
|-----------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | Motor | 533,000 | 533,000 |
| 2 | Convertidor de par | 86,000 | 86,000 |
| 3 | Transmisión | 256,000 | 256,000 |
| 4 | Diferencial | 90,000 | 89,000 |
| 5 | Mandos finales (02) | 614,000 | 614,000 |
| 6 | Ruedas posteriores (2) | 257,000 | 257,000 |
| 7 | Cilindro de levante (2) | 125,000 | 125,000 |
| 8 | Cilindro de dirección (2) | 16,000 | 16,000 |
| 9 | Suspensión delantera (2) | 224,000 | 224,000 |
| 10 | Suspensión posterior (2) | 102,000 | 102,000 |

Nota. Tabla elaborada a partir de los precios establecidos por el área comercial del *dealer* de Caterpillar en Perú

Cabe indicar que el único componente que ha variado, de estos diez, es el motor; sin embargo, mantiene el precio de su predecesor, como se ve en la Tabla 5.

3.3 Uso de la Metodología de Diagnóstico de Caterpillar

También conocida como Método de los 10 Pasos, es una herramienta muy útil para resolver problemas técnicos de equipos, de diversa índole. Abarca los siguientes puntos:

1. Reclamación del cliente

Recibir el modelo, serie, horómetro del equipo; ubicación y síntomas.

2. Realizar una inspección visual

Conversar con el operador sobre las condiciones del problema y realizar una inspección visual general: niveles de fluidos, presencia de fugas, componentes fisurados, etc.

3. Confirmación de la falla

Realizar las pruebas en las condiciones que se presenta la falla (operación) para validar la misma. En algunos casos puede ser un desconocimiento del operador o una mala configuración.

4. Determinar las causas más probables

Hacer una lista de las causas más probables en orden de más fácil de probar y más factible a más difícil de probar y menos factible.

5. Realizar evaluación con instrumentos

Utilizar softwares de diagnóstico como el ET (*Electronic Technician*), como un *datalogger* (registro de parámetros durante la operación) o informe de estado de producto; VIMS (*Virtual Information Management System*) para conocer otros parámetros. Además de manómetros, multímetro, termómetros, etc. Deben registrarse los valores

6. Localizar la falla

Se interpretan los resultados del punto 5. Y se comparan con las especificaciones, a fin de hallar el desperfecto. Siempre basándose en manuales y en información brindada por la web técnica del fabricante, como SIS (*Service Information System*) o TMI (*Technical Marketing Information*).

7. Realizar los ajustes o reparaciones

Seguir los procedimientos brindados en las fuentes de información mencionadas para realizar los ajustes necesarios o reparar/reemplazar componentes.

8. Hacer pruebas de verificación

Realizar las pruebas de componentes, sistemas y equipo para cerciorarse que todo esté en orden. En caso de no estarlo, regresar al punto 4.

9. Documentar lo que se encontró y cómo se solucionó

Debe documentarse el problema, las revisiones/inspecciones y la solución de este; así como los repuestos utilizados y las pruebas de verificación hechas.

10. Entregar la máquina; hacer recomendaciones y seguimiento

Entregar el equipo reparado y probado al cliente. Instruirlos sobre la falla y operación, de ser necesario. Monitorear el estado del equipo en los días siguientes, vía telefónica/electrónica o presencial.

A continuación, se muestra, en la Figura 4, un diagrama de flujo del método descrito:

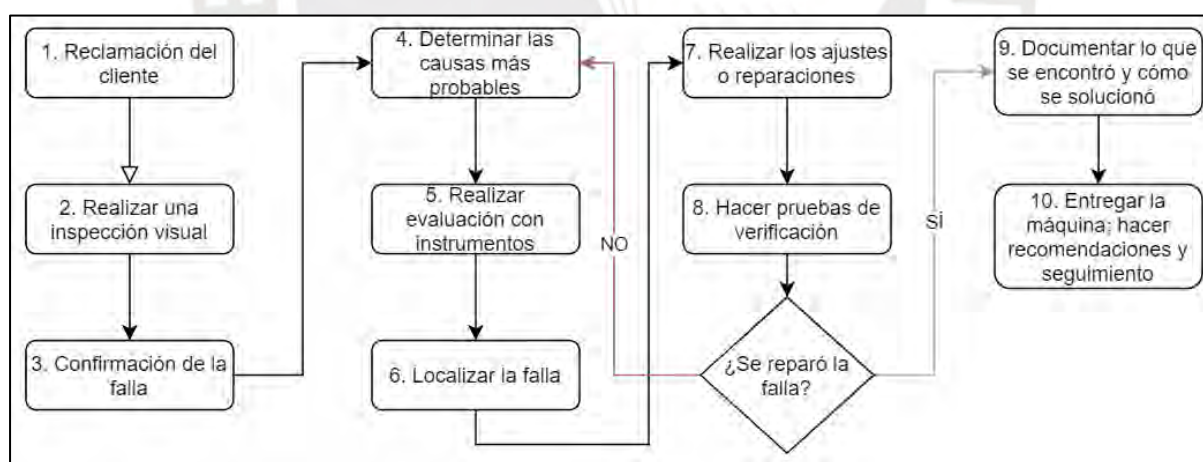


Figura 4. Diagrama de flujo de la Metodología de Diagnóstico

3.4 Localización y Características de la Operación Minera

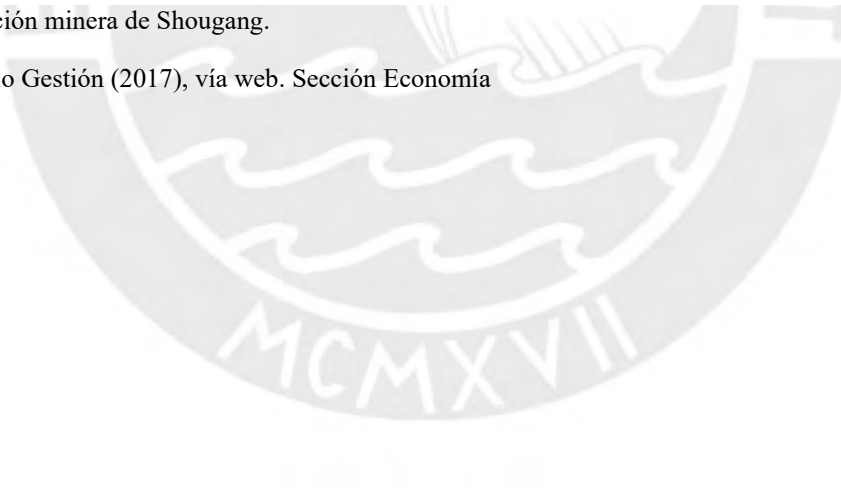
La mina de hierro ubicada en Marcona, Nazca, Ica es una zona de 150 km² de extensión. Aquí se realizan trabajos de exploración y explotación a tajo abierto (ver Figura 5). Los camiones se encargan de transportar el mineral hasta las chancadoras, y/o el desmante a los botaderos, sumando un total de casi 50 Mm³ por año. Los siguientes son datos de la geografía y clima del lugar:

- Altitud: 800 m.s.n.m.
- Presión atmosférica aproximada: 0,9 atm
- Clima seco y ventoso, por lo general
- Temperaturas varían generalmente entre 15 y 27°C, en promedio.



Figura 5. Operación minera de Shougang.

Tomado de Diario Gestión (2017), vía web. Sección Economía



4. Comparación y Análisis de Motores

4.1 Comparación de Performances de Dos Motores, 3512B y 3512C

A continuación, se indicarán y calcularán los parámetros principales del motor 3512B y 3512C (ver Figura 6) de un camión 785C y un 785D de la flota (APX02218 y MSY00650, respectivamente) y se muestran en las Tablas 6 y 7. Estos datos se obtuvieron en base a la ficha técnica (Tabla 6) y a la data de performance de las pruebas en banco (Tabla 7) del motor de uno de los camiones realizada por el productor original del equipo (OEM) antes de ser instalado en el camión correspondiente:

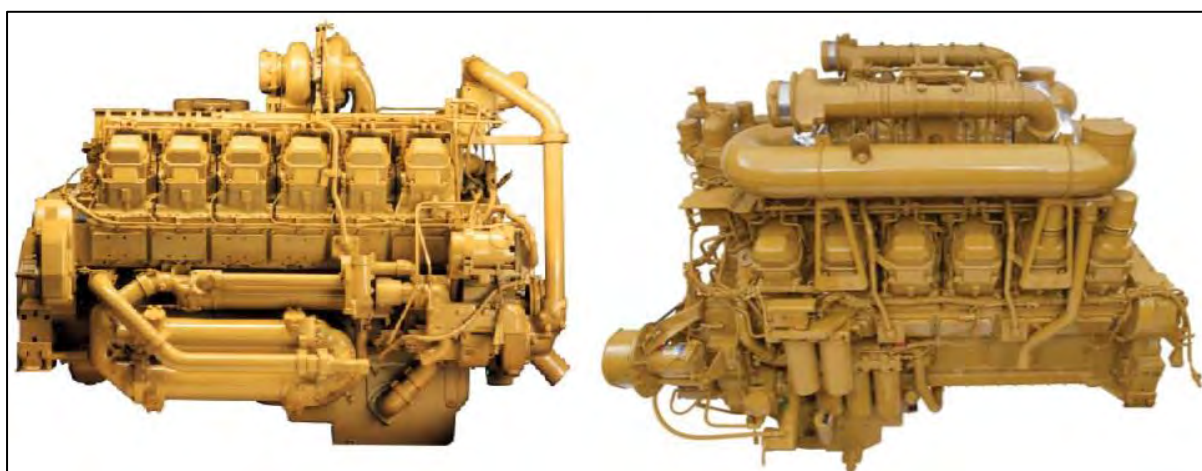


Figura 6. Motor 3512B de un 785C (izquierda) y motor 3512C de un 785D (derecha)

Tomado de CATERPILLAR (2010) CAT 785C Specalog y CATERPILLAR (2010) CAT 785D Specalog

Tabla 6 Parámetros geométricos de un motor de 785C y 785D

Parámetros geométricos de un motor de 785C y 785D

| Descripción parámetro | Símbolo | 785C | 785D | Unidad | Obtención |
|---------------------------|----------|---------|---------|-----------------|-----------|
| Diámetro del pistón | D | 17,00 | 17,00 | cm | dato |
| Carrera del pistón | S | 19,00 | 21,50 | cm | dato |
| Relación carrera/diámetro | S/D | 1,12 | 1,26 | - | cálculo |
| Área del pistón | A_p | 226,98 | 226,98 | cm ² | cálculo |
| Cilindrada unitaria | V_d | 4 313 | 4 880 | cm ³ | cálculo |
| Número de cilindros (60°) | z | 12,00 | 12,00 | und | dato |
| Cilindrada total | V_T | 51 751 | 58 561 | cm ³ | cálculo |
| Volumen muerto | V_{cc} | 331,74 | 356,21 | cm ³ | cálculo |
| Relación de compresión | r_c | 14,00:1 | 14,70:1 | - | dato |
| Número de ciclos/vuelta | i | 0,50 | 0,50 | - | dato |
| Longitud de biela | L | 38,00 | 39,25 | cm | dato |
| Manivela de cigüeñal | r | 9,50 | 10,75 | cm | cálculo |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data de CATERPILLAR (2010) CAT 785C y 785D Specalogs

Se puede apreciar, por la relación carrera/diámetro, que son motores alargados (más el 3512C), comunes en este tipo de motores (valores entre 1,1 y 1,2). Otros parámetros encontrados a plena carga, con las velocidades de potencia máxima (nominal), a menos que se indique otra, son los siguientes:

Tabla 7

Otros parámetros a plena carga de un motor de u 785C y un 785D

| Descripción parámetro | Símbolo | 785C | 785D | Unidad | Obtención |
|--------------------------------|----------|--------|--------|-------------------|-----------|
| Velocidad de motor | n | 1 750 | 1 750 | rpm | dato |
| Potencia al freno | P | 1 081 | 1 081 | kW | dato |
| Torque | Te | 5 899 | 5 900 | N.m | dato |
| Torque máximo (@1 300 rpm) | Te, máx | 7 037 | 7 039 | N.m | dato |
| Incremento de torque | - | 19,3% | 19,3% | - | cálculo |
| Caudal de combustible | Qc | 268,10 | 271,80 | L/h | dato |
| Densidad de combustible diésel | rho | 830 | 830 | kg/m ³ | dato |
| Flujo másico de combustible | mc | 3,71 | 3,76 | kg/min | cálculo |
| Flujo masico de aire | ma | 129,15 | 134,62 | kg/min | dato |
| Dosado absoluto | F | 0,03 | 0,03 | - | cálculo |
| Dosado estequiométrico | Fe | 0,0685 | 0,0685 | - | dato |
| Dosado relativo | Fr | 0,42 | 0,41 | - | cálculo |
| Presión media efectiva máxima | pme, máx | 17,09 | 15,10 | bar | cálculo |
| Rendimiento efectivo | ηe | 42,4% | 42,4% | - | cálculo |
| Elasticidad (<i>Ep.En</i>) | E | 8,76 | 8,77 | - | cálculo |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data CAT TMI (2020) motores 3512B del equipo APX02218 y 3512C del MSY00650.

