



Desarrollo de un modelo de confiabilidad basado en datos para la mejora de costos operativos: Aplicación en sistemas de ruedas y frenos de la flota Airbus A320 de JetSMART

Eduardo Andrés Inostroza Fernández

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Aeroespacial

Profesor guía:
Dr.- Ing. Alejandro López Telgie
Msc. – Ing. Mauricio Cancino Queirolo

Julio 2026
Concepción, Chile

Agradecimientos

Expreso mi más profunda gratitud a las personas que me acompañaron en esta etapa académica.

A mis profesores guía, especialmente a Mauricio Cancino por su orientación constante a lo largo del desarrollo de este estudio.

Al equipo de JetSMART por la oportunidad, el recibimiento y la disposición para enseñar, apoyar y compartir experiencias, especialmente a Salomón Crisóstomo por la paciencia, confianza y permanente disposición para enseñar.

A mi familia por su apoyo incondicional y estar presentes a lo largo de todo este tiempo.

Resumen

JetSMART Airlines SpA es una aerolínea de bajo costo que opera en Chile, Argentina, Perú y Colombia y gestiona actualmente el mantenimiento de ruedas y frenos de su flota Airbus A320 mediante criterios de remoción conservadores y no diferenciados por modo de falla, lo que limita la comprensión de las causas técnicas de las remociones y dificulta decisiones de mantenimiento fundamentadas. El presente trabajo desarrolla una metodología de análisis de confiabilidad basada en datos operacionales para apoyar la toma de decisiones de mantenimiento en componentes aeronáuticos, aplicada a los sistemas de ruedas y frenos de la flota Airbus A320 de JetSMART. La metodología integra caracterización de remociones, análisis FMECA, evaluación de desempeño respecto de referencias de vida en ciclos, ajuste de distribuciones de confiabilidad, desarrollo de modelos predictivos de desgaste y definición de estrategias de mejora orientadas a modos de falla críticos.

El análisis de los modos de falla más críticos y los resultados de las propuestas muestran que las principales oportunidades se concentran en las ruedas, especialmente en cortes donde se propone una priorización del seguimiento de ciertas secuencias operacionales y bases de donde se puede estimar un ahorro potencial de USD 39.788 bajo un escenario conservador de recuperación del 25 % de la vida operacional no utilizada. Y desgaste normal en los frenos, donde se detalla la aplicación de un modelo predictivo basado en mediciones de su parámetro indicador de desgaste para proyectar demanda mensual de componentes y apoyar decisiones de abastecimiento.

La metodología desarrollada confirma la relevancia del modelamiento de confiabilidad como herramienta para estructurar decisiones de mantenimiento en la industria aeroespacial, especialmente en componentes cuyo deterioro depende del uso acumulado y cuya condición puede evaluarse mediante parámetros cuantificables.

Palabras clave: confiabilidad, mantenimiento predictivo, FMECA, RCM, ruedas y frenos, Airbus A320.

Abstract

JetSMART Airlines SpA is a low-cost airline operating in Chile, Argentina, Peru, and Colombia. The maintenance of the wheels and brakes installed on its Airbus A320 fleet is currently managed using conservative removal criteria that are not differentiated by failure mode. This limits the understanding of the technical causes underlying component removals and hinders well-founded maintenance decision-making. This study develops an operational data-driven reliability analysis methodology to support maintenance decisions for aeronautical components, applied to the wheel and brake systems of JetSMART's Airbus A320 fleet. The methodology integrates removal data characterization, Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA), performance assessment against cycle-based service-life benchmarks, reliability distribution fitting, predictive wear modeling, and the definition of improvement strategies focused on critical failure modes.

The analysis of the most critical failure modes and the proposed strategies indicate that the main improvement opportunities are associated with wheels, particularly removals caused by cuts. For this failure mode, the study proposes prioritizing the monitoring of specific operating sequences and stations. Under a conservative scenario involving the recovery of 25% of the unused operational life, the potential savings are estimated at USD 39,788. In the case of brakes, the main opportunity is associated with normal wear. A predictive model based on measurements of the brake wear indicator is implemented to forecast monthly component demand and support maintenance and supply planning decisions.

The developed methodology confirms the relevance of reliability modeling as a tool for structuring maintenance decisions in the aerospace industry, particularly for components whose deterioration depends on accumulated usage and whose condition can be assessed through quantifiable parameters.

Keywords: reliability, predictive maintenance, FMECA, RCM, wheels and brakes, Airbus A320.

Contenidos

Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tablas.....	x
Nomenclatura	xi
Símbolos griegos	xi
Subíndices	xii
1 Introducción	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Identificación de la problemática.....	2
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Metodología.....	7
1.5.1 Objetivo 1: Caracterizar el comportamiento de las tasas de remoción de los componentes.....	7
1.5.2 Objetivo 2: Evaluar el desempeño operativo de los componentes	7
1.5.3 Objetivo 3: Determinar al menos dos modos de falla críticos	7
1.5.4 Objetivo 4: Diseñar estrategias para la disminución de costos operativos.....	7
1.5.5 Objetivo 5: Determinar el impacto financiero del modelo propuesto	7
2 Marco teórico	7
2.1 Definiciones.....	7
2.2 Marco normativo.....	8
2.2.1 Otras normativas	8
2.3 Sobre JetSMART Airlines SpA.....	8
2.3.1 Flota Airbus A320	9
2.3.2 Flota Airbus A321	9
2.4 Sobre los componentes de ruedas y frenos.....	9
2.4.1 ATA 32	9
2.4.2 Ruedas	10
2.4.3 Neumáticos.....	10
2.4.4 Frenos.....	11
3 Desarrollo de la metodología FMECA.....	12
3.1 Planificación del análisis.....	12
3.2 Estructura del sistema	12
3.2.1 Contexto operacional.....	13

3.3	<i>Determinación de los modos de falla</i>	13
3.3.1	<i>Modos de falla y fallas funcionales Ruedas</i>	16
3.3.2	<i>Modos de falla y fallas funcionales Frenos</i>	17
3.4	<i>Causas de falla</i>	17
3.4.1	<i>Causas de falla de ruedas</i>	18
3.4.2	<i>Causas de falla de frenos</i>	23
☐	<i>Wear</i>	23
☐	<i>Leaks</i>	24
3.5	<i>Efectos y detección de las fallas</i>	25
3.6	<i>Evaluación de las fallas</i>	25
4	<i>Modelamiento de Confiabilidad</i>	29
4.1	<i>Estimación por máxima verosimilitud y selección de la distribución</i>	29
4.2	<i>Implementación de curvas de confiabilidad para ruedas</i>	32
4.3	<i>Implementación de curvas de confiabilidad para frenos</i>	35
4.4	<i>Confiabilidad general</i>	35
4.5	<i>Evaluación de remplazos preventivos</i>	36
5	<i>Desarrollo de modelos predictivos para remociones y desgaste de componentes</i>	37
5.1	<i>Introducción al enfoque predictivo</i>	37
5.2	<i>Parámetros de medición de condición</i>	37
5.3	<i>Preparación y limpieza de datos</i>	38
5.4	<i>Modelos posibles de implementación</i>	39
5.4.1	<i>Modelo de desgaste promedio</i>	39
5.4.2	<i>Modelo de regresión polinómica</i>	39
5.4.3	<i>Modelo de Random Forest</i>	40
5.5	<i>Variables de ingreso al modelo</i>	40
5.6	<i>Agrupación temporal de los datos</i>	40
5.7	<i>Comparación de modelos</i>	41
5.8	<i>Modelo implementado y reglas</i>	42
5.9	<i>Convergencia y estabilidad del modelo</i>	43
5.10	<i>Operación del modelo y predicción por período</i>	44
6	<i>Estrategias de mejora y tareas proactivas</i>	44
6.1	<i>Criterios para la selección de estrategias de mejora</i>	45
6.2	<i>Estrategias para el desgaste normal de las ruedas</i>	45
6.3	<i>Estrategias para cortes por FOD</i>	46

6.4	<i>Estrategias para vibraciones.....</i>	50
6.5	<i>Estrategias para el desgaste normal de los frenos.....</i>	50
6.6	<i>Estrategias para fugas hidráulicas</i>	51
6.7	<i>Estrategias para la planificación del abastecimiento de frenos</i>	51
7	<i>Cuantificación de ahorro potencial.....</i>	54
7.1	<i>Alcance.....</i>	54
7.2	<i>Cuantificación económica potencial de remociones abordables por cortes por vida no utilizada</i>	54
7.3	<i>Cuantificación económica potencial de remociones abordables por vibraciones por vida no utilizada</i>	57
7.4	<i>Relación del ahorro potencial con el costo anual de componentes</i>	58
7.5	<i>Efecto proyectado sobre la vida operacional.....</i>	59
8	<i>Conclusiones</i>	60
	<i>Referencias</i>	1

Lista de Figuras

Figura 1-1. Curvas normales centradas en la mediana de ciclos de remoción de ruedas NLG, según AOC.	4
Figura 1-2. Curvas normales centradas en la mediana de ciclos de remoción de ruedas MLG A320, según AOC.	4
Figura 1-3. Curvas normales centradas en la mediana de ciclos de remoción de ruedas MLG A321, según AOC.	5
Figura 1-4. Curvas normales centradas en la mediana de ciclos de remoción de frenos, según AOC.	5
Figura 2-1. Modelo A320 CEO matrícula CC-AWA [18].	9
Figura 2-2. Modelo A320 NEO matrícula CC-AWJ [18].	9
Figura 2-3. Modelo A321 NEO matrícula CC-AWS [18].	9
Figura 2-4. IPC NLG ATA 32-21 [20]	10
<i>Figura 2-5. IPC MLG ATA 32-11 [20]</i>	<i>10</i>
Figura 2-6. IPC Rueda de nariz ATA 32-11-41 [22].	10
Figura 2-7. Cuerdas presentes en la carcasa del neumático [23].	11
Figura 2-8. Conjunto de freno [24].	12
Figura 3-1. Diagrama jerárquico del alcance del estudio.	13
Figura 3-2. Distribución de remociones de ruedas NLG en JAT.	14
Figura 3-3. Diagrama de Pareto de remociones NNW de ruedas NLG en JAT.	14
Figura 3-4. Distribución de remociones de ruedas NLG en JES.	14
Figura 3-5. Diagrama de Pareto de remociones NNW de ruedas NLG en JES.	14
Figura 3-6. Distribución de remociones de frenos en JEC.	14
Figura 3-7. Diagrama de Pareto de remociones NNW de frenos en JEC.	14
Figura 3-8. Tasa de remociones NNW técnicas de ruedas por exposición operacional según AOC de remoción.	15
Figura 3-9. Tasa de remociones NNW técnicas de frenos por exposición operacional según país de remoción.	15
Figura 3-10. Touchdown de la aeronave CC-AWA en Balmaceda [25].	18
Figura 3-11. Remociones Wear de neumáticos NLG según ciclos y densidad promedio (AOC JAT, JES, JAP).	20
Figura 3-12 Remociones Wear de neumáticos MLG A320 según ciclos y densidad promedio (AOC JAT, JES y JAP).	21
Figura 3-13 Remociones Wear de neumáticos MLG A321 según ciclos y densidad promedio (AOC JAT, JES y JAP)	21
Figura 3-14. Remociones de neumáticos NLG según proporción de ciclos realizados en Colombia (densidad entre 0,0019-0,0022 [slug/ft ³])	22
Figura 3-15. Remociones de neumáticos MLG según proporción de ciclos realizados en Colombia (densidad entre 0,0019-0,0022 [slug/ft ³])	22
Figura 3-16. Remociones Wear de frenos según ciclos y densidad promedio en posiciones interiores.	23

Figura 3-17. Remociones Wear de frenos según ciclos y densidad promedio en posiciones exteriores.....	23
Figura 3-18. Proporción de aterrizajes en bases seleccionadas según CSI del freno en su vida operativa.	24
Figura 3-19. Matriz FMECA con modos de falla.....	26
Figura 4-1. Confiabilidad por desgaste normal de ruedas NLG según AOC.....	33
Figura 4-2. Confiabilidad por desgaste normal de ruedas MLG de aeronaves A320 según AOC.....	33
Figura 4-3. Confiabilidad por desgaste normal de ruedas MLG de aeronaves A321 según AOC.....	33
Figura 4-4. Confiabilidad frente a cortes FOD en ruedas NLG según AOC.....	34
Figura 4-5. Confiabilidad frente a cortes FOD en ruedas MLG de aeronaves A320 según AOC.....	34
Figura 4-6. Confiabilidad frente a cortes FOD en ruedas MLG de aeronaves A321 según AOC.....	34
Figura 4-7. Confiabilidad por desgaste normal de frenos según AOC y posición	35
Figura 5-1. Condición aeronavegable y no aeronavegable según posición del indicador de desgaste del freno [35].	37
Figura 5-2. Comparación entre la longitud medida y estimada del indicador de desgaste para un freno de la matrícula AWA.....	42
Figura 5-3. Comparación entre la longitud medida y estimada del indicador de desgaste sin aplicar la regla de corrección en pin 3 de la matrícula AWB.....	43
Figura 5-4. Comparación entre la longitud medida y estimada del indicador de desgaste aplicando la regla de corrección en pin 3 de la matrícula AWB.	43
Figura 5-5. Variación del error del modelo según la cantidad de mediciones disponibles.	43
Figura 6-1. IARE ponderado por 1.000 exposiciones para JAT ruedas NLG según base y rango de ciclos.....	47
Figura 6-2. IARE ponderado por 1.000 exposiciones para JAT ruedas MLG A320 según base y rango de ciclos.	48
Figura 6-3. IARE ponderado por 1.000 exposiciones para JAT ruedas MLG A321 según base y rango de ciclos.	48
Figura 6-4. Remociones en Argentina por vibración según matrícula de aeronave.	50
Figura 7-1. Valor económico potencial recuperable por componente y escenario.	56
Figura 7-2. Valor económico potencial recuperable por vibraciones y escenario.....	57
Figura 7-3. Ahorro potencial relativo sobre el costo anual equivalente por escenario de recuperación.....	58
Figura 7-4. Efecto proyectado de la recuperación de vida no utilizada sobre la mediana de CSI en MLG A321.....	59

Lista de Tablas

Tabla 1-1. CSI de referencia por AOC.....	3
Tabla 3-1. Distribución porcentual de ciclos acumulados por país de operación, según AOC de remoción, para ruedas NLG.	16
Tabla 3-2. Número de Prioridad de Riesgo por componente, modo de falla y AOC.....	28
Tabla 4-1. Distribuciones seleccionadas para los modos de falla de ruedas según AOC y tipo de tren.....	31
Tabla 4-2 Distribuciones seleccionadas para los modos de falla de frenos según AOC y posición.	32
<i>Tabla 5-1. Comparación del error de los modelos evaluados para la estimación del desgaste de frenos.....</i>	<i>41</i>
Tabla 5-2. Comparación del error absoluto total según la representación temporal de la densidad atmosférica.....	41
Tabla 5-3. Proyección mensual de remociones de frenos por desgaste normal y AOC.	44
Tabla 6-1. Stock de seguridad por AOC según nivel de servicio objetivo para frenos.....	53
Tabla 7-1. Fracción de vida no utilizada en remociones abordables por AOC y componente.	55

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidad de medida
F	Fuerza	lbf
g	Aceleración de gravedad	ft/s ²
H	Altura geométrica	ft
h	Altura geopotencial	ft
I	Momento de Inercia	slug·ft ²
L	Longitud	ft
m	Masa	slug
PP	Porcentaje Pérdida	-
PR	Porcentaje Remociones	%
r	radio	ft
S	Deslizamiento	ft
T	Temperatura	K
V	Velocidad	kt

Símbolos griegos

Símbolo	Descripción	Unidad de medida
γ	Gradiente atmosférico	K/ft
μ	Coeficiente de fricción.	-
ρ	Densidad	slug/ft ³
Φ	Función de distribución normal acumulada	-

Subíndices

0	: Condición a nivel del mar.
AOC	: Air Operator Certificate.
AOG	: Aircraft on Ground.
b	: Base aeroportuaria.
BD	: Budget de referencia.
COND	: Condicional.
DAMAGED	: Modo de falla asociado a daños estructurales.
e	: terrestre.
EXPONENCIAL	: Distribución Exponencial.
f	: Modo de falla.
LEAKS	: Modo de falla asociado a fugas hidráulicas.
Limit	: Valor limite.
Lognormal	: Distribución Lognormal.
m	: Valor mediano.
p	: Posición.
Pre	: Preventivo.
Prom	: Promedio.
r	: Costo de reparación y logística.
Ref	: Valor de referencia.
TD	: Touchdown.
TOTAL	: Total de un conjunto.
v	: Máxima Verosimilitud.
WEAR	: Modo de falla asociado al desgaste normal.
Weibull	: Distribución Weibull.

Glosario:

AIC	:Akaike Information Criterion.
AIP	:Aeronautical Information Publication.
AMM	:Aircraft Maintenance Manual.
AOG	:Aircraft on Ground.
AOC	:Air Operator Certificate.
CMA	:Centro de mantenimiento aeronáutico.
CMM	:Component Maintenance Manual.
CSI	:Cycles Since Installation.
FOD	:Foreign Object Debris.
IEM	:Iowa Environmental Mesonet.
IPC	:Illustrated Parts Catalogue.
NNW	: Non-normal Wear.
RCM	:Reliability-Centered Maintenance.
TAS	:True Airspeed.

1 Introducción

1.1 Contexto

La gestión de activos en la industria aerocomercial contemporánea ha experimentado una transformación profunda desde su concepción formal a mediados del siglo XX, desplazando el enfoque tradicional de mantenimiento reactivo hacia estrategias basadas en la ingeniería de confiabilidad. Este cambio se ve reforzado por el hecho de que el mantenimiento aeronáutico ha evolucionado más que casi cualquier otra disciplina gerencial dentro de este sector [1], impulsado principalmente por el aumento en la complejidad de los activos, el interés por aumentar la disponibilidad operativa de las aeronaves y la presión por la disminución de costos asociados al mantenimiento. Bajo estas condiciones, los análisis de confiabilidad se sitúan como una herramienta fundamental para comprender el comportamiento de los sistemas a lo largo del tiempo, permitiendo tomar decisiones de mantenimiento basadas en datos, riesgo y probabilidad de falla. La confiabilidad corresponde a la probabilidad de que un sistema desempeñe su función sin fallas, bajo condiciones establecidas y durante un período determinado. [2] Esta definición adquiere especial relevancia al considerar que, en componentes complejos, la antigüedad operacional no siempre mantiene una relación directa con la probabilidad de todos sus modos de falla [1]. Esta realidad evidencia que el mantenimiento basado únicamente en criterios temporales no resulta adecuado para todos los modos de falla, haciendo necesario un análisis detallado del comportamiento de los componentes, con el fin de asegurar que estos operen de manera eficiente y segura dentro de su contexto operacional específico. Por lo anterior, el análisis debe identificar las causas técnicas y los patrones asociados a las remociones de los componentes en servicio, con el fin de sustentar medidas de mantenimiento aplicables.

La distinción entre el control de calidad tradicional y la ingeniería de confiabilidad resulta clave para comprender por qué una organización aeronáutica, como una aerolínea, no puede depender únicamente de inspecciones visuales y del cumplimiento de estándares formales. El control de calidad se orienta a verificar si un componente cumple con los atributos especificados por el fabricante en una condición determinada, evaluando su condición de forma estática y sin incorporar explícitamente el efecto del tiempo. Por otro lado, el análisis de confiabilidad se enfoca en el estudio de la ocurrencia de fallas en el dominio temporal, utilizando herramientas probabilísticas para modelar la incertidumbre inherente a los sistemas de ingeniería. Desde una perspectiva tecnológica, esta diferencia es fundamental, ya que este análisis permite transformar información técnica aislada con enfoque reactivo en una estrategia de mantenimiento centrada en los patrones de falla, que caracterizan a los activos modernos, sustentando decisiones de mantenimiento basadas en datos, probabilidad de falla y riesgo operacional.

La ausencia de modelos de confiabilidad adecuadamente desarrollados puede generar consecuencias económicas relevantes. Por ejemplo, una empresa proveedora de componentes que no cuente con métodos de confiabilidad bien formulados o que no los utilice de manera correcta durante la negociación de garantías con sus clientes puede

enfrentar costos elevados de reparación como resultado de remociones efectuadas antes de lo previsto, además de impactos negativos con los clientes asociados a la interrupción del servicio que prestan. [2] Desde la perspectiva de los operadores, como las aerolíneas, incluso considerando efectos de garantías, un modelo de confiabilidad correctamente establecido mantiene relevancia. Esto debido a que este análisis proporciona una base técnica para justificar la permanencia en servicio de determinados componentes, evitando descartes y remociones prematuras de unidades que aún conservan vida útil segura. Finalmente, el conocimiento más preciso del momento en que se espera la remoción de un componente permite una gestión más racional del *stock* de seguridad requerido para su reemplazo, tanto en cantidad como en disponibilidad según las bases operativas donde se proyecta su utilización. Todo lo anterior contribuye a que la aerolínea mantenga la continuidad operacional sin comprometer los márgenes de utilidad del negocio.

Sin embargo, este tipo de análisis no solo cumple un rol económico para la empresa, sino que también presenta una dimensión social y ambiental. Desde el punto de vista social, el análisis de confiabilidad contribuye a resguardar la seguridad de pasajeros y tripulación, al reducir el riesgo asociado a una gestión inadecuada de la vida en servicio de los componentes. Desde el punto de vista ambiental, evitar remociones anticipadas disminuye la generación de residuos y el consumo de recursos vinculados a su fabricación, reparación y logística [1].

Para complementar las inspecciones de condición, se requiere una metodología que caracterice los modos de falla y su comportamiento dentro del contexto operacional estudiado. En este sentido, el presente estudio se centra en el desarrollo de dicha metodología, que requiere el estudio sistemático de los distintos modos de falla de un componente de acuerdo con su operación, la identificación de sus causas subyacentes y la evaluación del impacto que estas generan sobre el sistema general, con el propósito final de clasificar las fallas según su probabilidad de ocurrencia y la severidad de sus consecuencias [3]. De esta forma, el análisis no se limita a una descripción estadística del comportamiento de los componentes, sino que debe incorporar criterios técnicos orientados a comprender las causas que originan las remociones en servicio para su consideración en análisis de confiabilidad y sustentar acciones correctivas que permitan aumentar el tiempo de uso de los componentes.

1.2 Identificación de la problemática

Como aplicación de la metodología propuesta, el presente trabajo considera como caso de estudio a la aerolínea JetSMART Airlines SpA, cuya competitividad en el mercado se sustenta en una gestión de costos rigurosa y en una elevada utilización de su flota. En particular, el análisis se enfoca en los componentes de ruedas y frenos operados por esta aerolínea, dado que actualmente su gestión utiliza mediciones periódicas de condición, inventarios de respaldo y criterios de remoción conservadores, adoptados para reducir el riesgo de indisponibilidad operacional de las aeronaves.

Esta gestión no se encuentra diferenciada por modo de falla ni incorpora probabilidades de remoción, lo que limita la comprensión de las causas técnicas y dificulta la toma de decisiones fundamentadas en el comportamiento real de los componentes. En este

contexto, la metodología busca establecer una base técnica para respaldar decisiones orientadas a la reducción de costos de estos componentes.

Al momento de realizar el estudio, la compañía opera una flota de 53 aeronaves, compuesta por 11 Airbus A320 CEO, 28 A320 NEO y 14 A321 NEO. Estas aeronaves acumulan, en promedio, entre 7 y 9 ciclos de vuelo diarios, condición que incrementa la exposición de los conjuntos de ruedas y frenos a procesos térmicos y de desgaste acumulativo [4].

Para comparar el desempeño de estos componentes, se utiliza el *Budget*, definido como el valor de vida en servicio esperado por la compañía. Para efectos del análisis, se denominan ruedas NLG a las instaladas en el tren de aterrizaje de nariz y ruedas MLG a las instaladas en los trenes de aterrizaje principales; estas últimas se diferencian entre las configuraciones A320 y A321. Este valor se expresa mediante los *Cycles Since Installation* (CSI), correspondientes al número de ciclos acumulados desde la instalación del componente, y se establece a partir del comportamiento histórico de las remociones, los criterios internos y los antecedentes técnicos del fabricante. La comparación considera los cuatro Certificados de Operador Aéreo (AOC): JAT para Chile, JES para Argentina, JAP para Perú y JEC para Colombia. Estos valores se presentan en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. CSI de referencia por AOC.

Componente	JAT (Chile) [ciclos]	JES (Argentina) [ciclos]	JAP (Perú) [ciclos]	JEC(Colombia) [ciclos]
Ruedas NLG	169	161	163	192
Ruedas MLG A320	293	288	301	364
Ruedas MLG A321	204	228	-	-
Frenos A320	1.677			
Frenos A321				

Para caracterizar el desempeño de las ruedas y frenos, se analizan los registros de remoción comprendidos entre el 1 de abril de 2025 y el 1 de abril de 2026. Para cada AOC, se representa la distribución de los CSI mediante una curva normal centrada en la mediana de remoción y se incorpora el *Budget* correspondiente, lo que permite visualizar la dispersión de los registros y su desviación respecto del valor de referencia. Los valores indicados sobre cada curva corresponden a las medianas de CSI. Las Figuras 1-1 a 1-4 presentan los resultados para ruedas NLG, ruedas MLG de aeronaves A320, ruedas MLG de A321, y frenos.

Las remociones se clasifican como desgaste normal (*Wear*), desgaste no normal (NNW) y remociones totales, correspondientes a la combinación de ambas categorías. La representatividad de la agrupación por AOC respecto de los países donde los componentes acumulan sus ciclos se evalúa en la Sección 3.3.

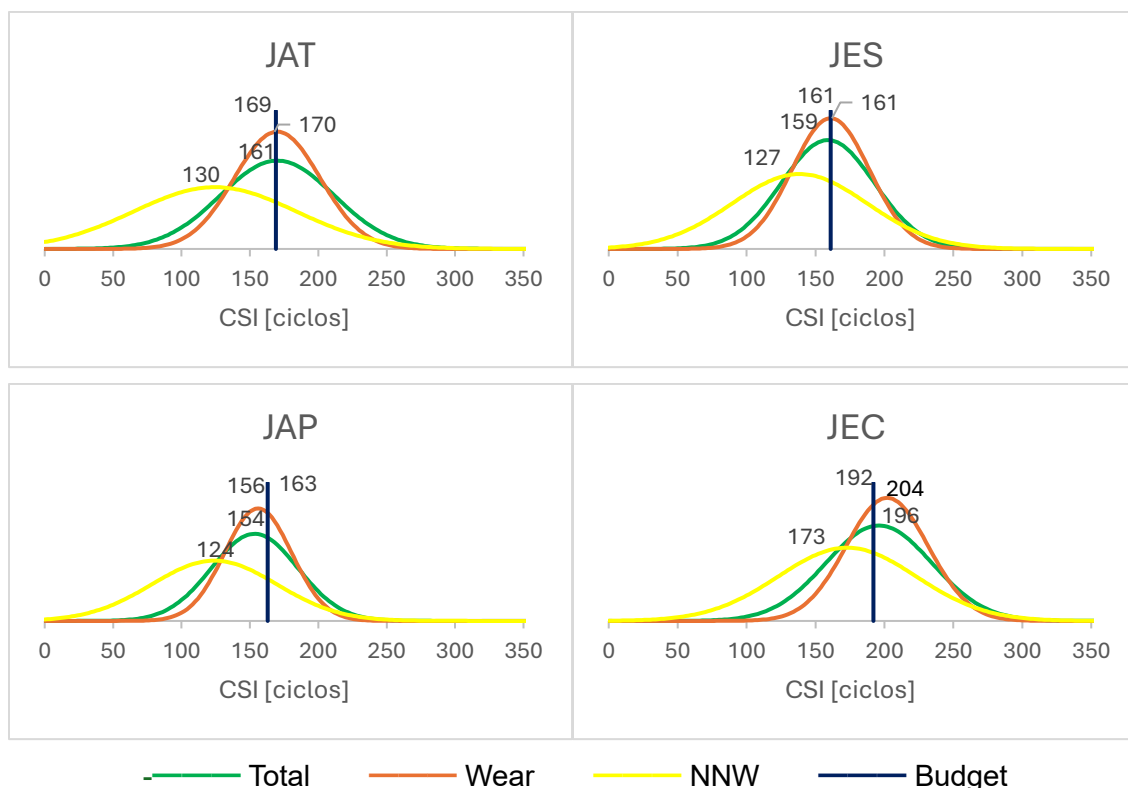


Figura 1-1. Curvas normales centradas en la mediana de ciclos de remoción de ruedas NLG, según AOC.

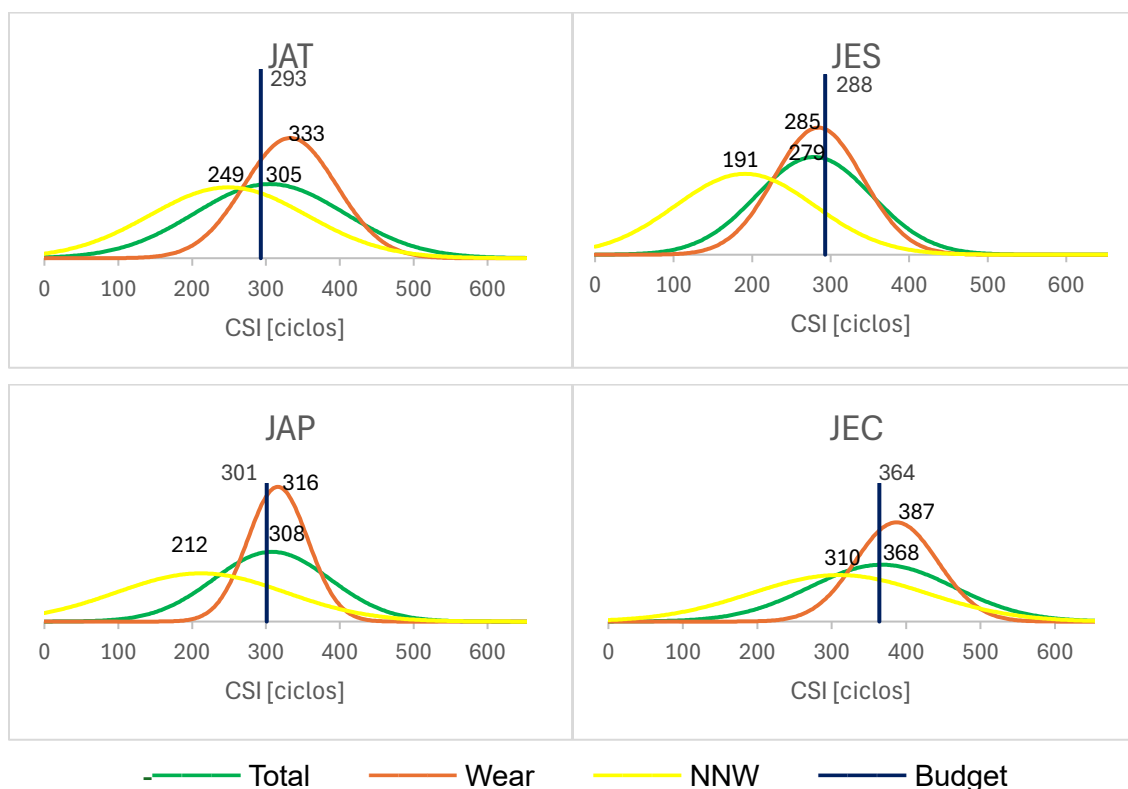


Figura 1-2. Curvas normales centradas en la mediana de ciclos de remoción de ruedas MLG A320, según AOC.

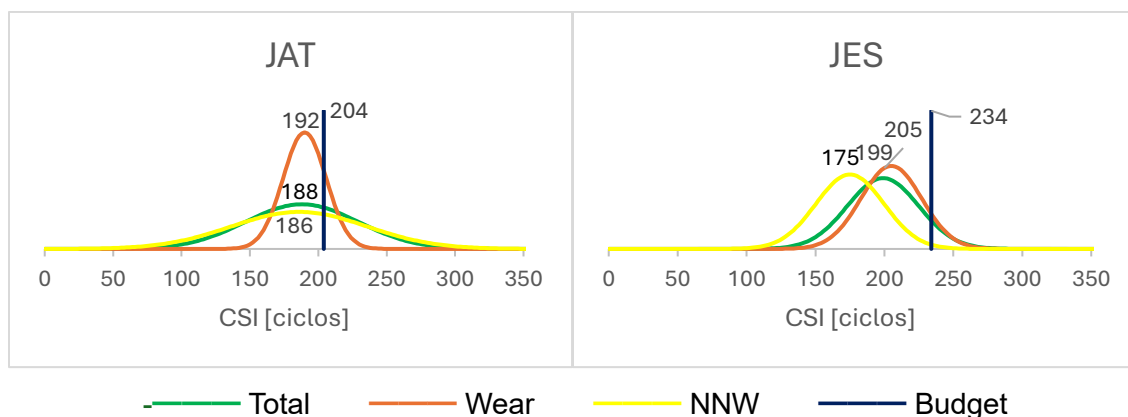


Figura 1-3. Curvas normales centradas en la mediana de ciclos de remoción de ruedas MLG A321, según AOC.

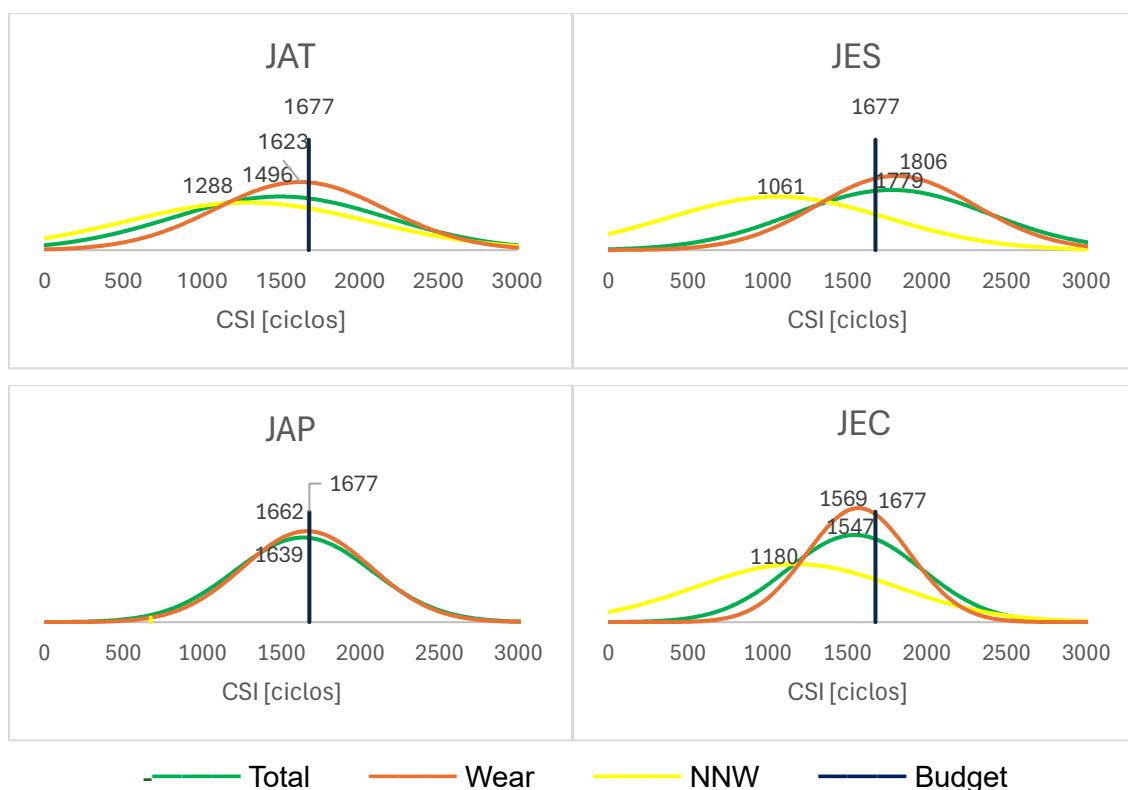


Figura 1-4. Curvas normales centradas en la mediana de ciclos de remoción de frenos, según AOC.

Las figuras muestran que las medianas de remoción total de las ruedas se encuentran bajo el *Budget* en Chile, Argentina y Perú, salvo las ruedas MLG A320 de Chile y Perú. En frenos, las principales desviaciones se observan en Chile y Colombia. No es posible atribuir estas diferencias a causas técnicas específicas mediante el análisis descriptivo, por lo que la metodología incorpora la identificación de modos de falla y factores operacionales para sustentar decisiones de mantenimiento.

El volumen mensual de reemplazos, comprendido entre 180 y 250 conjuntos de ruedas y entre 25 y 30 frenos, implica que incluso variaciones de 1 a 2 ciclos pueden generar efectos económicos acumulados.

1.3 Hipótesis

"La implementación de un modelo de confiabilidad basado en la caracterización técnica de la operación real de una empresa permite establecer las bases para una toma de decisiones estratégicas orientada a lograr en JetSMART una disminución del 5 % en los costos operativos asociados a remociones de componentes de ruedas y frenos, mediante la mitigación de fallas prematuras y la extensión de la permanencia en servicio."

La hipótesis se sustenta en las desviaciones observadas entre las medianas de remoción y los *Budgets* de referencia. La desviación porcentual ponderada se determina mediante la Ecuación (1), considerando la participación de cada AOC en las remociones totales.

$$PP = \sum_{j=1}^4 \left[\left(\frac{CSI_{BD,j} - CSI_{m,j}}{CSI_{BD,j}} \right) \cdot PR_j \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:

- j : AOC evaluado.
- PP : desviación porcentual ponderada respecto del *Budget*.
- CSI_{BD} : CSI de referencia definido por el *Budget*.
- CSI_m : mediana del CSI registrado.
- PR : proporción de remociones correspondientes.

Su aplicación entrega diferencias de 3,37 % para ruedas de nariz, 5,92 % para ruedas principales y 5,47 % para frenos. Debido a que solo una fracción de esta vida no utilizada resulta recuperable y los costos varían entre componentes, estos valores permiten considerar viable una reducción global del 5 % para el análisis.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un marco metodológico de análisis de confiabilidad para componentes aeronáuticos, mediante el modelamiento estadístico de su ciclo de vida y el estudio de sus modos de falla, con el fin de generar acciones estratégicas que aumenten la permanencia en servicio y disminuyan sus costos operativos, con aplicación en las ruedas y los frenos utilizados por JetSMART.

