

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica

Tesis

**Diseño de plan de mantenimiento RCM basado en
el análisis por tribología del motor C32 de camiones
Caterpillar 777F y 777G**

Mauricio Ari Ari

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecánico

Arequipa, 2024

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Dr. Felipe Gutarra Meza
Decano de la Facultad de Ingeniería

DE : Mg. Jonathan Alain Sánchez Paredes
Asesor de trabajo de investigación

ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación

FECHA : 22 de abril de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

DISEÑO DE PLAN DE MANTENIMIENTO RCM BASADO EN EL ANÁLISIS POR TRIBOLOGÍA DEL MOTOR C32 DE CAMIONES CATERPILLAR 777F Y 777G

Autor:

MAURICIO ARI ARI – EAP. Ingeniería Mecánica

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 15 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO

- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores SI NO
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**):

- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

Mg. Jonathan Alain Sánchez Paredes

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	xv
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1 Planteamiento y formulación problema	1
1.1.1 Definición del problema.....	1
1.1.2 Formulación del problema	1
1.1.3 Problemas específicos	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Justificación	2
1.3.1 Justificación económica	2
1.3.2 Justificación operativa.....	2
1.3.3 Justificación social	3
1.4 Hipótesis	3
1.5 Variable e indicadores.....	3
CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Antecedentes de la investigación	4
2.1.1 Antecedentes internacionales	4
2.1.2 Antecedentes nacionales	4
2.2 Bases teóricas.....	5
2.2.1 Minera a tajo abierto	5
2.2.2 Camiones de acarreo	8
2.2.3 Motor CAT C32.....	10
2.2.4 Mantenimiento industrial	13
2.2.5 Plan de mantenimiento.....	16
2.2.6 Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)	19
2.2.7 Mantenimiento basado en la condición.....	24

2.2.8	Desarrollo de la metodología RCM	24
2.2.9	Tribología.....	26
2.2.10	Indicadores de clase mundial	28
CAPÍTULO III.....		30
METODOLOGÍA		30
3.1	Método y alcance de la investigación	30
3.1.1	Métodos de la investigación.....	30
3.2	Alcances de la investigación	30
3.3	Alcances.....	30
3.3.1	Diseño de la investigación	30
3.3.2	Población y muestra.....	31
CAPÍTULO IV		32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		32
4.1	Análisis de la problemática.....	32
4.1.1	Resultados obtenidos en el año 2022	32
4.2	Proceso de diseño de plan de mantenimiento RCM.....	71
4.2.1	RCM en alta temperatura de escape.....	73
4.2.2	RCM en fisuras o rajaduras en la culata.....	75
4.2.3	RCM en pérdida de potencia y apagado	77
4.2.4	Plan de mantenimiento RCM recomendado	79
4.2.5	Evaluación de la solución propuesta.....	82
4.2.6	Evaluación económica	85
CAPÍTULO V.....		86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		86
5.1	Conclusiones.....	86
5.2	Recomendaciones	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		88
ANEXOS		93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Variables e indicadores	3
Tabla 2.	Especificaciones técnicas para el camión	9
Tabla 3.	Especificaciones técnicas del motor.	11
Tabla 4.	Tabla general de los eventos ocurridos en el año 2022.....	37
Tabla 5.	Tabla de fallas de flota 777F/G del mes de febrero.	38
Tabla 6.	Eventos ocurridos de motor C32 ACERT en el mes de febrero del año 2022.....	39
Tabla 7.	Tabla de fallas de flota 777F/G del mes de marzo.....	40
Tabla 8.	Eventos ocurridos del motor C32 ACERT en el mes de marzo del año 2022.	41
Tabla 9.	Tabla de fallas de flota 777F/G del mes de septiembre.	42
Tabla 10.	Eventos ocurridos del motor C32 ACERT en el mes de septiembre del año 2022.	43
Tabla 11.	Modos de falla del mes de febrero en motores C32 ACERT.....	44
Tabla 12.	Modos de falla del mes de marzo en motores C32 ACERT.	45
Tabla 13.	Modos de falla del mes de septiembre en motores C32 ACERT.....	46
Tabla 14.	Historial de análisis de aceite del motor 777F-1110-0042.....	47
Tabla 15.	Historial de análisis de aceite del motor 777F-1110-0034.....	48
Tabla 16.	Historial de análisis de aceite del motor 777G-1110-0067.....	50
Tabla 17.	Historial de análisis de aceite del motor 777F-1110-0043.....	52
Tabla 18.	Historial de análisis de aceite del motor 777G-1110-0064.....	54
Tabla 19.	Historial de análisis de aceite del motor 777F-1110-0038.....	57
Tabla 20.	Historial de análisis de aceite del motor 777F-1110-0045.....	60
Tabla 21.	Historial de análisis de aceite del motor 777F-1110-0015.....	63
Tabla 22.	Historial de análisis de aceite del motor 777F-1110-0020.....	65
Tabla 23.	Historial de análisis de aceite del motor 777F-1110-0067.....	67
Tabla 24.	Historial de análisis de aceite del motor 777F-1110-0041.....	69
Tabla 25.	Plan de mantenimiento RCM para motor C32 ACERT que registran alta temperatura en el escape.	74
Tabla 26.	Plan de mantenimiento RCM para motor C32 ACERT que registran fisuras o rajaduras en la culata.....	76
Tabla 27.	Plan de mantenimiento RCM para motor C32 ACERT que registran pérdida de potencia y apagado.....	78
Tabla 28.	Plan de mantenimiento RCM para motor C32 ACERT según PM's.....	80
Tabla 29.	Impacto porcentual del sistema de motor en la disponibilidad de la flota de camiones 777F/G en el año 2022.....	82