Así mismo, se tienen las siguientes curvas características de un motor 3512B (verde) y otro 3512C (rojo) de la flota en cuestión; las figuras se muestran una seguida de otra (ver Figuras 7; 8 y 9) graficadas a partir de la data encontrada (ver Tabla 8), también con motor a plena carga. Obsérvese que no muestra el rango de velocidades completo; sino, solo un fragmento:

Tabla 8

Otros parámetros de un motor 3512B y 3512C

| Punto | Velocidad (n) [rpm] | Potencia (P) 785C [kW] | Potencia (P) 785D [kW] | Torque (T) 785C [N.m] | Torque (T) 785D [N.m] | Consumo específico de combustible (cec) 785C [g/kW.h] | Consumo específico de combustible (cec) 785D [g/kW.h] | ηe 785C | ηe 785D |
|-------|------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---|---|---------|---------|
| 1 | 1200 | 868 | 870 | 6907 | 6910 | 203.4 | 209.5 | 41.2% | 40.0% |
| 2 | 1300 | 958 | 958 | 7037 | 7039 | 201.2 | 208.4 | 41.6% | 40.2% |
| 3 | 1400 | 1020 | 1020 | 6957 | 6957 | 199.8 | 208.1 | 41.9% | 40.2% |
| 4 | 1500 | 1059 | 1059 | 6742 | 6744 | 200.3 | 207.1 | 41.8% | 40.4% |
| 5 | 1600 | 1080 | 1080 | 6446 | 6443 | 202.3 | 206.5 | 41.4% | 40.5% |
| 6 | 1700 | 1085 | 1085 | 6095 | 6095 | 206.2 | 208.5 | 40.6% | 40.2% |
| 7 | 1750 | 1081 | 1081 | 5899 | 5900 | 208.1 | 210.9 | 40.2% | 39.7% |
| 8 | 1850 | 900 | 900 | 4646 | 4644 | 223.2 | 222.6 | 37.5% | 37.6% |
| 9 | 1937 | 403 | 403 | 1987 | 1988 | 243.8 | 271.1 | 34.3% | 30.9% |

Nota. Tomado de CAT TMI (2020) motores 3512B del equipo APX02218 y 3512C del MSY00650.

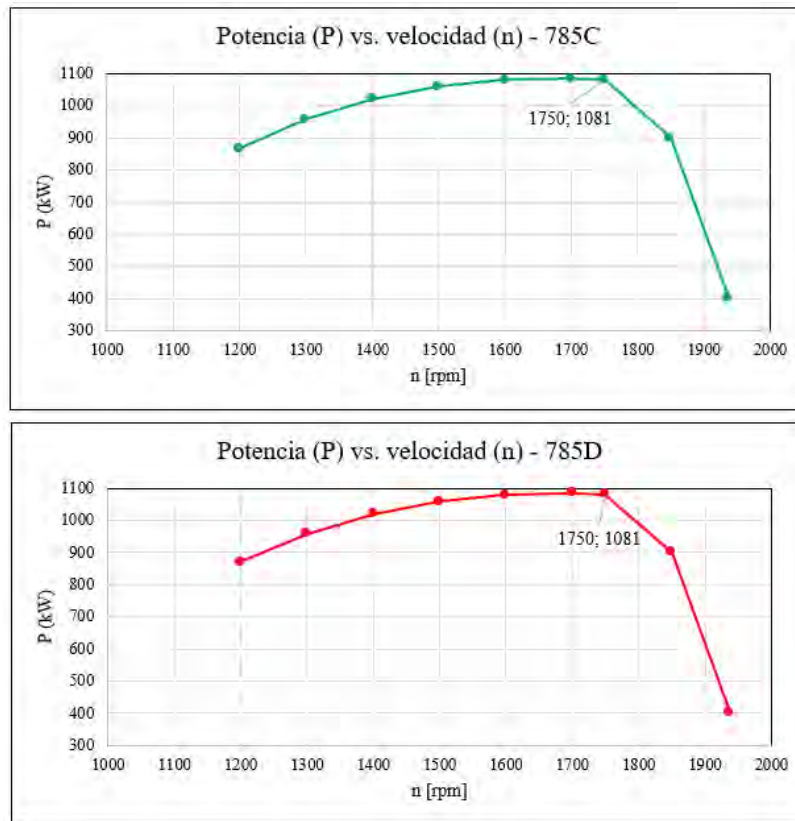


Figura 7. Curvas Potencia vs. Velocidad.

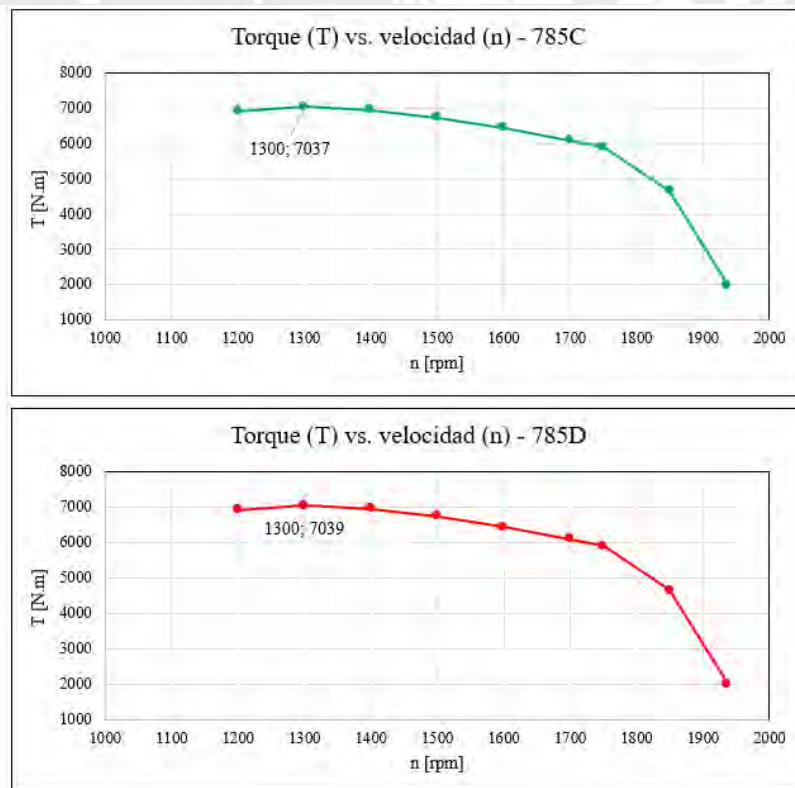


Figura 8. Curvas Torque vs. Velocidad.

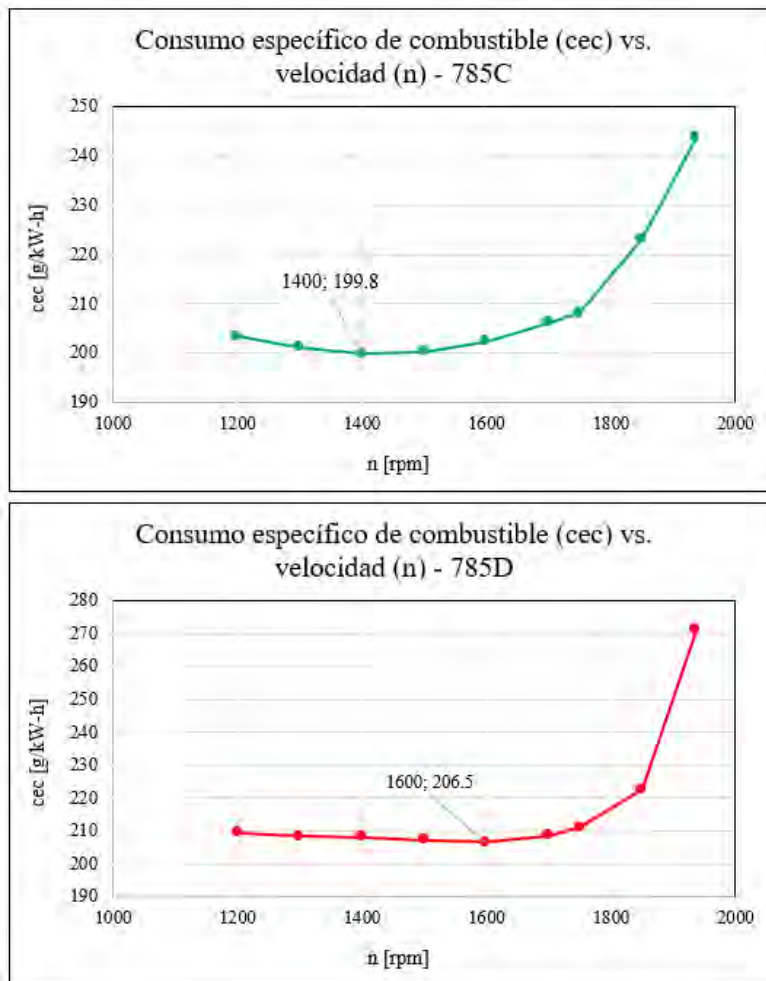


Figura 9. Curvas Consumo específico de combustible vs. Velocidad.

4.1.1 Consumo específico de combustible (cec) y rendimiento efectivo (η_e)

Como se aprecia en la última gráfica y según los datos, los cec_{min} (199,80 y 206,5 g/kW-h) para el 785C y 785D, respectivamente, se dan a 1 400 y 1 600 rpm, respectivamente. El motor del 785C tiene menor cec_{min} y es menor a las revoluciones de torque efectivo. A estas velocidades se calculará el mayor rendimiento efectivo (η_e) de cada uno (J. B. Heywood, 1988):

$$\eta_{e\ 785C} = \frac{1}{cec \times PCI_{diésel}}$$

$$\eta_{e\ 785C} = 41,90\%$$

$$\eta_{e\ 785D} = \frac{1}{cec \times PCI_{diésel}}$$

$$\eta_{e\ 785D} = 40,50\%$$

Se aprecia que las curvas son muy similares, solo se encuentran algunas variaciones en las de *cec*, esto conlleva a que tengan distintos rendimientos efectivos, siendo, en este aspecto, el 785C mejor que 785D. Es importante tener en cuenta que en la prueba de banco (dinamómetro), no se consideran las pérdidas de potencia por algunos auxiliares o periféricos, tales como: ventilador, compresor de aire acondicionado, alternador, silenciadores, etc. Valores típicos de este parámetro para MEC ID 4T de vehículos pesados, sobrealimentados, rondan cerca a los 190 g/kW-h.

4.1.2 Presión media efectiva (*pme*)

En cuanto a la presión media efectiva (*pme*), la cual es un parámetro normalizado útil para comparar motores distintos, se define como la presión promedio a la cual está sometida el pistón durante la expansión, lo que posteriormente genera el torque en el motor; además nos da un indicio de qué tan eficiente es la generación de torque de un motor basándonos en su desplazamiento. Se calcula de la siguiente forma (J. B. Heywood, 1988):

$$pme = \frac{4\pi \times Te}{Vd}$$

Se vio, en la Tabla 7, que la $pme_{MÁX}$ calculada para el motor de un 785C: 17,09 bar y, del motor de un 785D: 15,10 bar. Estos valores coinciden con aquellos indicados en la prueba de banco: 17,09 y 15,11 bar, respectivamente. Se ve que el nuevo motor redujo su $pme_{MÁX}$ en un 12%. Valores típicos de este parámetro para MEC ID 4T de vehículos pesados, sobrealimentados, rondan cerca a los 23 bar.

4.1.3 Fuerzas y torques en el cigüeñal

Para comparar la variación de las fuerzas entre ambos motores, debido al incremento en la carrera y desplazamiento del motor 3512C (correspondiente al camión 785D), se usará en el siguiente esquema de elaboración propia (Figura 10) y los datos de carreras y longitudes de bielas:

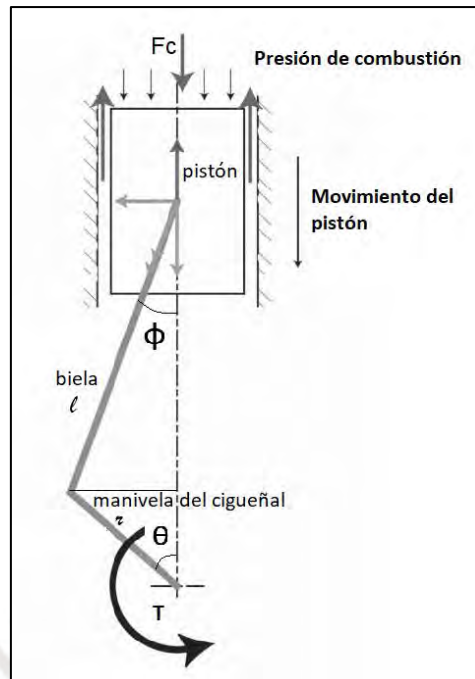


Figura 10. Esquema de fuerzas en el mecanismo pistón – biela – manivela del cigüeñal.