1.4.2 Objetivos específicos

- OE1) Caracterizar el comportamiento de las tasas de remoción de los componentes.
- OE2) Evaluar el desempeño operativo de los componentes.
- OE3) Determinar al menos dos modos de falla críticos.
- OE4) Diseñar estrategias para la disminución de costos operativos.
- OE5) Determinar el impacto financiero del modelo propuesto.

1.5 Metodología

Esta sección resume las etapas metodológicas asociadas al cumplimiento de cada objetivo específico.

1.5.1 Objetivo 1: Caracterizar el comportamiento de las tasas de remoción de los componentes.

Se estructura una base de datos con los registros de remoción de ruedas y frenos, incorporando antecedentes técnicos y operacionales como modo de falla, CSI, número de serie, posición, aeronave, bases involucradas e historial del componente.

1.5.2 Objetivo 2: Evaluar el desempeño operativo de los componentes

Se comparan los indicadores observados con las referencias internas de vida y los antecedentes técnicos aplicables, con el fin de identificar desviaciones relevantes.

1.5.3 Objetivo 3: Determinar al menos dos modos de falla críticos

Se identifican y priorizan los modos de falla, mediante análisis de causas, modos, efectos y criticidad de fallas (FMECA), con el fin de determinar al menos dos modos de falla críticos.

1.5.4 Objetivo 4: Diseñar estrategias para la disminución de costos operativos

Se definen acciones de mantenimiento y gestión orientadas a los modos de falla prioritarios, considerando su relación técnica, aplicabilidad y factibilidad dentro del contexto operacional.

1.5.5 Objetivo 5: Determinar el impacto financiero del modelo propuesto

Se cuantifica el ahorro potencial asociado a las remociones técnicamente abordables y a la recuperación parcial de vida no utilizada mediante escenarios de efectividad.

2 Marco teórico

2.1 Definiciones

- Falla: La finalización de la aptitud de un elemento para realizar una función requerida [3].
- Falla funcional: La incapacidad de cualquier activo físico de satisfacer un estándar de desempeño deseado por el usuario [3].
- Modo de falla: Cualquier evento que causa una falla funcional [1].
- Mantenimiento: Combinación de todas las acciones técnicas y de gestión que tienen la intención de asegurar que los activos físicos continúen cumpliendo las funciones que los usuarios desean que cumplan en su contexto operacional actual [1].
- Tiempo entre fallas: La esperanza matemática o el promedio aritmético de la operación continua que un activo es capaz de acumular entre dos eventos de falla sucesivos [2].
- Componente: Cualquier instrumento, mecanismo, equipo, parte, aparato o dispositivo, incluyendo equipo de comunicaciones que es usado o se desea usar en

operación o control de la aeronave en vuelo, que es instalado o unido a una aeronave que no es estructura, motor o hélice [5].

- Sistema: Conjunto de elementos interrelacionados o que interactúan [3].
- Severidad: Importancia o calificación del efecto de un modo de falla sobre la operación del componente, sobre su entorno o sobre el operador [3].
- Criticidad: Combinación de la severidad de un efecto y la frecuencia de su ocurrencia [3].
- Tareas de condición: Una inspección, comprobación o prueba realizada a intervalos regulares para determinar si un elemento puede continuar en servicio hasta la próxima inspección [5].

2.2 Marco normativo

La aviación comercial se rige por disposiciones internacionales y regulaciones nacionales. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) establece normas y directrices generales de seguridad operacional y aeronavegabilidad [6]. Debido a que JetSMART opera mediante distintos AOC, la gestión de ruedas y frenos debe cumplir las exigencias establecidas por la autoridad aeronáutica de cada país.

En materia de mantenimiento, las disposiciones equivalentes a la Parte 43 regulan la ejecución, el registro y la certificación de los trabajos, mientras que aquellas equivalentes a la Parte 145 establecen los requisitos aplicables a los centros de mantenimiento aeronáutico (CMA), correspondientes a organizaciones autorizadas para inspeccionar, reparar y certificar el retorno al servicio de componentes aeronáuticos. Estas disposiciones corresponden a la DAN 43 [7] y DAN 145 [8] en Chile; la RAAC Parte 43 [9] y RAAC Parte 145 [10] en Argentina; la RAP 43 [11] y RAP 145 [12] en Perú; y el RAC 43 [13] y RAC 145 [14] en Colombia.

2.2.1 Otras normativas

- **SAE JA1011 RCM:** Establece los criterios que debe satisfacer un proceso para ser considerado mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) [15].
- **ATA Spec 2000 (Capítulo 11):** Establece una estructura estandarizada para la recopilación e intercambio de datos de confiabilidad de componentes entre operadores, fabricantes y organizaciones de mantenimiento [16].
- **UNE-EN 60812:** Esta normativa proporciona lineamientos para la preparación y el desarrollo de un estudio FMECA, entregando criterios para la priorización de riesgo operacional, para evaluar las consecuencias relativas de cada falla y la asignación de recursos [3].

2.3 Sobre JetSMART Airlines SpA

JetSMART Airlines SpA es una compañía de transporte aéreo que opera bajo un modelo de tarifas ultra bajas o *ultra low cost* [4], caracterizado por una elevada utilización de la flota, estandarización operacional, externalización de servicios y control de costos. La aerolínea opera en 65 destinos de Latinoamérica y cuenta con 53 aeronaves distribuidas entre los modelos Airbus A320 CEO, A320 NEO y A321 NEO.

2.3.1 Flota Airbus A320

La flota Airbus A320 comprende las variantes CEO y NEO, ambas configuradas para transportar 186 pasajeros. El A320 CEO posee un peso máximo de despegue de 77.000 [kg], mientras que el A320 NEO alcanza 79.000 [kg] [17]. Ambos modelos se presentan en las Figuras 2-1 y 2-2.



Figura 2-1. Modelo A320 CEO matrícula CC-AWA [18].



Figura 2-2. Modelo A320 NEO matrícula CC-AWJ [18].

2.3.2 Flota Airbus A321

La flota Airbus A321 está compuesta por la variante NEO, configurada para transportar hasta 240 pasajeros y operar con un peso máximo de despegue de 93.500 [kg]. Dentro de JetSMART, estas aeronaves operan en Chile y Argentina [17]. El modelo se presenta en la Figura 2-3.



Figura 2-3. Modelo A321 NEO matrícula CC-AWS [18].

2.4 Sobre los componentes de ruedas y frenos

2.4.1 ATA 32

La especificación ATA 100, desarrollada por la *Air Transport Association* (ATA), organiza la documentación técnica de las aeronaves mediante capítulos asociados a cada sistema. El capítulo ATA 32 comprende los componentes mecánicos, estructurales, hidráulicos y de control del tren de aterrizaje, cuya función incluye absorber las cargas del aterrizaje [19].

La familia Airbus A320 utiliza una configuración tipo triciclo, compuesta por un tren de aterrizaje de nariz (NLG) y dos trenes de aterrizaje principales (MLG) con dos ruedas por conjunto. El sistema incorpora mecanismos hidráulicos de extensión y retracción, un

sistema de dirección en el NLG y protección antideslizamiento en las ruedas principales. Su arquitectura se presenta en el catálogo ilustrado de piezas (IPC) en las Figuras 2-4 y 2-5.

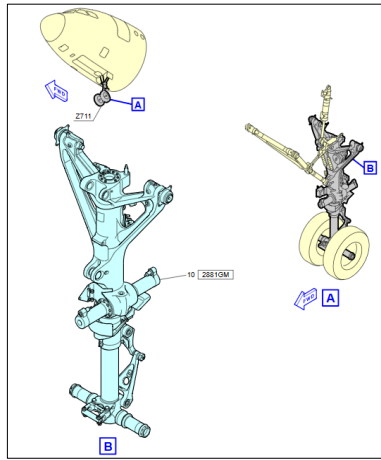


Figura 2-4. IPC NLG ATA 32-21 [20].

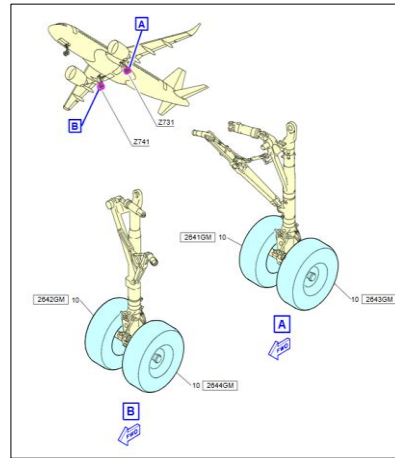


Figura 2-5. IPC MLG ATA 32-11 [20].

2.4.2 Ruedas

La rueda corresponde a la estructura metálica sobre la cual se instala y sella el neumático. Su función consiste en soportar y transmitir las cargas y, en las posiciones principales, alojar el conjunto de freno. Sus componentes incluyen rodamientos, sellos, válvulas de inflado y tapones fusibles térmicos [21]. La configuración de una rueda NLG se presenta en la Figura 2-6.

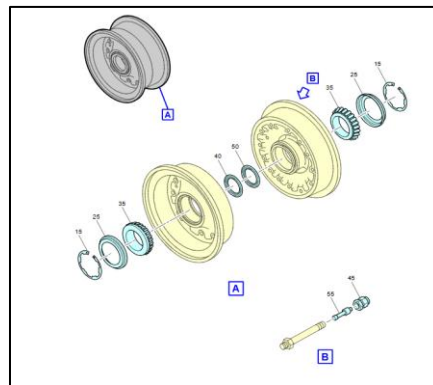


Figura 2-6. IPC Rueda de nariz ATA 32-11-41 [22]

Los números de parte (PN) de las ruedas utilizadas por JetSMART corresponden a:

- **PN 3-1531-3** : rueda utilizada en NLG.
- **PN 3-1724** : rueda utilizada en MLG A320.
- PN C20500100** : rueda utilizada en MLG A321.

2.4.3 Neumáticos

El neumático constituye la interfaz de contacto con el pavimento y se compone principalmente de caucho, nailon y alambres de acero [23]. Se infla con nitrógeno y opera bajo presiones cercanas a 200 [psi] y velocidades de hasta 180 [kt]. Su integridad estructural

depende de una carcasa formada por capas de cuerdas de nailon, encargadas de distribuir los esfuerzos generados durante la operación. Estas cuerdas se presentan en la Figura 2-7.

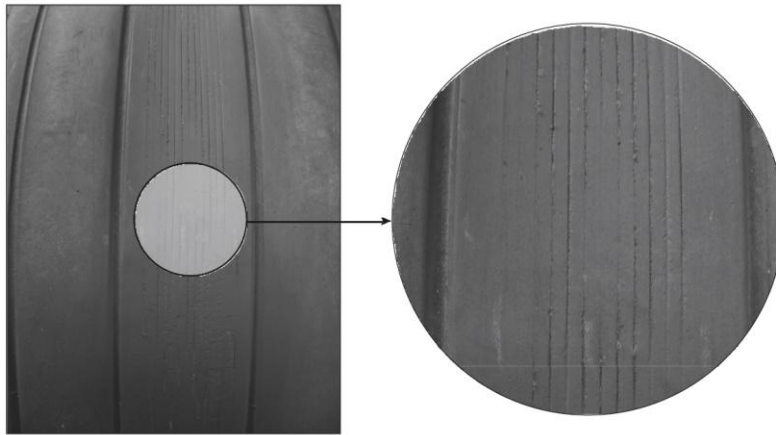


Figura 2-7. Cuerdas presentes en la carcasa del neumático [23].

Las configuraciones base de neumáticos utilizadas por JetSMART corresponden a:

- **PN M08201** : neumático utilizado en las ruedas NLG.
- **PN M01103-02** : neumático utilizado en las ruedas MLG A320.
- **PN M20101-01** : neumático utilizado en las ruedas MLG A321.

Las cartas de trabajo aplicables establecen la remoción cuando la profundidad remanente de cualquiera de los surcos alcanza 1 [mm]. Este criterio anticipa el retiro respecto del límite general indicado por Michelin, que indica la remoción normal cuando el desgaste alcanza el fondo de cualquier surco en un punto, con una extensión máxima equivalente a 1/8 de la circunferencia del neumático [23].

2.4.4 Frenos

Los conjuntos de freno, instalados en los trenes de aterrizaje principales, utilizan paquetes de discos de carbono comprimidos mediante pistones para disipar como calor la energía generada durante el aterrizaje, rodaje y rechazo de despegue [24]. Sus principales elementos corresponden a la carcasa de pistones, el dissipador de calor, los conjuntos ajustadores y el indicador de desgaste, cuya longitud expuesta permite determinar la condición remanente del paquete térmico.

Según el Manual de Mantenimiento de Componentes (CMM), el desgaste del freno se alcanza completamente cuando el indicador de desgaste queda a ras del aislante térmico [24]. En la operación de JetSMART, el conjunto se retira preventivamente cuando la longitud expuesta alcanza 1,5 [mm], manteniendo un margen respecto del límite. La disposición de los elementos del freno se puede observar en la Figura 2-8.

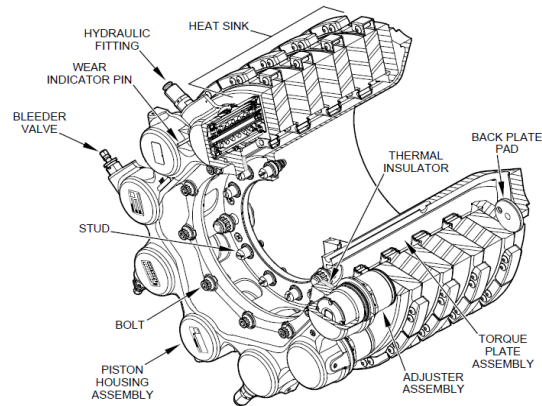


Figura 2-8. Conjunto de freno [3].

- **PN 2-1759-1** : Freno principal utilizado en aeronaves Airbus A320.
- **PN C20534100** : Freno principal utilizado en aeronaves Airbus A321.

Adicionalmente, las aeronaves utilizan ventiladores eléctricos encargados de aumentar el flujo de aire alrededor del conjunto y favorecer la disipación térmica posterior al aterrizaje.

3 Desarrollo de la metodología FMECA

El análisis FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) es un procedimiento de ingeniería utilizado para identificar los modos de falla potenciales de un activo físico, evaluar sus causas y efectos, y priorizarlos según su criticidad [3]. Esto para sustentar la priorización de modos de falla y la definición de decisiones de mantenimiento basadas en riesgo.

3.1 Planificación del análisis

La planificación del análisis define el propósito, alcance, responsables y contexto operacional del estudio, conforme a la norma UNE-EN 60812 [3]. En el contexto aplicado, el alcance se limita a las ruedas y los frenos, cuya necesidad de intervención se encuentra previamente identificada en la operación, por lo que no se requiere una comparación con otros capítulos ATA.

La caracterización considera los registros comprendidos entre el 1 de abril de 2025 y el 1 de abril de 2026. Esta ventana de 12 meses representa la condición operacional reciente, incorpora un ciclo estacional completo y evita sobrerrepresentar períodos de mayor demanda. Además, su selección responde al crecimiento reciente de la flota y de la actividad operacional, condición que modifica la exposición de los componentes y limita la comparabilidad con períodos anteriores. La extracción, depuración y clasificación de los datos sigue los lineamientos de ATA Spec 2000, Capítulo 11 [3].

3.2 Estructura del sistema

La fase analítica de la metodología propuesta inicia con la delimitación del objeto de estudio, definiendo las fronteras físicas y funcionales de los componentes identificados

anteriormente. El nivel de análisis y la jerarquía del sistema se establecen mediante la clasificación ATA, desde la aeronave hasta los componentes y subcomponentes incluidos. Esta descomposición define el nivel en que se evalúan los modos de falla y las tareas aplicables. El diagrama jerárquico de la Figura 3-1 representa los subcomponentes definidos en los CMM aplicables que mantienen relación directa con las remociones evaluadas.

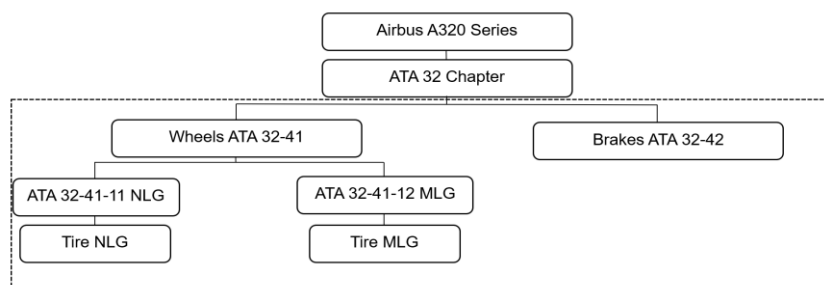


Figura 3-1. Diagrama jerárquico del alcance del estudio.

3.2.1 Contexto operacional

La obtención del contexto operacional consiste en definir formalmente los parámetros de utilización, metas corporativas, restricciones geográficas y demás condiciones operativas relevantes para el sistema analizado, para asegurar que las funciones y los criterios de desempeño se evalúen bajo las condiciones reales de operación de la compañía. En el caso de JetSMART, su principal objetivo es buscar que los activos, incluidas las ruedas y los frenos, mantengan una permanencia controlada en servicio y contribuyan al control de los costos operativos asociados, bajo estas condiciones, evitar cualquier evento de aeronave fuera de servicio (AOG), y disminuir la frecuencia de eventos de mantenimiento no programado. Además, es necesaria la consideración de que JetSMART opera de manera internacional, sometiéndose a ambientes diversos, con mantenimiento realizado por diferentes países, con varios CMA involucrándose en la operación. Todo lo anterior genera factores humanos relevantes a considerar.

3.3 Determinación de los modos de falla

La determinación de los modos de falla comienza con la clasificación de las categorías de remoción registradas en las cartas de trabajo de los CMA para cada operador, las cuales pueden corresponder a condiciones físicas, técnicas, operacionales o administrativas. Para las ruedas NLG asociadas a JAT, se identifican 66 remociones NNW, equivalentes al 23 % del total como se puede ver en la Figura 3-2. La distribución de las fallas no normales se detalla mediante un diagrama de Pareto de la Figura 3-3, donde la curva naranja representa el porcentaje acumulado y de donde se desprende que la categoría de cortes (CUT) presenta el mayor número de remociones. Este comportamiento también se observa en las ruedas MLG del mismo AOC, cuyos resultados se presentan en el Anexo B.

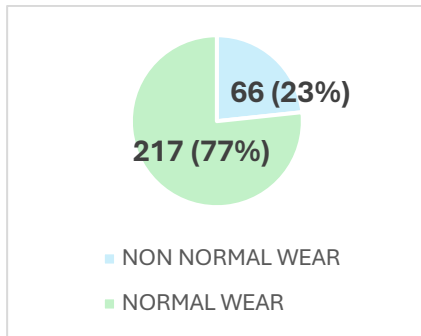


Figura 3-2. Distribución de remociones de ruedas NLG en JAT.

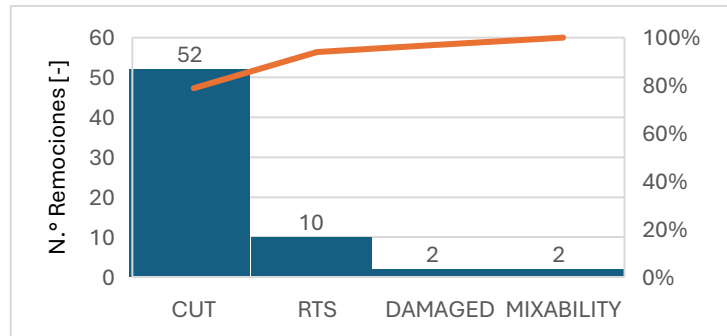


Figura 3-3. Diagrama de Pareto de remociones NNW de ruedas NLG en JAT.

En las ruedas NLG asociadas a JES, el desgaste normal representa 320 de las 378 remociones, equivalente al 85 % del total, mientras que las remociones NNW se concentran en vibraciones y cortes, según las Figuras 3-4 y 3-5. JAP presenta una distribución similar, cuyos resultados se incluyen en el Anexo B.

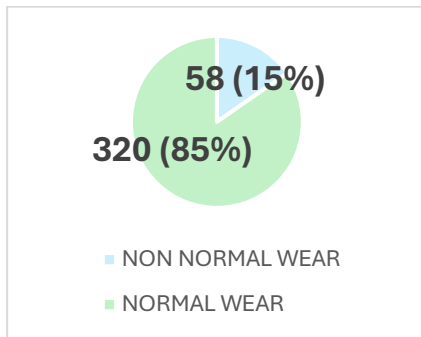


Figura 3-4. Distribución de remociones de ruedas NLG en JES.

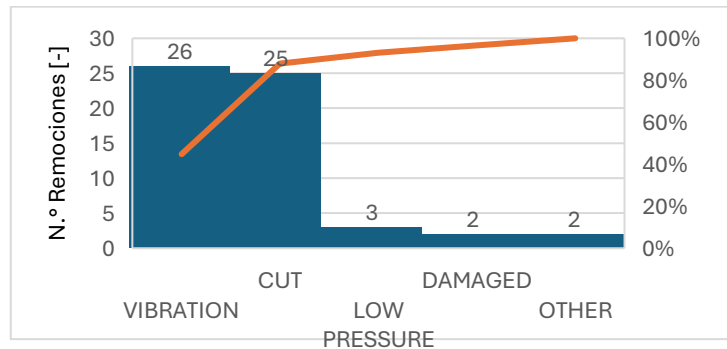


Figura 3-5. Diagrama de Pareto de remociones NNW de ruedas NLG en JES.

En JEC, 66 de las 75 remociones de frenos corresponden a desgaste normal, según la Figura 3-6, mientras que las nueve remociones NNW se distribuyen según los motivos presentados en la Figura 3-7. Los resultados de los demás AOC se incluyen en el Anexo B.

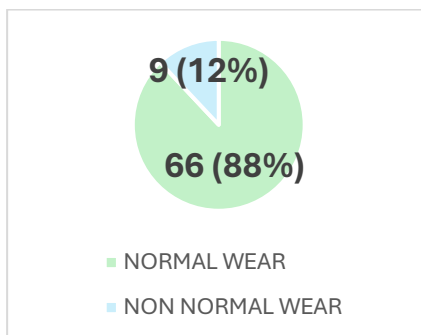


Figura 3-6. Distribución de remociones de frenos en JEC.

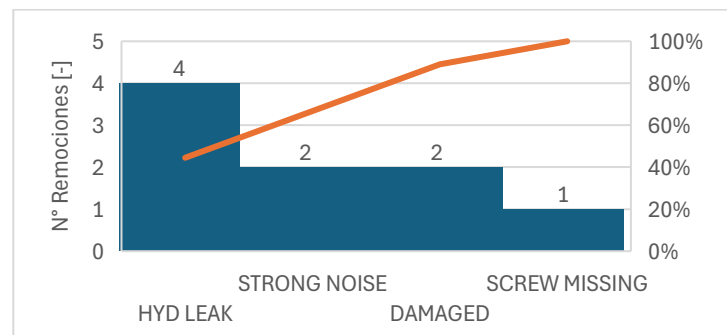


Figura 3-7. Diagrama de Pareto de remociones NNW de frenos en JEC.

Para comparar los AOC, las remociones NNW se normalizan mediante la Ecuación (2), considerando los ciclos de vuelo acumulados por el operador que registra cada evento

durante el período analizado. El resultado corresponde a la tasa de remociones NNW por cada 1.000 ciclos, excluyendo las remociones por motivos administrativos y regulatorios. Estos resultados se muestran en la Figura 3-8 para las ruedas y en la Figura 3-9 para los frenos. El detalle de los modos de falla considerados para cada componente, AOC y categoría se presenta en el Anexo C.

$$T_{NNW,1000,a} = \frac{N_{NNW,a}}{FC_a} \cdot 1000 \quad (2)$$

Donde:

- a : AOC evaluado.
- $T_{NNW,1000}$: tasa de remociones NNW por cada 1.000 ciclos.
- N_{NNW} : número de remociones NNW consideradas.
- FC : total de ciclos de vuelo acumulados durante el período analizado.

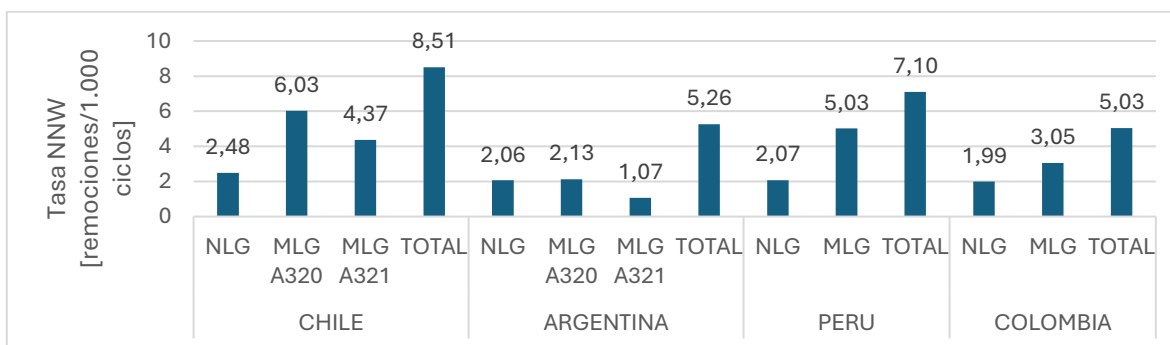


Figura 3-8. Tasa de remociones NNW técnicas de ruedas por exposición operacional según AOC de remoción.

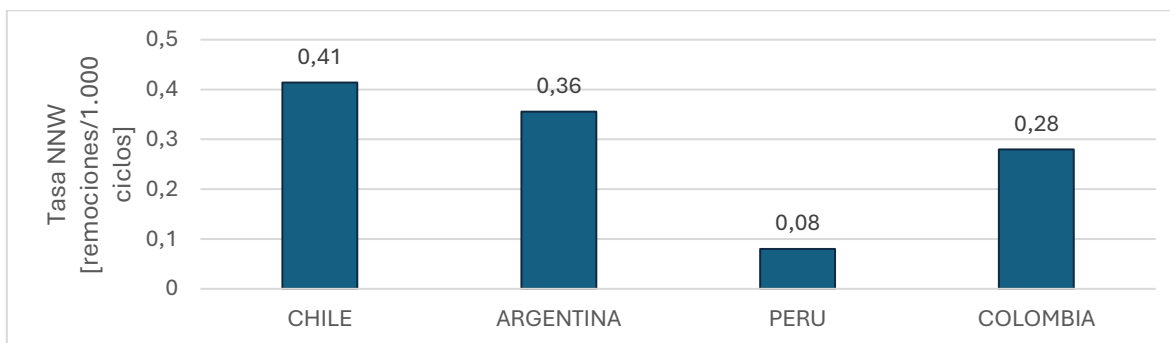


Figura 3-9. Tasa de remociones NNW técnicas de frenos por exposición operacional según país de remoción.

Por consiguiente, bajo un enfoque de priorización de recursos, resulta pertinente concentrar los esfuerzos de análisis en los países y componentes que presentan mayor recurrencia absoluta, mayor incidencia relativa normalizada y mayor desviación respecto del *Budget*. En ruedas, JAT presenta la mayor tasa normalizada total de remociones NNW, con una concentración principal en las ruedas MLG A320, por lo que esta combinación adquiere prioridad en el análisis posterior. En frenos, en cambio, la distribución se encuentra dominada por remociones asociadas a desgaste normal, mientras que las remociones NNW presentan tasas menores. Para estos casos, se analizan los modos de falla y fallas

funcionales asociados a las remociones dentro de las categorías estudiadas, según se detalla en los apartados 3.3.1 y 3.3.2.

Después de normalizar las remociones técnicas por exposición operacional, se contrasta el AOC de remoción con la distribución de ciclos acumulados por país de operación. Esta comparación permite evaluar si la exposición del componente se concentra en el mismo país donde se documenta su remoción o se distribuye entre distintas redes. La distribución de operación para las ruedas de nariz se muestra en la Tabla 3-1 y el resto de los componentes en el Anexo D.

Tabla 3-1. Distribución porcentual de ciclos acumulados por país de operación, según país de remoción, para ruedas NLG.

País de remoción	Ciclos Chile [%]	Ciclos Argentina [%]	Ciclos Perú [%]	Ciclos Colombia [%]	Ciclos Brasil [%]	Otros [%]
Chile	62,25 %	11,89 %	4,55 %	11,79 %	7,26 %	2,28 %
Argentina	6,03 %	79,19 %	0,76 %	0,91 %	7,02 %	6,09 %
Perú	8,33 %	1,63 %	80,53 %	7,88 %	0,42 %	1,21 %
Colombia	6,46 %	0,61 %	1,92 %	90,13 %	0,40 %	0,48 %

Los resultados muestran una correspondencia predominante entre país de remoción y país de operación acumulada, especialmente en Argentina, Perú y Colombia, con valores diagonales de 79,19 %, 80,53 % y 90,13 %, respectivamente. En Chile, esta correspondencia alcanza 62,25 %, lo que indica una exposición más distribuida, aunque mantiene la mayor participación dentro de la fila. A partir de esta verificación, el AOC de remoción se utiliza como variable de agrupación del análisis, debido a que mantiene una correspondencia predominante con el país donde el componente acumula sus ciclos.

3.3.1 Modos de falla y fallas funcionales Ruedas

Las denominaciones siguientes corresponden a categorías registradas en las cartas de remoción emitidas por los CMA. Estas pueden representar modos de falla físicos, condiciones operacionales o motivos de configuración. Sus modos de falla y fallas funcionales corresponden a:

- **Wear:** Para las ruedas, la categoría de falla principal corresponde al desgaste progresivo de la banda de rodadura, incluyendo desgastes simétricos y asimétricos, y desgastes localizados, como superficies planas en el neumático [23], dado por el propio uso de estos. Su falla funcional asociada es la incapacidad de asegurar una tracción de manera segura [23].
- **Cut:** La categoría *Cut* se interpreta como un corte o daño penetrante en el neumático, el cual puede estar localizado en la banda de rodadura, hombros, surcos, flancos o laterales del neumático. También puede incluir desprendimiento de trozos de caucho, desgarros o agrietamientos profundos. Su falla funcional corresponde a la incapacidad de retener adecuadamente la presión de inflado necesaria para el correcto funcionamiento [23].
- **Vibration:** Esta categoría se produce por una vibración excesiva en el conjunto rueda-neumático o sus elementos asociados, generando oscilaciones mecánicas

indeseadas inducidas por un desbalance dinámico del conjunto rotativo [21]. Su falla funcional es la incapacidad de garantizar una rodadura concéntrica y un guiado estable. Esta categoría es mayormente presentada en ruedas de nariz.

- **Damaged:** Categoría que agrupa fallas mecánicas y deformaciones permanentes en los subcomponentes rígidos del conjunto de la rueda [21]. Su falla funcional es la incapacidad de garantizar la integridad estructural deseada y soportar los esfuerzos del peso de la aeronave.
- **Overspeed:** Esta categoría corresponde a una condición operacional anormal en la cual la rueda opera por sobre su velocidad nominal permitida, perdiendo su condición de aeronavegabilidad debido a la superación de sus límites certificados de operación [21].
- **RTS (Return To Service):** Evento en el cual una rueda completa es removida debido a que la aeronave estuvo un tiempo prolongado en tierra, lo que puede provocar deformaciones del conjunto [21]. Su falla funcional es la incapacidad de garantizar la integridad estructural.
- **Mixability:** Evento en el cual se remueve una rueda debido a que la aeronave se encuentra operando con dos neumáticos de diferente fabricante. Su falla funcional es la incapacidad de mantener el activo en un estado de estricta conformidad legal de aeronavegabilidad.
- **Pérdida de elementos estructurales:** Su falla funcional es la incapacidad de garantizar la integridad estructural y retención segura del conjunto de la rueda.

3.3.2 Modos de falla y fallas funcionales Frenos

- **Wear:** Para los frenos, la categoría *Wear* se interpreta como el desgaste progresivo de los discos de carbono que componen la masa térmica del conjunto, hasta alcanzar el límite de servicio [24]. Su falla funcional asociada corresponde a la incapacidad del conjunto para proporcionar capacidad de frenado suficiente y detener la aeronave de forma segura en las distancias de pista certificadas.
- **HYD Leak:** Esta categoría se interpreta como la pérdida de la capacidad de contención hermética de fluido hidráulico en el conjunto de freno [24]. Su falla funcional es la incapacidad del freno de mantener presión hidráulica requerida para su accionamiento.
- **Pérdida de elementos estructurales:** Su falla funcional es la incapacidad de garantizar la integridad estructural y retención segura del conjunto de los frenos.
- **Damaged:** Categoría que agrupa daños mecánicos o deformaciones permanentes en los elementos estructurales del conjunto. Su falla funcional es la incapacidad de garantizar la integridad estructural deseada y un frenado adecuado de la aeronave.

El resto de los modos de falla reportados por los frenos presenta una baja recurrencia dentro del período analizado, por lo que no se desarrolla un análisis específico para estos eventos.

3.4 Causas de falla

Una vez determinados los modos de falla y sus fallas funcionales asociadas, el siguiente paso metodológico consiste en identificar las causas o mecanismos potenciales que explican su aparición dentro del contexto operacional real de la empresa. Si bien la literatura

técnica, los CMM, las especificaciones de fabricantes y las bases de datos de referencia suelen proporcionar un catálogo sobre las causas teóricas que gatillan la degradación de los componentes, dichos antecedentes deben ser contrastados con el entorno operativo del estudio debido a que pueden existir diferencias entre los entornos usados en los documentos de referencia, contemplando variables operacionales, características técnicas de los componentes y factores asociados a las tareas de mantenimiento e inspección.

3.4.1 Causas de falla de ruedas

- **Wear MLG.**

En las ruedas principales, el hito mecánico más agresivo ocurre durante el Touchdown [23] la velocidad periférica del neumático pasa de casi cero a la velocidad de avance de la aeronave, generando un diferencial de velocidades neumático-pavimento y una aceleración angular agresiva. Esto produce fricción, calentamiento y remoción de material, visible como la estela de humo blanco al contacto con la pista, como se puede apreciar en la Figura 3-10.



Figura 3-10. Touchdown de la aeronave CC-AWA en Balmaceda [25].

Durante el contacto con la pista, la fuerza de fricción tangencial genera el momento torsor necesario para acelerar la rueda. Conforme al principio de trabajo y energía para cuerpos rígidos en rotación, el trabajo de fricción se iguala a la energía cinética rotacional adquirida por la rueda, según la Ecuación (3).

$$W_f = E_k \quad (3)$$

Bajo una aproximación idealizada que desprecia el roce aerodinámico y las pérdidas internas, la Ecuación (3) se expresa en función de la fricción en la interfaz pista-neumático y del momento de inercia de la rueda, obteniéndose la Ecuación (4) [27].

$$(\mu \cdot F) \cdot L = \frac{1}{2} I \left(\frac{V_{TD}}{r} \right)^2 \quad (4)$$

Donde:

- F : fuerza normal ejercida sobre la rueda.
- L : distancia efectiva de deslizamiento durante la aceleración angular de la rueda.
- V_{TD} : velocidad de la aeronave durante el *Touchdown*.

- r : radio de la rueda.

De la Ecuación (4), se desprende que, bajo condiciones comparables, un aumento en la velocidad al momento del *Touchdown* incrementa la energía total que debe ser transferida a la rueda para alcanzar la condición de la rodadura. Esta mayor energía cinética requiere una mayor transferencia de energía durante el proceso de aceleración angular de la rueda. Sin embargo, no es posible correlacionar directamente este incremento con una cantidad determinada de caucho removido, debido a que el desgaste también depende de la carga normal, la distancia de deslizamiento, las características de la superficie y las propiedades del neumático [26].

No obstante, correlacionar la velocidad directamente con la tasa de desgaste es una tarea complicada, debido a las limitaciones de las bases de datos disponibles para el área de trabajo en la que se realiza el estudio dentro de JetSMART, teniendo en consideración que factores como variaciones en la técnica de pilotaje, gradientes de descenso y componentes de viento relativo, no permiten realizar una correlación de velocidad directamente. Sin embargo, es posible evaluar la asociación entre la densidad del aire al momento del aterrizaje y las variaciones observadas en los ciclos de remoción, esto debido a que, para una misma condición aerodinámica de sustentación, una menor densidad atmosférica requiere una mayor velocidad verdadera (TAS) respecto del aire para mantener una cierta magnitud de esta fuerza [28]. Por esta razón, si bien la densidad no corresponde a una causa directa de desgaste, puede utilizarse como una variable indirecta para evaluar su asociación con las variaciones observadas en el CSI de las ruedas.

Para cuantificar esta variable, se estima la densidad local del aire mediante el modelo de Atmósfera Estándar Internacional en la tropósfera [28]. En primer lugar, la densidad se calcula considerando el aire como gas ideal, según la Ecuación (5).

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (5)$$

La presión atmosférica se obtiene mediante la Ecuación (6).

$$P(h) = P_0 \cdot \left(1 - \frac{\gamma \cdot h}{T_0}\right)^{\frac{g}{R \cdot \gamma}} \quad (6)$$

La altura geopotencial se determina mediante la Ecuación (7).

$$h = H \cdot \left(\frac{R_e}{R_e + H}\right) \quad (7)$$

Luego, para establecer la correlación entre la densidad atmosférica y el desgaste de las ruedas en la flota de JetSMART, es analizada la muestra completa de remociones y es caracterizada cada estación aeroportuaria a partir de su altura sobre el nivel del mar. Esta información es obtenida a partir de la documentación AIP emitida por las autoridades aeronáuticas correspondientes [29] a [32] y en aquellos casos donde no existe información

oficial disponible de manera pública, se obtiene desde bases de datos aeronáuticas de respaldo [33]. El detalle de las alturas consideradas para cada estación se presenta en el Anexo A. Complementariamente, para representar el entorno térmico asociado a cada operación, se recopilan datos meteorológicos históricos desde la base de datos IEM [34], la cual dispone de información climática para cada ciudad con una resolución temporal de 30 minutos. Esto permite asociar a cada aterrizaje una temperatura ambiente representativa en el instante en el cual este ocurre. De esta forma, mediante las Ecuaciones (5) a (7) se calcula la densidad atmosférica correspondiente y, posteriormente, su valor promedio de operación mediante la Ecuación (8).

$$\rho_{prom,j} = \frac{\sum_i^{n_j} (\rho_{i,j})}{n_j} \quad (8)$$

Donde:

- $\rho_{prom,j}$: densidad promedio ponderada de operación del componente j .
- ρ_i : densidad atmosférica representativa de la estación i .
- n_j : número de aterrizajes considerados para el componente j .