Tabla 30.	Inversión económica	85
Tabla 31.	Inversión económica	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Perforadora de agujeros para explosivos CAT 6540.....	6
Figura 2.	Pala eléctrica CAT 7495.	7
Figura 3.	Camión CAT 777.	8
Figura 4.	Camión de acarreo CAT 777F/777G.	9
Figura 5.	Motor CAT C32 de camión 777F/G..	10
Figura 6.	Sistema de refrigeración Motor C32 en Camión 777F/G.	12
Figura 7.	Cambios en las técnicas de mantenimiento.	
Figura 8.	Disponibilidad de la flota camión Caterpillar 777F en el año 2022.....	32
Figura 9.	Confiabilidad del Motor C32 ACERT en el camión 777F/G en el año 2022	33
Figura 10.	Campana de Gauss, resultados de disponibilidad en el año 2022.....	34
Figura 11.	Distribución de indicadores de confiabilidad según el estadístico de Kolmogórov-Smirnov en el año 2022.....	36
Figura 12.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777F-1110-0042.....	48
Figura 13.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777F-1110-0042.....	49
Figura 14.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777G-1110-0067.	51
Figura 15.	Manifold de escape lado derecho e izquierdo.....	51
Figura 16.	Superficie de las culatas lado combustión.	51
Figura 17.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777F-1110-0067.....	52
Figura 18.	(a) Culata lado RH y (b) culata lado LH del motor 777F-1110-0043.....	53
Figura 19.	Superficie de la culata donde trabaja el cilindro 4.	53
Figura 20.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777G-1110-0064.	55
Figura 21.	Fuga de aceite por empaque de culata LH.	55
Figura 22.	(a) culata RH y (b) culata LH del motor 777G-1110-0064.....	56
Figura 23.	Rajaduras entre los asientos de las válvulas.....	56
Figura 24.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777F-1110-0038.....	58
Figura 25.	(a) culata LH y (b) culata RH del motor 777F-1110-0038.	58
Figura 26.	Superficie de las culatas de combustión.	59
Figura 27.	Cilindros del motor 777f-1110-0038.	59
Figura 28.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777F-1110-0045.....	61
Figura 29.	Metales de bancada.	61
Figura 30.	Cojinete de biela.	61
Figura 31.	(a) culata RH y (b) Culata LH del motor 777F-1110-0045.....	62
Figura 32.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777F-1110-0015.....	63