Se ve que la fuerza producto de la combustión (F_c) equivale al área del pistón por la presión de combustión en una determinada posición de la manivela del cigüeñal (ángulo θ) (R. Norton, 2009):

$$F_c = A_p \times p_c$$

El torque por combustión (T_c), puede obtenerse mediante la siguiente expresión en función del ángulo de posición de la manivela del cigüeñal (θ), de la longitud de biela entre centros (l), del radio de giro de la manivela (r) y la fuerza producida por la combustión (F_c) (R. Norton, 2009):

$$T_c = F_c \cdot r \cdot \sin \theta \cdot \left(1 + \frac{r}{l} \cdot \cos \theta\right)$$

Para efectos prácticos y comparativos, y asumiendo que ambos motores producen el mismo torque (T_c) en la misma posición de giro del cigüeñal (θ), se establece la relación de fuerzas sobre el pistón (F_c) entre los motores 3512B (mayores) y 3512C (menores) desde el PMS (punto muerto superior) al PMI (punto muerto inferior):

Acomodando la ecuación previa:

$$F_c = \frac{T_c}{r \cdot \sin \theta \cdot \left(1 + \frac{r}{l} \cdot \cos \theta\right)}$$

Esta ecuación es válida por motor. Para calcular la relación de estas fuerzas, se dividirá esta ecuación sobre la misma, pero reemplazando los valores de cada motor:

$$\frac{F_{C_{3512B}}}{F_{C_{3512C}}} = \frac{\frac{T_c}{r_{3512B} \cdot \sin \theta \cdot \left(1 + \frac{r_{3512B}}{l_{3512B}} \cdot \cos \theta\right)}}{\frac{T_c}{r_{3512C} \cdot \sin \theta \cdot \left(1 + \frac{r_{3512C}}{l_{3512C}} \cdot \cos \theta\right)}}$$

Eliminando T_c y $\sin \theta$ (para un mismo ángulo de giro en ambos motores) y acomodando:

$$\frac{F_{C_{3512B}}}{F_{C_{3512C}}} = \frac{r_{3512C} \cdot l_{3512B} \cdot (l_{3512C} + r_{3512C} \cdot \cos \theta)}{r_{3512B} \cdot l_{3512C} \cdot (l_{3512B} + r_{3512B} \cdot \cos \theta)}$$

Reemplazando los valores de la Tabla 6 en la ecuación anterior:

$$\frac{F_{C_{3512B}}}{F_{C_{3512C}}} = 1,0955 \left(\frac{39,25 + 10,75 \cdot \cos \theta}{38 + 9,5 \cdot \cos \theta} \right)$$

Se ve esta relación en la siguiente Figura 11:

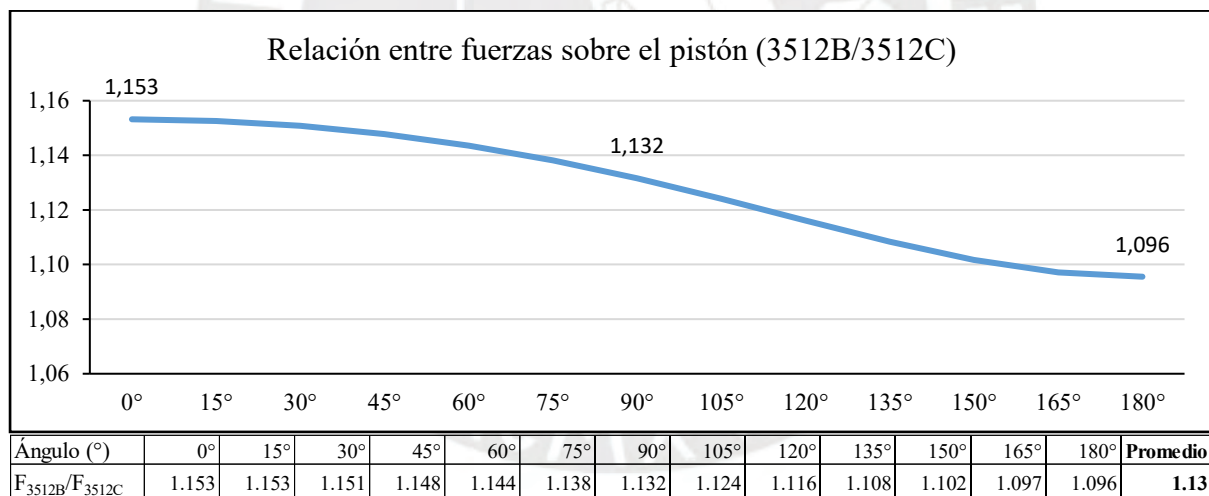


Figura 11. Relación de fuerzas sobre el pistón, durante la combustión, entre los motores 3512B y 3512C

Se ve que el promedio se aproxima a la relación de presiones medias efectivas (pme) entre ambos motores ($17,09 \text{ bar} \div 15,10 \text{ bar} = 1,13$). Como ambos motores presentan cilindros con áreas idénticas, la relación de fuerzas de combustión es igual a la relación de presiones de combustión.

4.2 Comparación de Emisiones de Dos Motores, 3512B y 3512C

Debido a que el motor 3512C (de los 785D) indica una mejora en cuanto a las emisiones, se realizará también un comparativo tomando datos de la prueba de banco. El motor 3512C tiene distintos inyectores (véase Tabla 4) en los cuales se varió la configuración de la punta y el ángulo de rocío de combustible: Pasó de tener 8 orificios x 80° a 7 orificios x 69,5°.

4.2.1 Especificaciones técnicas (TIER)

Para equipos no viales, la US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU, por sus siglas en inglés), establece los siguientes límites en cuanto a emisiones para motores de más de 900 kW (como los 3512B y 3512C) en cuanto a Tier 1 y Tier 2 (ver Tabla 9).

Tabla 9

Estándar de emisiones para motores diésel no viales; valores en g/kW-h (g/hp-h)

| Potencia motor | Tier | Año | CO | HC | NMHC+NOx | NOx | PM |
|--------------------------|--------|------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| kW > 900 (hp > 1 207) | Tier 1 | 2000 | 11,4 (8,5) | 1,3 (1,0) | - | 9,2 (6,9) | 0,54 (0,4) |
| | Tier 2 | 2006 | 3,5 (2,6) | - | 6,4 (4,8) | - | 0,2 (0,15) |

Nota. Tomado de “Nonroad Compression-Ignition Engines: Exhaust Emission Standards”, por Environmental Protection Agency (Estados Unidos de América), 2016.

4.2.2 Emisiones en pruebas de banco

Como muestra, en la siguiente Tabla 10, se detallan los valores de algunos contaminantes a diferentes grados de carga, pero todos a velocidad nominal (1 750 rpm).

Tabla 10

Resultados de emisiones contaminantes durante las pruebas de banco de los motores

| Modelo Motor | Potencia (kW) | 1 081 | 811 | 540 | 270 | 108 |
|---------------------------|--------------------------|-------|------|------|------|-------|
| | Grado de carga (%) | 100 | 75 | 50 | 25 | 10 |
| 785C 3512B (Tier 1) | NO _x (g/hp-h) | 8,07 | 5,45 | 5,66 | 8,71 | 16,87 |
| | CO (g/hp-h) | 0,40 | 0,68 | 1,05 | 1,93 | 6,18 |
| | HC (g/hp-h) | 0,31 | 0,39 | 0,47 | 0,74 | 2,29 |
| | PM (g/hp-h) | - | - | - | - | - |
| 785D 3512C (Tier 2) | NO _x (g/hp-h) | 5,17 | 3,73 | 3,23 | 4,64 | 8,57 |
| | CO (g/hp-h) | 0,45 | 0,50 | 0,78 | 1,87 | 6,22 |
| | HC (g/hp-h) | 0,31 | 0,39 | 0,49 | 0,73 | 1,98 |
| | PM (g/hp-h) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Nota. Tomado de CAT TMI (2020) motores 3512B del equipo APX02218 y 3512C del MSY00650.

5. Análisis del Tren de Fuerza

Como se pudo ver en el Estado del Arte, el tren de fuerza prácticamente no ha variado. La única mejora se encuentra en la filtración continua del eje posterior, con el que garantizan un aumento de 15% de la vida del componente, ya que se circula el aceite a través de un filtro (color verde en la Figura 12) por un sistema de bombeo continuo para mantener una limpieza ISO 18/15.

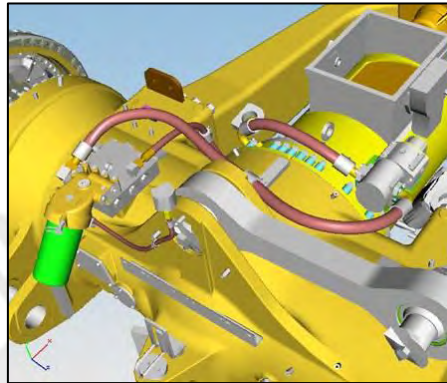


Figura 12. Sistema de filtración continua del eje posterior del camión 785D

Tomado de Caterpillar: 785D NPI

En la Figura 13 se aprecia el accionamiento del sistema. Una bomba de engranajes (1) es accionada por un motor hidráulico de desplazamiento fijo (2), el cual, a su vez, es accionado por la bomba del sistema de dirección. El aceite bombeado es filtrado y luego distribuido hacia los rodamientos del diferencial y mandos finales. Este sistema es controlado por el ECM del sistema de frenos. A diferencia del sistema de filtración del camión 785C, este no requiere que el camión esté en movimiento.

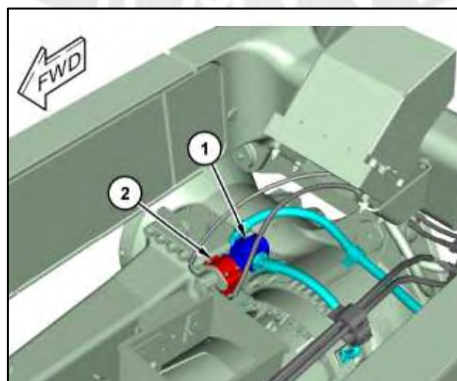


Figura 13. Sistema de filtración continua del eje posterior del camión 785D

Tomado de Caterpillar SIS 2.0: 785D - Systems Operation

En el caso del camión 785C, como se mencionó, el bombeo de aceite depende del movimiento de la máquina, ya que la bomba es accionada por el movimiento de los engranajes dentro del diferencial (ver Figura 14). El sistema, igualmente, lubrica principalmente los rodamientos del diferencial y mandos finales, como sistema hidráulico independiente. La bomba de engranajes (3) bombea aceite del fondo del alojamiento (*housing*) de a través del elemento de succión (2) para luego ser filtrado y distribuido a los rodamientos mencionados.

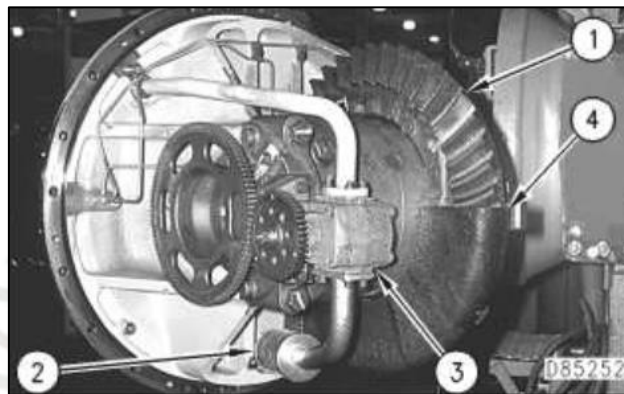


Figura 14. Sistema de filtración del eje posterior del camión 785C

Tomado de Caterpillar SIS 2.0: 785C - Systems Operation

En ambos casos, el tren de potencia es mecánico y tiene la misma configuración (ver Figura 15): La volante del motor (1) se conecta con el convertidor de torque (2) y este aumenta el par (generalmente) para luego transferirlo al eje central (3). Luego del eje central, hay una reducción de nivel a través de un par de engranajes -llamados de transferencia- (4) para el eje de entrada de la transmisión (5). La salida de la transmisión se conecta con el diferencial (6) a través de un piñón de ataque y una corona. Del diferencial se transfiere la potencia a los dos mandos finales (7) y, de estos, a las ruedas y neumáticos del camión.

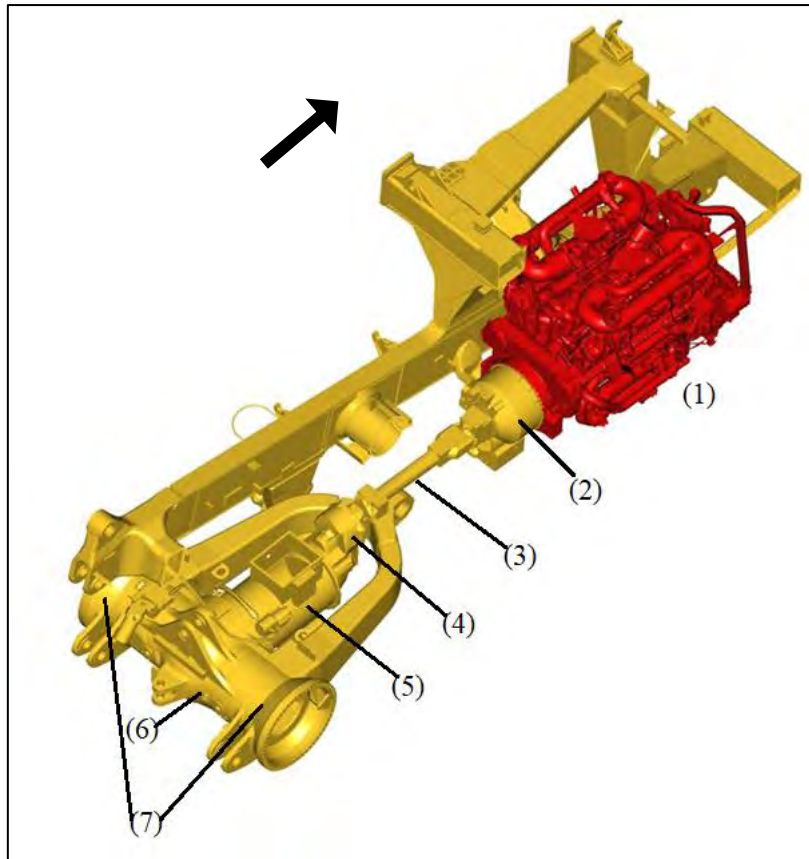


Figura 15. Esquema de tren de potencia mecánico de un OHT

Tomado de Caterpillar: 785D NPI

5.1 Convertidor de Torque

La volante del motor es quien se encarga de transmitir la potencia del motor al tren de fuerza y se da, en primer lugar, a través del convertidor de torque (ver Figura 16). Este consta de un impulsor (o rodete), una turbina, un estator -con embrague unidireccional- y un embrague de traba (o *lockup clutch*), típico en camiones, cargadores, etc. El convertidor de torque, además, absorbe las cargas de impacto y se ajusta a las cargas del equipo. El convertidor de torque puede trabajar en dos modos: modo convertidor y modo mando directo.