Aplicando la Ecuación (8) a la muestra de neumáticos removidos por desgaste normal, se obtiene una densidad promedio de operación para cada componente removido por esta razón. Contrastando este resultado para cada uno de los neumáticos removidos, se presentan los resultados en la Figura 3-11 para las ruedas de nariz, para las ruedas MLG de A320 CEO y A320 NEO en la Figura 3-12, y para las ruedas MLG de A321 NEO en la Figura 3-13. El desglose de ciclos por estación utilizado para este cálculo se presenta en el Anexo E.

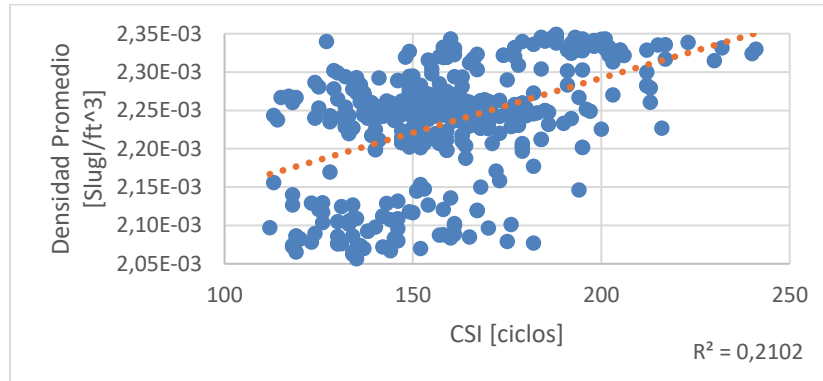


Figura 3-11. Remociones Wear de neumáticos NLG según ciclos y densidad promedio (AOC JAT, JES, JAP).

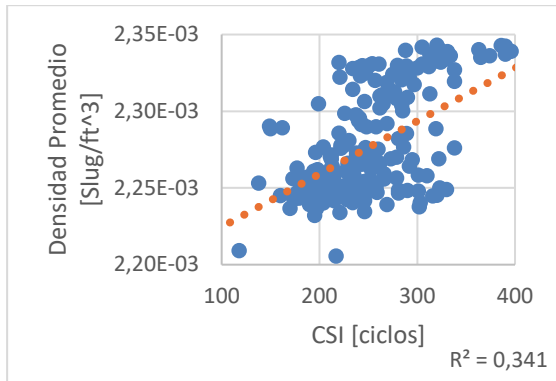


Figura 3-12. Remociones Wear de neumáticos MLG A320 según ciclos y densidad promedio (AOC JAT, JES y JAP).

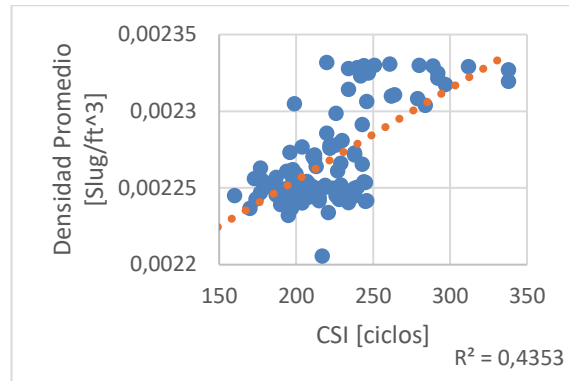


Figura 3-13. Remociones Wear de neumáticos MLG A321 según ciclos y densidad promedio (AOC JAT, JES y JAP).

Las Figuras 3-11 a 3-13 muestran una asociación positiva entre la densidad atmosférica promedio y los ciclos de remoción de los neumáticos. Sin embargo, los valores de R^2 , comprendidos entre 0,21 y 0,43, indican que esta variable no explica por sí sola la vida en servicio ni permite establecer una relación causal directa. Además, la tendencia no se mantiene al incorporar JEC, cuyas ruedas presentan una mayor vida en ciclos pese a operar bajo menores densidades relativas, según las Figuras 1-1 y 1-2.

Luego, de las Figuras 3-11 a 3-13 se observa que la asociación entre densidad y CSI resulta más clara en las ruedas MLG que en las ruedas NLG. En estas últimas, la menor influencia del contacto inicial con la pista hace necesario considerar también condiciones de operación en tierra, como virajes, pivoteos y maniobras de rodaje con un solo motor [23].

Además, a partir de la Ecuación (4), el trabajo de deslizamiento aumenta con la carga normal y el coeficiente de fricción neumático-pista, incrementando el desgaste [27]. Sin embargo, este coeficiente no está disponible en la documentación AIP ni en otras fuentes oficiales, y aunque lo estuviera, factores como humedad, contaminación, pulido superficial y mantenimiento de la pista también lo afectan [23]. Por ello, no es posible atribuir la remoción de caucho al tipo de superficie ni a parámetros estructurales, dado que estas variables no están disponibles con el nivel de detalle necesario.

En este contexto, el caso colombiano resulta particularmente relevante, donde, a pesar de operar en condiciones de menor densidad atmosférica relativa, las ruedas muestran un desempeño superior al esperado. No es posible correlacionar directamente este resultado con una causa específica; sin embargo, puede ser compatible con diferencias operacionales o de gestión de los componentes que no se encuentran representadas en las variables disponibles. Para distinguir si el desempeño observado responde a condiciones propias de JEC o a la exposición operacional en Colombia, se analiza en componentes pertenecientes a las demás AOC la relación entre la proporción de ciclos realizados en aeropuertos colombianos y el CSI alcanzado. La comparación se restringe al rango de densidad comprendido entre 0,0019 y 0,0022 $[slug/ft^3]$, con el fin de reducir la influencia de las diferencias atmosféricas sobre el resultado. Esto se puede ver en las Figuras 3-14 y 3-15.

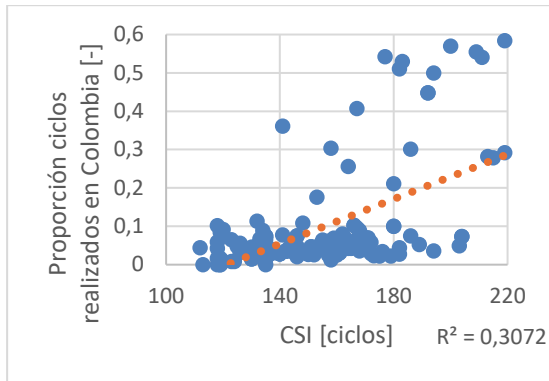


Figura 3-14. Remociones de neumáticos NLG según proporción de ciclos realizados en Colombia (densidad entre 0,0019-0,0022 [slug/ft³])

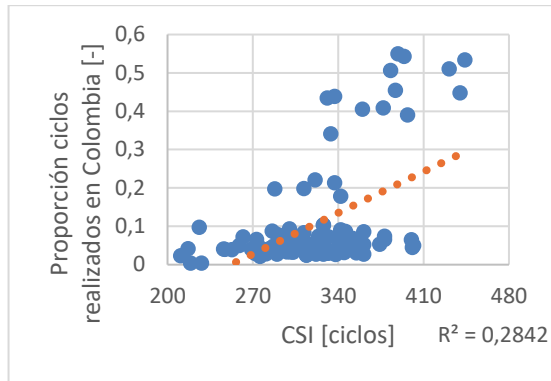


Figura 3-15. Remociones de neumáticos MLG según proporción de ciclos realizados en Colombia (densidad entre 0,0019-0,0022 [slug/ft³])

En ambos conjuntos se observa una tendencia positiva entre la proporción de ciclos realizados en Colombia y el CSI con coeficientes R^2 similares. Sin embargo, la dispersión indica que esta exposición no explica por sí sola la vida en servicio. La revisión tampoco identifica diferencias en protocolos de inflado y criterios de remoción, almacenamiento, proveedores, cantidad de recauchados de los neumáticos, tiempo en tierra entre vuelos o utilización diaria y antecedentes de instalación y reparación disponibles, lo mismo para el resto de los operadores. En consecuencia, las variables internas evaluadas no explican la mayor cantidad de ciclos de los componentes. El comportamiento permanece compatible con factores operacionales que no presentan trazabilidad para cada ciclo, como la dirección del viento durante el aterrizaje, las maniobras en tierra, la masa de la aeronave y las condiciones de las pistas.

- **Cut.**

Las remociones por *Cut* se concentran principalmente en dos clasificaciones dentro de JetSMART: Objetos extraños incrustados en los neumáticos (FOD) y *Groove Cut*, que corresponde a cortes localizados en los surcos de la banda de rodadura, compatibles con la interacción del neumático con ranuras transversales de la pista durante el *Touchdown* y el *spin-up* o por condiciones de almacenamiento.

- **Vibration.**

Entre las causas potencialmente asociadas se encuentran el desbalance dinámico, la instalación incorrecta de contrapesos, la distribución no uniforme de masa, las holguras y los desalineamientos; sin embargo, la categoría de remoción y la información disponible en las cartas de mantenimiento no permite determinar por sí sola una causa específica [27].

Las demás categorías no requieren una descripción adicional, debido a que su denominación identifica directamente la causa registrada de la remoción

3.4.2 Causas de falla de frenos

- **Wear.**

El desgaste de los discos de carbono depende de la temperatura operativa y presenta un comportamiento no lineal, con una tasa particularmente elevada dentro de rangos térmicos moderados [35].

Luego, desde la perspectiva de la mecánica, el proceso de frenado transforma parte de la energía cinética de la aeronave, representada mediante la Ecuación (9), en energía térmica disipada por el conjunto de una manera similar al mecanismo explicativo del desgaste de las ruedas.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (9)$$

Para una misma masa operacional, la Ecuación (9) muestra que la energía cinética aumenta con el cuadrado de la velocidad. Debido a que no se dispone de registros directos de velocidad durante la toma de contacto, la densidad atmosférica se utiliza como variable indirecta para evaluar su posible asociación con el CSI, sin considerarla una medida directa de la velocidad de aterrizaje de manera coherente con el análisis realizado para las ruedas.

Además, una aproximación hacia la temperatura de operación, sin datos suficientes tiene sus limitaciones, debido a que la temperatura alcanzada por los frenos depende además de otros mecanismos, tales como la capacidad de absorción calorífica del conjunto de carbono, condiciones de ventilación, transferencia de calor por convección hacia el entorno y otros mecanismos de disipación de energía propios de la aeronave, reversores de empuje, etc [35]. Por este motivo, los frenos ubicados en posiciones interiores de la aeronave (2641GM y 2644GM) tienden a tener un peor desempeño en función de ciclos que los ubicados en las posiciones exteriores (2642GM y 2643GM) [35].

Mediante las Ecuaciones (5) a (8), se obtiene la densidad atmosférica promedio de operación de cada freno a partir de los aterrizajes asociados a su historial en servicio. Esta variable se contrasta posteriormente con el CSI, como se presenta en las Figuras 3-16 y 3-17.

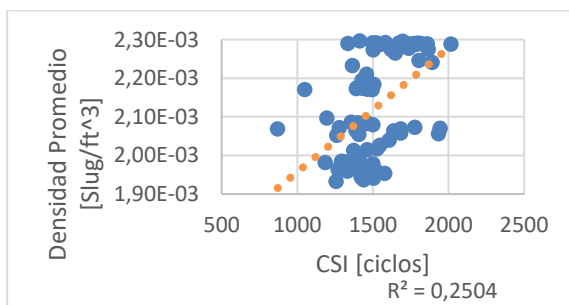


Figura 3-16. Remociones Wear de frenos según ciclos y densidad promedio en posiciones interiores.

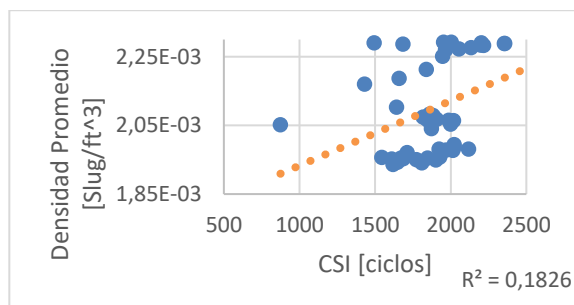


Figura 3-17. Remociones Wear de frenos según ciclos y densidad promedio en posiciones exteriores.

A partir de las figuras, se observa una tendencia lineal creciente entre la densidad atmosférica promedio de operación y el CSI alcanzado por los frenos, esta tendencia es

coherente con la hipótesis de que la contribución energética del aterrizaje influye en el desgaste del conjunto de los frenos. No obstante, la dispersión evidente observada en los datos no constituye una variable explicativa única del desgaste, sino una aproximación indirecta dentro de un fenómeno térmico multivariable. Al segmentar el análisis por AOC, la asociación resulta menos evidente debido al menor rango de densidades y al menor número de observaciones disponibles en cada operación, como se presenta en el Anexo F.

Durante el rodaje, las aplicaciones repetidas del freno pueden generar condiciones térmicas y tribológicas distintas de aquellas presentes durante el aterrizaje. [35] Considerando que este puede requerir múltiples aplicaciones de freno por ciclo operativo, la infraestructura y complejidad operacional de ciertas bases puede influir en la frecuencia de aplicación del pedal. De esta forma, aeropuertos con mayor congestión operacional, mayores tiempos de rodaje, múltiples puntos de espera o restricciones de circulación podrían aumentar el uso intermitente del freno y, por ende, contribuir al desgaste acumulado del conjunto. Debido a que la base de datos no contiene registros directos de tiempos de rodaje, congestión ni aplicaciones del pedal, se utiliza como variable exploratoria la proporción de aterrizajes efectuados en aeropuertos seleccionados por su mayor complejidad operacional esperada. Esta selección incluye SCL, LIM, AEP, BOG, MEX, SJO, PUJ, GIG y MVD; no obstante, la variable representa únicamente una aproximación y no una medición directa de la exigencia asociada al rodaje. Esta correlación se presenta en la Figura 3-18, de donde se puede observar una tendencia negativa. El desglose por AOC se muestra en el Anexo G. Sin embargo, el análisis no controla la densidad atmosférica, la temperatura de operación ni otras variables asociadas al desgaste, por lo que el resultado se presenta únicamente como una asociación exploratoria.

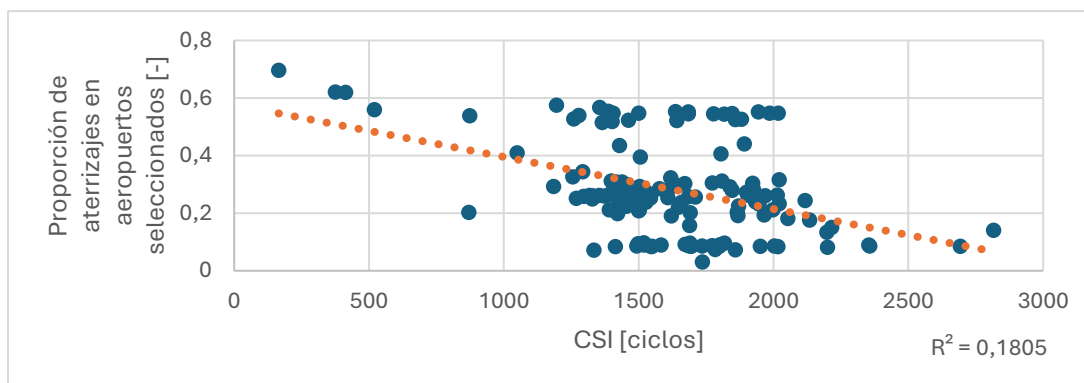


Figura 3-18. Proporción de aterrizajes en bases seleccionadas según CSI del freno en su vida operativa.

- **Leaks.**

Por último, respecto a las remociones por fugas hidráulicas, estas obedecen principalmente a factores térmicos y de ensamblaje, [24] pudiéndose originar en sellos, válvulas, uniones hidráulicas, en las camisas de los pistones, etc. En la Figura 3-19 se desglosan distintas causas de falla producto de Leaks.

3.5 Efectos y detección de las fallas

La identificación de los efectos de las fallas y de sus métodos de detección permite evaluar su repercusión desde la manifestación local hasta el impacto operacional a nivel de flota [3]. Esto se fundamenta en que la criticidad de un evento no solo depende de su severidad y ocurrencia, sino también de la capacidad de detectarlo antes de que genere una consecuencia operacional no programada.

3.6 Evaluación de las fallas

Para evaluar los riesgos en los componentes de ruedas y frenos operados por JetSMART es posible implementar una matriz con la información recopilada en los capítulos anteriores y según la información recopilada, es posible ponderar la criticidad de un cierto modo de falla en función de su severidad, detectabilidad y ocurrencia. Para esto, se pueden priorizar acciones sobre modos de falla en particular con el Número de Prioridad de Riesgo, el cual es posible de obtener mediante la Ecuación (10) [3].

$$NPR = S \cdot O \cdot D \quad (10)$$

Donde:

- NPR : Número de Prioridad de Riesgo del modo de falla evaluado.
- S : severidad de sus efectos técnicos y operacionales.
- O : ocurrencia, determinada mediante la frecuencia relativa de remociones.
- D : detectabilidad de la condición antes de alcanzar un estado no aceptable.

Para utilizar la Ecuación (10), se debe clasificar la severidad de una falla, su ocurrencia en función del número de eventos y su detectabilidad, considerando la factibilidad de su detección antes de que se genere un evento operativo no programado. Para esto, se debe clasificar dentro de un rango definido, en este caso, del 0 al 10, pero también se puede clasificar en función de terminologías no cuantificables en caso de que ciertos eventos sean difíciles de ponderar cuantitativamente a modo de comparación [3].

En severidad, un valor en el rango más alto del conjunto corresponde a un evento catastrófico, el cual compromete la seguridad de la operación, y un valor bajo representa una condición de efecto menor, sin impacto relevante sobre la aeronavegabilidad y cuya atención puede diferirse conforme a los límites establecidos. Luego, para la detección, los valores bajos de D representan una alta capacidad de detección antes de alcanzar una condición no aceptable, mientras que los valores altos indican una menor capacidad de detección anticipada y, por último, la ocurrencia del 1 al 10 se cuantifica mediante la frecuencia relativa de cada modo de falla respecto del total de remociones registradas para el componente dentro de cada AOC. Teniendo esto en cuenta, el NPR se determina separadamente por AOC, debido a las diferencias en volumen operacional y número de componentes expuestos, y posteriormente para el conjunto de la flota, con el fin de identificar modos de falla relevantes tanto a nivel local como global.

La evaluación considera las categorías de remoción más relevantes identificadas para los componentes de ruedas y frenos, tanto por AOC como para el conjunto de la flota.

SUBSISTEMA	SUB-SUBSISTEMA	FUNCION	FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA		CAUSAS DE FALLO		EFECTOS DE FALLA		S	D
ATA 32-40 RUEDAS Y FRENOS	ATA 32-41 NLG	SOPORTE ESTRUCTURAL PARA RODAJE Y ROTACION DE LA AERONAVE	A	INCAPACIDAD DE PROPORCIONAR LA ADHERENCIA NECESARIA PARA UNA OPERACIÓN SEGURA.	1	DESGASTE PROGRESIVO BANDA DE RODADURA	-FRICCION ACUMULADA DURANTE TOUCHDOWN, RODAJE Y	-REDUCCION DE PROFUNDIDAD	3	2		
					2	DESGASTE CENTRAL	-PRESION DE INFLADO INADECUADA	- DESGASTE LOCALIZADO -PERDIDA UNIFORMIDAD DE RODADURA				
					3	DESGASTE LATERAL						
					4	SUPERFICIES PLANAS EN EL NEUMATICO	-DERRAPES O PRESION DE INFLADO					
			B	INCAPACIDAD DE RETENER LA PRESION DE INFLADO	5	CORTE O DAÑO POR FOD	-OBJETOS EXTRAÑOS EN LA PISTA	EXPOSICION DE LAS CAPAS ESTRUCTURALES DEL NEUMATICO CON RIESGO A NEUMATICO REVENTADO -PERDIDA DE PRESION	7	6		
					6	SEPARACION DE LAS CAPAS SUPERFICIALES DEL NEUMATICO	-GIROS EN PISTA A GRAN VELOCIDAD					
					7	DESGARRO/DESPRENDIMIENTO DE TROZOS DE	-PRESION DE INFLADO INADECUADA					
					8	AGRIETAMIENTO DE LOS SURCOS	-EXCESIVA CARGA DE FLEXION -REACCIONES QUIMICAS CON AGENTES EXTERNOS					
			C	INCAPACIDAD DE GARANTIZAR RODADURA CONCENTRICA Y GUIADO AERONAVE	9	VIBRACIONES EN LA RUEDA	-DESBALANCEO DINAMICO DEL CONJUNTO	VIBRACIONES EN LA AERONAVE	6	4		
					10	RUEDA QUE VUELVE A SERVICIO	VUELTA A SERVICIO AERONAVE AOG				1	
			D	INCAPACIDAD PARA GARANTIZAR INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LA RUEDA.	11	RUEDA DAÑADA	-DAÑOS ESTRUCTURALES	PERDIDA DE CONDICION ESTRUCTURAL	8	4		
					12	PERDIDA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	-ERRORES INSTALACION / MANTENIMIENTO				6	
			E	INCAPACIDAD DE ASEGURAR CONDICION AERONAVEGABLE	13	AERONAVE OPERANDO CON 2 NEUMATICOS DE DIFERENTE FABRICANTE	-ERRORES INSTALACION / MANTENIMIENTO	-INCLUMPIAMIENTO CONFIGURACION LEGAL	2	2		
	ATA 32-42 MLG	SOPORTE ESTRUCTURAL PARA RODAJE DE LA AERONAVE	A	INCAPACIDAD DE PROPORCIONAR LA ADHERENCIA NECESARIA PARA UNA OPERACIÓN SEGURA.	14	DESGASTE PROGRESIVO BANDA DE RODADURA	-FRICCION ACUMULADA DURANTE TOUCHDOWN Y RODAJE	-REDUCCION DE PROFUNDIDAD	3	2		
					15	DESGASTE CENTRAL	-PRESION DE INFLADO INADECUADA	- DESGASTE LOCALIZADO -PERDIDA UNIFORMIDAD DE RODADURA				
					16	DESGASTE LATERAL						
					17	SUPERFICIES PLANAS EN EL NEUMATICO	-DERRAPES O PRESION DE INFLADO					
			B	INCAPACIDAD DE RETENER LA PRESION DE INFLADO	18	CORTE O DAÑO POR FOD	-OBJETOS EXTRAÑOS EN LA PISTA	EXPOSICION DE LAS CAPAS ESTRUCTURALES DEL NEUMATICO CON RIESGO A NEUMATICO REVENTADO -PERDIDA DE PRESION	7	6		
					19	SEPARACION DE LAS CAPAS SUPERFICIALES DEL NEUMATICO	-GIROS EN PISTA A GRAN VELOCIDAD					
					20	DESGARRO/DESPRENDIMIENTO DE TROZOS DE	-PRESION DE INFLADO INADECUADA					
					21	AGRIETAMIENTO DE LOS SURCOS	-EXCESIVA CARGA DE FLEXION -REACCIONES QUIMICAS CON AGENTES EXTERNOS					
			C	INCAPACIDAD DE GARANTIZAR RODADURA CONCENTRICA	22	RUEDA QUE VUELVE A SERVICIO	VUELTA A SERVICIO AERONAVE AOG	VIBRACIONES EN LA AERONAVE	6	1		
			D	INCAPACIDAD PARA GARANTIZAR INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LA RUEDA.	23	RUEDA DAÑADA	-DAÑOS ESTRUCTURALES	PERDIDA DE CONDICION ESTRUCTURAL	8	4		
					24	PERDIDA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	-ERRORES INSTALACION / MANTENIMIENTO					
			E	INCAPACIDAD DE ASEGURAR CONDICION AERONAVEGABLE	25	RUEDA OPERA POR SOBRE SU VELOCIDAD NOMINAL	CONTACTO IRREGULAR, DESLIZAMIENTO O SPIN ACELERADO	INCLUMPLIMIENTO CONFIGURACION LEGAL	6	6		
					26	AERONAVE OPERANDO CON 2 NEUMATICOS DE DIFERENTE FABRICANTE	-ERRORES INSTALACION / MANTENIMIENTO				2	1
	ATA 32-43 CONJUNTOS DE FRENO	DETENER LA AERONAVE EN ATERRIZAJE Y CONTROL EN RODAJE	1	INCAPACIDAD DE PROPORCIONAR LAS CONDICIONES DE FRENADO SUFICIENTES EN LA OPERACIÓN	27	DESGASTE PROGRESIVO DE LOS DISCOS DE CARBONO	-FRICCION ACUMULADA -DISIPACION TERMICA RECURRENTE -APLICACIONES DE FRENO EN RODAJE Y ATERRIZAJE	-REDUCCION DE ESPESOR Y MASA TERMICA DEL CONJUNTO DE CARBONO HASTA LIMITE DE SERVICIO	3	2		
				INCAPACIDAD DE MANTENER PRESION HIDRAULICA EFECTIVA	28	PERDIDA DE ESTANQUEIDAD HIDRAULICA DEL CONJUNTO DE FRENO	-SELLOS DESGASTADOS O DEFECTUOSOS -VALVULAS DE PURGA SUELTAS O DEFECTUOSAS -DAÑOS EN PISTONES, CAMISAS O CARCASAS	-FRENADO ASIMETRICO -PERDIDA DE FLUIDO HIDRAULICO	6	3		
			INCAPACIDAD DE MANTENER INTEGRIDAD ESTRUCTURAL	29	PERDIDA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	-ERRORES INSTALACION / MANTENIMIENTO	PERDIDA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LA AERONAVE	8	3			
				30	FRENO DAÑADO	-DAÑOS ESTRUCTURALES -HARD LANDING						

Figura 3-19. Matriz FMECA con modos de falla.

El análisis utiliza las categorías de remoción con trazabilidad disponible en los CMA, vinculándolas con los modos de la matriz FMECA para calcular el NPR de cada componente y AOC. Dado que la base no diferencia homogéneamente los tipos de desgaste de neumáticos (central, lateral, irregular, etc.), estos modos se agrupan para el cálculo; el resto se evalúa individualmente cuando el registro lo permite. En consecuencia, el NPR depende del nivel de detalle disponible en la base operacional. Para análisis futuros, se recomienda estandarizar los registros, incluyendo mecanismo físico, ubicación del daño y causa identificada en la inspección.

Bajo estos criterios, los modos de desgaste (banda de rodadura, desgaste central o lateral, desgaste progresivo de frenos) reciben valores de severidad y detectabilidad bajos, dado que corresponden a procesos progresivos, monitoreables y que no comprometen de forma inmediata la integridad del componente. Los modos asociados a vibraciones en la rueda reciben una severidad y detectabilidad intermedias, debido a que, si bien corresponden a un evento de aparición súbita, su manifestación es percibida por la tripulación a través de las indicaciones de vibración disponibles en el tablero de la aeronave, lo que permite una detección relativamente oportuna respecto de otros modos de falla de tipo discreto. En contraste, los modos asociados a cortes, daño por FOD, separación de capas o pérdida de elementos estructurales reciben valores de severidad y detectabilidad altos, debido a su naturaleza súbita e impredecible, a la ausencia de un indicador que anticipe su ocurrencia y al mayor riesgo que representan para la integridad estructural y la seguridad operacional. Finalmente, los modos con implicancia principalmente administrativa o de configuración, como la operación con neumáticos de distinto fabricante, reciben ponderaciones bajas en ambos criterios, ya que su efecto se limita al incumplimiento de un requisito de configuración y su verificación es directa mediante los registros de mantenimiento.

Una vez definidos los modos de falla, se procede a calcular la ocurrencia normalizada de cada uno de ellos, para esto es posible utilizar la Ecuación (11).

$$O = 10 \cdot \frac{P_i}{T_j} \quad (11)$$

Donde:

O : ponderación de ocurrencia del modo de falla evaluado.

P_i : número de remociones asociadas al modo de falla i .

T_j : número total de remociones del componente j dentro del AOC evaluado.

Cuando $P_i = 0$, la ocurrencia adopta el valor $O = 0$, indicando que el modo de falla no presenta remociones registradas para el componente y el AOC durante el período analizado. Finalmente, es posible obtener un índice NPR para todos los componentes analizados con respecto a cada AOC y según remociones totales considerando el número total de remociones. Los resultados obtenidos para cada AOC y totales se muestran en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Número de Prioridad de Riesgo por componente, modo de falla y AOC.

Componente/ Posición	Modo de falla FMECA	JAT [-]	JES [-]	JAP [-]	JEC [-]	Σ -NPR [-]
Ruedas NLG	1-4	34,69	51,15	23,66	16,24	125,74
	5	9,7	4,66	3,73	1,44	19,53
	8	0,75	0	0	0	0,75
	9	0	5,54	1,07	3,98	10,59
	10	0,13	0	0	0	0,13
	11	0,57	0,57	0,28	0,26	1,68
	12	0	0	0	0	0
	13	0,07	0	0	0	0,07
Ruedas MLG	14-17	25,27	50,55	16,98	26,34	119,15
	18	28,55	9,05	8,89	12,79	59,29
	21	0,94	0	0,16	0,47	1,56
	22	0,85	0,09	0	0	0,93
	23	2,14	5,23	0,24	1,66	9,27
	24	0,24	0	0,71	0,71	1,66
	25	0,64	0	1,61	0	2,25
	26	0	0	0	0	0
CONSOLIDADO RUEDAS	1-4 , 14-17	29,56	49,55	19,99	30,58	129,69
	5 , 18	19,11	8,67	3,48	8,41	39,67
	8 , 21	0,05	0	0	0,25	0,3
	9	0,00	2,42	0,68	4,18	7,27
	10 , 22	0,70	0,05	0	0	0,75
	11, 23	1,42	0	0	2,07	3,5
	12 , 25	0,13	0	0	0	0,13
	13 , 26	0,0	0	0	0	0,06
FRENOS	27	19,24	30,38	16,2	33,42	99,24
	28	5,32	10,63	0	7,09	23,04
	29	1,35	2,7	0	1,35	5,4
	30	2,7	1,35	0	2,7	6,75

Los resultados de la Tabla 3-2 identifican el desgaste normal de los neumáticos como el principal modo de falla de las ruedas, con la mayor prioridad en Argentina, tanto para ruedas de nariz como para ruedas principales. Los cortes presentan su mayor incidencia en Chile, especialmente en las ruedas MLG, mientras las vibraciones adquieren mayor relevancia en Argentina y Colombia al igual que el desgaste normal de los frenos que se presenta como el modo de falla principal para estos, en cambio, las fugas hidráulicas presentan una prioridad secundaria.

En consecuencia, el análisis posterior se concentra en el desgaste de ruedas y frenos, los cortes, las vibraciones y las fugas hidráulicas, considerando las diferencias observadas entre AOC.

4 Modelamiento de Confiabilidad

En este capítulo, se desarrolla un análisis de confiabilidad con el objetivo de caracterizar la naturaleza de los modos de falla más críticos y orientar la selección del tipo de mantenimiento aplicable según su comportamiento respecto del ciclaje [1]. Para ello, es posible hacer uso de la función de confiabilidad $R(t)$, que representa la probabilidad de que el componente permanezca en servicio más allá de un determinado número de ciclos; la función de densidad $f(t)$, que permite identificar los intervalos donde se concentra una mayor proporción de remociones y la función de riesgo $h(t)$, que permite determinar si el riesgo de remoción aumenta, disminuye o permanece aproximadamente constante a medida que se acumulan ciclos [36].

4.1 Estimación por máxima verosimilitud y selección de la distribución

Para seleccionar la distribución que mejor represente el conjunto de datos, se evalúan los comportamientos de vida y remoción de los componentes mediante las distribuciones Weibull, exponencial y lognormal.

- Weibull.

La distribución de Weibull corresponde a una distribución flexible utilizada en análisis de confiabilidad, debido a que permite representar distintas formas de tasa de falla según el valor de su parámetro de forma [37]. Resulta particularmente útil cuando los modos de falla presentan una relación con la vida operacional del componente.

Los parámetros utilizados son β y η . El primero corresponde al parámetro de forma y permite interpretar el comportamiento de la tasa de falla. Cuando $\beta > 1$, la tasa de fallas aumenta con la vida operacional, coherente con desgastes progresivos, cuando $\beta < 1$, se considera un modo de falla con mortalidad infantil y cuando $\beta = 1$, el modo de falla es de carácter aleatorio. Por otro lado, η corresponde al parámetro de vida característica expresado en ciclos, este representa el punto en que la confiabilidad alcanza un valor equivalente a una probabilidad acumulada de falla cercana al 63,2 %. Para el cálculo de sus funciones de confiabilidad y densidad de falla, se utilizan las Ecuaciones (12) y (13).

$$R(t)_{Weibull} = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (12)$$

$$f(t)_{Weibull} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (13)$$

- Exponencial.

La distribución exponencial considera una tasa de falla constante y resulta aplicable cuando la probabilidad instantánea de falla no varía con los ciclos acumulados. Esta utiliza un único parámetro λ denominado parámetro de tasa de falla representa una tasa de falla constante [38]. Para el cálculo de sus funciones de densidad y de confiabilidad, se utilizan las Ecuaciones (14) y (15).

$$R(t)_{Exponencial} = e^{-\lambda t} \quad (14)$$

$$f(t)_{Exponencial} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (15)$$

- Lognormal.

La distribución Lognormal corresponde a una distribución de la vida del componente en la que el logaritmo natural de los ciclos de las fallas sigue una distribución normal [39]. Esta distribución resulta conveniente para modos de falla con alta dispersión en los ciclos de remoción, especialmente cuando no existe una relación progresiva simple con la vida operacional. La distribución Lognormal, al igual que Weibull, es flexible y puede ajustar distintos tipos de datos de falla; además, puede asociarse a procesos de degradación influenciados por múltiples efectos acumulativos o multiplicativos [39].

Los parámetros utilizados para esta distribución son φ , que corresponde al valor medio de $\ln t$ y σ , que representa la desviación estándar de $\ln t$. Por último, para la obtención de sus funciones de densidad y de confiabilidad, se pueden utilizar las Ecuaciones (17) y (18).

$$z = \frac{\ln(t) - \varphi}{\sigma} \quad (16)$$

$$R(t)_{Lognormal} = 1 - \Phi(z) \quad (17)$$

$$f(t)_{Lognormal} = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (18)$$

Por último, para la determinación de la función de riesgo, es posible utilizar la Ecuación (19) para todas las distribuciones.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (19)$$

Luego, para la selección de la distribución, es posible usar el método de máxima verosimilitud. El criterio consiste en determinar el vector de parámetros θ que maximiza la función de verosimilitud de la muestra observada, considerando conjuntamente los eventos asociados al modo de falla analizado y las observaciones censuradas [40]. Para esto, se considera un modo de falla m , una variable de vida $t_i = CSI_i$, donde cada observación i corresponde a una remoción o a un componente que permanece instalado al cierre del período analizado. Con esto, la Verosimilitud se puede calcular utilizando la Ecuación (20).

$$L_v(\theta) = \prod_{i=1}^n [f(t_i\theta)]^{\delta_i} \cdot [R(t_i\theta)]^{1-\delta_i} \quad (20)$$

Donde:

- $L_v(\theta)$: función de verosimilitud del modelo evaluado.
- θ : vector de parámetros de la distribución.
- t_i : ciclos acumulados correspondientes a la observación i .
- n : número total de observaciones consideradas.
- δ_i : indicador del estado de la observación igual a 1 cuando corresponde al modo de falla evaluado y 0 cuando corresponde a un dato censurado.

Debido a que la maximización directa de esta función puede resultar compleja computacionalmente, se utiliza su logaritmo natural, presentado en la Ecuación (21), el cual conserva los parámetros que maximizan la verosimilitud.

$$\ln L_v(\theta) = \sum_{i=1}^n \delta_i \ln [f(t_i\theta)] + (1 - \delta_i) \ln [R(t_i\theta)] \quad (21)$$

La selección de la distribución se efectúa para cada grupo con exposición operacional comparable. El desgaste de frenos se segmenta por AOC y posición; las ruedas, por AOC y tipo de tren. Los cortes se analizan separadamente por AOC y tipo de tren, mientras las fugas, vibraciones y daños estructurales se consolidan cuando la cantidad de eventos no permite una segmentación representativa. Posteriormente, para seleccionar la distribución apropiada dentro de cada grupo, se utiliza el criterio de información de Akaike corregido (AIC_c) como se puede ver en la Ecuación (22). Este criterio permite comparar modelos considerando conjuntamente su ajuste a los datos y la cantidad de parámetros utilizados, e incorpora una corrección asociada al tamaño de la muestra [40].

$$AIC_c = 2k - 2\log \hat{L} + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (22)$$

Donde:

- k : número de parámetros del modelo.
- $\hat{L}$: máximo valor de la función de verosimilitud.
- n : número de observaciones del grupo.

Posteriormente, dentro de cada grupo, se selecciona la distribución que presenta el menor valor de AIC_c , mediante la biblioteca *reliability* de Python usada en el código mostrado en el Anexo H. Los resultados obtenidos a partir de la base de datos de remociones se muestran en la Tabla 4-1 para las ruedas y en la Tabla 4-2 para los frenos. Los resultados de todos los modos estudiados se muestran en el Anexo I.

Tabla 4-1. Distribuciones seleccionadas para los modos de falla de ruedas según AOC y tipo de tren.