Figura 33.	. (a) culata RH y (b) Culata LH del motor 777F-1110-0015.....	64
Figura 34.	(a) Superficie de culata lado combustión, (b) Cojinetes de biela.....	64
Figura 35.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777F-1110-0020.....	65
Figura 36.	Cilindros de combustión.....	66
Figura 37.	(a) Culata RH y (b) culata LH del motor 777F-1110-0020.....	66
Figura 38.	Superficie de culata lado combustión.....	67
Figura 39.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777F-1110-0067.....	68
Figura 40.	(a) Superficie de culata lado de combustión, (b) Cilindro de combustión.....	68
Figura 41.	Nivel de sustancias presentes en el motor 777F-1110-0041.....	69
Figura 42.	Culata trasera del motor 777F-1110-0041.....	70
Figura 43.	Superficie de culata lado combustión.....	70
Figura 44.	Disponibilidad del Motor C32 ACERT luego de aplicar el plan de mantenimiento RCM en el camión 777F/G.....	83

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación titulado “Diseño de plan de mantenimiento RCM basado en el análisis por tribología del motor C32 de camiones Caterpillar 777F y 777G”, se tuvo como objetivo el diseñar un plan de mantenimiento basado en el análisis por tribología de los motores C32, el cual podría mejorar algunos indicadores de clase mundial como son la disponibilidad mecánica y física de los camiones 777F/G. En el trabajo se evaluó resultados y eventos que sucedieron durante el año 2022, en donde se los KPI's de clase mundial como la disponibilidad (física y mecánica) y la confiabilidad (MTBF y MTTR) demostraron el impacto en la flota de camiones 777F/G que generaron los eventos relacionados al sistema de motor C32 ACERT; además, según el análisis estadístico realizado (Campana de Gauss y el estadístico de Kolmogórov-Smirnov) se demostró que los datos obtenidos pertenecen a una distribución normal y permiten validar la alternativa como investigación para poder solucionar el problema presentado. Luego se hizo el análisis de los principales casos de fallas, modos de fallas identificados, finalmente se desarrolló el análisis por tribología de los motores C32 ACERT. A partir de los resultados obtenidos, se diseñó el plan de mantenimiento RCM recomendado, que tiene como potencial eliminar o evitar los principales eventos encontrados en el sistema de motor de la flota de camiones 777F/G.

Palabras clave: mantenimiento RCM, tribología, disponibilidad, confiabilidad.

ABSTRACT

In the research work "Design of RCM maintenance plan based on the tribology analysis of the C32 engine of Caterpillar 777F and 777G trucks". The objective was to design a maintenance plan based on the tribology analysis of the C32 engines, which could improve some world class indicators such as the mechanical and physical availability of the 777F/G trucks. The work evaluated results and events that occurred during the year 2022, where according to the world class KPI's such as availability (Physical and Mechanical) and reliability (MTBF and MTTR) showed the impact on the fleet of 777F/G trucks generated by the events related to the C32 ACERT engine system, Furthermore, according to the statistical analysis performed (Gaussian Bell and Kolmogorov-Smirnov statistic), it was shown that the data obtained belong to a normal distribution and allow validating the alternative as a research to solve the problem presented. Then, the analysis of the main cases of failures, failure modes identified, and finally, the analysis by tribology of the C32 ACERT engines was developed. From the results obtained, the recommended RCM maintenance plan was designed, which has the potential to eliminate or avoid the main events found in the engine system of the 777F/G truck fleet.

Keywords: RCM maintenance, tribology, availability, reliability.