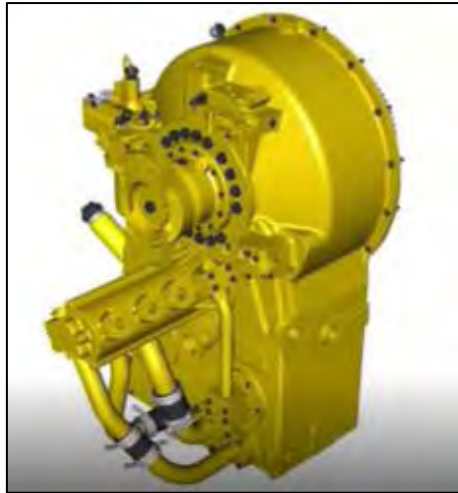


Figura 16. Convertidor de torque de camión minero

Tomado de Caterpillar: 785D NPI

El primer modo aplica para las marchas retroceso (R), Neutro (N) y Primera convertidor (1C). Este modo es utilizado cuando se requiere mayor torque en el tren de fuerza. Esto es ocasionado por la reducción de la velocidad en el convertidor -y aumento de torque- mediante el siguiente proceso (ver Figura 17): La volante del motor gira la carcasa giratoria (rojo) que, a su vez, gira el rodete. Este dirige el aceite a los álabes de la turbina, haciendo que gire. La turbina dirige el aceite al estator. El estator (sin moverse) dirige la mayor parte del aceite de vuelta al rodete; el resto del aceite sale del convertidor a través del paso de salida. El aceite, que vuelve al rodete desde el estator, se mueve en la misma dirección que la rotación del rodete. La turbina, acoplada al eje de salida, lo hace girar. La potencia se envía a través del yugo de salida al eje central y los engranajes de transferencia de la transmisión.

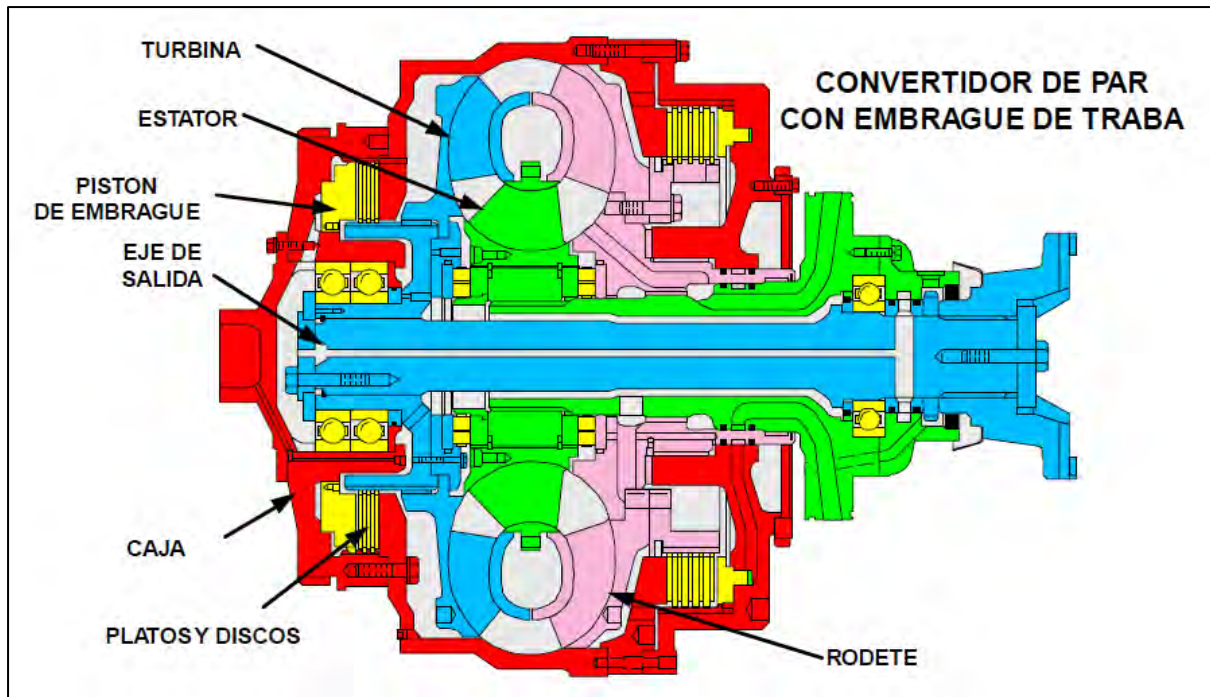


Figura 17. Esquema de un convertidor de torque

Tomado de Caterpillar: Curso de Tren de Fuerza

El segundo modo, mando directo, se activa gracias al embrague de traba y se da bajo ciertas condiciones como: velocidad mínima del camión de 7 km/h y que ningún pedal de freno esté presionado.

5.1.1 Embrague de traba (*lockup clutch*)

El embrague de traba es parte del convertidor de par y está ubicado entre la volante del motor y la turbina. Este se activa cuando la transmisión está entre segunda y sexta marcha. El embrague de traba se activará en primera marcha a medida que aumente la velocidad de salida de la transmisión. Los componentes principales del embrague de traba son el pistón de embrague, los dos platos y tres discos. La operación es la siguiente: La carcasa giratoria está conectada al volante del motor mediante estrías y sujeta al rodete mediante pernos. El pistón y los platos también están conectados a la carcasa giratoria por estrías. Los discos y el eje de salida están conectados al cubo por estrías y la turbina está acoplada al cubo. El ECM del tren de fuerza activa el solenoide del embrague de traba. La válvula del embrague de traba del convertidor (ver Figura 18) envía aceite a presión a través del paso de entrada. El aceite pasa por un pasaje en el centro del eje de salida y llega al espacio de la carcasa y el pistón. La presión del aceite provoca que el pistón se mueva hacia los discos, haciendo que se “peguen”, a presión, a las

placas y giren a la misma velocidad. El embrague se convierte en una conexión directa entre la carcasa giratoria y el eje de salida, a través del cubo. Esto hace que la turbina y el rodete giren a la misma velocidad. El estator gira libremente. En este momento, se está en mando directo. En dicho modo se es más eficiente con la transmisión de potencia y consumo de combustible.



Figura 18. Ubicación de válvula solenoide del embrague de traba

Tomado de Caterpillar: Manual del Estudiante, Camión 785C

5.2 Eje Central y Engranajes de Transferencia

Antes de que la potencia llegue a la transmisión, pasa a través de un eje central y engranajes de transferencia (ver Figuras 19 y 20). Al eje de salida del convertidor de torque se acopla el eje central (2), mediante un yugo (1) Este eje tiene en su extremo final (3) una rueda dentada unida mediante estrías.

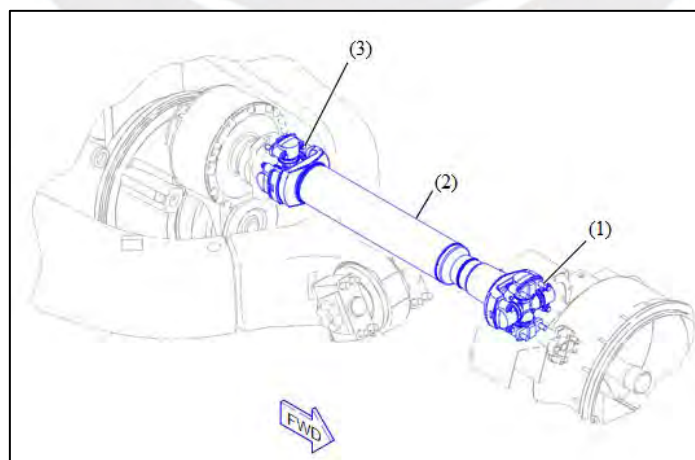


Figura 19. Esquema de eje central

Tomado de Caterpillar SIS 2.0: 785D - Parts

Esta rueda dentada (4) -de 68 dientes- transfiere potencia a un piñón (5) -de 56 dientes- que está acoplado directamente al eje de entrada de la transmisión también mediante estrías.

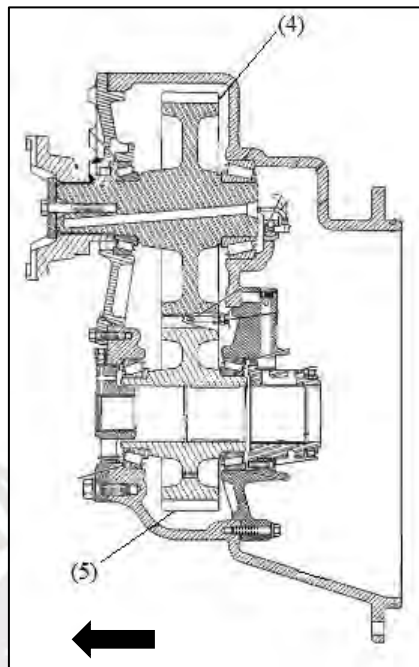


Figura 20. Vista de corte de engranajes de transferencia

Tomado de Caterpillar SIS 2.0: 785D - Parts

5.3 Transmisión

La transmisión de ambos modelos de camiones es una *Power Shift* planetaria (ver Figuras 21 y 22). El modo de operación es el siguiente: El ECM de la transmisión activará el solenoide de cambio ascendente (*upshift*) o descendente (*downshift*) cuando se necesiten cambios. Estos activan hidráulicamente el actuador rotatorio de la transmisión. El movimiento de este selecciona mecánicamente la posición del carrete (*spool*) selector rotatorio. El flujo a través del carrete activa hidráulicamente las válvulas adecuadas en la válvula de control de presión. Estas válvulas acoplan los paquetes de embrague de transmisión adecuados. Los paquetes conectan mecánicamente el eje de entrada de la transmisión al eje de salida y luego al diferencial. La transmisión tiene seis velocidades o marchas de avance y una de retroceso. La selección de marcha retroceso, neutral o primera velocidad se realiza manualmente. La selección de la segunda velocidad a la sexta velocidad se realiza automáticamente. Cuando la transmisión está en cualquiera de las marchas entre segunda y sexta, el convertidor de torque estará en

modo mando directo. El convertidor de torque estará en modo convertidor un breve período de tiempo durante los cambios de transmisión para proporcionar un acoplamiento más suave de los paquetes de embragues de transmisión. Esta transmisión (ver Figuras 21 y 22) es tipo ICM (modulación individual de embragues, por sus siglas en inglés). Aquí, cada embrague es modulado aisladamente con el fin de brindar cambios más suaves bajo carga. En la siguiente Tabla 11 puede apreciarse, de manera resumida, los paquetes de embrague activados y el modo de funcionamiento del convertidor para cada marcha de la transmisión.

Tabla 11

Paquetes de embrague y modos de operación de convertidor por marcha de la transmisión

| Marcha de la transmisión | Paquetes de embrague accionados/acoplados | Modo convertidor | Modo mando directo |
|---------------------------------|--|-------------------------|---------------------------|
| Reversa (R) | 1 y 6 | X | |
| Neutro-1 (N-1) | 3 | X | |
| Neutro-2 (N-2) | 1 | X | |
| Primera (1C o 1D) | 1 y 5 | X | X |
| Segunda (2D) | 2 y 5 | | X |
| Tercera (3D) | 1 y 4 | | X |
| Cuarta (4D) | 2 y 4 | | X |
| Quinta (5D) | 1 y 3 | | X |
| Sexta (6D) | 2 y 3 | | X |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data de CATERPILLAR SIS 2.0

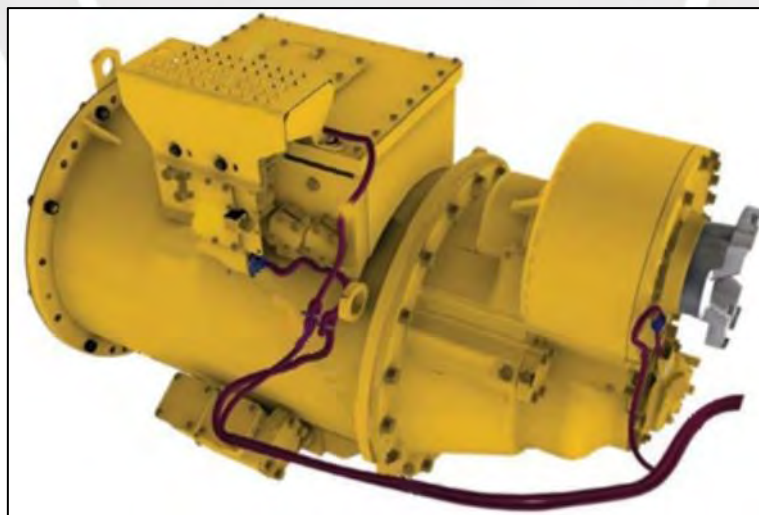


Figura 21. Transmisión *Power Shift* planetaria de camión minero

Tomado de Caterpillar SIS 2.0: 785D – Interactive Schematic

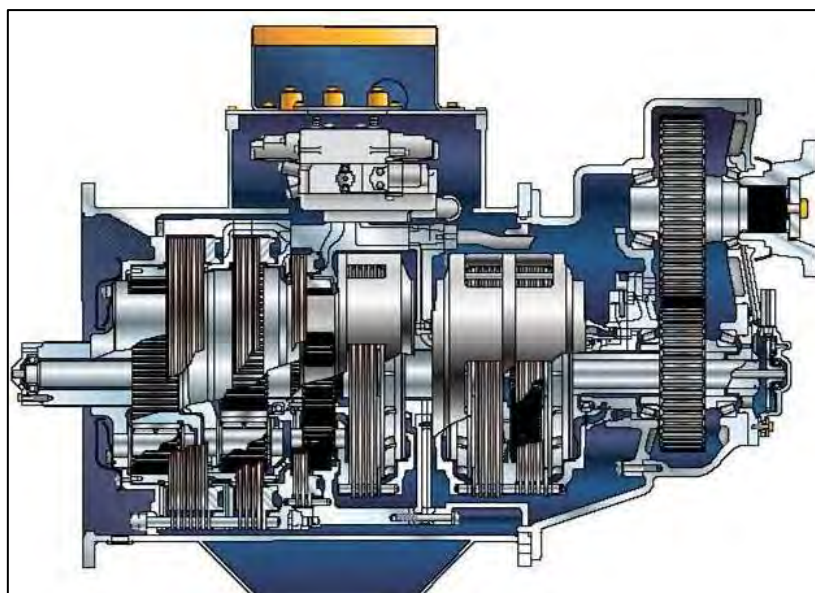


Figura 22. Esquema de vista de corte de la transmisión

Tomado de Caterpillar: 785D NPI

5.4 Diferencial y Semi Ejes

El eje de salida de la transmisión tiene en su extremo final acoplado un piñón de ataque mediante estrías, este engrana con una rueda dentada, llamada corona, en el diferencial (ver Figura 23); el cual, además, cuenta con cuatro piñones cónicos y dos ruedas dentadas laterales, que están acopladas mediante estrías a los semi ejes. El diferencial tiene como objetivo compensar la diferencia de velocidades de giro de las ruedas y brindarles el mismo torque a ambas. Al girar el camión por una curva, por ejemplo, le da menos velocidad de giro a la rueda interna que a la externa. La relación de transmisión entre el piñón y corona es de 2,10:1 y en el conjunto de engranajes planetarios, 10,83:1.