AOC	Tren	Categoría de falla	Distribución	Log $\hat{L}$ [-]	AIC_c [-]
JES	MLG 320	FOD CUT	Weibull	-354,60	713,25
JES	MLG 320	WEAR	Weibull	-1.150,07	2.304,19
JES	MLG 321	FOD CUT	Weibull	-409,54	823,14
JES	MLG 321	WEAR	Weibull	-922,54	1.849,13
JES	NLG	FOD CUT	Weibull	-268,57	541,17
JES	NLG	WEAR	Weibull	-1.528,20	3.060,43
JAT	MLG 320	FOD CUT	Weibull	-509,99	1.024,04
JAT	MLG 320	WEAR	Weibull	-758,78	1.521,62
JAT	MLG 321	FOD CUT	Weibull	-264,46	533,11
JAT	MLG 321	WEAR	Weibull	-113,34	230,86
JAT	NLG	FOD CUT	Lognormal	-177,71	359,48
JAT	NLG	WEAR	Lognormal	-974,12	1.952,30

JEC	MLG 320	FOD CUT	Weibull	-827,88	1.659,8
JEC	MLG 320	WEAR	Weibull	-1.209,82	2.423,67
JEC	NLG	FOD CUT	Weibull	-248,71	501,45
JEC	NLG	WEAR	Lognormal	-1.213,19	2.430,43
JAP	MLG 320	FOD CUT	Lognormal	-215,21	434,50
JAP	MLG 320	WEAR	Lognormal	-701,03	1.406,14
JAP	NLG	FOD CUT	Weibull	-176,50	357,08
JAP	NLG	WEAR	Lognormal	-647,18	1.298,43
CONSOLIDADO	MLG 320	DAMAGED	Weibull	-199,11	402,23
CONSOLIDADO	MLG 321	DAMAGED	Weibull	-158,08	320,20
CONSOLIDADO	NLG	DAMAGED	Weibull	-74,60	153,22
CONSOLIDADO	NLG	VIBRATION	Weibull	-590,67	1.185,34

Tabla 4-2. Distribuciones seleccionadas para los modos de falla de frenos según AOC y posición.

AOC	Posición	Categoría de falla	Distribución	$\text{Log } \hat{L} [-]$	$AIC_c [-]$
JES	EXTERIORES	WEAR	Weibull	-185,89	375,98
JES	INTERIORES	WEAR	Weibull	-241,59	487,37
JAT	EXTERIORES	WEAR	Weibull	-117,85	240,01
JAT	INTERIORES	WEAR	Weibull	-212,76	429,77
JEC	EXTERIORES	WEAR	Weibull	-175,35	354,95
JEC	INTERIORES	WEAR	Weibull	-234,01	472,21
JAP	EXTERIORES	WEAR	Weibull	-101,97	208,46
JAP	INTERIORES	WEAR	Weibull	-120,23	244,90
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	DAMAGED	Lognormal	-56,28	116,57
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	LEAK	Lognormal	-144,64	293,28

Para ruedas, como se puede ver en la Tabla 4-1, las categorías de falla analizadas para las ruedas se representan mediante distribuciones Weibull o Lognormal, dependiendo del grupo evaluado, sin que ninguna de ellas se ajuste mejor a una distribución exponencial.

Para el caso de los frenos, como se puede ver en la Tabla 4-2, la distribución Weibull presenta el menor valor de AIC_c para el desgaste normal en cada AOC y posición, mientras que la distribución Lognormal presenta el menor valor para los modos consolidados de fugas y daños.

Las funciones de la biblioteca *reliability* para las distribuciones estudiadas estiman sus parámetros mediante la maximización de la Ecuación (21) y determinan, para cada parámetro estimado, su intervalo de confianza del 95 % [40]. Estos se presentan en el Anexo J.

4.2 Implementación de curvas de confiabilidad para ruedas

Usando las ecuaciones correspondientes a las distribuciones seleccionadas en la sección 4.1, es posible calcular las curvas de confiabilidad para cada modo de falla. Para el caso del desgaste normal en las ruedas, los resultados de las curvas se muestran en la Figura

4-1 para las ruedas de nariz, en la Figura 4-2 para las ruedas principales para las aeronaves A320 NEO y A320 CEO y en la Figura 4-3 para las aeronaves A321 NEO.

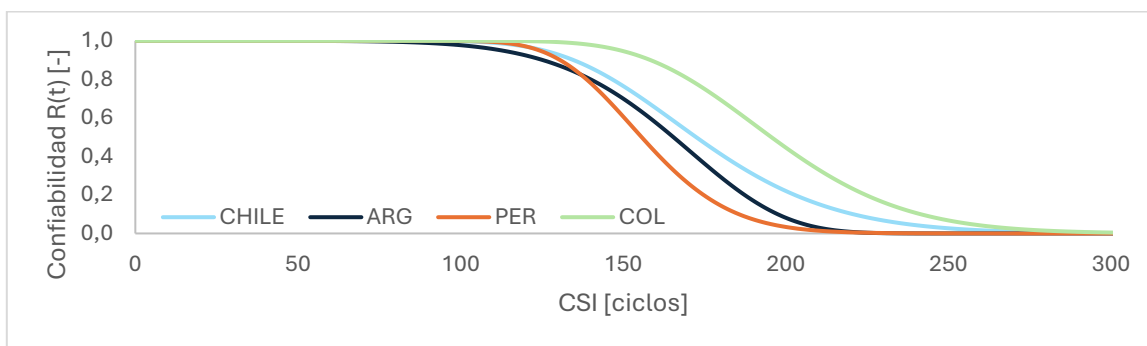


Figura 4-1. Confiabilidad por desgaste normal de ruedas NLG según AOC.

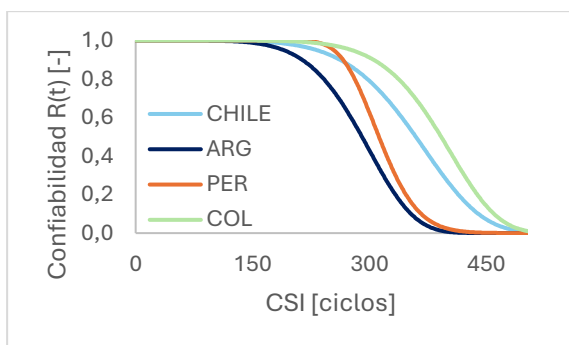


Figura 4-2. Confiabilidad por desgaste normal de ruedas MLG de aeronaves A320 según AOC.

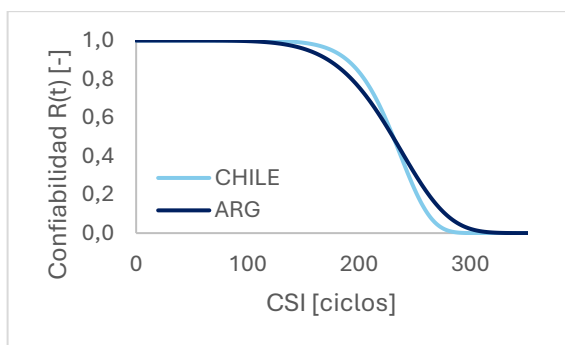


Figura 4-3. Confiabilidad por desgaste normal de ruedas MLG de aeronaves A321 según AOC.

Como se puede apreciar, el comportamiento de las curvas de confiabilidad mantiene coherencia en el desglose por AOC presentado en la Sección 1.2, destacando el AOC de Colombia con un desempeño relativo superior a las demás AOC en los trenes de nariz y principales de las aeronaves A320 CEO y NEO. Sin embargo, la ausencia de aeronaves A321 NEO en Colombia junto con la similitud de las curvas de confiabilidad observada entre Chile y Argentina en la Figura 4-3, respalda la revisión de variables propias de la operación colombiana como posibles factores explicativos, considerando además que las mallas operadas por las aeronaves en Chile y Argentina presentan densidades relativamente similares. Para los grupos de desgaste normal ajustados mediante Weibull, los parámetros de forma varían entre $\beta = 5,96$ y $\beta = 9,49$, y todos sus intervalos de confianza se mantienen completamente por encima de $\beta = 1$, lo que indica una relación marcada entre el aumento del CSI y la concentración de remociones en etapas avanzadas de la vida operacional del neumático, propia de la naturaleza de la categoría. Las curvas $f(t)$ y $h(t)$ se muestran en el Anexo K.

Por otro lado, las curvas $R(t)$ para los modos de falla relacionados a los cortes por objetos extraños, se pueden ver en la Figura 4-4 para las ruedas de nariz, en la Figura 4-5 para los aviones A320 CEO y NEO y en la Figura 4-6 para los aviones A321 NEO.

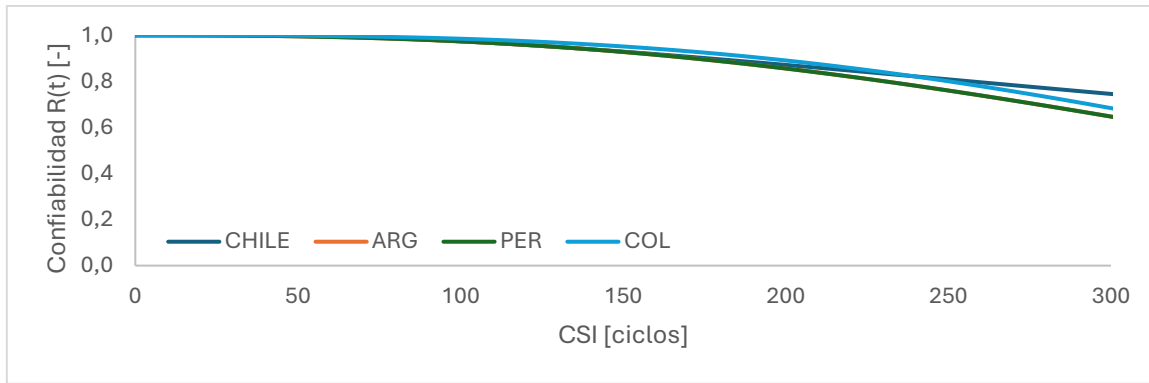


Figura 4-4. Confiabilidad frente a cortes FOD en ruedas NLG según AOC.

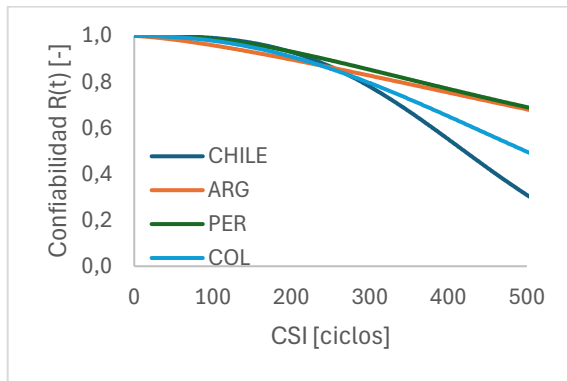


Figura 4-5. Confiabilidad frente a cortes FOD en ruedas MLG de aeronaves A320 según AOC.

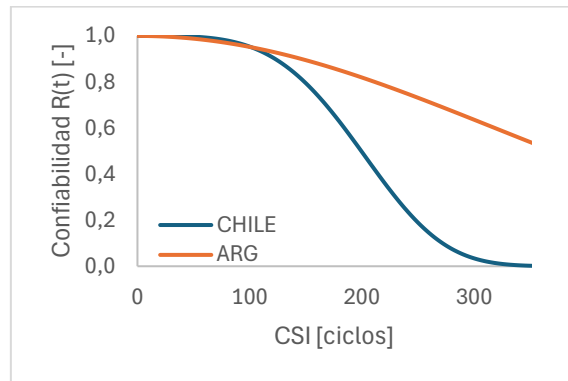


Figura 4-6. Confiabilidad frente a cortes FOD en ruedas MLG de aeronaves A321 según AOC.

Los parámetros de forma obtenidos para estos cortes varían entre $\beta = 0,91$ y $\beta = 3,87$. En siete de los ocho grupos ajustados mediante Weibull, el límite inferior del intervalo de confianza del 95 % permanece por encima de $\beta = 1$, lo que sugiere una posible relación entre el aumento de los ciclos al momento de la remoción y la tasa de remoción por cortes. Además, los intervalos presentan amplitudes variables por lo que la intensidad de esta relación no resulta uniforme entre los grupos. En los seis grupos donde cortes y desgaste normal presentan ajustes Weibull comparables, los valores de β para cortes son inferiores a los obtenidos para desgaste normal, lo que indica una mayor dispersión de los cortes durante la vida del neumático y una menor concentración en una etapa específica como es esperado. Las curvas $f(t)$ y $h(t)$ para cortes se muestran en Anexo L.

Por otro lado, la dependencia de los ciclos puede relacionarse con eventos de permanencia en servicio de daños iniciales que todavía no alcanzan los límites de remoción entregados por el fabricante. Estos límites exigen el cambio del neumático por razones de corte cuando este expone las capas de refuerzo en más de 6 $[cm^2]$ o compromete el ancho completo de nervadura [23]. Esto se refuerza debido a que las cartas de remoción de los neumáticos por cortes no incluyen los elementos que generaron este evento ni la morfología del corte. En consecuencia, estos resultados justifican revisar las estrategias de seguimiento de este modo de falla según las distintas etapas de vida operacional del neumático, explorando la hipótesis de que la exposición acumulada a ciclos influye en su ocurrencia.

Por último, las curvas correspondientes a vibraciones y daños estructurales se presentan como resultados complementarios en el Anexo M. Donde todos los ajustes Weibull de estas categorías presentan intervalos de confianza del 95 % completamente superiores a $\beta = 1$, lo que sugiere una tasa de remoción creciente con los ciclos acumulados.

4.3 Implementación de curvas de confiabilidad para frenos

Para los componentes de frenos, se puede observar la curva $R(t)$ para desgaste normal por posición y por AOC en la Figura 4-7. El resto de las gráficas se presentan en el Anexo N.

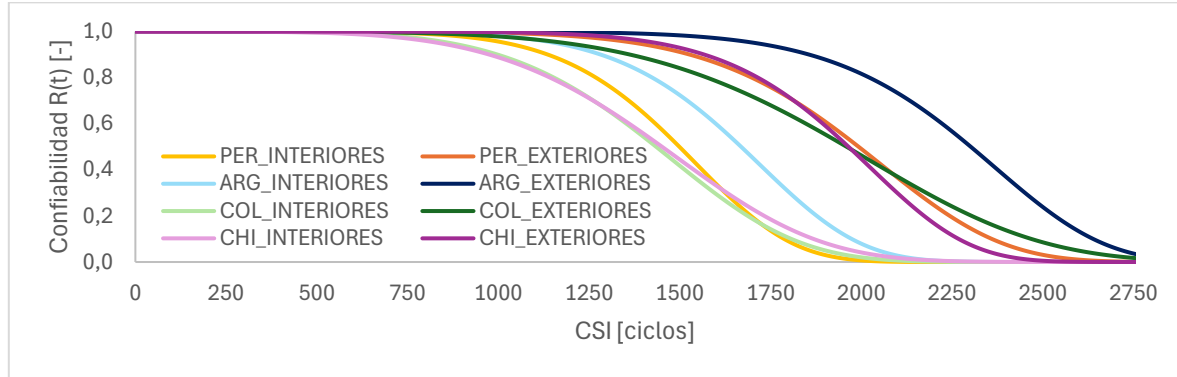


Figura 4-7. Confiabilidad por desgaste normal de frenos según AOC y posición.

Como se puede ver, las curvas de confiabilidad guardan coherencia con el desgaste relacionado a las posiciones interiores y exteriores y al comportamiento de los AOC según el Capítulo 1, lo que indica que la posición del freno tiene un efecto relevante en el desgaste de estos. Por otro lado, con respecto a las fallas relacionadas a daños estructurales y fugas hidráulicas, se presentan sus curvas de confiabilidad en el Anexo O. El comportamiento de las fugas al inicio de la vida es compatible con un régimen de fallas tempranas, lo que lleva a la consideración de problemas asociados a condiciones de instalación. En contraste, las remociones por daños presentan una mayor concentración relativa a ciclajes elevados y una disminución más tardía de la confiabilidad. Sin embargo, ambas categorías de falla presentan valores de confiabilidad considerablemente altos en comparación con el desgaste normal de los frenos.

4.4 Confiabilidad general

Para conocer la probabilidad de que un componente siga desempeñando las funciones para las que es diseñado, es necesaria la consideración de todos los modos de falla relevantes para el componente en cuestión, esto debido a que la salida de servicio puede estar dada por cualquiera de los eventos singulares. Es decir, el componente en cuestión permanece instalado mientras ninguno de sus modos de falla alcance el estado de falla. Para esto, es posible utilizar el supuesto de independencia de los modos de falla, donde la confiabilidad total de un componente corresponde al producto de sus confiabilidades individuales [14]. Esto puede ser calculado mediante la Ecuación (23) para el caso de los frenos. Por último, aunque los daños estructurales se mantienen en un nivel secundario del análisis, se

incorporan en la confiabilidad total debido a que representan una causa posible de remoción del componente.

$$R_{TOTAL,AOC,p}(t) = R_{Wear,AOC,p}(t) \cdot R_{Leaks}(t) \cdot R_{Damaged}(t) \quad (23)$$

Donde:

p : posición.

4.5 Evaluación de remplazos preventivos

Dentro del enfoque RCM, las alternativas de intervención propias del estudio realizado pueden ser tareas programadas por tiempo o ciclos, tareas basadas en condición o tareas proactivas que actúen directamente sobre los modos de falla más críticos y en el caso de que ninguna tarea resulte apropiada a un componente, se requiere evaluar un rediseño o una incorporación de redundancia [1]. En este contexto, se requiere hacer un estudio de tareas de reemplazo preventivo para la conclusión de la metodología.

Para esto, es necesaria la consideración de un reemplazo preventivo cuando un componente alcanza una cantidad fija de ciclos. Para esto, es necesaria la consideración de los costos asociados a una remoción preventiva y los costos asociados a una condición de falla del componente.

Para esto, es posible calcular el costo esperado por ciclo a diferentes intervalos mediante las funciones de Confiabilidad general para frenos y la Ecuación (24) [41].

$$C(t_{pre}) = \frac{C_{pre} \cdot R_{TOTAL,AOC,p}(t_{pre}) + C_f [1 - R_{TOTAL,AOC,p}(t_{pre})]}{\int_0^{t_{pre}} R_{TOTAL,AOC,p}(t) dt} \quad (24)$$

Donde:

- t_{pre} : número de ciclos considerado para el reemplazo preventivo del componente.
- $C(t_{pre})$: costos de un componente a un t_{pre} .
- C_{pre} : los costos de un reemplazo preventivo.
- C_f : costos asociados a la falla del componente

En JetSMART, una interrupción operativa no programada implica costos considerablemente mayores a los de un reemplazo preventivo, por lo que la empresa mantiene stock conservador y reemplazos anticipados, según lo detallado en la Sección 2.4. Por este motivo, para todo t_{pre} se cumple la desigualdad:

$$C_{pre} \geq C_f$$

Y, por consiguiente, se cumple la desigualdad:

$$C_{pre} \cdot R_{TOTAL,AOC,p}(t_{pre}) + C_f [1 - R_{TOTAL,AOC,p}(t_{pre})] \geq C_f$$

Y además considerando que:

$$\int_0^{t_{pre}} R_{TOTAL,AOC,p}(t) dt \leq \int_0^{\infty} R_{TOTAL,AOC,p}(t) dt$$

Estas condiciones determinan que el costo promedio por ciclo de cualquier intervalo preventivo finito sea igual o superior al costo asociado a mantener el freno instalado hasta su remoción. En consecuencia, el reemplazo exclusivamente por edad no presenta factibilidad económica para las condiciones evaluadas.

5 Desarrollo de modelos predictivos para remociones y desgaste de componentes

5.1 Introducción al enfoque predictivo

La metodología avanza hacia evaluar la predictibilidad de los componentes y la factibilidad de un mantenimiento predictivo, determinando si existen parámetros medibles en servicio que permitan proyectar la condición del componente antes de su remoción.

En JetSMART, tanto ruedas como frenos presentan desgaste normal con variables medibles. Sin embargo, el desarrollo teórico se centra en frenos, ya que su desgaste normal es el modo de falla dominante, con mayor permanencia en servicio y mayor tiempo de reposición desde el taller, por lo que predecir sus remociones resulta especialmente útil para planificar mantenimiento y abastecimiento. En las ruedas, en cambio, la demanda total depende también de otros eventos discretos sin evolución progresiva medible, lo que limita la aplicación del modelo.

5.2 Parámetros de medición de condición

Los parámetros de condición son mediciones físicas que representan el estado de un componente durante su permanencia en servicio. Para frenos, el parámetro principal es la longitud del indicador de desgaste (*Brake Wear Indicator Pin*), el cual se puede ver en la Figura 5-1. Tras instalar un conjunto nuevo, la longitud inicial expuesta se ajusta entre 52,6 y 54,1 [mm], con mediciones cada 7 a 10 días por aeronave bajo una presurización de 99,9 a 103,4 [bar] [24]. JetSMART remueve el conjunto cuando el indicador alcanza 1,5 [mm] por encima de la referencia de condición no aeronavegable, manteniendo un margen de seguridad operacional. Esta variable constituye la base para proyectar la vida remanente del freno en el modelo predictivo.

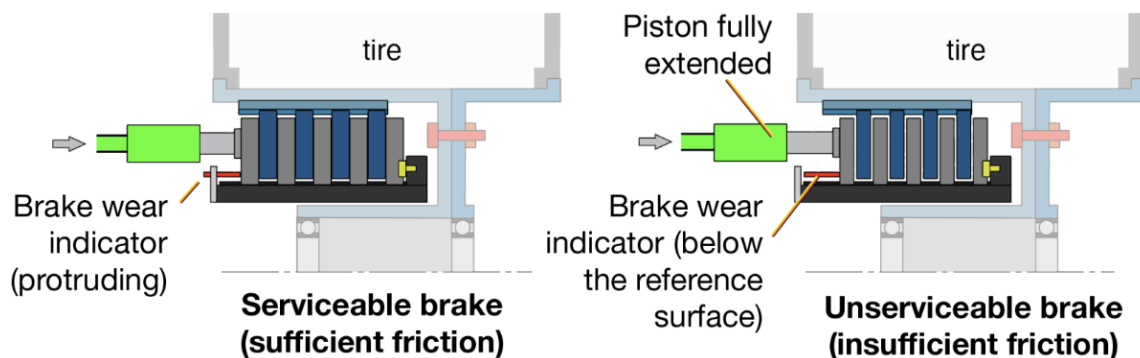


Figura 5-1. Condición aeronavegable y no aeronavegable según posición del indicador de desgaste del freno [35].

5.3 Preparación y limpieza de datos

Para el desarrollo del modelo, la base de datos obtenida a partir de las mediciones requiere una etapa previa de preparación y limpieza, debido a que las mediciones en línea, especialmente cuando dependen de lectura manual o ingreso operacional, pueden presentar variaciones puntuales entre registros consecutivos. Estas variaciones pueden originarse por diferencias en la condición de medición, lectura manual, errores de ingreso, etc. Por esta razón, resulta relevante la revisión de la coherencia de las mediciones obtenidas.

La base original utilizada para el modelo aplicado corresponde al registro secuencial de la longitud de cada pin, identificado por aeronave, fecha de medición, orden de trabajo y ciclos acumulados entre inspecciones, calculados directamente desde los itinerarios. A partir de estos registros, es posible obtener una tasa de desgaste por ciclo, definida como la diferencia entre la longitud del pin en la medición anterior y la longitud del pin en la medición actual, dividida por los ciclos de vuelo acumulados entre ambas, como se puede ver en la Ecuación (25). Esta normalización permite evaluar mediciones realizadas con distinta cantidad de ciclos entre inspecciones.

$$\delta_k = \frac{L_{k-1} - L_k}{C_k} \quad (25)$$

Donde:

- δ_k : : desgaste por ciclo entre mediciones.
- L_k : corresponde a la longitud del indicador en la medición k .
- L_{k-1} : longitud registrada en la medición anterior.
- C_k : número de ciclos acumulados entre ambas mediciones.

Para favorecer la aplicación automatizada del modelo, las tasas de desgaste calculadas a partir de los registros deben someterse a reglas de validación y depuración. Estas reglas buscan excluir mediciones atípicas, errores de registro y variaciones que no representen la evolución física del desgaste del freno. Para este propósito, se definen tres criterios principales:

- **Eliminar picos abruptos de medición respecto del registro anterior y posterior**

Esta regla es aplicada cuando una medición presenta un aumento puntual de la longitud del pin respecto a los registros adyacentes sin mantenerse en las mediciones posteriores. Este comportamiento no representa una recuperación física del desgaste del freno, por lo que se interpreta como una medición atípica. En el modelo aplicado, el valor se corrige mediante el promedio entre el registro anterior y posterior solo cuando dicho ajuste mantiene una tendencia de desgaste coherente. Si la corrección no entrega una tasa positiva y físicamente consistente, el registro se excluye del cálculo. En el modelo, una medición se considera atípica cuando su diferencia respecto del valor entre los registros adyacentes supera 8 [mm].

- **Eliminar de entrada al modelo valores superiores e inferiores a umbrales definidos.**

Esta regla se aplica para evitar que valores no representativos ingresen al modelo. Se excluyen tasas negativas, nulas sin justificación operacional o superiores al umbral máximo definido, debido a que estos registros suelen representar una desviación significativa entre los parámetros ingresados al modelo o condiciones operativas puntuales que no representan la tendencia general.

- **Segmentar valores donde el valor registrado supera un umbral definido y este se mantiene por varias mediciones.**

Este comportamiento se interpreta como cambio de componente o reinicio de la serie de medición, por lo que los registros posteriores deben analizarse como una nueva secuencia de desgaste.

5.4 Modelos posibles de implementación

Antes de la implementación de un modelo, corresponde evaluar distintas alternativas de modelamiento, debido a que el desempeño de cada método depende del contexto de la aplicación, la naturaleza de las variables estudiadas y la cantidad de datos disponibles. Para su posterior selección, se debe considerar la complejidad de la implementación y el error obtenido respecto de los datos disponibles. Para esto, se analizan modelos con distintos niveles de complejidad y aplicaciones, que incluyen un modelo de desgaste promedio, un modelo de regresión polinómica y un modelo basado en Random Forest para su comparación.

5.4.1 Modelo de desgaste promedio

El modelo de desgaste promedio corresponde a una estimación referencial, donde la vida remanente se proyecta a partir de una tasa media de desgaste por ciclo obtenida mediante la Ecuación (25) y los registros disponibles. Este enfoque es particularmente útil cuando el comportamiento del componente es relativamente estable, cuando se requiere una metodología simple, o cuando no se pueden obtener variables con suficiente representatividad del comportamiento del componente.

5.4.2 Modelo de regresión polinómica

La regresión polinómica permite representar relaciones con curvatura entre una variable dependiente y una o más variables explicativas. Este tipo de modelo resulta útil cuando la tendencia del desgaste no es estrictamente lineal, pero mantiene una forma progresiva y físicamente interpretable dentro del rango de datos observado utilizando una variable explicativa de su comportamiento. Su uso debe evaluarse con cautela en órdenes elevados, debido a que puede aumentar la complejidad del ajuste y disminuir la estabilidad fuera del rango analizado [42]. Este tipo de regresión se puede modelar mediante la Ecuación (26).

$$\hat{y} = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n \quad (26)$$

Donde:

- $\hat{y}$: valor estimado de la variable dependiente.
- x : variable explicativa utilizada por el modelo.
- a_r : coeficiente asociado al término de orden r .

- n : grado del polinomio.

5.4.3 Modelo de Random Forest

Random Forest es un modelo predictivo basado en la combinación de múltiples árboles de decisión. Cada árbol proporciona una estimación y el resultado final es obtenido a partir de las predicciones combinadas. Para esto, cada árbol se entrena mediante una muestra aleatoria de los registros disponibles y, durante su construcción, utiliza subconjuntos aleatorios de las variables de entrada. La predicción final corresponde a la combinación de las estimaciones entregadas por los árboles [43]. Este tipo de modelos depende de un volumen de datos relativamente alto para poder entrenar el modelo con suficiente representatividad.

5.5 Variables de ingreso al modelo

Antes de ingresar variables a los modelos, corresponde estudiar cuáles representan de mejor manera el comportamiento del desgaste. Para ello, pueden utilizarse las causas y variables asociadas a los modos de falla identificados previamente en la Sección 3.4.2. Debido a que no existen mediciones directas de temperatura para cada freno, se utiliza la densidad atmosférica como variable indirecta de las condiciones presentes durante el aterrizaje. Para evaluar su nivel adecuado de representación temporal, se comparan tres alternativas: densidad promedio anual, densidad correspondiente a la hora y día de cada medición, y densidad diferenciada por mes y franja horaria. Esta comparación permite determinar si una mayor especificidad temporal mejora la capacidad predictiva del modelo sin fragmentar excesivamente los datos. Inicialmente, los modelos se comparan utilizando una misma representación de esta variable, con el fin de evitar que su resolución temporal influya en la selección del método. Posteriormente, sobre el modelo seleccionado, se evalúan distintas formas de representación.

5.6 Agrupación temporal de los datos

Posteriormente, corresponde evaluar la forma en que los registros son agrupados antes de ingresar al modelo. En términos generales, los datos pueden analizarse como registros puntuales, registros diarios o grupos acumulados entre mediciones. En estos casos, es importante comparar diferentes agrupaciones de los datos, debido a que una mayor desagregación puede incorporar variaciones puntuales y reducir la representatividad de la tendencia general evaluada por el modelo.

En el caso aplicado, se comparan dos estructuras principales: registros desagregados por día y registros agrupados entre mediciones. Esta comparación se utiliza en modelos sensibles a la forma de ingreso de los datos, como Random Forest y regresiones polinómicas de grado dos o superior. Para regresiones de grado uno, la comparación resulta menos relevante cuando las variables se agrupan de forma equivalente, debido a que el modelo no incorpora curvatura y el cambio de agrupación no afecta a los resultados.

5.7 Comparación de modelos

Posteriormente, la comparación de modelos se realiza considerando todos los frenos instalados y todos los registros válidos disponibles para cada pin. Para esto, se compara el error absoluto acumulado entre la longitud estimada y la longitud medida del indicador para 50 aeronaves con registros disponibles y sus 4 pines. Esto permite comparar los modelos bajo una misma base de evaluación y seleccionar aquel que entrega la menor desviación global con respecto al comportamiento real. Los errores obtenidos se muestran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Comparación del error de los modelos evaluados para la estimación del desgaste de frenos.

MODELO	Error absoluto total [mm]
Random Forest por mediciones	856,30
Random Forest por ciclos	1.215,07
Promedio simple	711,79
Regresión grado 1	702,30
Regresión grado 2 por mediciones	587,33
Regresión grado 2 por ciclos	896,50

Como se observa en la Tabla 5-1, el menor error acumulado se obtiene mediante regresión polinómica de segundo grado utilizando la densidad del aire promedio por medición. Por esta razón, se selecciona este modelo como el modelo principal para estimar el desgaste de los frenos.

Por último, el mayor error en Random Forest no puede asociarse a una única causa, sino a un conjunto entre la complejidad del modelo y a la representatividad de los datos disponibles, dependiendo del conjunto de entrenamiento para representar con precisión las combinaciones existentes [43]. Finalmente, los modelos evaluados por ciclo presentan más error que los basados en mediciones, debido a que la desagregación por ciclo aumenta la dispersión de los registros e incorpora cambios que no son físicos en el freno en el caso aplicado.

Para validar la representación de la densidad, las tres alternativas se incorporan al modelo de regresión polinómica de segundo grado seleccionado, manteniendo la misma muestra, estructura de agrupación y métrica de evaluación. De esta forma, las diferencias observadas en el error pueden asociarse exclusivamente a la forma en que la variable atmosférica ingresa al modelo. Los resultados se presentan en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Comparación del error absoluto total según la representación temporal de la densidad atmosférica.

MODELO	Error absoluto total [mm]
Densidad promedio anual (5 años)	605,12
Densidad por hora y día	616,05
Densidad diferenciada por mes y franja horaria (día/noche)	587,33

Como se observa, la densidad diferenciada por mes y franja horaria entrega el menor error acumulado, aunque la diferencia respecto a las demás alternativas no es sustancial. Cabe destacar que la densidad por hora, pese a ser la representación más desagregada, no entrega el menor error, lo que confirma que una mayor especificidad temporal no garantiza necesariamente un menor error, ya que su desempeño depende de las evaluaciones realizadas. Asimismo, dado que la densidad del aire constituye una aproximación al efecto de la temperatura sobre el desgaste, y no una medición directa de esta, cualquiera de las alternativas evaluadas resulta razonable para su utilización. Pero por su menor error acumulado y por ser más simple de implementar que una desagregación horaria, se selecciona la densidad diferenciada por mes y franja horaria como variable representativa del modelo.

5.8 Modelo implementado y reglas

Una vez seleccionada la regresión polinómica de segundo grado y la densidad atmosférica diferenciada por mes y franja horaria correspondiente a cada intervalo entre mediciones, corresponde definir la forma en que este se aplica para estimar la condición del freno. Para esto, se define que, para cada intervalo de medición, el modelo estima el desgaste esperado del pin a partir de la densidad del aire promedio del período evaluado utilizando la densidad calculada mediante la Ecuación (5) como variable de entrada en la Ecuación (26). Luego, este desgaste estimado se descuenta de la longitud de la medición anterior, con lo que se obtiene un nuevo valor de la longitud remanente. Un ejemplo visual del modelo implementado para un pin específico se puede ver en la Figura 5-2.

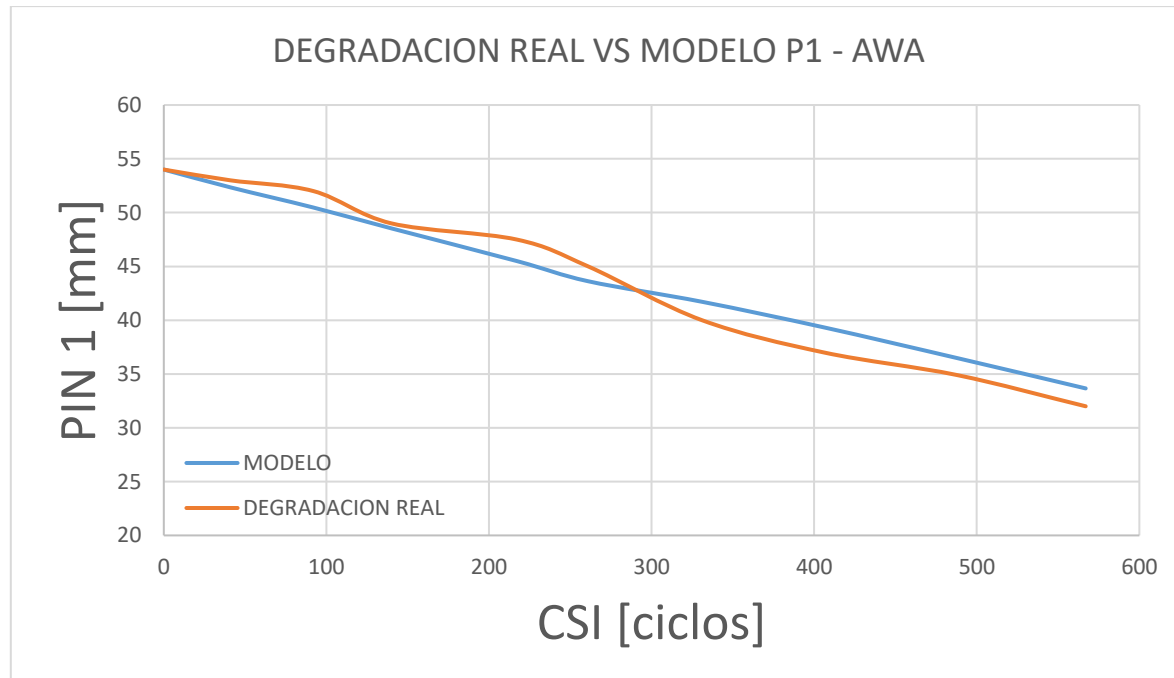


Figura 5-2. Comparación entre la longitud medida y estimada del indicador de desgaste para un freno de la matrícula AWA.

Posteriormente, se aplica una regla que identifica un cambio persistente en la longitud registrada del indicador de desgaste. Cuando la nueva condición se mantiene durante al menos tres mediciones consecutivas, con una variación máxima de 5 [mm] entre ellas, el registro se interpreta como el inicio de una nueva secuencia asociada al reemplazo del freno. Esto permite identificar los cambios de serie de los frenos sin que las mediciones erróneas continuas alteren la secuencia. El modelo implementado sin la regla se ve en la Figura 5-3 y el modelo con la regla, se ve en la Figura 5-4.

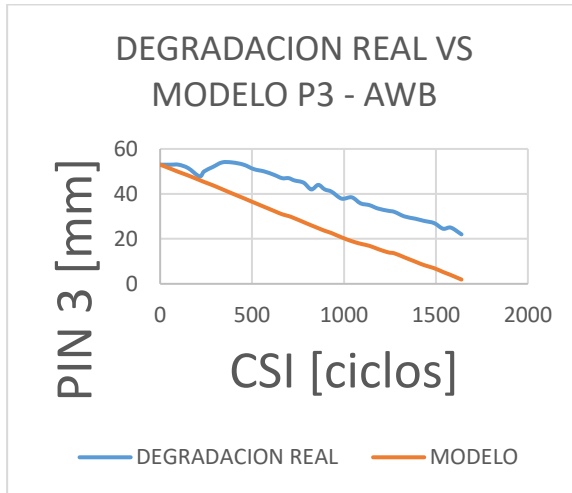


Figura 5-3. Comparación entre la longitud medida y estimada del indicador de desgaste sin aplicar la regla de corrección en pin 3 de la matrícula AWB.

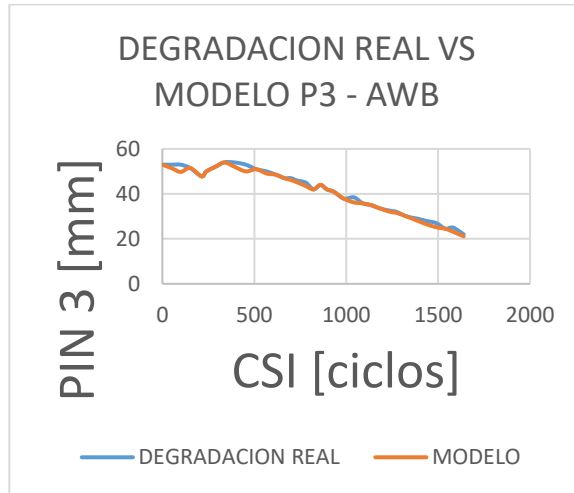


Figura 5-4. Comparación entre la longitud medida y estimada del indicador de desgaste aplicando la regla de corrección en pin 3 de la matrícula AWB.

5.9 Convergencia y estabilidad del modelo

Para evaluar la estabilidad del modelo seleccionado, se obtiene el error acumulado de predicción para todos los frenos variando progresivamente la cantidad de mediciones utilizadas en el ajuste. El resultado se puede ver en la Figura 5-5. Los resultados son consistentes con el uso de curvas de aprendizaje, las cuales permiten estudiar el resultado de incorporar más muestras de entrenamiento sobre el desempeño del modelo [36].

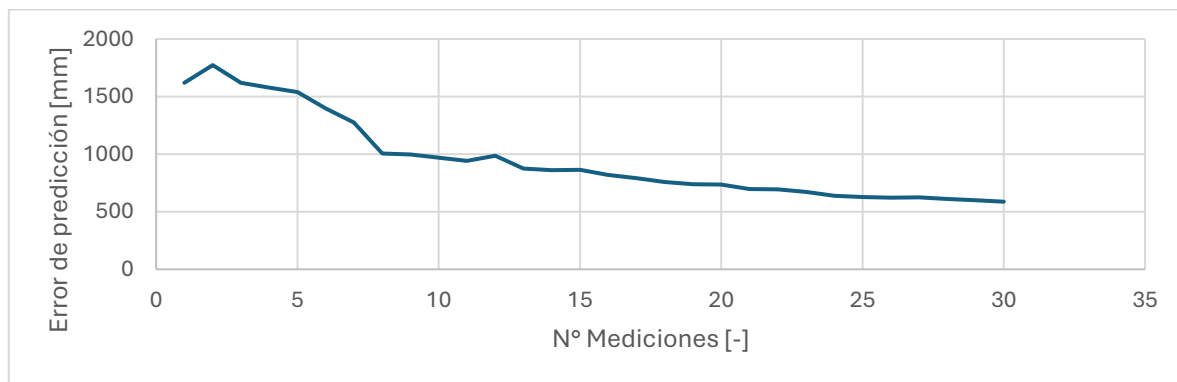


Figura 5-5. Variación del error del modelo según la cantidad de mediciones disponibles.

Como se observa en la Figura 5-5, el error presenta una tendencia general decreciente al aumentar la cantidad de mediciones. Sin embargo, dentro del período analizado no se identifica una estabilización completa hacia un valor constante, ya que el error continúa disminuyendo incluso en las últimas mediciones. Esto indica que el modelo aún puede beneficiarse de una mayor cantidad de datos y que la base disponible no permite definir un criterio claro de convergencia para la regresión polinómica realizada.

5.10 Operación del modelo y predicción por período

A partir del modelo implementado, es posible la proyección del desgaste de los pines en un período futuro y estimar la demanda esperada de frenos por desgaste normal. Para ello, es útil el itinerario futuro de vuelos de JetSMART, considerando los ciclos proyectados, la condición de cada pin y el momento en el que estos alcanzan su límite de remoción definido.

Como se observa en la Tabla 5-3, la demanda proyectada es agrupada por AOC y por mes para identificar el requerimiento mensual de frenos considerando su desgaste normal y la distribución operacional. Esto permite anticipar las necesidades de componentes en el horizonte analizado, apoyando decisiones en la planificación del mantenimiento, abastecimiento y coordinación logística con talleres.

Tabla 5-3. Proyección mensual de remociones de frenos por desgaste normal y AOC.

AOC	Jul-2026	Ago-2026	Sep-2026	Oct-2026	Nov-2026	Dic-2026	Ene-2027	Feb-2027	Mar-2027
JES	6	5	6	6	6	6	6	5	6
JEC	8	9	9	10	10	10	10	9	10
JAP	3	4	3	3	3	3	2	2	2
JAT	4	3	4	4	4	5	4	4	4
Total mensual	21	21	22	23	23	24	22	20	22

Como se puede ver en la Tabla 5-3, la demanda proyectada presenta valores relativamente estables, ubicados entre 20 y 24 frenos removidos al mes por desgaste normal. Posteriormente, este análisis puede utilizarse como antecedente técnico para considerar inventario y órdenes de frenos. Finalmente, es posible definir medidas de mejora para este modelo, incorporando variables de temperatura, un mayor volumen de datos y eventos operacionales no recurrentes.

6 Estrategias de mejora y tareas proactivas

Una vez priorizados los modos de falla mediante la matriz FMECA, el análisis avanza hacia la definición de estrategias de mejora y tareas proactivas utilizando los modos de falla priorizados como base para establecer acciones técnicamente aplicables que permitan gestionar sus consecuencias, mejorar su detección, reducir su recurrencia o disminuir la pérdida de vida útil de los componentes analizados [1].

En este contexto, las tareas proactivas corresponden a acciones de monitoreo, inspección, control operacional o revisión de procedimientos orientadas a intervenir antes de que el modo de falla alcance una condición no aceptable [1].

6.1 Criterios para la selección de estrategias de mejora

A partir de los principios de aplicabilidad definidos por Moubray [1], esta metodología establece los siguientes criterios para evaluar las propuestas.

- **Relación técnica con el modo de falla:** Este criterio evalúa si la estrategia actúa directamente sobre la causa o el mecanismo de degradación asociado al modo de falla estudiado según teoría relevante aplicada.
- **Controlabilidad sobre la causa:** Este criterio evalúa si la organización encargada de llevar a cabo las acciones de mejora tiene poder de acción directa y si es implementable.
- **Medición y seguimiento:** Evalúa si el efecto de la estrategia puede medirse mediante indicadores objetivos que permitan comparar el desempeño anterior y posterior a su implementación.
- **Seguridad operacional:** Evalúa si la estrategia a implementar mantiene los márgenes de seguridad del sistema, si requiere validación o certificación adicional antes de su implementación y si no introduce nuevos modos de falla ni consecuencias inaceptables.
- **Justificación técnico-económica:** Evalúa si el beneficio esperado tras la implementación de la estrategia justifica el costo o esfuerzo de su implementación.

Cuando no se identifica una tarea proactiva técnicamente factible o justificable económicamente, es posible definir una acción por defecto. Esta puede corresponder a mantener operación hasta límite, reforzar el seguimiento técnico, mejorar la disponibilidad logística, revisar procedimientos, modificar criterios de inspección o evaluar cambios en la forma de operar o mantener el activo [1].

6.2 Estrategias para el desgaste normal de las ruedas

El desgaste normal de los neumáticos mantiene una relación con la edad operativa. Sin embargo, la dispersión del CSI de remoción y la falta de una ubicación estandarizada para medir la profundidad de los surcos no permiten definir intervalos fijos de reemplazo ni desarrollar un seguimiento predictivo cuantitativo de la degradación.

Para la búsqueda de tareas proactivas enfocadas en las causas físicas que terminan generando el desgaste normal, se debe considerar que una parte importante del fenómeno estudiado en la Sección 3.4.1 responde a condiciones propias del contexto operacional de la aerolínea. En este caso, la elevada utilización de la flota y la operación en una red de vuelos definida por criterios comerciales estrictos limita la posibilidad de intervenir directamente sobre todas las variables que influyen en el desgaste. Por lo tanto, no resulta razonable proponer modificaciones sobre la red de operación y los criterios de despacho, ya que dichas acciones presentan baja controlabilidad, una justificación técnico-económica poco favorable y resultan incompatibles con el contexto operacional definido en la Sección 3.2.1.

Bajo esta premisa, la búsqueda de las mejoras tampoco se puede orientar a modificar límites de remoción, reforzar controles de presión y de condiciones de almacenamiento, o aumentar inspecciones y control de componentes recauchados debido a que estas correlaciones no aportan evidencia suficiente para atribuir el comportamiento observado a problemas internos del componente. En consecuencia, insistir en estos puntos podría generar acciones de baja efectividad práctica.

En conclusión, el análisis no identifica una variable técnica u operacional adicional y controlable que permita reducir el desgaste normal de las ruedas. Como acción complementaria, corresponde estandarizar el registro de la zona desgastada al momento de la remoción y, cuando la información se encuentre disponible, incorporar variables operacionales con fines exploratorios. Hasta identificar una relación reproducible, se mantiene la inspección visual por condición y la remoción conforme a los límites establecidos, sin incorporar tareas adicionales de seguimiento predictivo cuya efectividad no pueda comprobarse.

6.3 Estrategias para cortes por FOD

La localización del origen de un corte por FOD presenta una incertidumbre relevante, debido a que la base donde se detecta la condición del neumático no necesariamente corresponde a aquella donde se produce el daño inicial. Aunque el neumático recibe una inspección visual antes de cada vuelo, el corte puede no ser detectado inicialmente, mantenerse dentro de los criterios aceptables o aumentar su profundidad durante operaciones posteriores. Además, la severidad observada depende de las características del objeto y de la condición inicial del daño.

Esta incertidumbre dificulta identificar la estación aeroportuaria donde se origina el corte por FOD. Por esta razón, se define el Índice de Agresividad Relativa de Estaciones (IARE), cuyo objetivo es distribuir la contribución de cada remoción entre las estaciones visitadas previamente y normalizar el resultado según la exposición operacional de cada base. El análisis considera las cuatro estaciones anteriores a la remoción, debido a que, dentro de la red analizada, no es habitual que una aeronave atraviese más de cuatro bases consecutivas en las que resulte factible efectuar el mantenimiento o reemplazo de una rueda afectada por corte. Este horizonte también incorpora las oportunidades sucesivas de inspección visual previas a la detección definitiva del daño. La formulación del Índice es expresada por cada 1.000 aterrizajes y se muestra en la Ecuación (27).

$$IARE_{b,g} = \frac{\sum_{d=1}^2 \sum_{i=1}^4 \alpha_{i,d} \cdot N_{i,b,g,d}^{FOD}}{C_{b,g}} \cdot 1000 \quad (27)$$

Donde:

- b : base aeroportuaria evaluada.
- g : grupo definido según el rango de CSI.
- d : categoría de profundidad del corte.
- i : posición de la base dentro de las cuatro estaciones anteriores a la remoción, donde $i = 1$ corresponde a la estación inmediatamente anterior.
- α : ponderación asignada a la posición y profundidad.

- N^{FOD} : número de remociones por cortes asociados a FOD.
- $C_{b,g}$: número total de aterrizajes registrados.

El IARE se calcula para cada base aeroportuaria b , considerando las remociones por cortes asociados a FOD detectadas en estaciones donde resulta factible efectuar tareas de mantenimiento o reemplazo de ruedas, que corresponden a [CCP, SCL, AEP, EZE, LIM, MDE y BOG]. Para cada remoción se revisan las cuatro bases visitadas previamente y se contabiliza la cantidad de veces que cada base ocupa las posiciones $i = 1, \dots, 4$. Posteriormente, estos conteos se ponderan según la cercanía respecto de la remoción y la profundidad del corte, y se normalizan mediante la exposición operacional de cada base. Además, es posible realizar una separación entre los cortes más profundos y los menos profundos, donde a los cortes menos profundos se les asigna una ponderación a los últimos 4 aterrizajes de $\alpha_{i,1} = [0,35; 0,35; 0,15; 0,15]$ y para los cortes más profundos, una ponderación de $\alpha_{i,2} = [0,2; 0,2; 0,3; 0,3]$. Esto, con el objetivo de considerar el efecto de un daño producido previamente en la ruta y haber aumentado su profundidad en la operación posterior. Esta diferenciación permite mantener dentro del análisis bases anteriores en las que el corte pudo ser identificado y atendido, evitando atribuir completamente el evento a la estación inmediatamente anterior a la remoción. Por último, es posible separar los eventos según el CSI acumulado al momento de la remoción, dividiendo las remociones en tempranas, intermedias y tardías mediante los percentiles Q_{33} y Q_{67} , con el objetivo de evaluar si la contribución relativa de cada base varía según la vida acumulada del neumático.

La Ecuación (27) se aplica a las remociones por cortes asociados a FOD de cada conjunto de ruedas. Los resultados permiten identificar las bases con mayores valores de IARE para las ruedas NLG y MLG, estos resultados se muestran en las Figuras 6-1 a 6-3 para Chile, considerando además el número de aterrizajes total de esa base hacia SCL y CCP, el resto de las bases se muestran en el Anexo P.

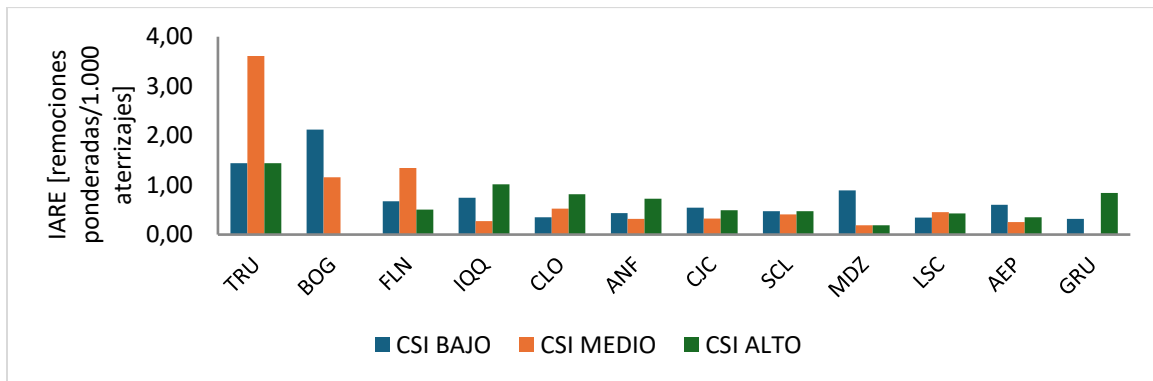


Figura 6-1. IARE ponderado por 1.000 exposiciones para JAT ruedas NLG según base y rango de ciclos.

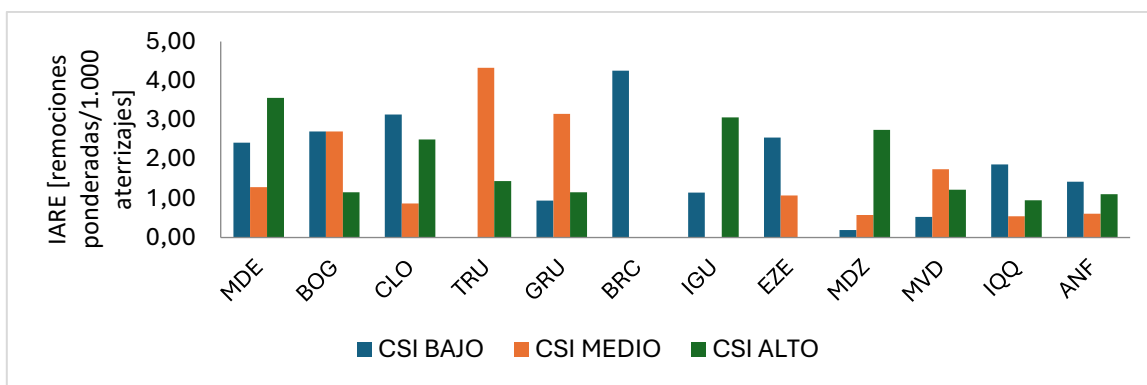


Figura 6-2. IARE ponderado por 1.000 exposiciones para JAT ruedas MLG A320 según base y rango de ciclos.

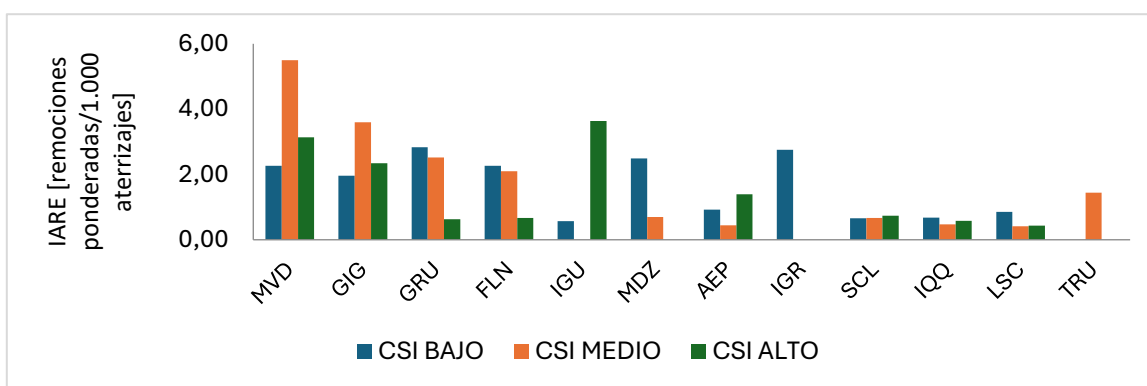


Figura 6-3. IARE ponderado por 1.000 exposiciones para JAT ruedas MLG A321 según base y rango de ciclos.

Las Figuras 6-1 a 6-3 muestran que la contribución relativa del IARE en Chile varía según componente, configuración y rango de ciclos. En ruedas NLG, TRU concentra la mayor señal relativa y mantiene presencia en distintos rangos de ciclos. En MLG A320, la contribución se distribuye entre MDE, BOG, CLO, TRU, GRU, BRC, IGU y EZE, sin concentrarse únicamente en una base. En MLG A321, en cambio, las mayores contribuciones se concentran en MVD, GIG, GRU, FLN e IGU, destacando la presencia de bases brasileñas dentro de rutas cubiertas principalmente por esta configuración.

Al revisar las secuencias previas, las bases brasileñas y MVD presentan mayor concentración en aeronaves A321 y con mayor presencia dentro del mallado operacional chileno. En particular, MVD destaca por su presencia directa y previa a remociones por cortes en SCL. La ruta MVD-SCL aparece en 17 vuelos en el período analizado, 4 operados por aviones A320 y 13 por A321, registrando 2 remociones en A320 y 1 en A321, y 347 vuelos dentro de la secuencia MVD-GIG-SCL, asociados a 23 remociones por FOD, de las cuales 21 corresponden a aeronaves A321.

Por otro lado, GRU constituye una base cuya operación se concentra casi en su totalidad por el AOC chileno, donde solo en aeronaves A320, se registraron 115 vuelos a Chile con GRU en las últimas 4 estaciones con 8 remociones por cortes, y cerca de 300 vuelos en las últimas 4 estaciones antes de la remoción en A321 con 12 remociones, además, del total,

11 remociones de estas son con GRU en la base anterior antes de la remoción. Luego FLN registra 298 vuelos directos a SCL en el período y 13 remociones por cortes. Esta base registra un número similar de vuelos a Argentina con 5 remociones registradas, equivalente a un 6 % de los cortes totales registrados en esta AOC. GIG presenta cerca de 600 vuelos directos hacia los AOC de Argentina y Chile, con 23 remociones en Chile y 12 en Argentina, sin embargo, 12 de esas 23 remociones registradas en Chile corresponden a aeronaves que operan regularmente en Argentina y también presentan recurrencia en eventos de GRU y MVD en 53 eventos totales.

TRU corresponde a una base peruana cuya operación se concentra casi en su totalidad hacia Chile, con 163 vuelos directos, y 10 remociones por FOD, sin tener recurrencia en el resto de las bases del mallado. Luego, CLO presenta 860 vuelos hacia Chile con presencia dentro de las últimas cuatro posiciones previas a la remoción, con 24 eventos de cortes, que además es una estación recurrente en el resto de los gráficos y en la operación de Colombia como se puede ver en el Anexo P.

En ruedas principales de aeronaves A320 en Chile, se registran 97 eventos de remoción por FOD, de los cuales 31 de estos presentan las bases CLO, GRU o TRU en sus últimas 4 estaciones antes de la remoción, lo que corresponde a cerca de un 32 % de los eventos, aunque estas bases representan solo el 4 % de los vuelos totales hacia SCL, lo que evidencia un margen relevante. Por otro lado, en las ruedas de nariz en aeronaves A320, se registran 47 de estos eventos en Chile, con 12 de estos presentando CLO, GRU o TRU entre las últimas cuatro estaciones, equivalente a un 25 %, al considerar las bases FLN, GIG y MVD, la cobertura aumenta a un 51 % con solo el 12 % de los vuelos totales. En el caso de las aeronaves A321 en Chile, se registran 81 eventos de remoción por FOD y 50 de estos presentan, dentro de las últimas cuatro estaciones antes de la remoción al menos una vez a MVD, GRU, FLN o GIG, lo que corresponde a un valor cercano al 61 %, aunque estas bases representan tan solo el 21 % de los vuelos totales a SCL por este operador.

A partir del análisis, se propone establecer un monitoreo diferenciado sobre las bases que presentan mayor índice para remociones de cortes. En el caso de Chile, identificado como el AOC con mayor criticidad relativa para este modo de falla, el análisis identifica a bases como TRU, GRU, GIG, MVD, FLN y CLO con mayor contribución relativa de índice. Sin embargo, debido a la trazabilidad de la documentación disponible, estas bases aeroportuarias no permiten atribuir directamente el origen del daño, pero sí definen puntos prioritarios para incorporarse inicialmente a un seguimiento interno, orientado a revisar la recurrencia de los eventos directamente, la naturaleza de los elementos encontrados y los patrones consistentes de daño para descartar la generación de cortes por el aumento de presión derivada de la operación en estaciones con mayores regímenes térmicos en comparación con la presión suministrada en las bases de mantenimiento chilenas. Posteriormente, en caso de contar con antecedentes suficientes, se puede escalar hacia una comunicación con el operador aeroportuario o a la autoridad correspondiente incorporando la evidencia de las remociones [23].

De forma complementaria, se propone mejorar la clasificación interna de los eventos de corte, especialmente al tratarse de un modo de falla crítico para la operación, diferenciando la presencia del objeto incrustado y la zona afectada de la banda de rodadura o el lateral

del neumático. Luego, con esta diferenciación, se propone complementar el IARE con antecedentes externos al componente, como el tipo de objeto encontrado y la zona afectada del neumático. Asimismo, se propone mantener un seguimiento periódico de las cuatro bases anteriores a cada remoción por corte, priorizando los eventos relevantes y detectando aumentos sostenidos del IARE respecto del comportamiento habitual de cada estación. Finalmente, la segmentación por rangos de CSI no identifica un rango de vida dominante de manera consistente entre las bases priorizadas.

6.4 Estrategias para vibraciones

En el caso de las remociones por vibraciones, se observa un comportamiento particular principalmente en el AOC de Argentina, donde 10 de las 26 remociones de ruedas por vibraciones se concentran en la aeronave de matrícula LV-KDP, como se puede ver en la Figura 6-4. Además, 9 de los 10 eventos corresponden a conjuntos de rueda con números de serie diferentes, lo que disminuye la posibilidad de atribuir la recurrencia a un componente específico y orienta la revisión hacia condiciones comunes de la aeronave, el tren de nariz o sus procedimientos de instalación.

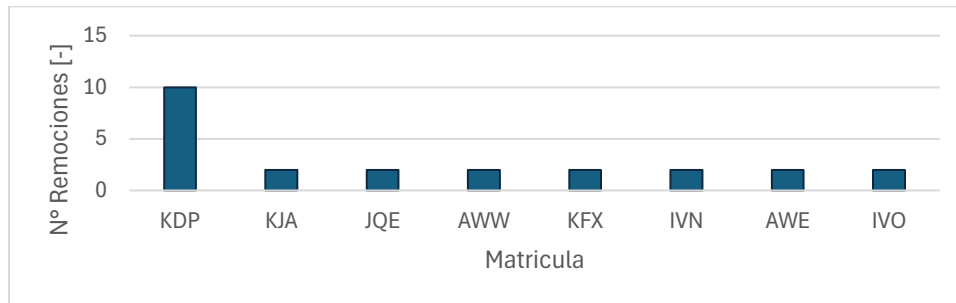


Figura 6-4. Remociones en Argentina por vibración según matrícula de aeronave.

El eje asociado al tren de nariz de la aeronave LV-KDP se encuentra instalado desde la recepción de la aeronave el año 2018 y la aeronave no presenta registros de remociones por vibraciones en sus ruedas de nariz previos al período analizado.

Por esta razón, se propone solicitar al área de ingeniería la activación de una tarea de revisión de la aeronave basada en los manuales aplicables de los componentes de los rodamientos y el tren de aterrizaje, considerando aspectos como el desalineamiento del eje, holguras, soldaduras, condición de los rodamientos, lubricación, entre otros aspectos técnicos aplicables. Posteriormente, corresponde mantener un seguimiento de las remociones por vibración asociadas a esta matrícula.

6.5 Estrategias para el desgaste normal de los frenos

Como se analiza en la Sección 1.2, el desempeño de los frenos presenta diferencias entre AOC respecto de la referencia de rendimiento establecida por el fabricante. Estas desviaciones no permiten atribuir directamente el desgaste a una variable operacional específica, debido a que no se dispone de registros de aplicación de frenos, temperatura real, energía absorbida o distancia de rodaje según lo descrito en la Sección 3.4.2. Sin embargo, desempeños sostenidamente inferiores a la referencia justifican priorizar una

evaluación conjunta entre Ingeniería, Operaciones y Seguridad Operacional, orientada a revisar prácticas relacionadas con el número de aplicaciones y la condición térmica de los frenos.

En los AOC que presentan un desempeño inferior a la referencia, particularmente JAT, JEC y JAP, corresponde evaluar el refuerzo de la recomendación de evitar aplicaciones continuas de los frenos durante el rodaje. En calles de rodaje rectas y cuando las condiciones de tránsito lo permiten, Airbus recomienda permitir una aceleración controlada hasta 30 [kt], aplicar frenado suave hasta alcanzar 10 [kt] y liberar posteriormente los frenos antes de una nueva aplicación [35]. Esta práctica busca reducir el número de aplicaciones y la acumulación térmica asociada a rodajes prolongados o congestionados conforme a lo descrito en la Sección 3.4.2.

La aplicación de estos lineamientos debe someterse a evaluación por Ingeniería, Operaciones y Seguridad Operacional, considerando sus efectos sobre el tránsito, consumo de combustible y márgenes de seguridad. Cuando su aplicación resulte factible, la efectividad debe verificarse mediante la evolución posterior de los ciclos de remoción de frenos en los AOC priorizados.

6.6 Estrategias para fugas hidráulicas

Las fugas hidráulicas, localizadas principalmente en el *piston housing*, presentan una mayor concentración durante los primeros ciclos. No obstante, la información disponible no permite asociar el comportamiento a un sello o elemento específico, y no se identifican componentes alternativos aplicables que permitan modificar directamente esta condición. En consecuencia, no se justifica incorporar una tarea proactiva periódica adicional.

La medida se limita a verificar el cumplimiento de los requisitos de instalación y de las pruebas de estanqueidad establecidas en el CMM cuando una fuga aparece durante los ciclos posteriores al montaje, especialmente si aumenta la criticidad de este modo de falla.

6.7 Estrategias para la planificación del abastecimiento de frenos

La proyección presentada en la Tabla 5-3 permite anticipar la demanda de frenos asociada al desgaste normal. Sin embargo, el abastecimiento también debe considerar las remociones por desgaste no normal, especialmente aquellas cuya fecha de ocurrencia no puede estimarse mediante un modelo de degradación, como daños estructurales, fugas hidráulicas, pérdida de elementos, entre otras. Debido a que no es posible asignar anticipadamente una fecha específica a estas remociones, se propone calcular un *stock* de seguridad por AOC que permita cubrir su ocurrencia durante el plazo de reposición con base en la frecuencia de remociones observada durante el período estudiado. Las remociones por vuelta a servicio de una aeronave luego de un período extendido en tierra no se consideran en este análisis, debido a que la necesidad de componentes en dichos casos se anticipa con una antelación mayor a los plazos de entrega y recepción vigentes con los proveedores y equipos de logística actuales, los cuales corresponden a 42 días.

Por ese motivo, se utilizan herramientas para la determinación de los niveles de *stock* de seguridad a considerar en los diferentes operadores, esta propuesta se limita a frenos

debido a que se dispone de una proyección de demanda, la cual es detallada en el Capítulo 5 y requiere de menos consideraciones como costos diferenciados y restricciones logísticas, además estos componentes cuentan con un mayor tiempo de reposición por lo que la necesidad de que su operación se encuentre cubierta es más grande.

La aplicación se limita a los frenos, debido a que para este componente se dispone de una proyección de demanda por desgaste normal, un registro de remociones reactivas diferenciado por AOC y un plazo de reposición definido de 42 días. La extensión del procedimiento a las ruedas requiere una estimación equivalente que permita separar la demanda anticipable de aquella cuya ocurrencia no puede programarse.

La demanda reactiva se representa mediante una distribución de Poisson, debido a que la variable analizada corresponde al conteo de remociones ocurridas dentro de un intervalo de tiempo definido. Esto se basa en que los eventos individuales de demanda se consideran independientes y la demanda esperada durante el intervalo es reducida [46].

No es posible demostrar con el período disponible que Poisson constituye el único modelo aplicable. Su utilización supone que la tasa histórica permanece aproximadamente constante y que no existe una dependencia relevante entre las remociones. Por tanto, el modelo se adopta como una aproximación inicial para la planificación del abastecimiento y debe actualizarse al incorporar nuevos períodos de operación.

Para esto, se calcula para cada AOC la demanda reactiva media esperada durante el plazo de reposición, transformando la cantidad de remociones registradas durante 365 días a un período equivalente de 42 días utilizando la Ecuación (28). Este cálculo considera que la frecuencia histórica de cada operador permanece aproximadamente constante durante el período futuro evaluado.

$$D_{LT,b} = N_b \frac{LT}{T_{obs}} \quad (28)$$

Donde:

- b : AOC evaluado, correspondiente a JAT, JES, JAP o JEC.
- N_b : cantidad de remociones registradas durante el período estudiado.
- LT : plazo de reposición, equivalente a 42 días.
- $D_{LT,b}$: demanda media esperada durante los 42 días.
- T_{obs} : extensión del período observado, equivalente a 365 días.

Luego, la demanda media estimada por el período de reposición depende de un nivel de servicio seleccionado, entendido como la probabilidad deseada de que el *stock* disponible sea suficiente para cubrir la demanda reactiva durante dicho período sin generar una condición de aeronave en tierra por falta de componente. Esta cantidad se calcula mediante la Ecuación (29), utilizando la función de distribución acumulada de una Poisson y se selecciona el primer valor entero que iguala o supera el nivel requerido. El *stock* de seguridad por base corresponde a la diferencia entre esta cantidad máxima cubierta y la demanda media esperada, como se puede ver en la Ecuación (30) [46]. Para esto, se puede utilizar la función acumulada de Poisson directamente desde Excel.

$$Q_b^* = \min\{Q \in \mathbb{Z} \geq 0: P(X_b \leq Q) \geq NS\}, \quad X_b \sim \text{Poisson}(Q_{LT,b}) \quad (29)$$

$$SS_b = [Q_b^* - D_{LT,b}] \quad (30)$$

Donde:

- Q : cantidad de frenos evaluada.
- Q_b^* : menor cantidad entera de frenos que alcanza el nivel de servicio seleccionado.
- NS : nivel de servicio requerido.
- X_b : número de remociones no programadas durante los 42 días.
- $P(X_b \leq Q)$: probabilidad de que ocurran como máximo Q remociones durante los 42 días.
- $\mathbb{Z}_{\geq 0}$: conjunto de números enteros no negativos.
- SS_b : *stock* de seguridad por AOC.
- $[\cdot]$: redondeo al entero superior.

En el período estudiado, JAT registra 10 remociones abordables, JES 11, JAP 1 y JEC 11. Tomando esto en consideración, se pueden utilizar las Ecuaciones (28) a (30) para la determinación del SS_b . Los resultados se presentan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. *Stock de seguridad por AOC según nivel de servicio objetivo para frenos.*

Nivel de servicio [%]	JAT SS_b [–]	JES SS_b [–]	JAP SS_b [–]	JEC SS_b [–]	Total flota SS_b [–]
85,00 %	1	1	0	1	3
87,50 %	1	2	0	2	5
90,00 %	2	2	1	2	7
92,50 %	2	2	1	2	7
95,00 %	2	2	1	2	7
96,00 %	2	2	1	2	7
97,00 %	2	3	1	3	9
98,00 %	3	3	1	3	10
99,00 %	3	3	1	3	10
99,50 %	4	4	2	4	14
99,90 %	5	5	2	5	17
99,99 %	6	6	3	6	21

La Tabla 6-1 muestra una relación escalonada entre el nivel de servicio y el *stock* de seguridad, debido a que las remociones y el inventario se expresan en cantidades enteras. El *stock* total se mantiene en siete unidades entre el 90 % y el 96 %, aumenta a nueve unidades al 97% y alcanza diez unidades entre el 98 % y el 99 %. Para niveles superiores, el incremento resulta más pronunciado, alcanzando 14 unidades al 99,5 %, 17 al 99,9 % y 21 al 99,99 %.

JES y JEC presentan el mismo *stock* de seguridad debido a que ambos registran 11 remociones por desgaste no normal abordables y comparten el plazo de reposición. JAP

por otro lado presenta un *stock* menor como consecuencia de la única remoción registrada, consistente además con el menor volumen de operación registrado por este operador.

En definitiva, la selección del nivel de servicio objetivo debe ser evaluada por el departamento de *Supply Chain*, considerando el costo de mantener inventario, las consecuencias operacionales de una unidad faltante y los acuerdos vigentes con proveedores y talleres. Por último, la cantidad de unidades a solicitar según el período corresponde a la demanda de frenos proyectada por desgaste normal para el período más la cantidad destinada a cubrir las remociones no anticipadas.

7 Cuantificación de ahorro potencial

7.1 Alcance

La cuantificación económica no se extiende a las estrategias operacionales y de abastecimiento. En el primer caso, su efecto depende del alcance y de las condiciones de aplicación que definan Ingeniería, Operaciones y Seguridad Operacional para el establecimiento de un protocolo de estandarización de aplicación de frenos. En el segundo, la determinación de un beneficio requiere de decisiones propias de *Supply Chain* y sus políticas de inventario, incluyendo condiciones contractuales con proveedores, talleres y los equipos logísticos encargados de entregar los consolidados de frenos, además del valor obtenido por la venta, disposición o recuperación de las series de frenos retiradas de rotación. Por esta razón, la cuantificación del capítulo se concentra en cortes y vibraciones, debido a que corresponden a eventos abordables mediante las estrategias definidas en el Capítulo 6 y permiten estimar una fracción recuperable de ciclos respecto de una referencia de desgaste normal.

7.2 Cuantificación económica potencial de remociones abordables por cortes por vida no utilizada

Esta sección detalla la evaluación económica orientada a estimar el valor económico equivalente de la vida operacional no utilizada en remociones por corte abordables. Estos escenarios consideran exclusivamente la disminución de eventos por corte en las estaciones priorizadas en el Capítulo 6, entre ellas TRU, GRU, GIG, MVD, FLN y CLO.

Bajo esta lógica, se estima la fracción de vida no utilizada en cada remoción por corte incluida en el análisis, comparando los ciclos registrados al momento de la remoción con una referencia de vida esperada asociada a la mediana de las remociones por desgaste normal dentro del mismo componente y operador. Cabe destacar que este análisis no incorpora horas-hombre necesarias para la generación de la trazabilidad requerida. Para esto, es posible obtener la fracción de vida no utilizada para una remoción en particular mediante la Ecuación (31).

$$\xi_j = \max\left(0; \frac{CSI_{a,k}^{ref} - CSI_j}{CSI_{a,k}^{ref}}\right) \quad (31)$$

Donde:

- a : AOC asociado a la remoción.
- k : componente evaluado.
- j : remoción por corte incluida en el análisis.
- ξ_j : fracción de vida operacional no utilizada en la remoción j .
- CSI_j : Ciclos desde la instalación registrados al momento de la remoción j .
- CSI^{ref} : mediana del CSI de las remociones por desgaste normal.

Posteriormente, utilizando la Ecuación (31), se obtienen los resultados presentados en la Tabla 7-1. La selección considera la estación en que se registra la remoción y solo se incluyen Chile, Argentina y Colombia, debido a que Perú no registra remociones que cumplan simultáneamente los criterios de causa y estación definidos para este análisis.

Tabla 7-1. Fracción de vida no utilizada en remociones abordables por AOC y componente.

AOC	Componente	Remociones por corte abordables	$\sum CSI_j$ [ciclos]	$\sum \xi_j$ [-]
Chile	Ruedas NLG	23	1.083	6,06
Chile	Ruedas MLG A320	45	4.404	12,14
Chile	Ruedas MLG A321	52	3.402	14,56
Argentina	Ruedas NLG	2	48	0,3
Argentina	Ruedas MLG A320	11	1.555	5,56
Argentina	Ruedas MLG A321	4	354	1,61
Colombia	Ruedas NLG	10	233	1,15
Colombia	Ruedas MLG A320	50	5.942	15,79
Total	Ruedas NLG	35	1.364	7,51
Total	Ruedas MLG A320	106	11.901	33,48
Total	Ruedas MLG A321	56	3.756	16,16
Total	General	197	17.021	57,16

Luego, para estimar distintos escenarios de aprovechamiento del potencial identificado, se define el factor de recuperación ϵ , que representa la proporción de vida no utilizada que podría recuperarse mediante las estrategias propuestas. Para el análisis se consideran los siguientes escenarios:

$$\epsilon = \{0; 25 \%; 50 \%; 75 \%; 100 \%\}$$

El escenario $\epsilon = 0 \%$ representa la ausencia de recuperación de la vida no utilizada, mientras que $\epsilon = 100 \%$ representa la recuperación total del potencial identificado. Luego, el valor económico recuperable queda definido por la Ecuación (32).

$$V_{rec,a,k}(\epsilon) = \epsilon \sum_{j \in J_{a,k}} \xi_j PU_k \quad (32)$$

Donde:

- a : AOC.

- j : remoción.
- k : componente.
- $V_{rec}(\epsilon)$: valor económico equivalente recuperable para el escenario ϵ .
- ϵ : factor de recuperación de la vida operacional no utilizada.
- $\mathcal{J}_{a,k}$: conjunto de remociones por corte abordables.
- ξ_j : fracción de vida operacional no utilizada en la remoción j .
- PU : precio unitario público de referencia del neumático.

Las medianas utilizadas como referencia (CSI^{ref}) se obtienen para cada AOC y componente a partir de las remociones por desgaste normal según lo presentado en la sección 1.2 cuya representatividad respecto de los países donde operan los componentes es evaluada en la Sección 3.3. Con respecto a los precios utilizados para el análisis, para mantener la cuantificación independiente de precios de adquisición internos, se utilizan fuentes públicas como valores unitarios de referencia. En particular, se utiliza un precio de USD 1.299 para el neumático Michelin M08201, utilizado para ruedas de nariz, un precio de USD 2.516 para el neumático Michelin M01103-02, utilizado como referencia para las ruedas principales de las aeronaves A320 y un precio de USD 4.029 para el neumático Michelin M20101-01, utilizado para las ruedas principales de aeronaves A321 [47] a [49].

Aplicando la Ecuación (32) se obtiene el valor económico recuperable para cada escenario de recuperación de vida operacional. Los resultados agregados del período analizado se presentan en la Figura 7-1, mientras que el desglose por AOC, estación y componente se incorpora en el Anexo Q.