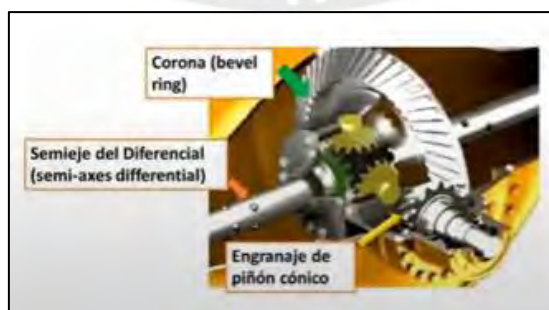


Figura 23. Esquema de componentes del diferencial

Tomado de Mecatec: Webinar de camión minero 785D

5.5 Mandos Finales y Frenos

Luego de que la potencia sea transmitida a través del diferencial, antes de llegar a las ruedas, pasa por los mandos finales (ver Figura 24). Estos cuentan con una doble reducción planetaria (1) de 4:1 -lo que resulta en 16:1 en total- para darle mayor torque a las ruedas. Además, incluyen el paquete de frenos (2) accionados con aceite a presión.

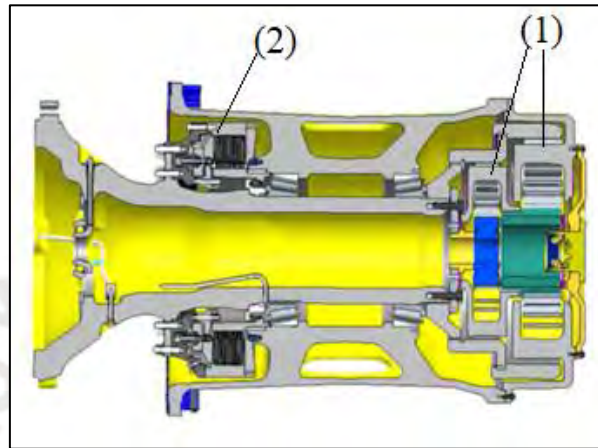


Figura 24. Esquema de vista de corte de mando final

Tomado de Caterpillar: 785D NPI

6. Análisis del Sistema de Control Electrónico

Respecto al sistema de control electrónico (ver Figura 25), es similar en ambos modelos y es gobernado por el módulo principal VIMS (*Vital Information Management System*). El VIMS (1) controla básicamente los siguientes componentes.

- (2) Software VIMS de conexión a la computadora para recopilar data.
- (3) Software ET (*Electronic Technician*) de computadora, utilizado para ver parámetros y hacer pruebas.
- (4) Pantalla y teclado del VIMS: información y valores digitales.
- (5) Indicadores analógicos como: temperatura refrigerante, presión de aceite, nivel de combustible, RPM, velocidad del camión
- (6) ECM (*Electronic Control Module*) del motor
- (7) Sensores del Sistema motor, tales como: sensor de presión, temperatura, nivel, velocidad angular
- (8) Inyectores EUI de combustible
- (9) TCC (*Transmission Chassis Control*), ECM de transmisión que controla los cambios automáticos y la activación/desactivación del embrague de traba.
- (10) Transmisión *Power Shift*
- (11) IBC (*Integrated Braking Control*), ECM del sistema de frenos que integra el sistema de tracción y el control del retardador.
- (12) Sensor de velocidad de las ruedas
- (13) Frenos en mandos finales

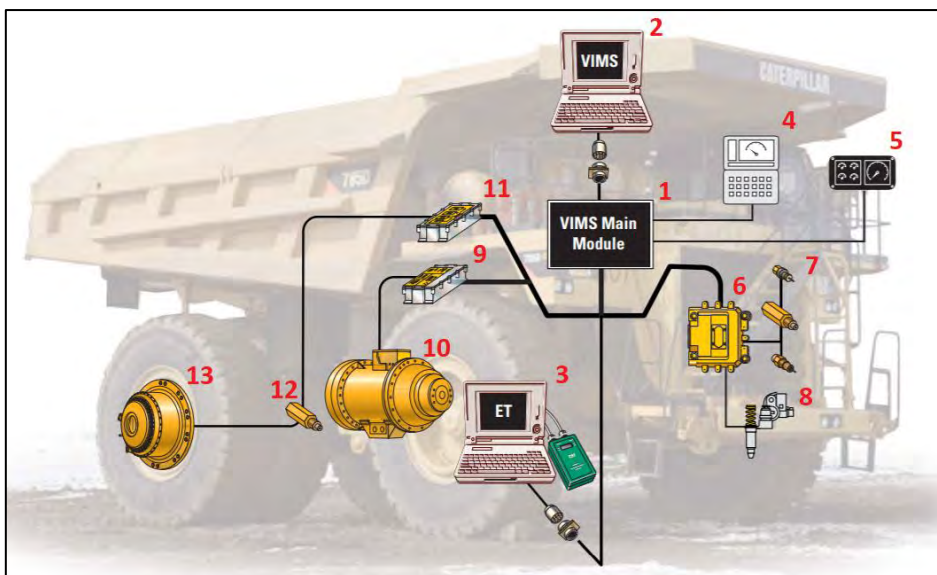


Figura 25. Control electrónico del camión minero

Tomado de Caterpillar (2010) CAT 785D Specalog

Como diferencia, el módulo de control electrónico del 785C presenta un controlador ADEM2, mientras que el del 785D, un ADEM3. En la siguiente Figura 26 se puede ver el ECM del motor:

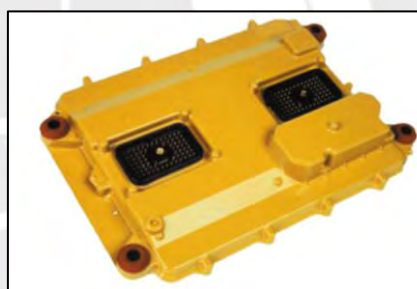


Figura 26. ECM del motor

Tomado de Caterpillar (2010) CAT 785C Specalog

En la Tabla 12 mostrada a continuación, se indican los *flash files* (con números de parte) del 785C y 785D. Se observa que los de VIMS y motor tuvieron una variación, o actualización.

Tabla 12

Variación de ECMs de camión 785C y 785D

| Ítem | Descripción ECM | Flash file 785C | Flash file 785D | ¿Varió? |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|
| 1 | VIMS | 444-2474 | 473-3812 | SÍ |
| 2 | Motor | 527-7397 | 516-9417 | SÍ |
| 3 | TCC | 473-3812 | 473-3812 | NO |
| 4 | IBC | 450-6234 | 450-6234 | NO |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data de CATERPILLAR SIS 2.0

7. Comparación de la Estructura Principal y Cabina del Operador

La estructura principal y la cabina del operador tienen algunas diferencias, mejoras sobre todo del 785D respecto al 785C.

7.1 Estructura Principal

Para la estructura (ver Figura 27), se agregaron 3 secciones más fabricadas por fundición; obteniendo 2 partes fabricadas por forja y 23 por fundición (color rojo). Los marcos son de acero dulce (entre 0,1% C y 0,3% C) de construcción para ser fáciles de soldar.

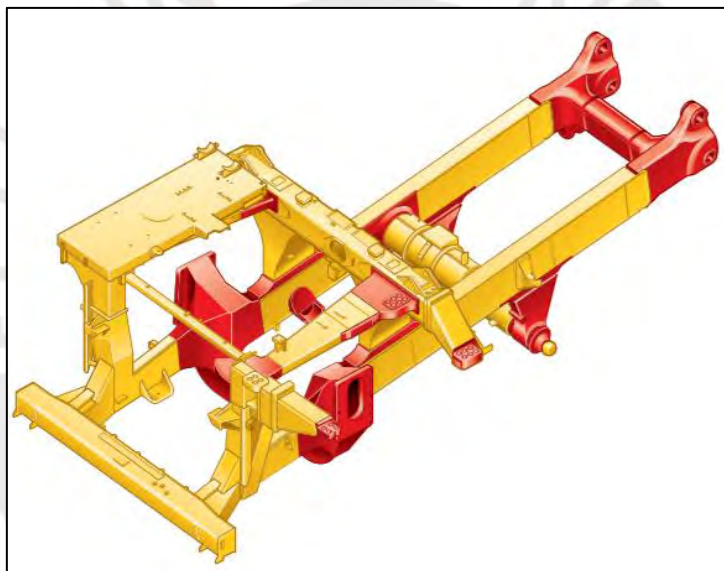


Figura 27. Estructura o chasis del camión 785D

Tomado de Caterpillar (2010) CAT 785D Specalogs

7.2 Cabina del Operador

En cuanto a los comandos de cabina, no hubo variaciones. Lo que cambió fue el acceso a esta, como se puede apreciar en la Figura 28, para mayor comodidad y seguridad del operador.



Figura 28. Vista frontal del camión minero

Tomado de Caterpillar (2010) CAT 785C Specalog y Caterpillar (2010) CAT 785D Specalog



8. Comparación de Datos Operacionales

En esta sección, se mencionarán los parámetros operacionales más importantes relacionados a la operación: pesos, tiempos, velocidades, etc. Además, se verá el ciclo de producción de estos camiones en la operación. Los datos de operación mostrados en el capítulo provienen de la información brindada por la empresa contratista.

8.1 Ciclo de Producción de un Camión Minero

El ciclo característico de producción de un camión minero consta de cuatro etapas significativas (véase Figura 29): En primera instancia, este es cargado (*load*), ya sea de mineral o desmonte; luego, realiza un viaje (*haul, loaded*) hacia la chancadora o el botadero, dependiendo si lleva mineral o desmonte; después, realiza la descarga en el lugar de destino (*dump*); y, finalmente, regresa a ser cargado, pero esta vez vacío (*haul, empty*).

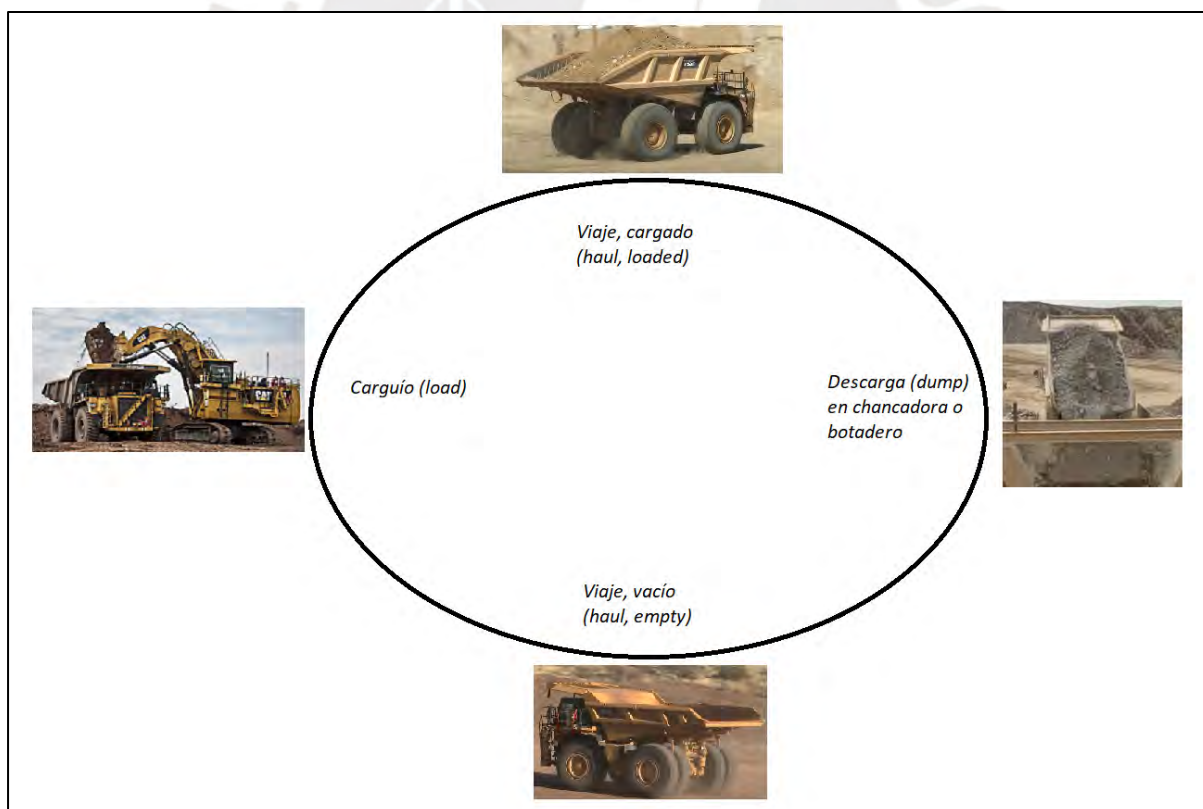


Figura 29. Ciclo de producción típico de camión minero

Figura elaborada a partir de fotografías de CATERPILLAR Surface Mining Product Demos

8.2 Pesos y Tolvas

La empresa adquirió los camiones con tolva estándar (*Dual Slope body*); sin embargo, para efectos de mejorar la capacidad de carga de los camiones, hizo aligerar sus tolvas. Es importante indicar los pesos más significativos de ambos camiones, los cuales se muestran en la siguiente Tabla 13:

Tabla 13

Parámetros de pesos de camiones 785C y 785D

| | Parámetro (TM) | 785C | 785D |
|-----------|-------------------------------|-------------|-------------|
| Original | Peso cargado | 249,5 | 249,5 |
| | Peso vacío | 113,7 | 115,8 |
| | Peso tolva + <i>liners</i> | 29,4 | 30,4 |
| | <i>Payload</i> objetivo | 135,8 | 133,7 |
| | <i>Payload</i> + 10% | 149,4 | 147,0 |
| | <i>Payload</i> + 20% | 163,0 | 160,4 |
| Aligerado | Peso cargado | 249,5 | 249,5 |
| | Peso vacío | 101,7 | 103,8 |
| | Peso tolva + <i>liners</i> | 17,4 | 18,4 |
| | <i>Payload</i> objetivo | 147,8 | 145,7 |
| | <i>Payload</i> + 10% original | 161,4 | 159,0 |
| | <i>Payload</i> + 20% original | 175,0 | 172,4 |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data CATERPILLAR (2010) CAT 785C y 785D Specialogs

El *payload* (carga de material, en peso) objetivo de cualquier equipo se calcula restando el peso del equipo cargado con el del equipo vacío.

Las capacidades que ha establecido la empresa como parámetro se indican en la elaborada Tabla 14:

Tabla 14

Payloads con tolvas originales y aligeradas para los camiones 785C y 785D, según la contratista

| Tolvas \ Cargas (TM) | <i>Payload</i> útil | <i>Payload</i> máximo | Sobrecarga |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------|
| Tolva original | 138 | 153 | 154 |
| Tolva aligerada | 150 | 161 | 162 |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data de la empresa subcontratista

Se ve que el *payload* útil se ha incrementado en un 10% respecto al original; este es el considerado para ambos modelos de camiones, 785C y 785D. A partir de las 162 TM, se considera sobrecarga.

8.2.1 Política 10/10/20 de Caterpillar

Caterpillar tiene una política conocida en cuanto a la gestión y optimización de cargas de los equipos de acarreo, la 10/10/20: La media de la distribución del *payload* no debe exceder el *payload* objetivo y menos del 10% de todos los *payloads* podrían exceder 1,1 veces el *payload* objetivo nominal y ningún *payload* debe exceder el objetivo en 1,2 veces el nominal. Si se trasladara esto al caso de estos camiones con tolva aligerada y carga nominal de 150 TM, se vería que solo el 10% de las cargas podría exceder las 164 TM, pero nunca llegar a 178 TM. Estos números son superiores a los que indica la empresa por lo que trabajan un factor de seguridad más exigente, ya que usan tolvas modificadas. En la siguiente Figura 30, se ve cómo deben distribuirse el número de cargas según el porcentaje o fracción del *payload* objetivo, en este caso, del 785D con tolva aligerada:

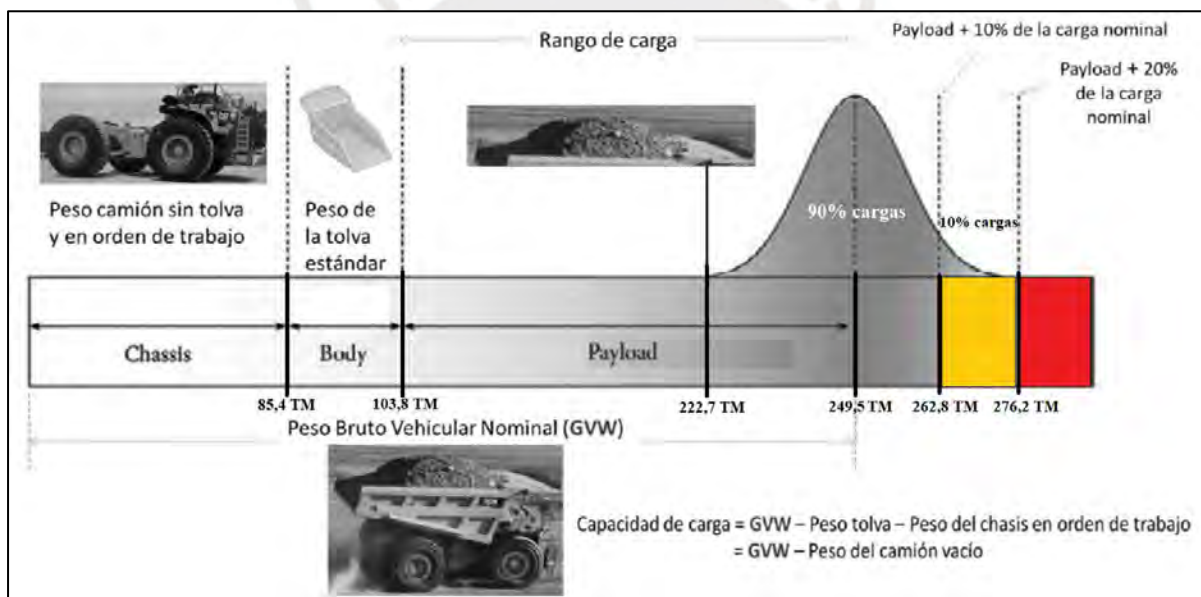


Figura 30. Pesos y payloads de camión 785D con tolva aligerada

Adaptado de Curso Diplomado de Ingeniería de Maquinaria Pesada PUCP – Severidad de la aplicación

8.3 Neumáticos

Los neumáticos utilizados por los camiones son 33,00-R51, de las marcas *Michelin* y *Bridgestone*, modelos XDR3 (B4) y VRPS (E2A), respectivamente. Estos aplican para ambos camiones, 785C y

785D. El valor de TKPH (tonelada - kilómetro por hora) de estos neumáticos es de 620 para el XDR3 y 558 para el VRPS.

Para validar si se cumplen las especificaciones del TKPH, se debe tener en cuenta que el eje delantero tiene dos neumáticos y, el posterior, 4; por lo que el eje delantero es más crítico en este aspecto, aun teniendo en cuenta la distribución de pesos (ver Tabla 15).

Tabla 15

Distribución de pesos y TKPH de neumáticos de la operación

| | Parámetro | Valor |
|-------------------|--|-------|
| Vacio (TM) | Distribución de pesos en eje delantero | 45,0% |
| | Peso sobre el eje delantero | 45,8 |
| | Peso por neumático | 22,9 |
| Con carga (TM) | Distribución de pesos en eje delantero | 33,3% |
| | Peso sobre el eje delantero | 83,1 |
| | Peso por neumático | 41,5 |
| | Peso promedio por neumático (TM) | 32,2 |
| | TKPH mínimo (dato neumático) | 558,0 |
| | Velocidad promedio máxima (km/h) | 17,3 |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data CATERPILLAR (2010) CAT 785C y785D Specialogs

Como se verá más adelante, las velocidades promedio de operación no superan los 13 km/h, por lo que los neumáticos no serían afectados por velocidad o carga:

$$\text{TKPH real} = 32,2 \text{ TM} \times 13 \text{ km/h} = 386,4 < 558,0 \rightarrow \text{OK}$$

8.4 Curvas Rimpull

El *rimpull* se define como la fuerza motriz ejercida por las ruedas de un equipo -camión en nuestro caso- a medida que actúa sobre la superficie. Se verá cómo se compara gráficamente, entre ambos modelos de camiones, este parámetro, considerando neumáticos estándar (1 433 mm de radio):

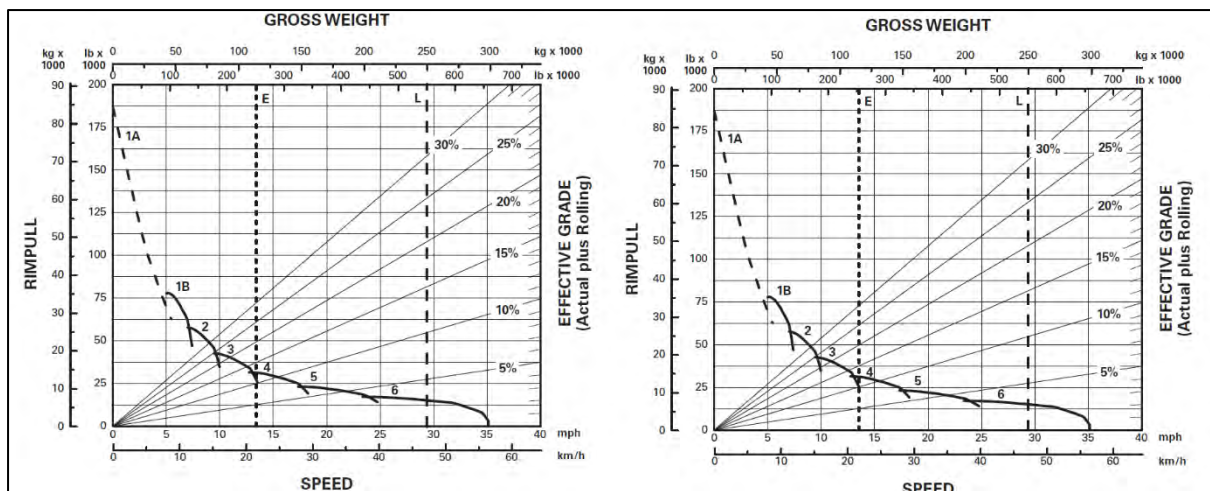


Figura 31. Curvas *rimpull* de camiones 785C y 785D

Tomado de Caterpillar Performance Handbook, Edición 49.

Se ve, en la Figura 31, que ambos gráficos son iguales. Lo cual quiere decir que, teóricamente, en el mismo grado de pendiente, ya sea vacío o cargado, se tiene el mismo *rimpull* y velocidad sobre el terreno en la misma marcha de transmisión.

8.5 Rutas de la Operación

La operación de la empresa en Marcona abarca la explotación de las minas 11; 14 y 19 (ver Figura 32). Cuentan con cuatro palas que cargan los camiones con mineral, óxidos y desmorte para ser llevados estos a chancadoras o botaderos, según corresponda (ver Tabla 16).

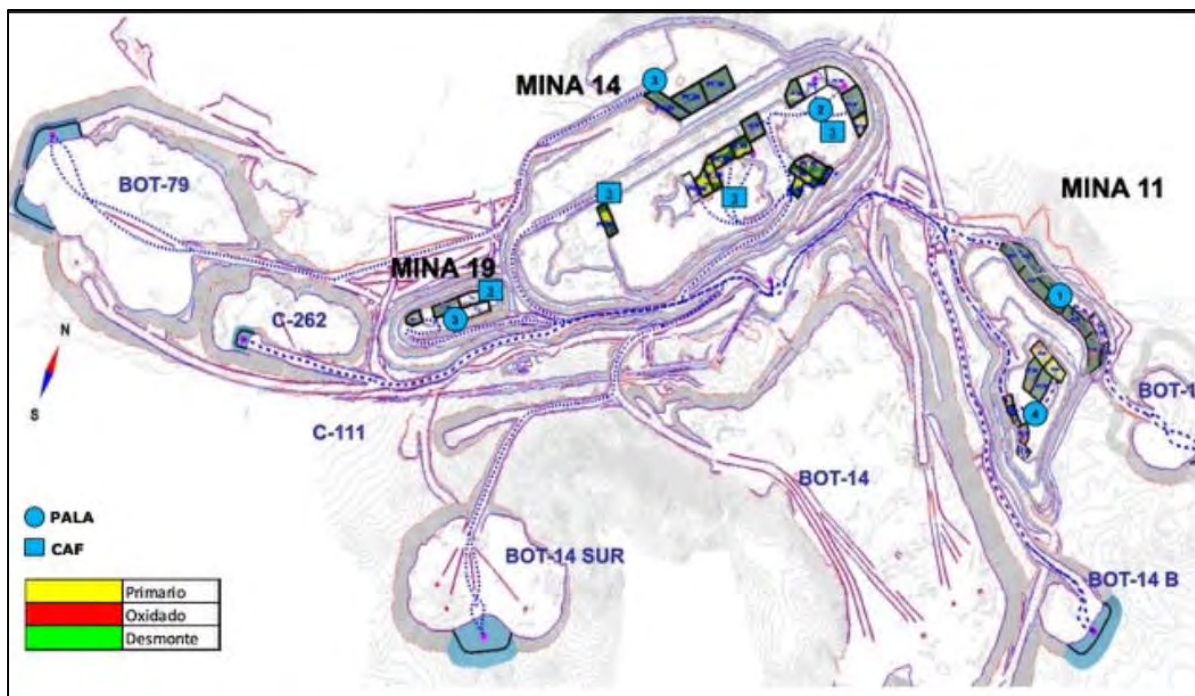


Figura 32. Mapa de minas y botaderos en la operación de empresa contratista

Tomado de correo electrónico de empresa contratista

Tabla 16 Distribución de materiales, canchas y distancias por palas

Distribución de materiales, canchas y distancias por palas

| Equipo | Material | Cancha | Distancia (m) |
|---------|----------|--------------|---------------|
| PALA-01 | PO | Chancadora | 2 049 |
| PALA-01 | DES | Botadero 14B | 2 645 |
| PALA-01 | OX | Cancha 262 | 4 077 |
| PALA-02 | PO | Chancadora | 1 923 |
| PALA-02 | DES | Botadero 14S | 3 747 |
| PALA-03 | DES | Botadero 79 | 3 425 |
| PALA-04 | DES | Botadero 14S | 3 546 |
| PALA-04 | PO | Chancadora | 1 700 |

Leyenda:

PO: pirrotina (primario)

DES: desmante

OX: óxidos (oxidado)

Nota. Tabla elaborada a partir de la data de la empresa subcontratista

8.6 Parámetros y valores de la operación

8.6.1 Velocidades promedio

Los camiones presentan las siguientes velocidades promedios en la operación (Tabla 17). Resalta a simple vista la marcada diferencia entre los 785C y los 785D, lo cual es parte del reclamo de la empresa.