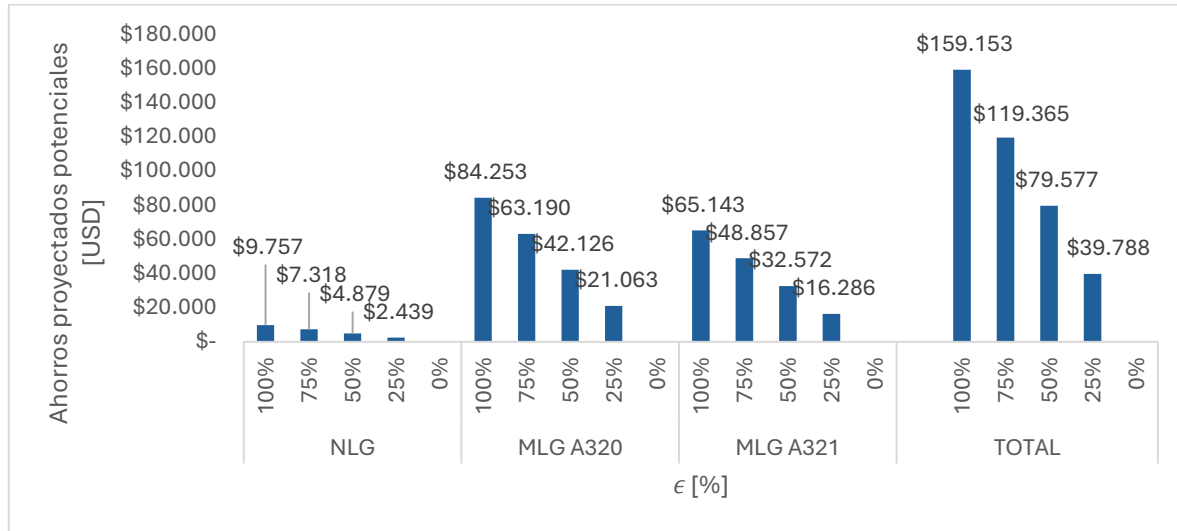


Figura 7-1. Valor económico potencial recuperable por componente y escenario.

La Figura 7-1 muestra que el valor económico equivalente recuperable alcanza USD 159.153 bajo el escenario de recuperación total de la vida no utilizada. Las ruedas principales de las aeronaves A320 concentran USD 84.253, equivalentes al 52,94 % del total, mientras que las ruedas principales de las aeronaves A321 representan USD 65.143, correspondientes al 40,93 %. En conjunto, ambos componentes reúnen el 93,87 % del potencial estimado. Las ruedas de nariz alcanzan USD 9.757 y representan el 6,13 %

restante. Luego, bajo el escenario conservador de recuperación del 25 %, el valor económico equivalente alcanza USD 39.788 y los escenarios del 50 % y 75 % representan USD 79.577 y USD 119.365, respectivamente.

La diferencia entre los componentes responde conjuntamente a la cantidad de remociones por corte consideradas, la fracción acumulada de vida no utilizada y el precio unitario público de referencia de cada neumático. Por esto, se observa que en JEC, que presenta una cantidad de remociones abordables inferior a otros grupos, pero utiliza una mediana de CSI por desgaste normal más elevada mantiene una contribución relevante al potencial económico, pese a su menor cantidad de eventos, como se puede ver en el Anexo Q.

A partir del desglose por estación presentado en el Anexo Q, GIG y CLO concentran los mayores valores económicos potenciales a recuperar, seguido por el resto de las bases de Brasil operadas por Chile. En particular, CLO concentra una proporción relevante de las remociones por corte consideradas para JEC, lo que explica su posición dentro de las estaciones con mayor potencial económico equivalente. Si bien este es el caso, se sigue manteniendo la sugerencia de incorporar trazabilidad a todos los eventos para tener un análisis más segregado sobre costos recuperables.

Por último, cabe destacar que los valores obtenidos corresponden al período estudiado y pueden utilizarse como referencia para un período posterior suponiendo que los volúmenes se mantienen relativamente constantes y las causas asociadas.

7.3 Cuantificación económica potencial de remociones abordables por vibraciones por vida no utilizada

Mediante el mismo procedimiento definido en la Sección 7.2, y la Ecuación (31), se puede determinar la vida equivalente pérdida por las 10 remociones abordables para la matrícula LV-KDP, estas acumulan 3,13 vidas equivalentes, a un precio de USD 1.299 cada rueda. Posteriormente, mediante la Ecuación (32), se determina el valor económico potencial recuperable para cada escenario considerado, como se puede ver en la Figura 7-2.

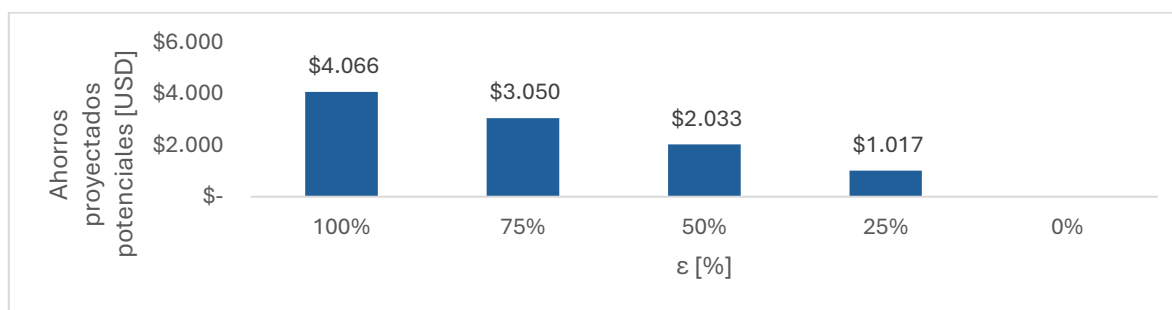


Figura 7-2. Valor económico potencial recuperable por vibraciones y escenario.

Bajo el escenario de recuperación total de la vida no utilizada identificada en las remociones por vibración, se podría considerar un ahorro de USD 4.066. Este valor resulta reducido frente al potencial identificado para las remociones por corte y representa aproximadamente el 2,5 % del valor total cuantificado mediante ambas estrategias. Por tanto, la aplicación de

la medida propuesta para vibraciones se justifica principalmente por la recurrencia identificada sobre la matrícula y no por su beneficio económico potencial.

7.4 Relación del ahorro potencial con el costo anual de componentes

Para dimensionar la relevancia económica de las estrategias cuantificadas, el valor económico equivalente recuperable por cortes y vibraciones se compara con el costo anual equivalente de reposición del componente correspondiente. Este costo equivalente se obtiene a partir del número total de remociones del período y el costo unitario de referencia del componente mediante la Ecuación (33).

$$R_{a,k}(\epsilon) = \frac{V_{rec,a,k}(\epsilon)}{N_k^{tot} PU_k} \cdot 100 \quad (33)$$

Donde:

- k : : componente evaluado.
- $R(\epsilon)$: valor económico recuperable respecto del costo anual para el escenario ϵ .
- N^{tot} : cantidad total de remociones durante el período analizado.

Mediante la Ecuación (33) se obtiene $R(\epsilon)$ para cada componente y todas sus remociones abordables. Los resultados agregados se presentan en la Figura 7-3 y el desglose por AOC y componente se incorpora en el Anexo R.

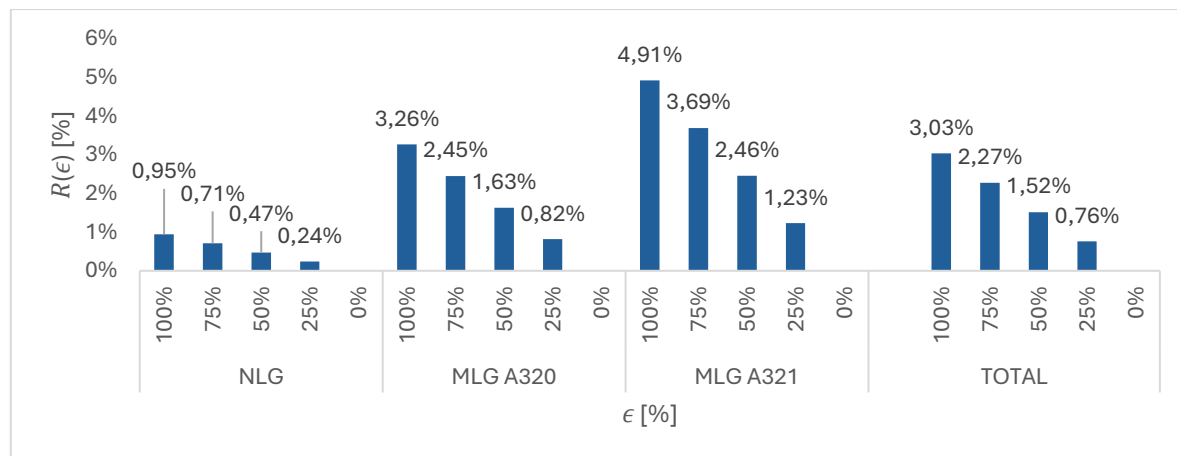


Figura 7-3. Ahorro potencial relativo sobre el costo anual equivalente por escenario de recuperación.

La Figura 7-3 muestra que el valor económico equivalente recuperable representa un 3,03% del costo anual equivalente de reposición bajo el escenario de recuperación total. Esta proporción disminuye a medida que disminuye el escenario de recuperación.

Las ruedas principales de aeronaves de la familia de A321 presentan la mayor proporción, alcanzando un 4,91 % bajo el escenario de recuperación total, seguidas por las ruedas principales A320, con un 3,26 %, y las ruedas de nariz, con un 0,95 %.

Cabe destacar que el análisis no incorpora costos asociados a indisponibilidad operacional, ya que dentro de las remociones abordables no se identifican eventos que generen una condición AOG durante el período analizado, lo que resulta consistente con las políticas de stock de seguridad mantenidas por la aerolínea en sus distintas bases.

7.5 Efecto proyectado sobre la vida operacional

Para complementar la cuantificación económica, se evalúa el efecto que tendría la recuperación parcial de vida no utilizada sobre la mediana de los ciclos de remoción. Para cada escenario, se recupera en cada remoción abordable una fracción ϵ de la diferencia entre su CSI observado y la mediana de referencia del mismo AOC y componente. Los registros restantes conservan su valor original y, posteriormente, se recalcula la mediana del CSI sobre el conjunto completo de remociones. Este análisis permite representar el impacto operacional esperado en ciclos y su impacto en el comportamiento general para cada operador. El efecto proyectado para las aeronaves A321, se muestra en la Figura 7-4, el Anexo S.

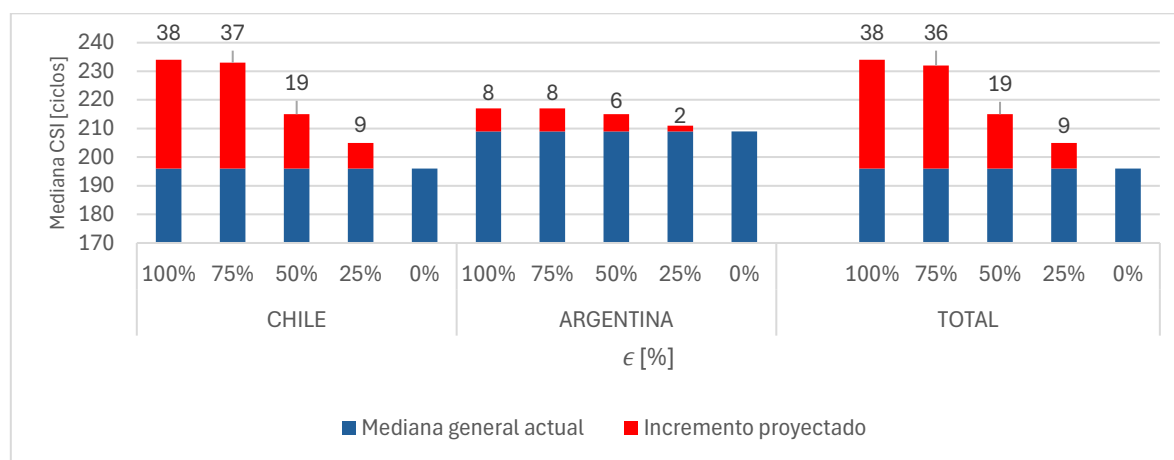


Figura 7-4. Efecto proyectado de la recuperación de vida no utilizada sobre la mediana de CSI en MLG A321.

Las Figuras del Anexo S muestran que el efecto proyectado varía según el componente y el AOC. En ruedas NLG, los incrementos de CSI son acotados y no modifican de forma relevante el comportamiento global, especialmente porque Colombia ya se encuentra próxima o sobre la referencia de la Figura 1-1. En MLG A320, el efecto es mayor en Chile, Perú y Colombia, donde las medianas base ya se ubican cercanas o superiores al *Budget* de la Figura 1-2, mientras que en Argentina permanece limitado por la menor cantidad de remociones abordables. En MLG A321, el principal efecto se concentra en Chile, donde una recuperación de $\epsilon = 25\%$ permite superar la referencia, mientras que en Argentina el desplazamiento proyectado no modifica sustancialmente su relación con el *Budget*.

8 Conclusiones

El análisis de los cuatro AOC de JetSMART, las tres configuraciones de ruedas y los conjuntos de freno permite identificar y priorizar los modos de falla relevantes. En ruedas, el desgaste normal presenta el mayor NPR consolidado, seguido por los cortes asociados a FOD; en frenos, el desgaste normal alcanza la mayor prioridad. Estos resultados orientan los análisis de confiabilidad y las estrategias asociadas a desgaste, cortes, vibraciones y fugas hidráulicas. La metodología cumple los objetivos definidos al integrar caracterización operacional, FMECA, modelamiento de confiabilidad, estrategias de mantenimiento, planificación del abastecimiento y cuantificación económica. Además, vincula confiabilidad, condición y contexto operacional para priorizar intervenciones, anticipar requerimientos y distinguir modos de falla dependientes de la vida operacional de aquellos asociados principalmente a factores externos.

Los grupos de desgaste normal de ruedas ajustados mediante Weibull presentan parámetros de forma entre $\beta = 5,96$ y $\beta = 9,49$, con límites inferiores del intervalo de confianza del 95 % superiores a uno, evidenciando una concentración de remociones en etapas avanzadas de la vida operacional. Los cortes muestran parámetros entre $\beta = 0,91$ y $\beta = 3,87$, con mayor dispersión y menor dependencia respecto de la edad del componente. En frenos, el desgaste normal presenta un mejor ajuste relativo mediante Weibull, confirmando que cada modo de falla requiere un tratamiento diferenciado y que una única distribución no representa adecuadamente el comportamiento global de los componentes.

Para el desgaste de frenos, el modelo predictivo utiliza las mediciones del indicador, el historial de ciclos y la densidad atmosférica como variable operacional indirecta. La regresión polinómica de segundo grado entrega un error acumulado de 587,33 [mm] y permite estimar la condición remanente y el período probable de remoción. Su aplicación proyecta una demanda mensual de entre 20 y 24 conjuntos por desgaste normal entre julio de 2026 y marzo de 2027, constituyendo una entrada para la programación del mantenimiento y el abastecimiento. Esta proyección se complementa con la determinación del *stock* de seguridad para remociones no programadas y permite definir coberturas por AOC considerando el inventario disponible y las unidades pendientes de recepción.

La cuantificación económica asociada a cortes y vibraciones alcanza USD 163.219 bajo un escenario de recuperación total de la vida no utilizada, equivalente al 3,03 % del costo anual de reposición de ruedas. Bajo un escenario conservador del 25 %, el valor alcanza USD 40.805, correspondiente al 0,76 %. Estos resultados permanecen por debajo de la reducción global del 5 % planteada en la hipótesis, debido a la influencia de condiciones operacionales con baja controlabilidad directa. Por lo tanto, la hipótesis se respalda respecto de la capacidad metodológica para sustentar decisiones orientadas a disminuir costos, aunque no se valida íntegramente en relación con la magnitud económica propuesta. La estructura desarrollada resulta aplicable a otros componentes aeronáuticos que dispongan de registros de remoción, límites de servicio y variables cuantificables.

Referencias

- [1] Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.
- [2] Lewis, E. E. (1996). *Introduction to reliability engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [3] Asociación Española de Normalización. (2008). *UNE-EN 60812:2008. Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas: Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE)*
- [4] JetSMART Airlines, Dirección de Operaciones. (s. f.). *Manual de inducción y bienvenida (onboard): Cultura operacional ULCC*
- [5] Airlines for America. (2018). *MSG-3: Operator/manufacturer scheduled maintenance development* (Vol. 1, Fixed-wing aircraft)
- [6] International Civil Aviation Organization. (2022). *Annex 8 to the Convention on International Civil Aviation: Airworthiness of aircraft* (13th ed., Amendment 110).
- [7] Dirección General de Aeronáutica Civil. (2022). *DAN 43: Mantenimiento* (2.^a ed., 3.^a enmienda).
- [8] Dirección General de Aeronáutica Civil. (2025). *DAN 145: Centros de mantenimiento aeronáutico (CMA)* (2.^a ed., Enmienda 5).
- [9] Administración Nacional de Aviación Civil. (s. f.). *Regulaciones Argentinas de Aviación Civil (RAAC)*.
- [10] Administración Nacional de Aviación Civil. (2014). *Resolución 805/2014* [Resolución sobre las Regulaciones Argentinas de Aviación Civil, Parte 145]. Boletín Oficial de la República Argentina.
- [11] Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2017). *Resolución Directoral 512-2017-MTC/12* [Resolución asociada a la RAP Parte 43].
- [12] Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Resolución Directoral 450-2018-MTC/12* [Resolución asociada a la RAP Parte 145]
- [13] Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2018). *Resolución 02496 de 2018* [Resolución asociada al RAC Parte 43]
- [14] Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2020). *Resolución 03120 de 2020* [Resolución asociada al RAC Parte 145]
- [15] SAE International. (2024). *Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes*.
- [16] Airlines for America. (2021). *Spec 2000, Chapter 11: Reliability data collection/exchange*.
- [17] Airbus. (2024). *A320 family aircraft characteristics: Airport and maintenance planning*
- [18] Flightradar24 AB. (s. f.). *Flightradar24 aircraft database and flight history*
- [19] Airbus. (2025). *A320 aircraft maintenance manual: Chapter 32—Landing gear*
- [20] Airbus. (2025). *A320 illustrated parts catalog*

- [21] Goodrich Corporation. (2004). *Component Maintenance Manual: Main Wheel Assembly, Part Number 3-1724 (Manual 32-41-87)*. Goodrich Aircraft Wheels and Brakes.
- [22] Goodrich Corporation. (2012). *Component maintenance manual with illustrated parts list: Nose landing gear wheel assembly, P/N 3-1531 series (CMM 32-41-13, Rev. 6)*
- [23] Michelin Aircraft Tire. (2021). *Michelin aircraft tire care & service manual*
- [24] Goodrich Corporation. (2021). *Component Maintenance Manual with Illustrated Parts List: Main Brake Assembly, Part Number 2-1759-1 (Manual 32-41-27)*. UTC Aerospace Systems.
- [25] Becker Aviation. (2019, 18 de agosto). *JetSMART Airbus A320-232 (CC-AWA) landing at Balmaceda Airport (BBA/SCBA)* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=fvk-5WzQu8Q>
- [26] Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering mechanics: Dynamics* (14th ed., SI units). Pearson.
- [27] Alroqi, A. A., & Wang, W. (2015). Comparison of aircraft tire wear with initial wheel rotational speed. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 2(1), Article 2.
- [28] Anderson, J. D., Jr. (2016). *Introduction to flight* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- [29] Dirección General de Aeronáutica Civil. (2023). Estructura organizacional de la DGAC.
- [30] Administración Nacional de Aviación Civil. (s. f.). Regulaciones Argentinas de Aviación Civil (RAAC).
- [31] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Aeronáutica Civil. (s. f.). Regulaciones Aeronáuticas del Perú (RAP).
- [32] Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (s. f.). Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC).
- [33] SkyVector LLC. (s. f.). *SkyVector: Flight planning and aeronautical charts*. Recuperado el 9 de julio de 2026, de <https://skyvector.com/>
- [34] Iowa State University. (s. f.). *Iowa Environmental Mesonet*. Recuperado el 9 de julio de 2026, de <https://mesonet.agron.iastate.edu/>
- [35] Airbus. (2022, septiembre). Take care of your brakes. *Safety First*, 34. <https://safetyfirst.airbus.com/take-care-of-your-brakes/>
- [36] National Institute of Standards and Technology. (2012). Maximum likelihood estimation. En *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. U.S. Department of Commerce. <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section4/apr412.htm>
- [37] National Institute of Standards and Technology. (s. f.). *Weibull*. En *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. U.S. Department of Commerce.
- [38] National Institute of Standards and Technology. (s. f.). *Exponential*. En *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. U.S. Department of Commerce.

- [39] National Institute of Standards and Technology. (s. f.). *Lognormal*. En *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. U.S. Department of Commerce.
- [40] Reid, M. (2022). *Reliability – a Python library for reliability engineering* (Version 0.8.2) [Computer software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3938000>
- [41] Finkelstein, M., Cha, J. H., & Langston, A. (2023). Improving classical optimal age-replacement policies for degrading items. *Reliability Engineering & System Safety*
- [42] National Institute of Standards and Technology. (s. f.). Fitting polynomial models. En *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. U.S. Department of Commerce. <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/ppc/section4/ppc431.htm?>
- [43] Scikit-learn developers. (s. f.). Validation curves: Plotting scores to evaluate models. En *Scikit-learn user guide*. https://scikit-learn.org/stable/modules/learning_curve.html
- [44] Michelin Aircraft Tire. *Aircraft tire care & service manual*. https://www.aircraftspruce.com/catalog/pdf/Care_and_Service_manual.pdf
- [45] Di Santo, G. (s. f.). *Proper operation of carbon brakes*. Airbus Flight Operations Support.
- [46] Jensen, P. A., & Bard, J. F. (2003). *Inventory theory*. En *Operations research models and methods*. John Wiley & Sons. <https://utw11041.utweb.utexas.edu/ORMM/supplements/units/inventory/inventory.pdf>
- [47] DMI Aviation Sales. (s. f.). *M08201 — 30x8.8R15 16 PLY 225 MPH*. <https://dmiaviation.com/product/m08201-30x8-8r15/>
- [48] DMI Aviation Sales. (s. f.). *M01103-02 — 46x17.0R20 30 PLY 225 MPH*. <https://dmiaviation.com/product/m01103-46x17-0r20/>
- [49] DMI Aviation Sales. (s. f.). *M20101-01 — 1270x455R22 32 PLY 225 MPH*. <https://dmiaviation.com/product/m20101-1270x455r22/>

ANEXO A. Listado aeropuertos red JetSMART.

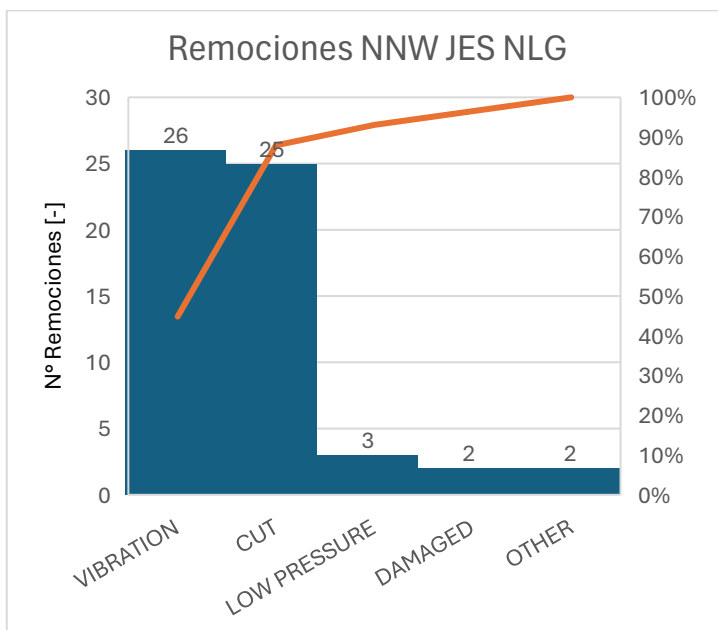
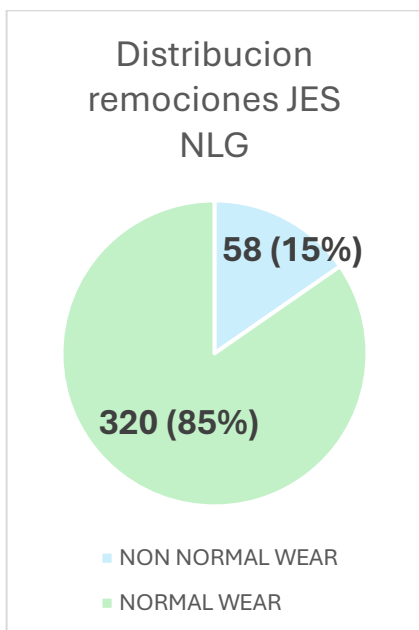
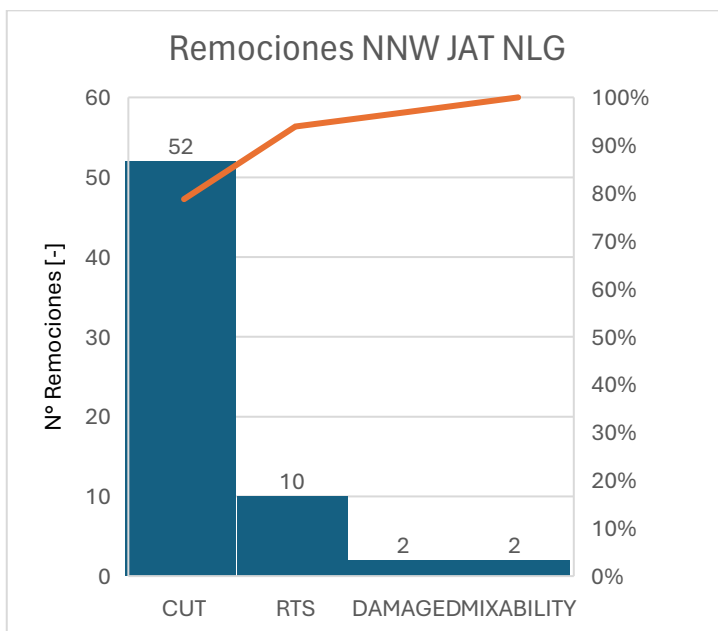
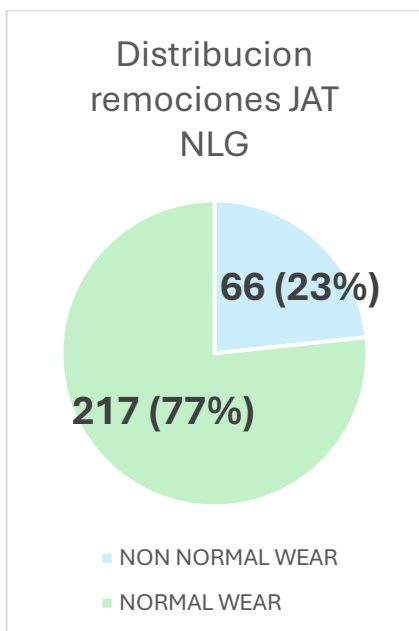
Código	Aeropuerto	Ciudad	País	Altura sobre el mar [ft]
BRC	Aeropuerto teniente Luis Candelaria	San Carlos de Bariloche	Argentina	2762
AEP	Aeroparque Jorge Newbery	Buenos Aires	Argentina	20
FTE	Aeropuerto Internacional comandante Tola	El Calafate	Argentina	647
REL	Aeropuerto Almirante Marcos A. Zar	Trelew	Argentina	114
CPC	Aeropuerto Internacional presidente Perón	Neuquén	Argentina	99
CRD	Aeropuerto General Enrique Mosconi	Comodoro Rivadavia	Argentina	185
USH	Aeropuerto Internacional Malvinas Argentinas	Ushuaia	Argentina	96
MDZ	Aeropuerto Internacional El Plumerillo	Mendoza	Argentina	1478
JUJ	Aeropuerto Gobernador Horacio Guzmán	Jujuy	Argentina	3020
SLA	Aeropuerto Martín Miguel de Güemes	Salta	Argentina	4089
COR	Aeropuerto Cap. FAP Carlos Martínez	Córdoba	Argentina	1600
IGR	Aeropuerto Internacional Mayor Krause	Puerto Iguazú	Argentina	916
EZE	Aeropuerto Internacional ministro Pistarini	Ezeiza	Argentina	67
TUC	Aeropuerto teniente Benjamín Matienzo	Tucumán	Argentina	1500
ROS	Aeropuerto Internacional Islas Malvinas	Rosario	Argentina	26
RES	Aeropuerto Internacional de Resistencia	Resistencia	Argentina	173

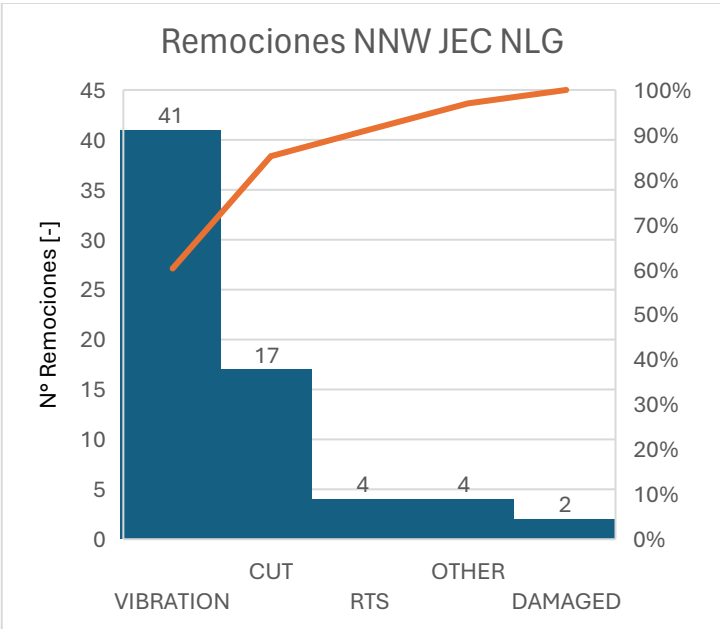
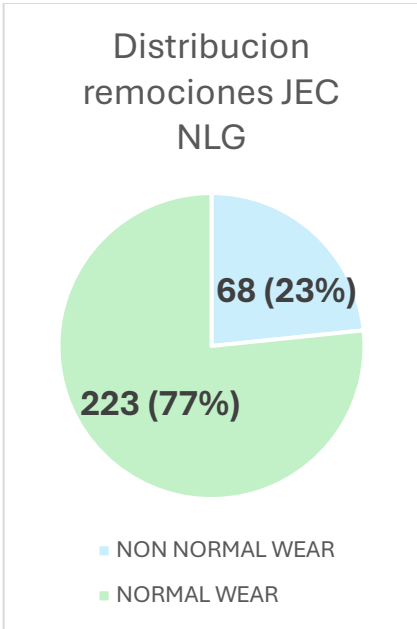
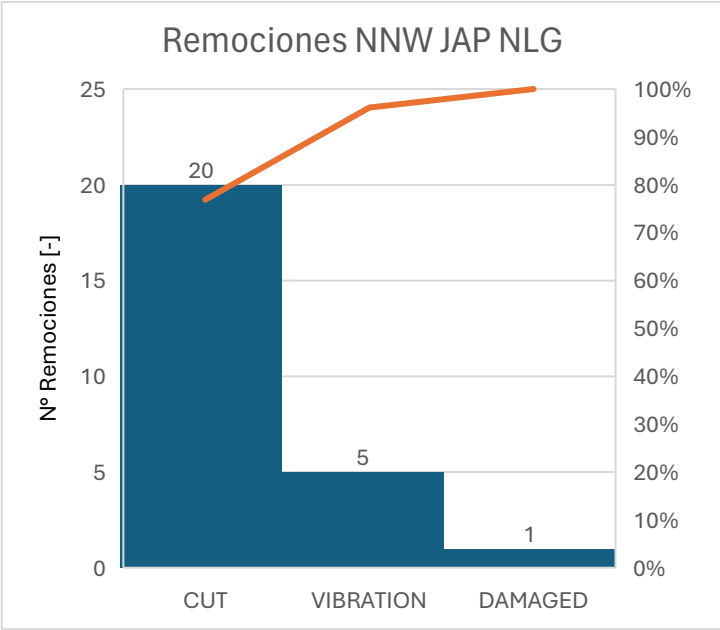
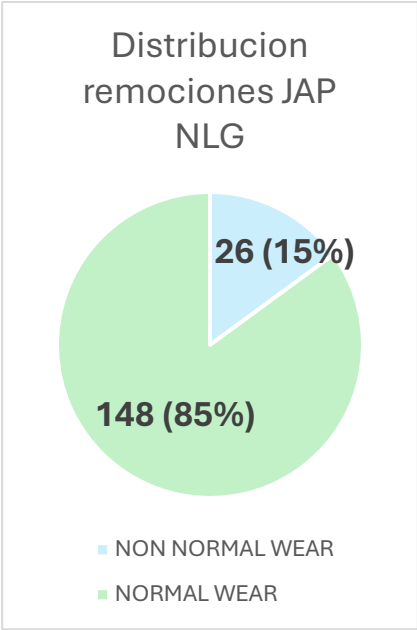
BPS	Aeropuerto de Porto Seguro	Porto Seguro	Brasil	169
IGU	Aeropuerto Internacional Cataratas	Foz do Iguaçu	Brasil	787
CWB	Aeropuerto Internacional Afonso Pena	Curitiba	Brasil	2989
FLN	Aeropuerto Internacional Hercílio Luz	Florianópolis	Brasil	17
REC	Aeropuerto Internacional de Guararapes	Recife	Brasil	33
POA	Aeropuerto Internacional Salgado Filho	Porto Alegre	Brasil	11
CNF	Aeropuerto Internacional Tancredo Neves	Belo horizonte	Brasil	2720
GRU	Aeropuerto Internacional de São Paulo-Guarulhos	Sao Paulo	Brasil	2461
NAT	Aeropuerto Internacional Governador Aluizio Alves	Natal	Brasil	273
GIG	Aeropuerto Internacional Galeão - Tom Jobim	Rio de Janeiro	Brasil	28
LSC	Aeródromo La Florida	La serena	Chile	481
CPO	Aeródromo Desierto de Atacama	Copiapó	Chile	670
ARI	Aeropuerto Chacalluta	Arica	Chile	166
ZCO	Aeródromo La Araucanía	Temuco	Chile	321
BBA	Aeródromo Balmaceda	Balmaceda	Chile	1722
ANF	Aeropuerto Andrés Sabella	Antofagasta	Chile	455
CCP	Aeródromo Carriel Sur	Concepcion	Chile	26
PMC	Aeródromo El Tepual	Puerto Montt	Chile	294

PUQ	Aeródromo Carlos Ibáñez del Campo	Punta Arenas	Chile	139
CJC	Aeródromo El Loa	Calama	Chile	7600
IQQ	Aeródromo Diego Aracena	Iquique	Chile	157
SCL	Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez	Santiago	Chile	1555
SMR	Aeropuerto Simón Bolívar	Santa Marta	Colombia	22
FDA	Aeropuerto de Fundación.	Fundación	Colombia	150
PEI	Aeropuerto Internacional Matecaña	Pereira	Colombia	4418
BGA	Aeropuerto Internacional Palonegro	Bucaramanga	Colombia	3900
CUC	Aeropuerto Internacional Camilo Daza	Cúcuta	Colombia	1089
MTR	Aeropuerto Los Garzones	Montería	Colombia	41
ADZ	Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla	San Andrés	Colombia	20
CTG	Aeropuerto Internacional Rafael Núñez	Cartagena	Colombia	7
CLO	Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón	Cali	Colombia	3162
BAQ	Aeropuerto Internacional Ernesto Cortissoz	Barranquilla	Colombia	95
MDE	Aeropuerto Internacional José María Córdova	Medellín	Colombia	7025
BOG	Aeropuerto Internacional El Dorado	Bogotá	Colombia	8360
SJO	Aeropuerto Internacional Juan Santamaría	San José	Costa Rica	3048
GYE	Aeropuerto Internacional José Joaquín de Olmedo	Guayaquil	Ecuador	20

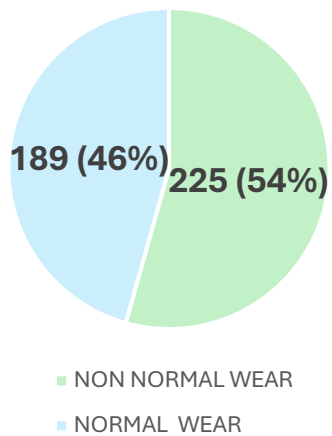
UIO	Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre	Quito	Ecuador	7910
MEX	Aeropuerto Internacional Benito Juárez	Ciudad de México	México	7297
ASU	Aeropuerto Internacional Silvio Pettrossi	Asunción	Paraguay	290
PIU	Aeropuerto Cap. FAP Guillermo Concha	Piura	Perú	116
CIX	Aeropuerto Capitan José Quiñones	Chiclayo	Perú	97
CJA	Aeropuerto Armando Rebolledo	Cajamarca	Perú	8848
TPP	Aeropuerto Cadete FAP Guillermo del Castillo	Tarapoto	Perú	868
AQP	Aeropuerto Rodríguez Ballón	Arequipa	Perú	8400
TRU	Aeropuerto Cap. FAP Carlos Martínez	Trujillo	Perú	128
CUZ	Aeropuerto Internacional Velasco Astete	Cuzco	Perú	10860
LIM	Aeropuerto Internacional Jorge Chávez	Lima	Perú	112
PUJ	Aeropuerto Internacional de Punta Cana	Punta Cana	República Dominicana	47
MVD	Aeropuerto Internacional de Carrasco	Montevideo	Uruguay	105

ANEXO B. Desglose distribución remociones por AOC, NW, NNW y razones de falla.

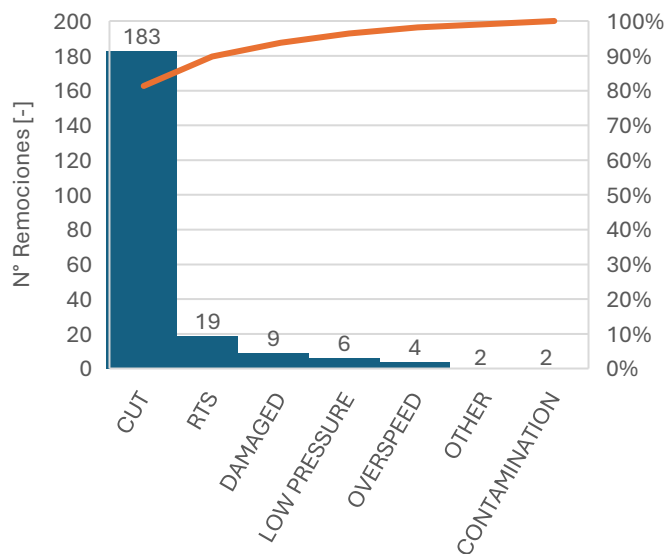




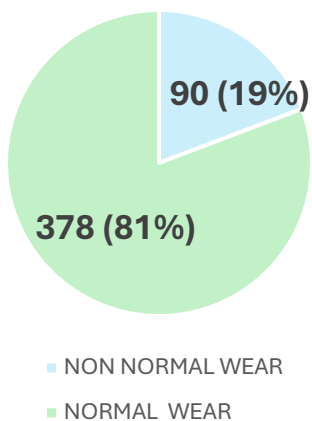
Distribucion
remociones JAT
MLG



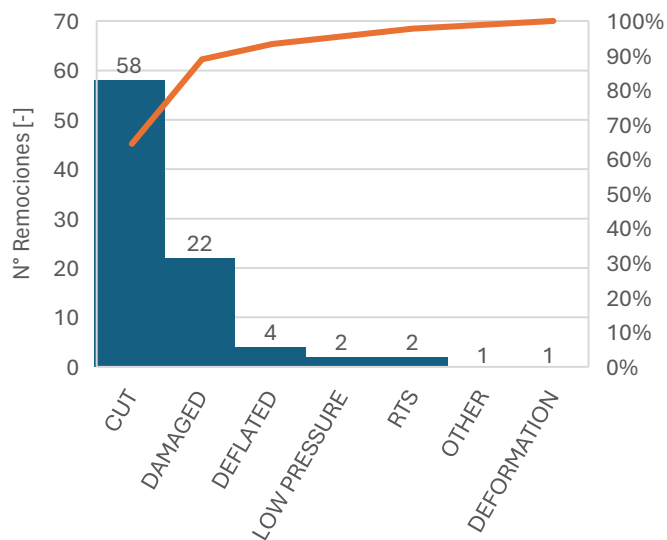
Remociones NNW JAT MLG

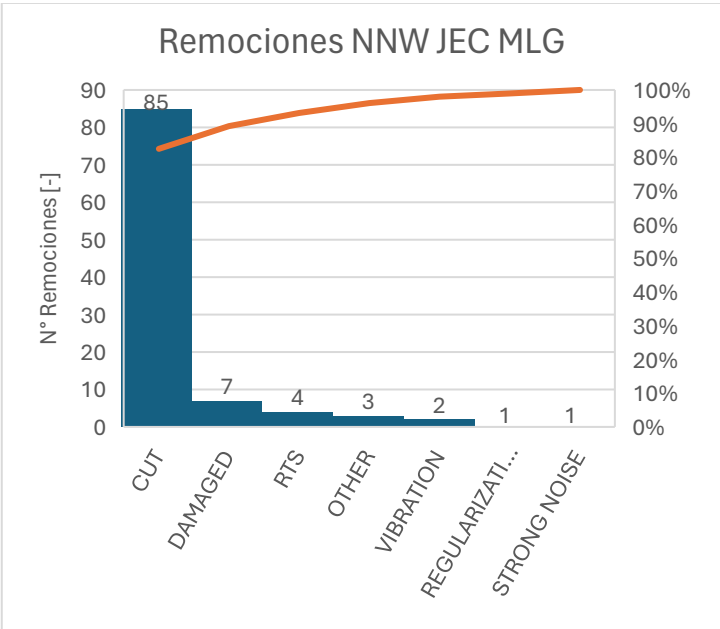
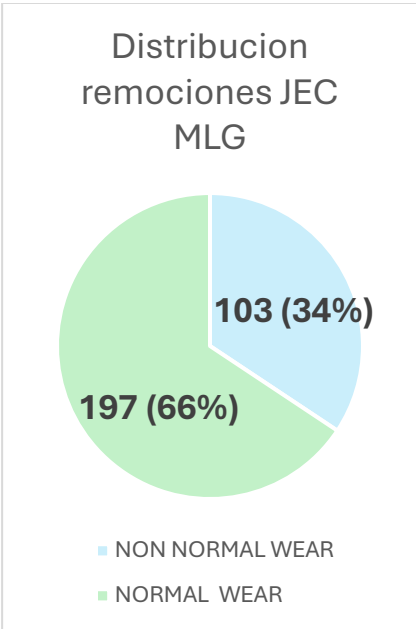
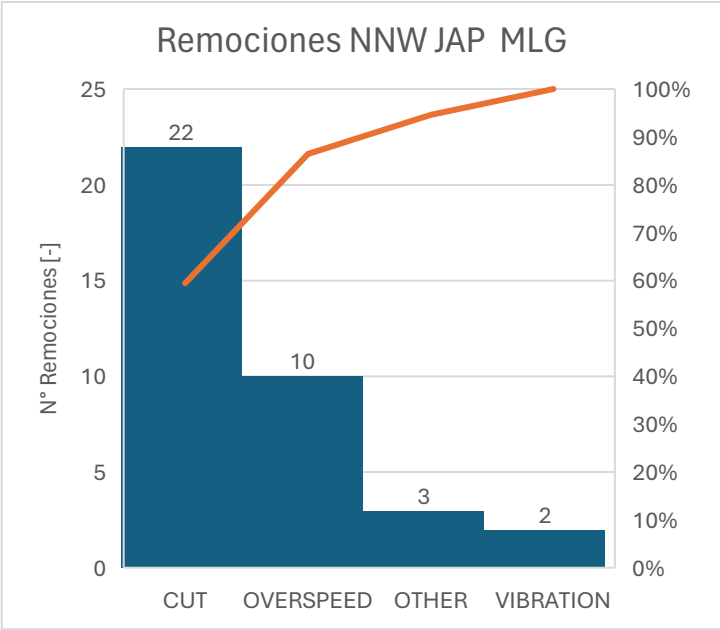
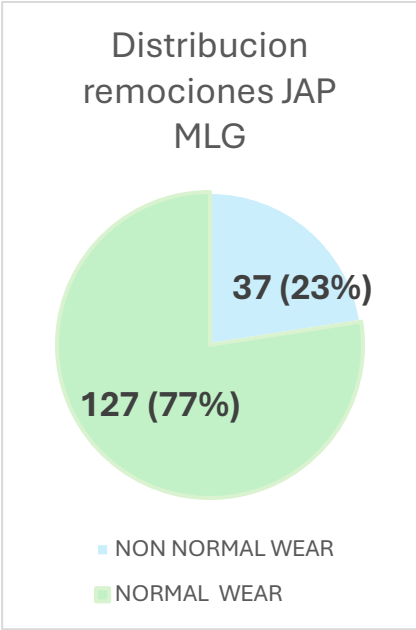


Distribucion
remociones JES
MLG

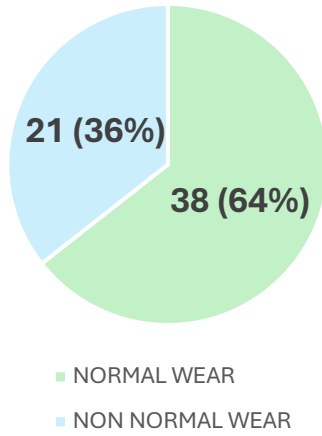


Remociones NNW JES MLG

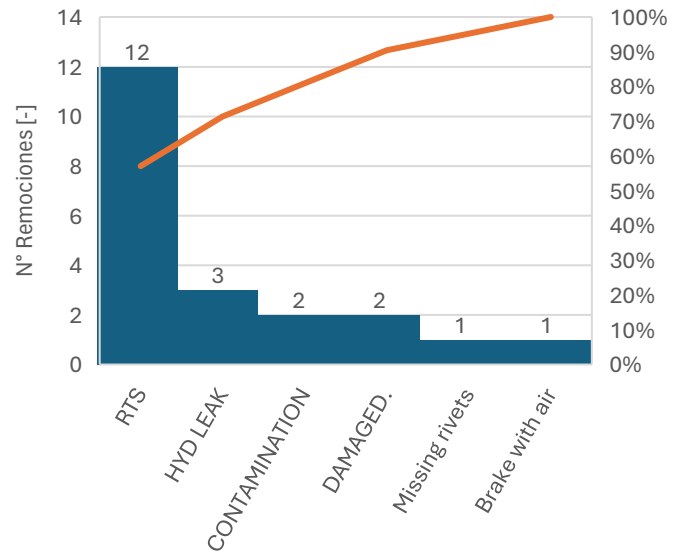




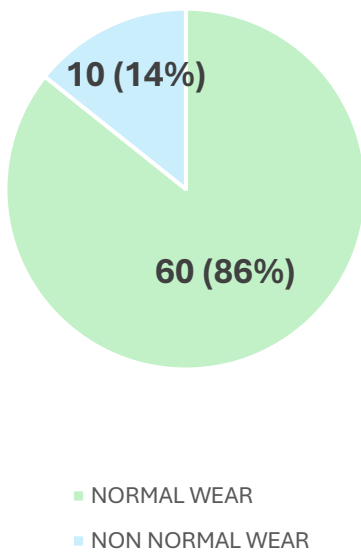
Distribucion
remociones Brakes
JAT



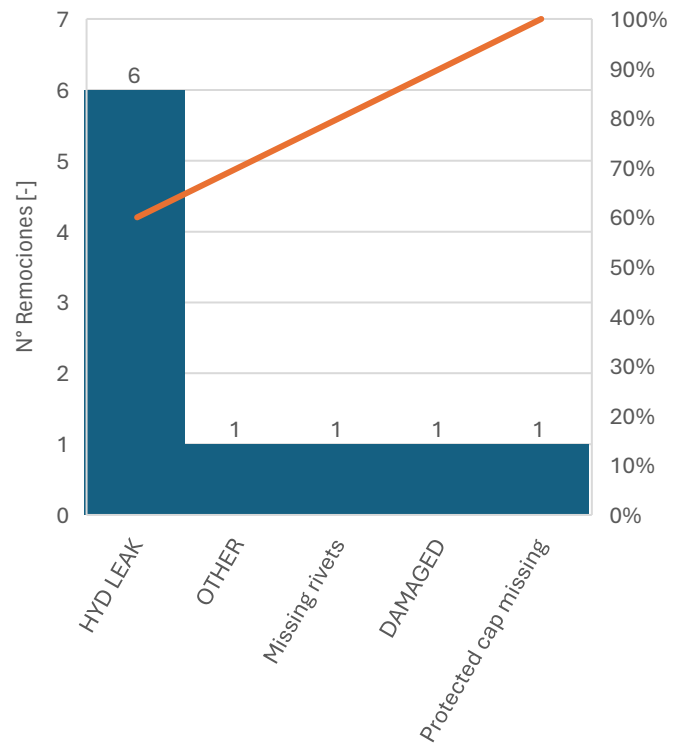
Remociones NNW JAT Brakes



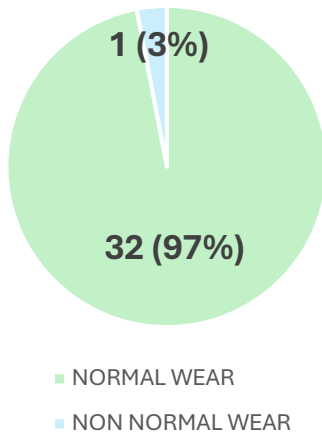
Distribucion
remociones Brakes
JES



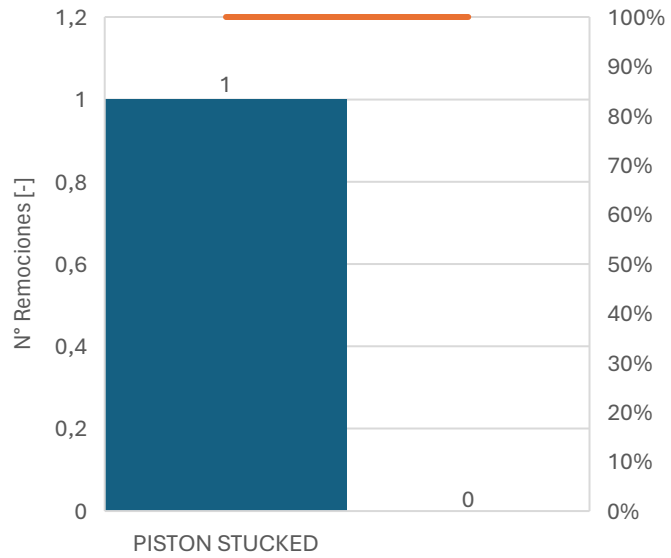
Remociones NNW JES Brakes



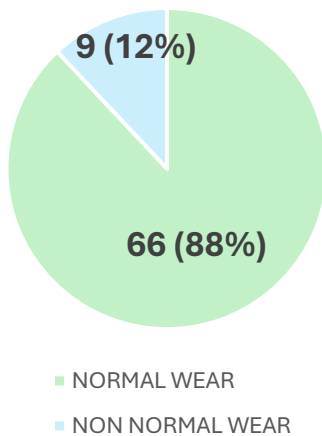
Distribucion
remociones Brakes
JAP



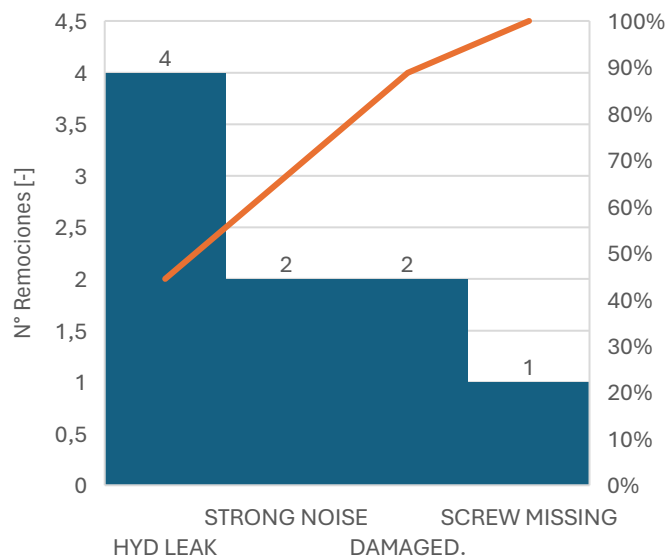
Remociones NNW JAP Brakes



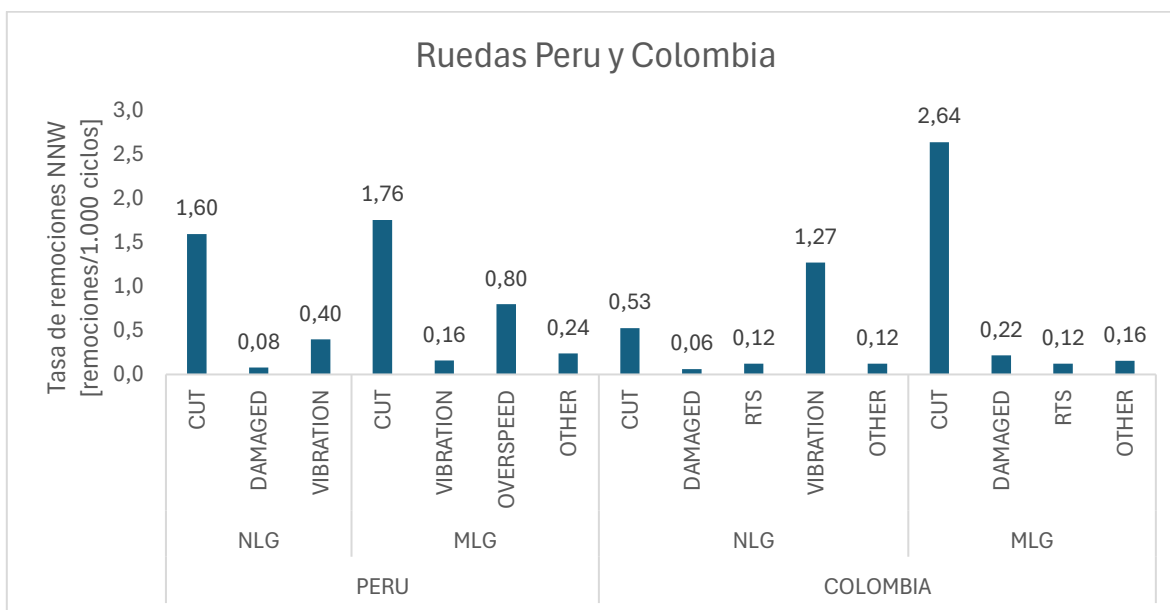
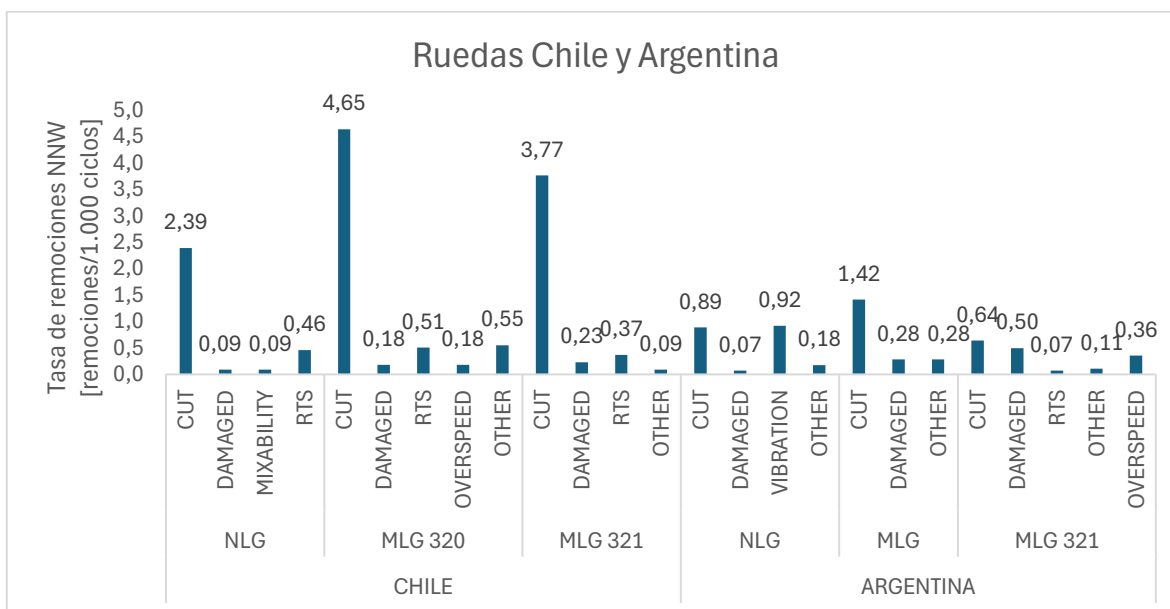
Distribucion
remociones Brakes
JEC

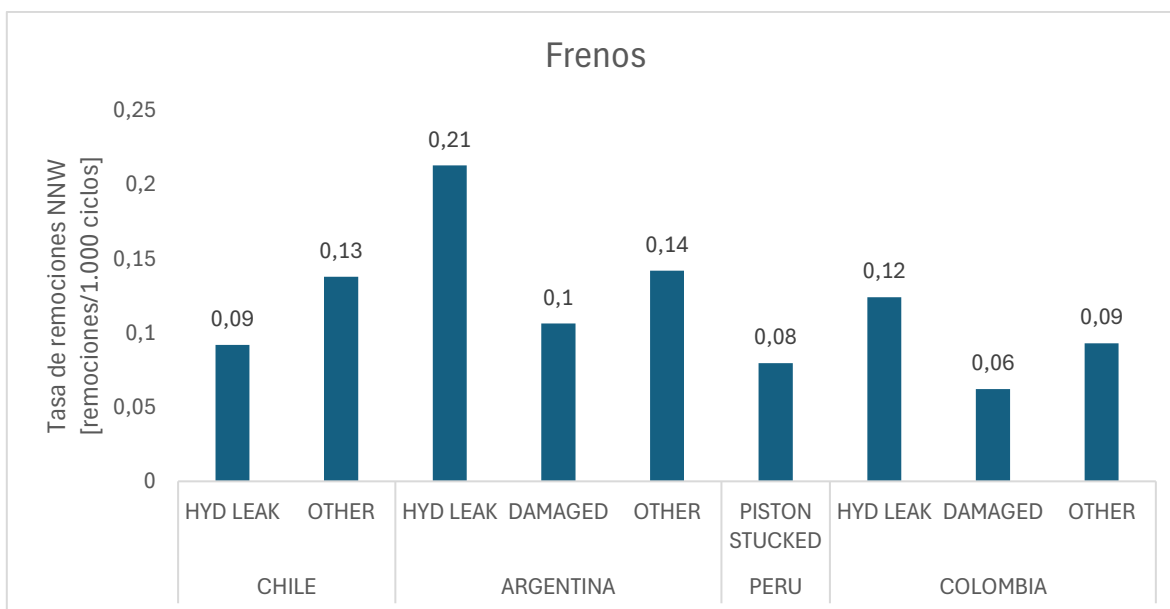


Remociones NNW JEC Brakes



ANEXO C. Tasa remociones por categorías de falla más relevantes.





ANEXO D.1. Distribución promedio de ciclos por país de operación según país de remoción para ruedas MLG A320.

País de remoción	Ciclos Chile [%]	Ciclos Argentina [%]	Ciclos Perú [%]	Ciclos Colombia [%]	Ciclos Brasil [%]	Otros [%]
CHILE	50,23 %	11,46 %	11,62 %	22,84 %	2,63 %	1,21 %
ARGENTINA	4,57 %	78,83 %	1,82 %	0,14 %	6,84 %	7,80 %
PERU	7,95 %	2,11 %	80,89 %	7,36 %	0,42 %	1,27 %
COLOMBIA	8,22 %	1,00 %	2,92 %	87,06 %	0,42 %	0,38 %

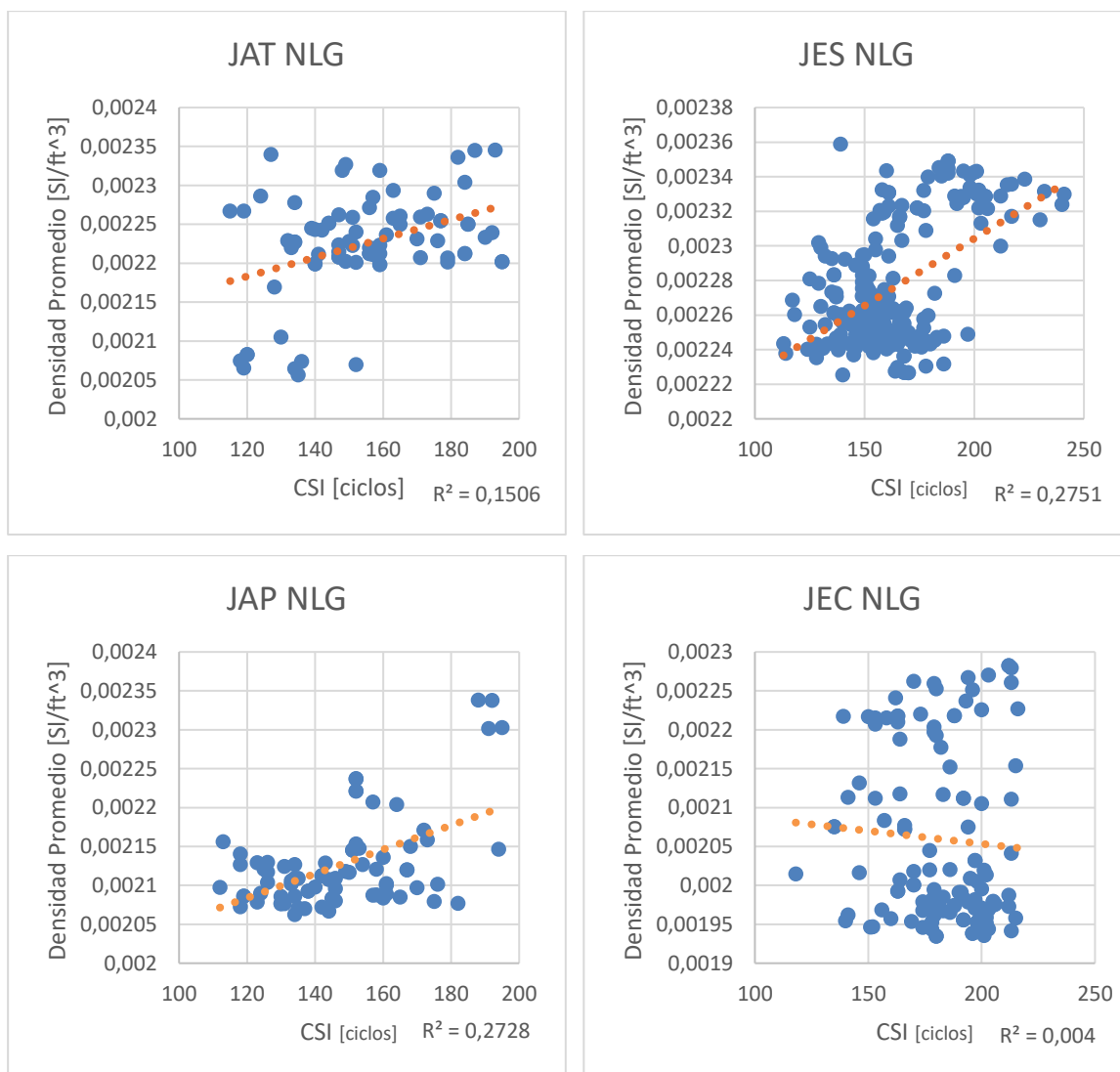
ANEXO D.2. Distribución promedio de ciclos por país de operación según país de remoción para ruedas MLG A321.

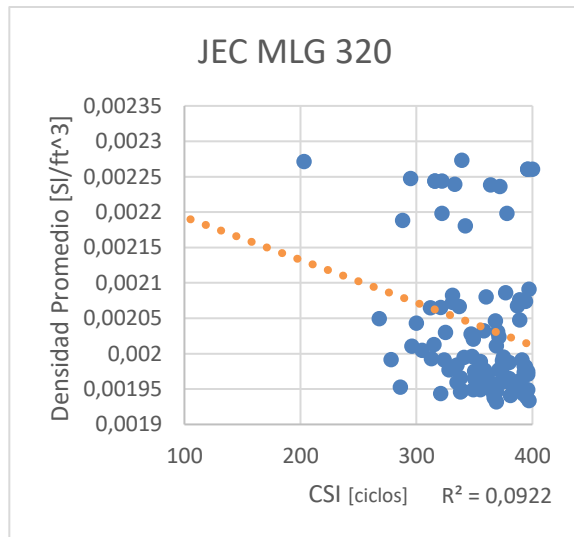
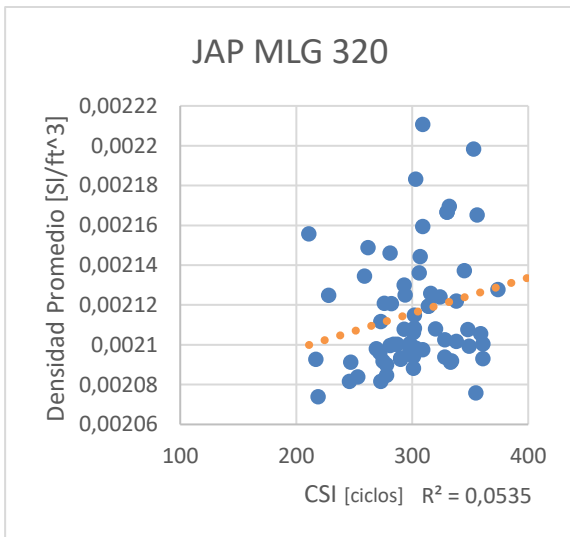
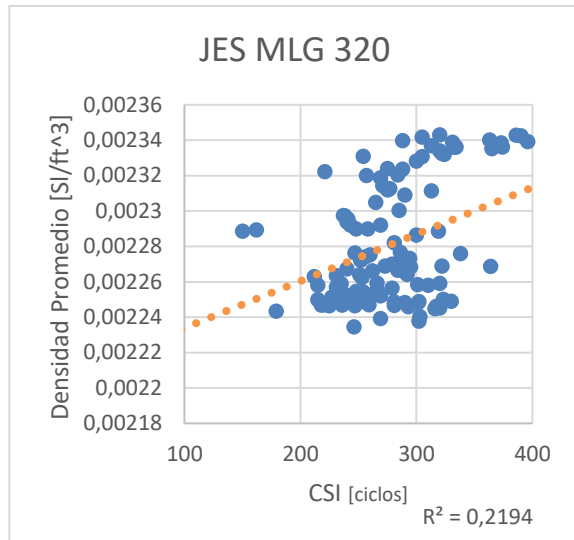
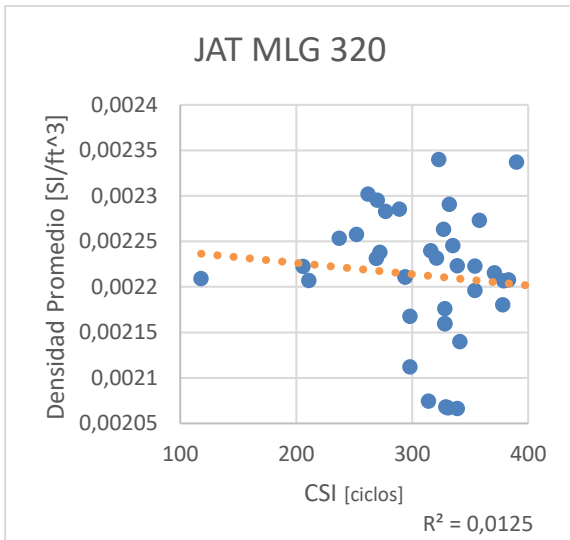
País de remoción	Ciclos Chile [%]	Ciclos Argentina [%]	Ciclos Perú [%]	Ciclos Colombia [%]	Ciclos Brasil [%]	Otros [%]
CHILE	59,71 %	16,98 %	0,36 %	1,20 %	16,58 %	5,18 %
ARGENTINA	7,19 %	82,47 %	0,05 %	0,12 %	7,18 %	2,99 %

ANEXO D.3. Distribución promedio de ciclos por país de operación según país de remoción para frenos.

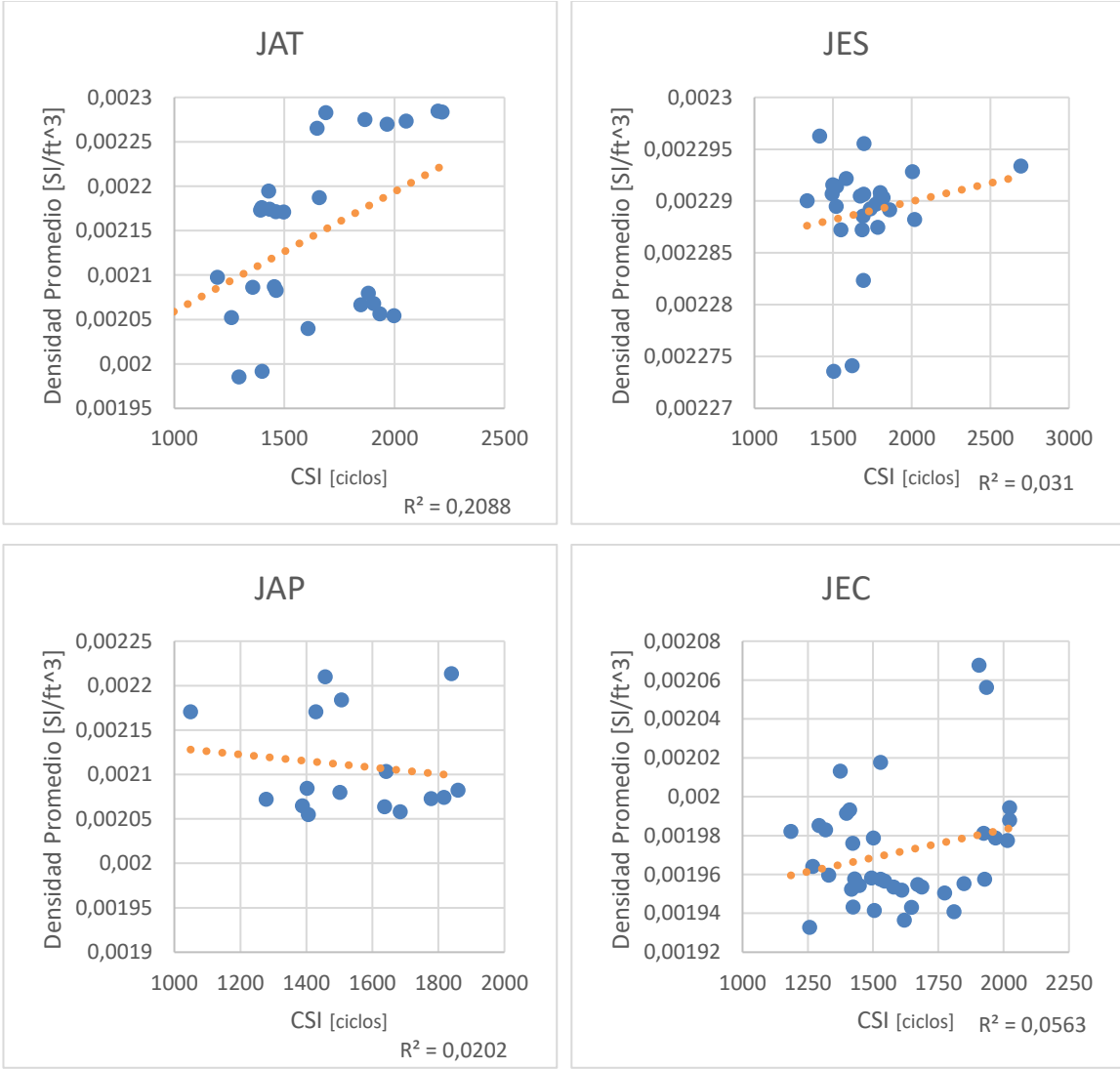
País de remoción	Ciclos Chile [%]	Ciclos Argentina [%]	Ciclos Perú [%]	Ciclos Colombia [%]	Ciclos Brasil [%]	Otros [%]
CHILE	44,39 %	14,49 %	14,53 %	22,68 %	2,22 %	1,69 %
ARGENTINA	9,97 %	74,44 %	2,05 %	0,24 %	6,67 %	6,63 %
PERU	9,10 %	6,12 %	74,16 %	8,39 %	0,71 %	1,51 %
COLOMBIA	6,26 %	1,09 %	3,67 %	85,79 %	0,30 %	2,89 %

ANEXO E. Desglose comportamiento ruedas según densidad promedio.