Tabla 17

Velocidades promedio por modelo de camión en la operación

| Modelo | Velocidad promedio de operación (km/h) |
|--------|--|
| 785C | 12,1 |
| 785D | 10,3 |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data de la empresa subcontratista

8.6.2 Cargas promedio de camiones en la operación (payload)

Se muestra en la Tabla 18 la distribución de cargas promedio en función de los meses por cada modelo de camión. Se ve que en el primer trimestre de año los 785C cargaron, en promedio, 200 kg más.

Tabla 18

Payloads promedio por modelo de camión en la operación

| Modelo \ mes | Enero '20 | Febrero '20 | Marzo '20 | Promedio |
|--------------|-----------|-------------|-----------|----------|
| 785C | 148,0 | 147,5 | 147,6 | 147,7 |
| 785D | 148,6 | 147,3 | 146,7 | 147,5 |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data de la empresa subcontratista

8.6.3 Consumo de combustible

El consumo de combustible teórico de estos camiones, por modelo y tipo de carga, se muestra en la siguiente Tabla 19:

Tabla 19

Consumo de combustible teórico, en función del grado de carga

| Consumo de combustible (gal/h) | 785C | 785D |
|--------------------------------|-------------|-------------|
| En baja carga (20-30%) | 14,2 - 21,3 | 14,3 - 21,5 |
| En media carga (30-40%) | 21,3 - 28,4 | 21,5 - 28,7 |
| En alta carga (40-50%) | 28,4 - 35,5 | 28,7 - 35,8 |

Nota. Adaptado de Caterpillar Performance Handbook, Edición 49

Es importante indicar que el rango de porcentaje entre paréntesis, de la Tabla 19, es el factor de carga del equipo. En la operación, los consumos reales promedios son los siguientes (ver Tabla 20):

Tabla 20

Consumo de combustible promedio en la operación, por modelo de camión

| Modelo | Consumo de combustible (gal/h) |
|--------|--------------------------------|
| 785C | 30,26 |
| 785D | 30,55 |

Nota. Tabla elaborada a partir de la data de la empresa subcontratista

8.6.4 Otros datos de operación

Los siguientes son otros datos significativos de la operación de estos camiones:

- Horas programadas: 24 h/día
- Horas de operación: 18 h/día
- Mantenimientos preventivos cada 300 h: 17 días, aproximadamente
- Disponibilidad física promedio: 88%
- Utilización promedio: 85%
- Objetivo de material movido por camión por hora: 450 TM
- Distancia promedio de recorrido: 2,89 km
- Valorización: USD 1.43 / TM

8.6.5 Afectación del bajo rendimiento en la producción:

La empresa es subcontratista de Shougang Hierro, ellos valorizan el material movido a USD 1.43 / TM, aproximadamente. Se hará un breve cálculo de cómo la velocidad de los dos camiones 785D impacta este monto anualmente, considerando los datos de la sección anterior (ver Tabla 21).

Tabla 21

Impacto en la producción por baja performance de camiones 785D

| Modelo camión | Velocidad promedio (km/h) | % velocidad deseada | Material movido por hora por camión (TM) | Horas de operación al día | Material total movido por día (TM) |
|---------------|---------------------------|---------------------|--|---------------------------|------------------------------------|
| 785C | 12,1 | 100% | 450 | 18 | 8 100 |
| 785D | 10,3 | 85% | 383 | | 6 895 |

Continuación:

| Modelo camión | Material movido al año (TM) | Valorización (USD/TM) | Venta anual | Venta unitaria perdida por velocidad | Venta perdida por velocidad (2 camiones 785D) |
|---------------|-----------------------------|-----------------------|--------------|--------------------------------------|---|
| 785C | 2 956 500 | 1.43 | \$ 4 227 795 | \$ - | \$ - |
| 785D | 2 516 690 | | \$ 3 598 867 | \$ 628 928 | \$ 1 257 856 |

Más de USD 1.25 MM es lo que se dejaría de vender anualmente en caso el problema con estos camiones persista. El impacto anual es muy relevante. Se debe también considerar la eficiencia de combustible:

Tabla 22

Impacto en la eficiencia de combustible por baja performance de camiones 785D

| Modelo camión | Consumo de combustible promedio (gal/h) | Horas de operación al día | Consumo de combustible anual (gal) | Precio combustible (USD/gal) | Costo combustible anual | Eficiencia de combustible (TM/gal) |
|---------------|---|---------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 785C | 30,26 | 18 | 198 808 | 3.32 | \$ 660 043 | 14,87 |
| 785D | 30,55 | | 200 714 | | \$ 666 369 | 12,54 |

Se puede apreciar, en Tabla 22, que el camión 785D es 16% menos eficiente en cuanto a uso de combustible, en función del peso movido. Adicionalmente, el camión 785C consume 0,25 L por TM de material transportado, mientras que el 785D, 0,30. Finalmente, el 785C gasta \$ 0.22 de combustible por tonelada movida y el 785D, \$ 0.26.

9. APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA DE BAJO DESEMPEÑO

Para efectos de describir, buscar y encontrar la solución del problema que presentan los dos camiones 785D, es necesario aplicar el Método de los 10 pasos o Metodología de Diagnóstico. Debido a que este informe contempla un análisis previo a una visita a campo, se ahondará en los puntos pertinentes.

9.1 Reclamación del cliente

En diciembre de 2019, la empresa contratista dueña de los camiones mencionados observa una baja performance de sus camiones 785D, que, comparados con los 785C, son más lentos (como se vio en la sección anterior) y, al parecer, no trabajan en mando directo cuando deberían hacerlo; ocasionando pérdida de potencia y menos velocidad en el eje central.

A raíz de esto, el cliente realizó un monitoreo de control de ciclo de la flota (ver Figura 33) desde la pala 03, en la Mina 14, acarreando los camiones desmonte al botadero 14 Sur (B-14 S). Se percibió (a través de la pantalla del VIMS en la cabina del operador) que tres camiones 785C (números 6; 17 y 21) trabajaban en mando directo, a mitad de la ruta donde hay una pendiente positiva (punto A) y luego, a casi el final de la ruta (punto B), suben una última rampa en tercera marcha. Por el contrario, el 785D número 25, lo hacía en modo convertidor y, luego, en segunda marcha, respectivamente; ocasionando que llegue a destiempo en el ciclo. También se observó que, si en la ruta de acarreo un camión 785D está por delante de un 785C (yendo más lento), este último debe bajar la velocidad para no sobrepasar al primero. La misma prueba se realizó con el camión 785D número 26 obteniendo resultados similares; se registró que, en esta subida, cargado, le toma de 45 a 50 segundos más que a los 785C, en promedio. En ruta, cuando un camión 785C se encuentra detrás de un 785D que vas más lento, se ve obligado a disminuir la velocidad para no sobre pasarlo; esto repercute también en la velocidad promedio de los 785D y, consecuentemente, en la producción. Otro dato que se pudo registrar es que las presiones de refuerzo (*boost pressure*) después de pasar el aire por el grupo turbocompresor era menor en los 785D, siendo también menor que la nominal. El resumen se muestra en la siguiente Tabla 23:

Tabla 23

Comparación de resultados en prueba operacional de ambos modelos de camiones

| Camión | Modo de trabajo media ruta (A) | Marcha en pendiente (+) final ruta (B) | Tiempo en subida final de ruta | Presión de refuerzo real (psi) | Presión de refuerzo nominal (psi) |
|--------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 785C | Modo mando directo | Tercera | t | 27 | 28 |
| 785D | Modo convertidor | Segunda | t + 50 | 23 | 28 |

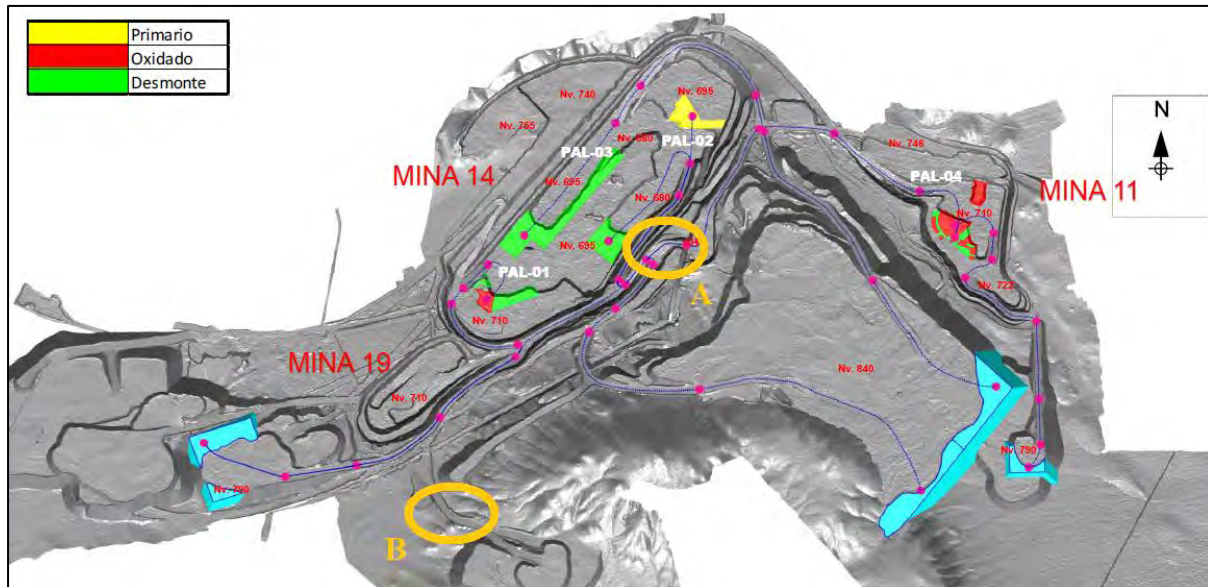


Figura 33. Mapa de minas y botaderos en la operación de empresa contratista, de plan de minado Tomado de informe de plan de minado 2018 de empresa contratista

9.2 Realizar una inspección visual

En este segundo paso de la metodología, se menciona lo que se debe tener en cuenta al momento de revisar visualmente a los camiones. Esto generalmente se realiza con un AT1 (Análisis Técnico 1). Los siguientes son los puntos más relevantes relacionados con el problema:

- Verificar el estado de los neumáticos por si presentan cortes, desgaste excesivo o protuberancias.
- Verificar en el turbocargador (relacionado a la presión de refuerzo) si:
 - Existe hollín alrededor de las áreas donde se emperna el turbocargador con el escape. Esto indicaría que puede haber conexiones sueltas en los juntas o pernos de montaje sueltos/rotos.
 - Hay fuga o resumen de aceite alrededor de esta línea del turbocargador
 - Hay rastros de tierra, lo cual daría indicios de fugas de aire en la admisión.

- El sistema en general se encuentra en correcto estado
- Verificar si en el tanque hidráulico (relacionado a la activación del embrague de traba):
 - Existe fuga de aceite
 - Hay rajaduras o fisuras
 - Los sellos se encuentran dañados
 - Mirillas de aceite se encuentra dañadas
 - El respiradero está en buenas condiciones

9.3 Confirmación de la falla

Para este punto, será necesario hacer una prueba en ruta en ambos modelos de camiones (correcto y defectuoso). Durante esta ruta se deberá subir al camión en el asiento de copiloto y:

- Conversar con el operador sobre condiciones, frecuencia e historial del problema
- Monitorear la operación de este.
- Tomar tiempos de ciclo, especialmente en pendientes (positivas y negativas) y en llano.
- Verificar las velocidades en pendientes (positivas y negativas) y en llano.
- Ver el estado de las vías
- Verificar en el panel del VIMS: marchas, modo convertidor o mando directo, presiones de refuerzo y, sobre todo, si existen alarmas o códigos de falla activos y/o eventos.

Los camiones 785D presentan dos deficiencias: baja presión de refuerzo y no activación del embrague de traba para trabajar en mando directo en algunos tramos de la ruta (se deberá comprobar si es así), ocasionando menor velocidad sobre terreno y mayor consumo de combustible.

9.4 Determinar las causas más probables

Para este punto, se realizará una lista de posibles causas que originan las mencionadas deficiencias en orden de mayor probabilidad y facilidad de prueba a menor probabilidad y dificultad de prueba. Una o más de estas podría ser la causa raíz del problema. Además, se incluyen las soluciones y/o verificaciones respectivas (ver Tablas 24 y 25):

a. Baja presión de refuerzo y pérdida de potencia

Tabla 24

Causas y soluciones/verificaciones para el problema a.

| Orden | Causa | Solución o verificación |
|-------|---|--|
| a1 | Fugas en el sistema de admisión | Verificar hermeticidad, preparar aditamentos para prueba |
| a2 | Restricción en filtros de aire (Evento E272), mayor o igual 1 psi | Verificar filtros primarios y secundarios |
| a3 | Restricción en las líneas de combustible | Verificar si están obstruidas o en mal estado. Reparar o reemplazarlas |
| a4 | Conexión eléctrica defectuosa | Verificar instalación correcta de los conectores de ECM J1/P1 y J2/P2, <i>harnesses</i> y conectores de los inyectores |
| a5 | Turbocompresor(es) averiado(s) | Verificar álabes de los turbocompresores. Reparar o reemplazar turbocompresores. |
| a6 | No encendido de los inyectores o inyectores defectuosos | Verificar con pruebas de corte de cilindros o excitación del solenoide del inyector. Reparar o reemplazar inyectores. |

b. No activación o falla del embrague de traba

Tabla 25

Causas y soluciones/verificaciones para el problema b.

| Orden | Causa | Solución o verificación |
|-----------|--|---|
| b1 | Falla en el solenoide de embrague de traba (el solenoide no se abre o cierra) | Medir presiones. Reemplazar solenoide de embrague de traba |
| b2 | Falla en el circuito eléctrico del solenoide de embrague de traba (Códigos: MID 027-CID 0709-FMI 03/05/06) | Medir resistencias. En caso no sea conforme a lo especificado, reparar/cambiar <i>harness</i> . |
| b3 | Falla en la válvula del embrague de traba y sincronización (no deja pasar aceite al embrague de traba) | Medir presiones. Reparar o reemplazar válvula |
| b4 | Desperfecto en la bomba de carga de la transmisión | Medir presiones. Reparar o reemplazar bomba |
| b5 | Desgaste de platos (02) y discos (03) de embrague de traba | Verificar medidas de espesores de platos y discos |

9.5 Realizar evaluación con instrumentos

Las verificaciones y pruebas deben realizarse solo en las condiciones en las que se presentan las causas.

Aquí se deben utilizar instrumentos de medición para validar y verificar algunos parámetros de funcionamiento del camión, comparándolos con las especificaciones estándares:

- Conectarse en la ruta de prueba con el software VIMS e ET desde una laptop y obtener parámetros de los equipos (*datalogger*) como:
 - Velocidad de motor (RPM)
 - Velocidad sobre el terreno
 - Posición del pedal de acelerador
 - Marcha actual
 - Presión en la admisión
 - Temperatura de refrigerante
 - Límite de combustible FRC (control de ratio de combustible)
 - Presión de refuerzo. Validar valor menor al nominal, que es 28 psi (ver Figura 34):

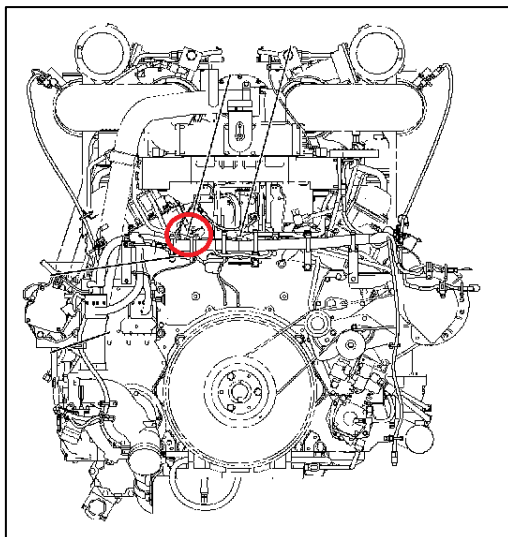


Figura 34. Ubicación del sensor de presión de refuerzo en motor 3512C

Tomado de Caterpillar SIS 2.0: 785D - Troubleshooting

- Medir resistencias entre conectores J1 y J2 del *harness*. Deberán ser mayores a 5 000 Ω . La ubicación de los solenoides se muestra en la Figura 35.

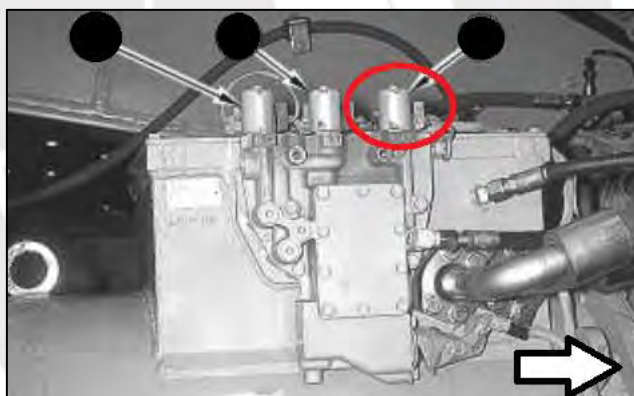


Figura 35. Ubicación de solenoide de activación de embrague de traba

Tomado de Caterpillar SIS 2.0: 785D - Troubleshooting

- Medir presiones hidráulicas relevantes del embrague de traba (ver Figura 36):
 - Presión de señal: Deberá ser de 250 psi
 - Presión piloto (CC): Deberá permanecer en el rango de 250 ± 10 psi
 - Presión máxima (DD): Deberá permanecer en el rango de 310 ± 10 psi

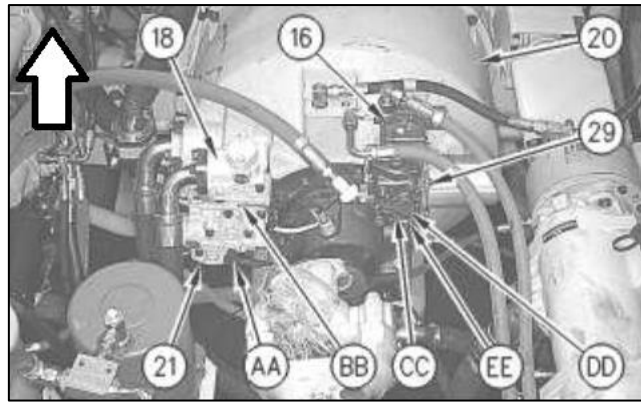


Figura 36. Ubicación de taps para medir presiones relacionadas al embrague de traba

Tomado de Caterpillar SIS 2.0: 785D - Troubleshooting

- Medir espesores de platos y discos del embrague de traba:
 - Medida del conjunto de 03 discos y 02 platos (nuevos): $21,35 \pm 0,34$ mm
 - Medida del plato (nuevo): $4,83 \pm 0,08$ mm
 - Medida del disco (nuevo): $3,43 \pm 0,05$ mm
- Adicionalmente puede efectuarse la prueba del calado del convertidor de par. En este proceso, colocándose en primera marcha, la velocidad del motor deberá estar dentro del rango de $1\ 642 \pm 65$ RPM. Si la velocidad es superior este rango, indica un problema en el tren de fuerza; si es inferior, indica un problema en el motor. La presión de refuerzo deberá ser de 96 kPa o 14 psi.

9.6 Localizar la falla

Luego de realizar las evaluaciones pertinentes ya comentadas y analizar las causas, se definirá la(s) causa(s) raíz que ocasionan el problema. Esta deberá informarse a la empresa.

9.7 Realizar los ajustes o reparaciones

Posteriormente, con el apoyo de personal técnico capacitado se informará al cliente el tiempo y costo de la reparación para que sea programada debidamente y afecte, lo menos posible, la operación. La reparación deberá hacerse en base a los procedimientos de los manuales de servicio correspondientes.

9.8 Hacer pruebas de verificación

Luego de la reparación, se realizará nuevamente la prueba mencionada en el punto 3 de la Metodología y se verificará que los parámetros de operación se encuentran correctos. Los camiones 785D no debería seguir presentando una baja performance. En caso lo sigan haciendo, se retornará al punto 4.

9.9 Documentar lo que se encontró y cómo se solucionó

Se realizará un informe sobre todo el estudio y la reparación para que quede documentada y sirva como antecedente para cualquier eventualidad similar.

9.10 Entregar la máquina; hacer recomendaciones y seguimiento

Se harán las recomendaciones pertinentes y se realizará la entrega de los equipos reparados al cliente y cada cierto tiempo se consultará sobre la operación de los mismos, ya sea por medio telefónico o visita a campo.



10.CONCLUSIONES

- La empresa cuenta con una flota de 24 camiones 785C y 2 camiones 785D, todos estos con más de 23 000 horas de operación. Los camiones 785D presentan un bajo desempeño, ocasionándoles menor producción.
- En cuanto al sistema motor, el 3512C presenta mayor desplazamiento (cilindros más largos) que el del motor del 3512B, dos turbocompresores más con sistema de post-enfriamiento por aire (ATAAC) y distinta configuración de los inyectores, para lograr la certificación Tier 2. Así como mayor compensación de altitud. Ambos motores mantienen la misma potencia y torque, esto indica que la presión media efectiva de los motores 3512C es menor. El consumo específico de combustible del 3512C es mayor.
- La configuración de los camiones 785C y 785D, fuera del motor, es muy similar. Las principales diferencias radican en el sistema continuo de filtración, de diferencial y mandos finales, del 785D; la mayor longitud de la tolva y estructura; y la escalera de acceso a la cabina de camión. El *payload* se mantiene similar. La empresa aligeró las tolvas, aumentando este valor. Las curvas *rimpull* son idénticas.
- La diferencia más impactante en cuanto a temas operacionales es de la velocidad promedio de operación: los camiones 785C transitan a 12,1 km/h, mientras que los 785D, a 10,3. Esto ocasiona que estos últimos muevan 17 toneladas menos por hora, perjudicando la venta anual por movimiento de materiales en USD 1.25 MM. Teniendo presente estos datos, los camiones 785D son 17% menos productivos. Así mismo, al comparar el uso eficiente de combustible respecto al peso movido, los 785D son 16% menos eficientes que los 785C.
- Los costos y pérdida en venta, en los que se ve perjudicada la empresa operadora de estos equipos, son elevados y lo podrían ser aún más si se considera que, como se indicó, la velocidad promedio

de los camiones 785C que tienen buena performance es menor a la que deberían tener debido a que no pueden ir a la velocidad óptima por “esperar” a los 785D que tienen delante en el circuito. Todos estos factores, viniendo un modelo “nuevo” de camión ven afectada la fidelidad del cliente para con el fabricante, Caterpillar, es deber de los especialistas técnicos de la marca corregir los percances lo más pronto posible.

- Se utilizó la Metodología de Diagnóstico de Caterpillar para analizar y abordar el problema o los problemas que causan el bajo desempeño de los 785D. De lo reportado por el cliente, los camiones 785D tienen menor presión de refuerzo (5 psi menos que la nominal) y durante algunos tramos de subida de la ruta, no trabajan en modo mando directo; sino, convertidor. Estos problemas se originan por fugas en el sistema de admisión, conexiones eléctricas defectuosas, bajas presiones de aceite hidráulico de señal o piloto para activación de solenoides y válvulas, o, también, a componentes defectuosos. Se señalan finalmente algunos parámetros a medir y acciones correctivas a tomar para solucionarlos: reemplazos o reparaciones de los componentes afectados, según su estado. Es importante tener en cuenta que, debido a que aún no es posible acceder a la operación minera, no se han efectuado evaluaciones en campo y, por ende, tampoco, reparaciones.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Aaron. (2016). *Sketchfab*. Obtenido de Caterpillar 785 stripped: <https://sketchfab.com/3d-models/caterpillar-785c-stripped-19a61a063fec448c9e690d3c2e6f8fd3>
- Bridgestone. (2016). *Data book: Off-the-road tires*.
- Caterpillar. (2010). *CAT 785C Mining Truck Specalog*. Peoria.
- Caterpillar. (2010). *CAT 785D Mining Truck Specalog*. Peoria.
- Caterpillar. (Mayo de 2014). *YouTube*. Obtenido de Caterpillar Global Mining channel: <https://www.youtube.com/watch?v=L0LE1skP-Po>
- Caterpillar. (2019). *Caterpillar Performance Handbook*. Peoria.
- Caterpillar. (2019). *Performance Data [EM0389]*.
- Caterpillar. (2019). *Performance Data [EM1270]*.
- Caterpillar. (Diciembre de 2019). *TMI web*. Obtenido de <https://tmiwebclassic.cat.com/tmi/servlet/>
- Caterpillar. (Julio de 2020). *SIS 2.0*. Obtenido de <https://sis2.cat.com/>
- Daniel. (Abril de 2020). *YouTube*. Obtenido de Daniel Mecatec channel: <https://www.youtube.com/watch?v=ueAnHplb1PE>
- Dieselnet. (Diciembre de 2017). *Emission Standards*. Obtenido de United States: Nonroad Diesel Engines: <https://dieselnet.com/standards/us/nonroad.php#tier3>
- Environmental Protection Agency. (2016). *Nonroad Compression-Ignition Engines: Exhaust Emission Standards*. Washington D.C.: EPA.
- Grupo El Comercio. (9 de Setiembre de 2017). *Diario Gestión*. Obtenido de <https://gestion.pe/economia/minera-shougang-hierro-peru-invertira-us-1-500-ampliacion-planta-desalinizadora-143948-noticia/>
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Material de Diplomatura de Ingeniería de Maquinaria Pesada. (2018). Lima, Perú: PUCP.
- Michelin. (Julio de 2020). *Michelin*. Obtenido de Michelin XDR3: https://www.michelinearthmover.com/esl_la/Bienvenido/Tires2/MICHELIN-XDR-3?f=s
- Norton, R. (2009). *Diseño de Maquinaria*. México, D.F.: McGraw Hill.
- Shougang. (Octubre de 2019). *Shougang*. Obtenido de Empresa: <https://www.shougang.com.pe/empresa.htm>
- Weather Spark. (Julio de 2020). *Weatherspark*. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/22204/Clima-promedio-en-San-Juan-de-Marcona-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o>