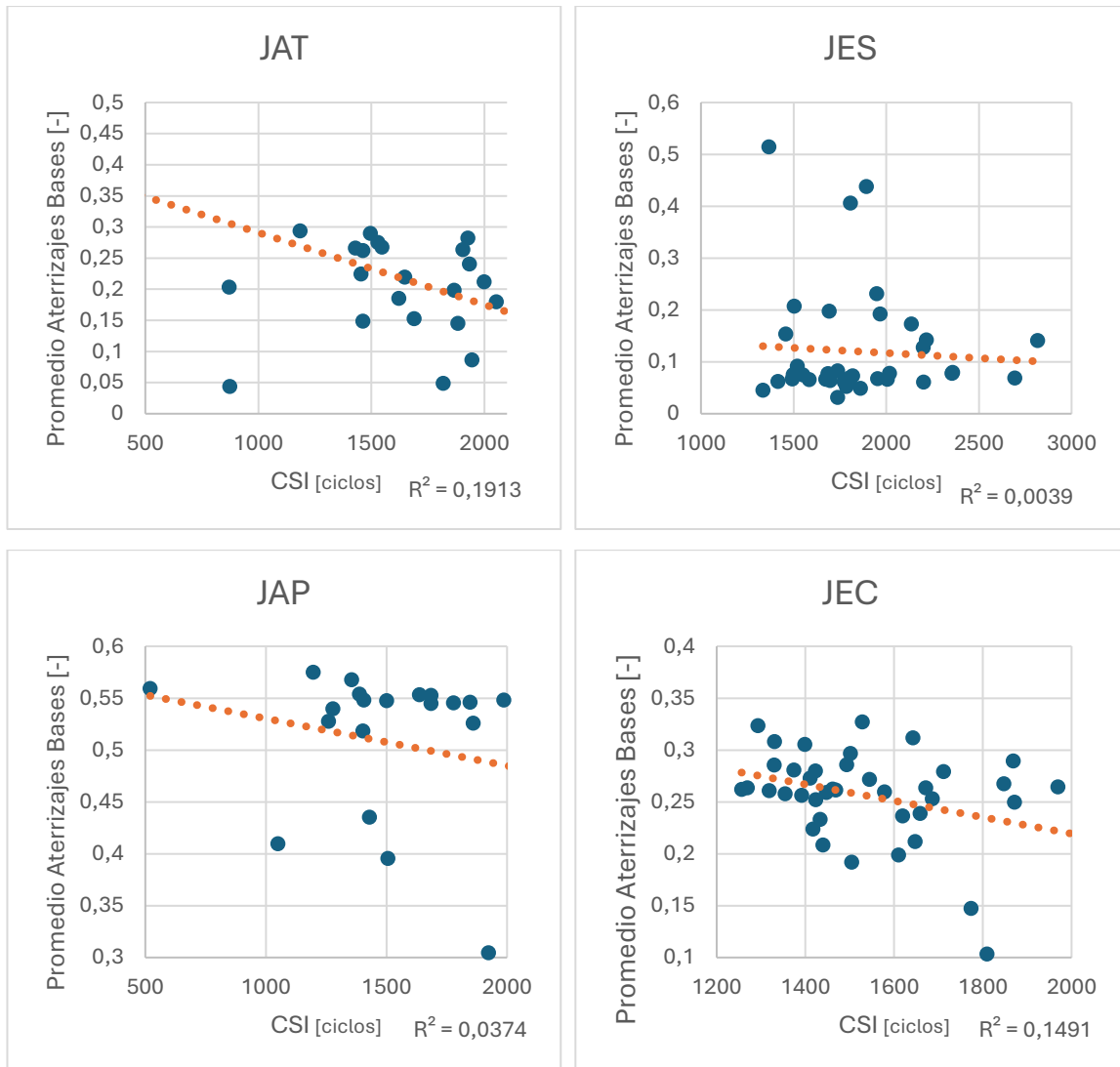




ANEXO F. *Densidad promedio frenos por AOC.*



ANEXO G. *Promedio aterrizajes bases principales por AOC.*



ANEXO H. Código usado para Máxima verosimilitud, parámetros e intervalos de confianza.

```
1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 from reliability.Fitters import Fit_Weibull_2P,
4 Fit_Exponential_1P, Fit_Lognormal_2P
5
6 # --- Datos ---
7 archivo, hoja = "REMOCIONES_RUEDAS.xlsx", "Datos"
8 col_t, col_causa, col_aoc, col_pos = "CSI", "RAZON REMOCION",
9 "AOC", "Posicion"
10 censura = "INSTALADO"
11 base = pd.read_excel(archivo, sheet_name=hoja)[[col_t, col_causa,
12 col_aoc, col_pos]].dropna()
13 base[col_t] = pd.to_numeric(base[col_t], errors="coerce")
14 for c in [col_causa, col_aoc, col_pos]:
15     base[c] = base[c].astype(str).str.upper().str.strip()
16 base = base[base[col_t] > 0]
17
18 # --- Ajuste ---
19 def ajustar_grupo(t, e):
20     fallas, censurados = t[e == 1], t[e == 0]
21     rc = censurados if len(censurados) > 0 else None
22     ajustes = {}
23     if len(fallas) >= 2:
24         fw = Fit_Weibull_2P(failures=fallas, right_censored=rc,
25 show_probability_plot=False, print_results=False)
26         ajustes["Weibull"] = (fw.AICc, fw.loglik, {"eta":
27 (fw.alpha, fw.alpha_lower, fw.alpha_upper), "beta": (fw.beta,
28 fw.beta_lower, fw.beta_upper)})
29         fl = Fit_Lognormal_2P(failures=fallas, right_censored=rc,
30 show_probability_plot=False, print_results=False)
31         ajustes["Lognormal"] = (fl.AICc, fl.loglik, {"phi":
32 (fl.mu, fl.mu_lower, fl.mu_upper), "sigma": (fl.sigma,
33 fl.sigma_lower, fl.sigma_upper)})
34         if len(fallas) >= 1:
35             fe = Fit_Exponential_1P(failures=fallas,
36 right_censored=rc, show_probability_plot=False,
37 print_results=False)
38             ajustes["Exponencial"] = (fe.AICc, fe.loglik, {"lambda":
39 (fe.Lambda, fe.Lambda_lower, fe.Lambda_upper)})
40     return ajustes
41
42 # --- Agrupacion ---
43 filas_aic, filas_param = [], []
44 modos_unicos = sorted(base.loc[base[col_causa] != censura,
45 col_causa].unique())
46 for modo in modos_unicos:
47     filas_modo = base[base[col_causa] == modo]
```

```

42     aoc_consolidado = (filas_modos[col_aoc] ==
43 "CONSOLIDADO").any()
44     pos_consolidado = (filas_modos[col_pos] ==
45 "CONSOLIDADO").any()
46     trabajo = base.copy()
47     if aoc_consolidado:
48         trabajo[col_aoc] = "CONSOLIDADO"
49     if pos_consolidado:
50         trabajo[col_pos] = "CONSOLIDADO"
51     for (aoc, pos), grupo in trabajo.groupby([col_aoc, col_pos]):
52         t = grupo[col_t].to_numpy(float)
53         e = (grupo[col_causa] == modo).astype(int).to_numpy()
54         if e.sum() == 0:
55             continue
56         ajustes = ajustar_grupo(t, e)
57         if not ajustes:
58             continue
59         mejor = min(ajustes, key=lambda d: ajustes[d][0])
60         for nombre, (aic, loglik, params) in ajustes.items():
61             filas_aic.append([aoc, pos, modo, nombre,
62 round(loglik, 2), round(aic, 2)])
63             seleccionada = "Si" if nombre == mejor else "No"
64             for nombre_p, (valor, lo, hi) in params.items():
65                 filas_param.append([aoc, pos, modo, nombre,
66 seleccionada, nombre_p, round(valor, 4), f"[{lo:.4g},
67 {hi:.4g}]"])
68
69 # --- Display ---
70 tabla_aic = pd.DataFrame(filas_aic, columns=["AOC", "Posicion",
71 "Modo de falla", "Distribucion", "Log L", "AIC"])
72 tabla_param = pd.DataFrame(filas_param, columns=["AOC",
73 "Posicion", "Modo de falla", "Distribucion", "Seleccionada",
74 "Parametro1", "Parametro2", "IC"])
75 print("\nSelección de distribución por AIC\n")
76 print(tabla_aic.to_string(index=False))
77 print("\nParámetros e IC\n")
78 print(tabla_param.to_string(index=False))

```

ANEXO I.1. Resultados distribución apropiada ruedas.

AOC	Posición	Modo	Distribución	Log $\hat{L}$ [-]	AIC [-]
ARG	MLG 320	CUT	Weibull	-352,23	706,47
ARG	MLG 320	CUT	Exponencial	-354,6	713,25
ARG	MLG 320	CUT	Lognormal	-356,75	717,56
ARG	MLG 320	WEAR	Weibull	-1.150,07	2.304,19
ARG	MLG 320	WEAR	Lognormal	-1.277,14	2.558,32
ARG	MLG 320	WEAR	Exponencial	-1.417,39	2.836,79
ARG	MLG 321	CUT	Weibull	-409,54	823,14
ARG	MLG 321	CUT	Lognormal	-412,55	829,16
ARG	MLG 321	CUT	Exponencial	-421,47	844,97
ARG	MLG 321	WEAR	Weibull	-922,54	1.849,13
ARG	MLG 321	WEAR	Lognormal	-928,4	1.860,85
ARG	MLG 321	WEAR	Exponencial	-1.188,34	2.378,69
ARG	NLG	CUT	Weibull	-268,57	541,17
ARG	NLG	CUT	Lognormal	-269,34	542,7
ARG	NLG	CUT	Exponencial	-280,43	562,87
ARG	NLG	WEAR	Weibull	-1.528,20	3.060,43
ARG	NLG	WEAR	Lognormal	-1.601,15	3.206,32
ARG	NLG	WEAR	Exponencial	-1.992,34	3.986,69
CHI	MLG 320	CUT	Weibull	-509,99	1.024,04
CHI	MLG 320	CUT	Lognormal	-513,7	1.031,46
CHI	MLG 320	CUT	Exponencial	-546,75	1.095,52
CHI	MLG 320	WEAR	Weibull	-758,78	1.521,62
CHI	MLG 320	WEAR	Lognormal	-760,3	1.524,66
CHI	MLG 320	WEAR	Exponencial	-934,91	1.871,85
CHI	MLG 321	CUT	Weibull	-264,46	533,11
CHI	MLG 321	CUT	Lognormal	-273,66	551,51
CHI	MLG 321	CUT	Exponencial	-297,31	596,69
CHI	MLG 321	WEAR	Weibull	-113,34	230,86
CHI	MLG 321	WEAR	Lognormal	-113,78	231,76
CHI	MLG 321	WEAR	Exponencial	-159,09	320,24
CHI	NLG	CUT	Lognormal	-177,71	359,48
CHI	NLG	CUT	Weibull	-178,49	361,04
CHI	NLG	CUT	Exponencial	-185,50	373,01
CHI	NLG	WEAR	Lognormal	-974,12	1.952,30
CHI	NLG	WEAR	Weibull	-978,31	1.960,69
CHI	NLG	WEAR	Exponencial	-1.229,18	2.460,39
COL	MLG 320	CUT	Weibull	-827,88	1.659,80
COL	MLG 320	CUT	Lognormal	-839,10	1.682,23

COL	MLG 320	CUT	Exponencial	-856,80	1.715,61
COL	MLG 320	WEAR	Weibull	-1.209,82	2.423,67
COL	MLG 320	WEAR	Lognormal	-1.251,22	2.506,48
COL	MLG 320	WEAR	Exponencial	-1.566,51	3.135,03
COL	NLG	CUT	Weibull	-248,71	501,45
COL	NLG	CUT	Lognormal	-249,02	502,07
COL	NLG	CUT	Exponencial	-263,96	529,93
COL	NLG	WEAR	Lognormal	-1.213,19	2.430,43
COL	NLG	WEAR	Weibull	-1.219,36	2.442,75
COL	NLG	WEAR	Exponencial	-1.579,62	3.161,26
PER	MLG 320	CUT	Lognormal	-215,21	434,5
PER	MLG 320	CUT	Weibull	-215,34	434,75
PER	MLG 320	CUT	Exponencial	-221,78	445,59
PER	MLG 320	WEAR	Lognormal	-701,03	1.406,14
PER	MLG 320	WEAR	Weibull	-709,77	1.423,61
PER	MLG 320	WEAR	Exponencial	-940,96	1.883,94
PER	NLG	CUT	Weibull	-176,50	357,08
PER	NLG	CUT	Lognormal	-180,43	364,94
PER	NLG	CUT	Exponencial	-183,91	369,84
PER	NLG	WEAR	Lognormal	-647,18	1298,43
PER	NLG	WEAR	Weibull	-657,17	1318,41
PER	NLG	WEAR	Exponencial	-881,72	1765,47
CONSOLIDADO	MLG 320	DAMAGED	Weibull	-199,11	402,23
CONSOLIDADO	MLG 320	DAMAGED	Lognormal	-200,82	405,65
CONSOLIDADO	MLG 320	DAMAGED	Exponencial	-202,69	407,38
CONSOLIDADO	MLG 321	DAMAGED	Weibull	-158,08	320,2
CONSOLIDADO	MLG 321	DAMAGED	Lognormal	-159,01	322,06
CONSOLIDADO	MLG 321	DAMAGED	Exponencial	-173,66	349,33
CONSOLIDADO	NLG	DAMAGED	Weibull	-74,60	153,22
CONSOLIDADO	NLG	DAMAGED	Lognormal	-74,87	153,76
CONSOLIDADO	NLG	DAMAGED	Exponencial	-175,90	353,81
CONSOLIDADO	NLG	VIBRATION	Weibull	-590,67	1.185,34
CONSOLIDADO	NLG	VIBRATION	Lognormal	-598,84	1.201,68
CONSOLIDADO	NLG	VIBRATION	Exponencial	-620,85	1.243,71

ANEXO I.2. Resultados distribución apropiada frenos.

AOC	Posición	Categoría de falla	Distribución	Log $\hat{L}$ [-]	AIC [-]
ARG	EXTERIORES	WEAR	Weibull	-185,89	375,98
ARG	EXTERIORES	WEAR	Lognormal	-187,16	378,52
ARG	EXTERIORES	WEAR	Exponencial	-241,12	484,30
ARG	INTERIORES	WEAR	Weibull	-241,59	487,37
ARG	INTERIORES	WEAR	Lognormal	-273,38	550,94
ARG	INTERIORES	WEAR	Exponencial	-290,12	582,30
CHI	EXTERIORES	WEAR	Weibull	-117,85	240,01
CHI	EXTERIORES	WEAR	Lognormal	-126,82	257,95
CHI	EXTERIORES	WEAR	Exponencial	-136,77	275,64
CHI	INTERIORES	WEAR	Weibull	-212,76	429,52
CHI	INTERIORES	WEAR	Lognormal	-227,98	459,96
CHI	INTERIORES	WEAR	Exponencial	-241,34	484,69
COL	EXTERIORES	WEAR	Weibull	-175,17	354,34
COL	EXTERIORES	WEAR	Lognormal	-176,21	356,42
COL	EXTERIORES	WEAR	Exponencial	-222,57	447,15
COL	INTERIORES	WEAR	Weibull	-234,00	472,01
COL	INTERIORES	WEAR	Lognormal	-240,30	484,61
COL	INTERIORES	WEAR	Exponencial	-318,02	638,05
PER	EXTERIORES	WEAR	Weibull	-101,97	208,46
PER	EXTERIORES	WEAR	Lognormal	-106,21	216,95
PER	EXTERIORES	WEAR	Exponencial	-123,91	249,99
PER	INTERIORES	WEAR	Weibull	-120,23	244,90
PER	INTERIORES	WEAR	Lognormal	-126,78	258,00
PER	INTERIORES	WEAR	Exponencial	-145,40	292,94
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	DAMAGED	Lognormal	-56,28	116,57
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	DAMAGED	Weibull	-56,77	117,55
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	DAMAGED	Exponencial	-62,42	126,84
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	LEAK	Lognormal	-144,64	293,28
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	LEAK	Weibull	-144,92	293,84
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	LEAK	Exponencial	-149,88	301,76

ANEXO J.1. Parámetros obtenidos según distribución para ruedas.

AOC	Posición	Categoría de falla	η [ciclos]	β [–]
ARG	MLG 320	CUT	2477,3	0,9164
ARG	MLG 320	WEAR	308,307	6,1275
ARG	MLG 321	CUT	444,081	2,0242
ARG	MLG 321	WEAR	244,042	6,4609
ARG	NLG	CUT	422,512	2,5486
ARG	NLG	WEAR	175,76	6,8512
CHI	MLG 320	CUT	474,45	3,036
CHI	MLG 320	WEAR	382,261	5,9646
CHI	MLG 321	CUT	219,328	3,8776
CHI	MLG 321	WEAR	239,983	9,499
COL	MLG 320	CUT	589,227	2,1838
COL	MLG 320	WEAR	412,712	7,61
COL	NLG	CUT	418,038	2,9872
PER	NLG	CUT	349,913	2,4159
CONSOLIDADO	MLG 320	DAMAGED	2540,91	1,89
CONSOLIDADO	MLG 321	DAMAGED	438,201	4,08
CONSOLIDADO	NLG	DAMAGED	933,542	3,02
CONSOLIDADO	NLG	VIBRATION	475,532	2,73

AOC	Posición	Categoría de falla	IC 95% η [ciclos]	IC 95% β [–]
ARG	MLG 320	CUT	[1224; 5014]	[0,72; 1,15]
ARG	MLG 320	WEAR	[301,4; 315,4]	[5,51; 6,78]
ARG	MLG 321	CUT	[359,1; 549,2]	[1,57; 2,59]
ARG	MLG 321	WEAR	[238,4; 249,8]	[5,83; 7,15]
ARG	NLG	CUT	[306,7; 582]	[1,85; 3,50]
ARG	NLG	WEAR	[172,9; 178,7]	[6,34; 7,40]
CHI	MLG 320	CUT	[431,3; 521,9]	[2,47; 3,71]
CHI	MLG 320	WEAR	[371,3; 393,5]	[5,28; 6,73]
CHI	MLG 321	CUT	[203,3; 236,6]	[3,01; 4,99]
CHI	MLG 321	WEAR	[229,2; 251,3]	[7,05; 12,79]
COL	MLG 320	CUT	[524,7; 661,7]	[1,83; 2,60]
COL	MLG 320	WEAR	[404,1; 419]	[6,85; 8,27]
COL	NLG	CUT	[324,6; 538,4]	[2,18; 4,08]
PER	NLG	CUT	[247,4; 494,9]	[1,64; 3,55]
CONSOLIDADO	MLG 320	DAMAGED	[1064; 6067]	[1,25; 2,86]
CONSOLIDADO	MLG 321	DAMAGED	[341,5; 562,3]	[2,83; 5,89]
CONSOLIDADO	NLG	DAMAGED	[322,2; 2705]	[1,58; 5,74]
CONSOLIDADO	NLG	VIBRATION	[383,8; 589,1]	[2,22; 3,37]

AOC	Posición	Categoría de falla	φ [–]	σ [–]
CHI	NLG	WEAR	5,1501	0,1925
CHI	NLG	CUT	6,2694	0,8574
PER	NLG	WEAR	5,0479	0,137
PER	MLG 320	WEAR	5,7435	0,1248
PER	MLG 320	CUT	6,6748	0,9243

AOC	Posición	Categoría de falla	IC 95% φ [–]	IC 95% σ [–]
CHI	NLG	WEAR	[5,12; 5,17]	[0,17; 0,21]
CHI	NLG	CUT	[5,80; 6,73]	[0,60; 1,21]
PER	NLG	WEAR	[5,026; 5,07]	[0,12; 0,15]
PER	MLG 320	WEAR	[5,723; 5,764]	[0,11; 0,14]
PER	MLG 320	CUT	[6,27; 7,08]	[0,67; 1,27]

ANEXO J.2. Parámetros obtenidos según distribución para frenos.

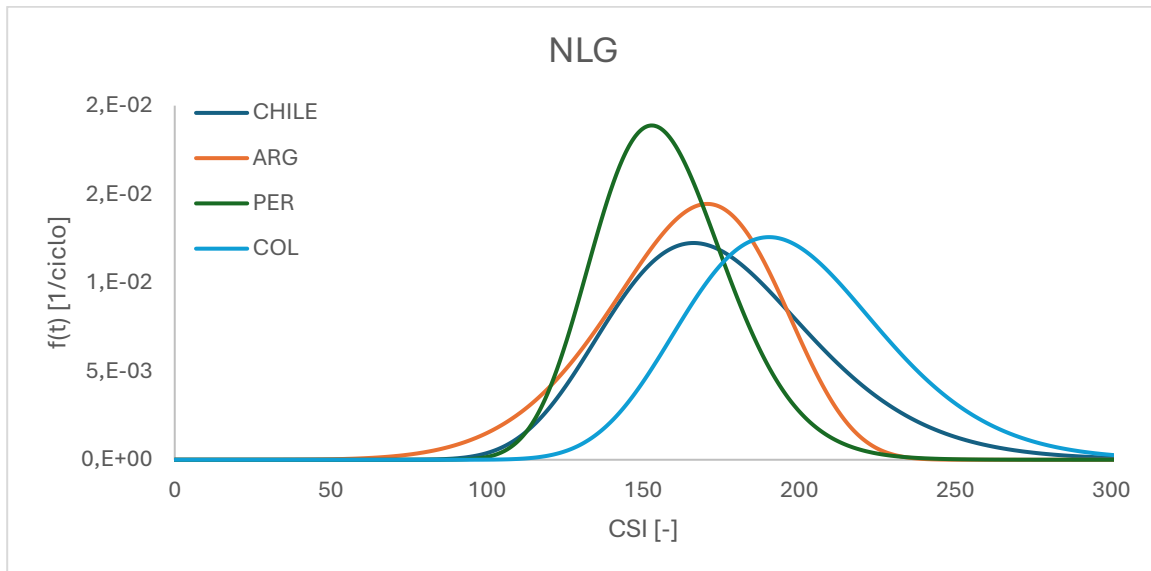
AOC	Posición	Categoría de falla	η [ciclos]	β [–]
ARG	EXTERIORES	WEAR	2399,9	8,78
ARG	INTERIORES	WEAR	1756,7	7,16
CHI	EXTERIORES	WEAR	2052,6	8,36
CHI	INTERIORES	WEAR	1567,7	4,75
COL	EXTERIORES	WEAR	2102,9	5,20
COL	INTERIORES	WEAR	1539,7	5,20
PER	EXTERIORES	WEAR	2098,4	7,10
PER	INTERIORES	WEAR	1581,5	6,82

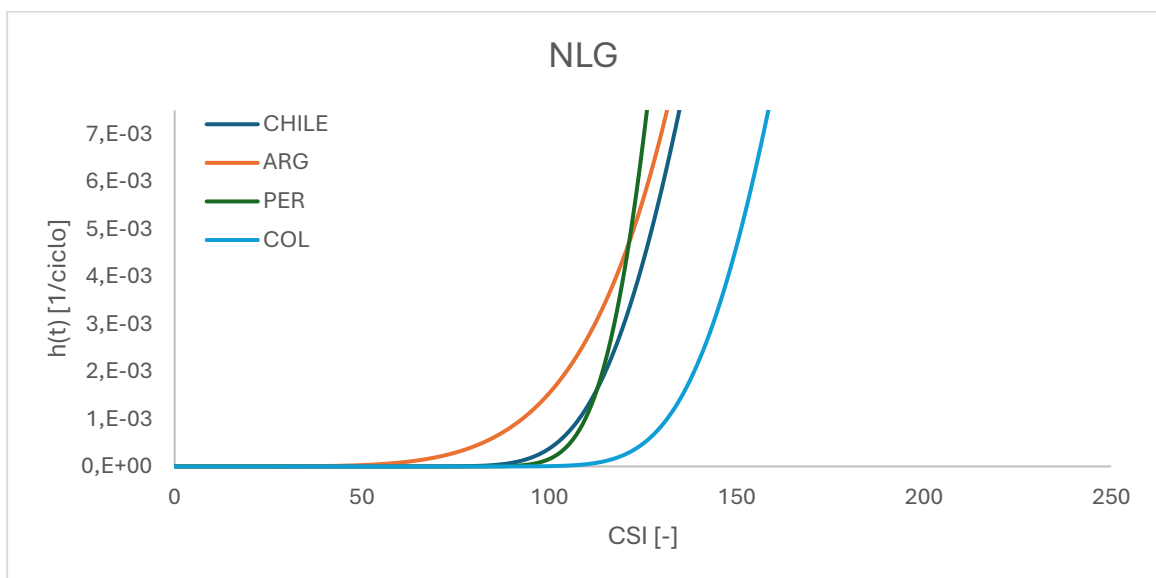
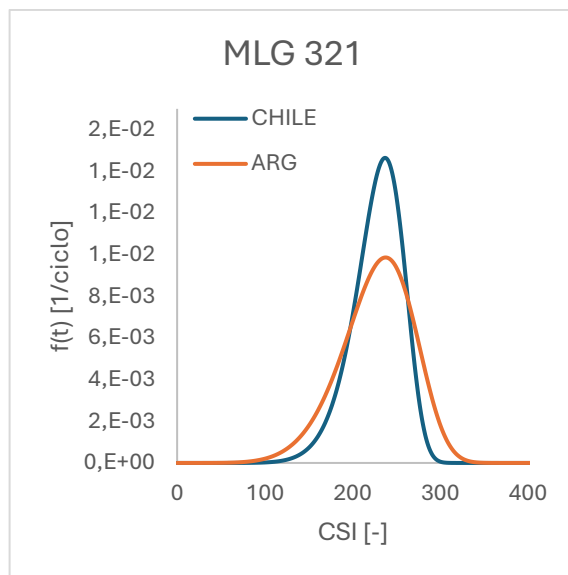
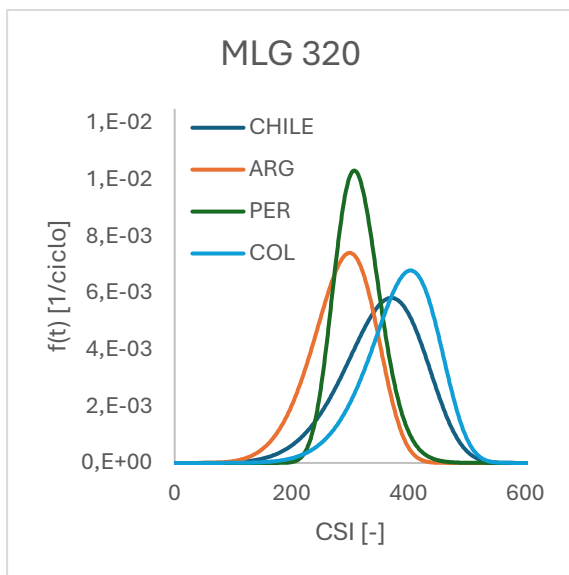
AOC	Posición	Categoría de falla	IC 95% η [ciclos]	IC 95% β [–]
ARG	EXTERIORES	WEAR	[2.291; 2.514]	[6,648; 11,62]
ARG	INTERIORES	WEAR	[1.675; 1.843]	[5,409; 9,479]
CHI	EXTERIORES	WEAR	[1.858; 2.268]	[3,481; 7,791]
CHI	INTERIORES	WEAR	[1.450; 1.695]	[3,473; 6,507]
COL	EXTERIORES	WEAR	[2.002; 2.208]	[6,285; 11,13]
COL	INTERIORES	WEAR	[1.487; 1.595]	[7,934; 11,95]
PER	EXTERIORES	WEAR	[1.945; 2.264]	[4,696; 10,76]
PER	INTERIORES	WEAR	[1.471; 1.700]	[4,77; 9,756]

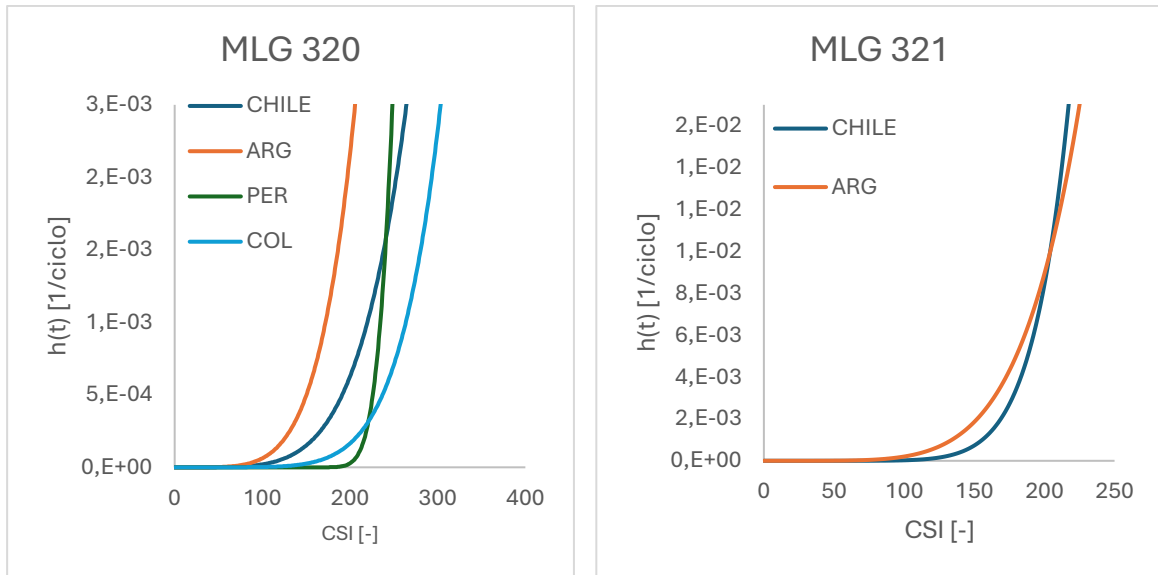
AOC	Posición	Categoría de falla	φ [-]	σ [-]
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	DAMAGED	8,54	0,51
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	LEAK	16,38	5,10

AOC	Posición	Categoría de falla	IC 95% φ [-]	IC 95% σ [-]
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	DAMAGED	[6,74; 9,64]	[0,10; 2,06]
CONSOLIDADO	CONSOLIDADO	LEAK	[6,89; 13,21]	[0,66; 4,79]

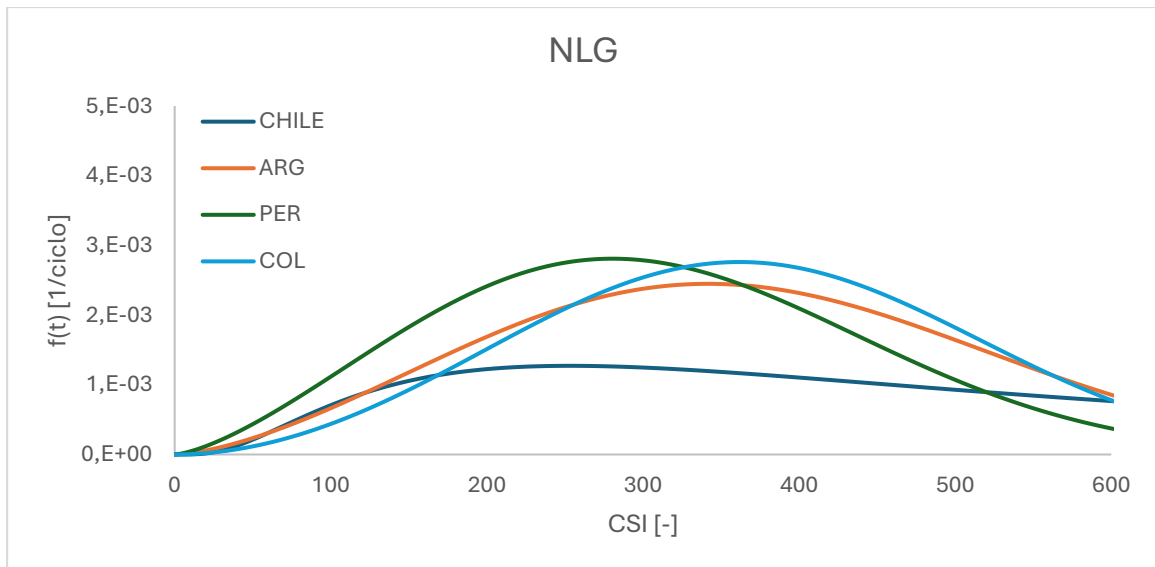
ANEXO K. Curvas desgaste normal ruedas.

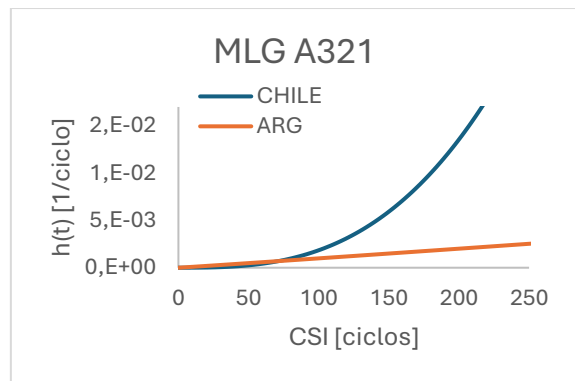
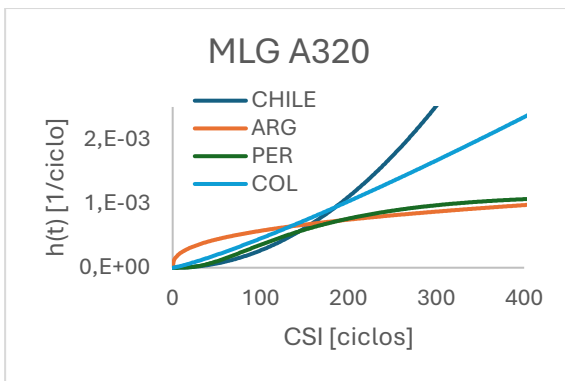
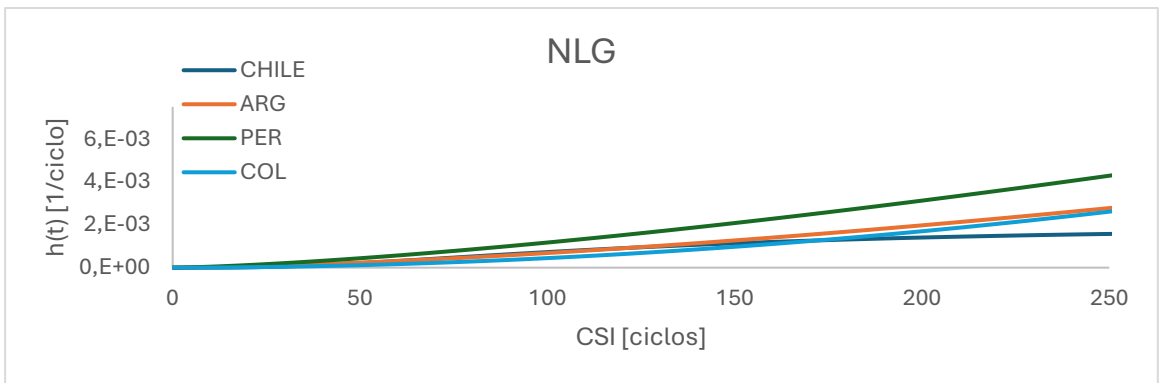
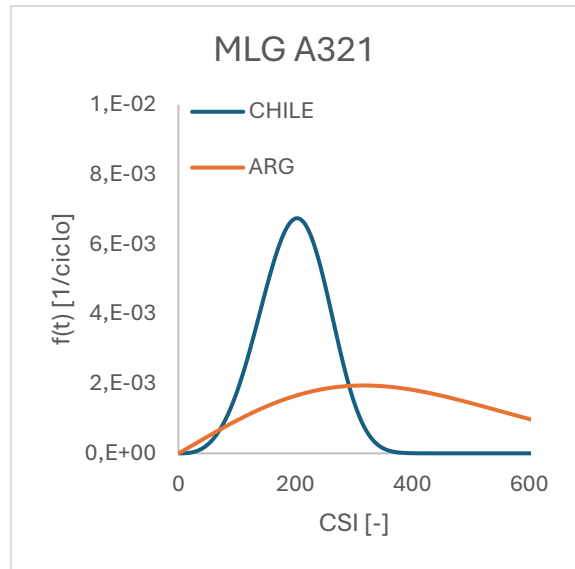
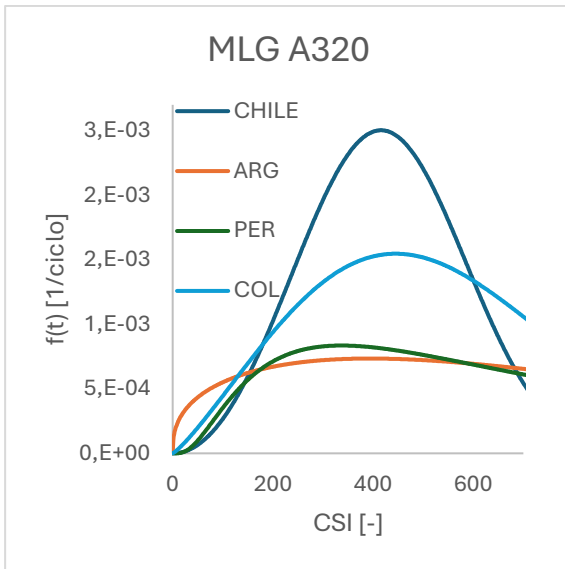




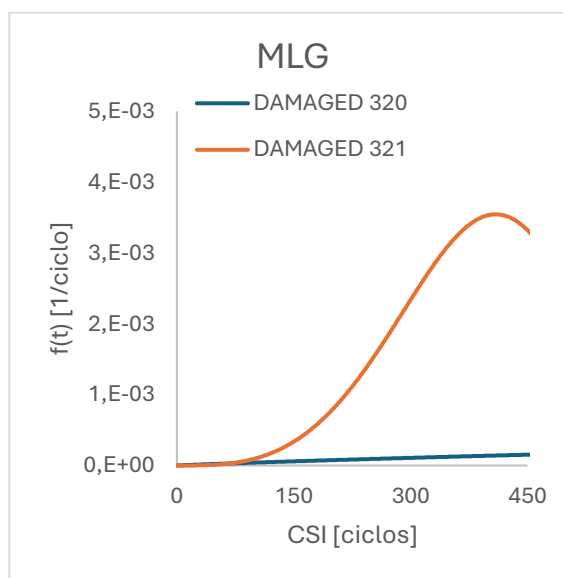
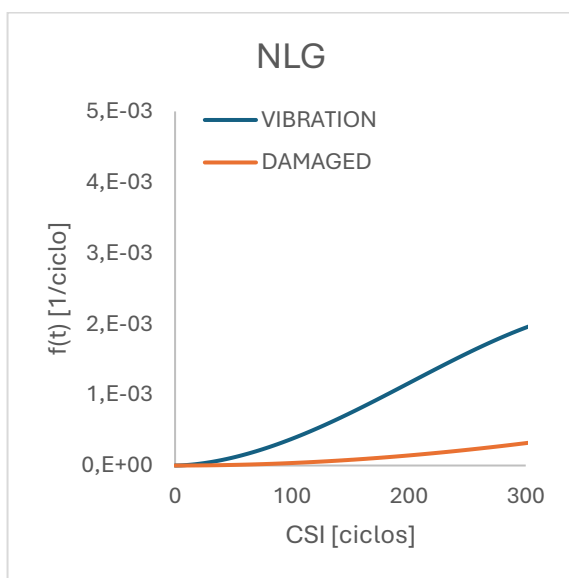
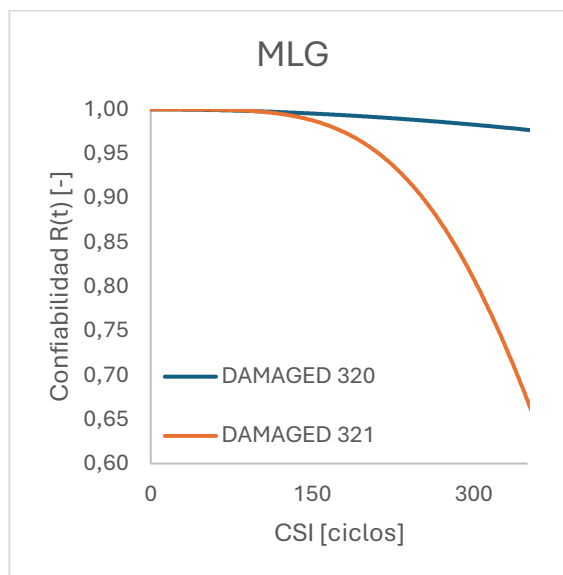
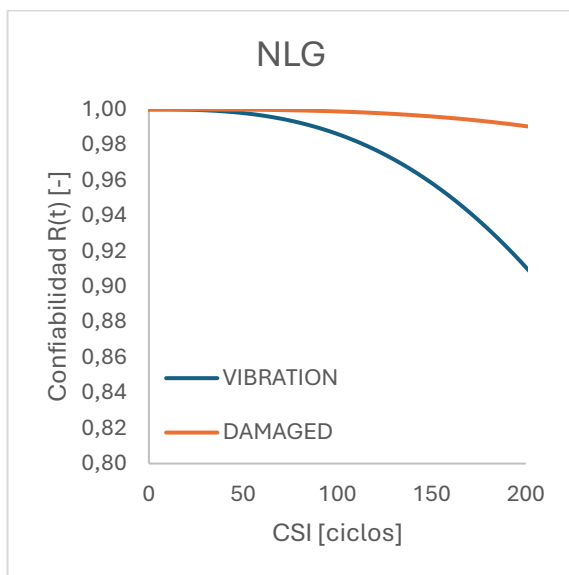


ANEXO L. Curvas cortes en ruedas.

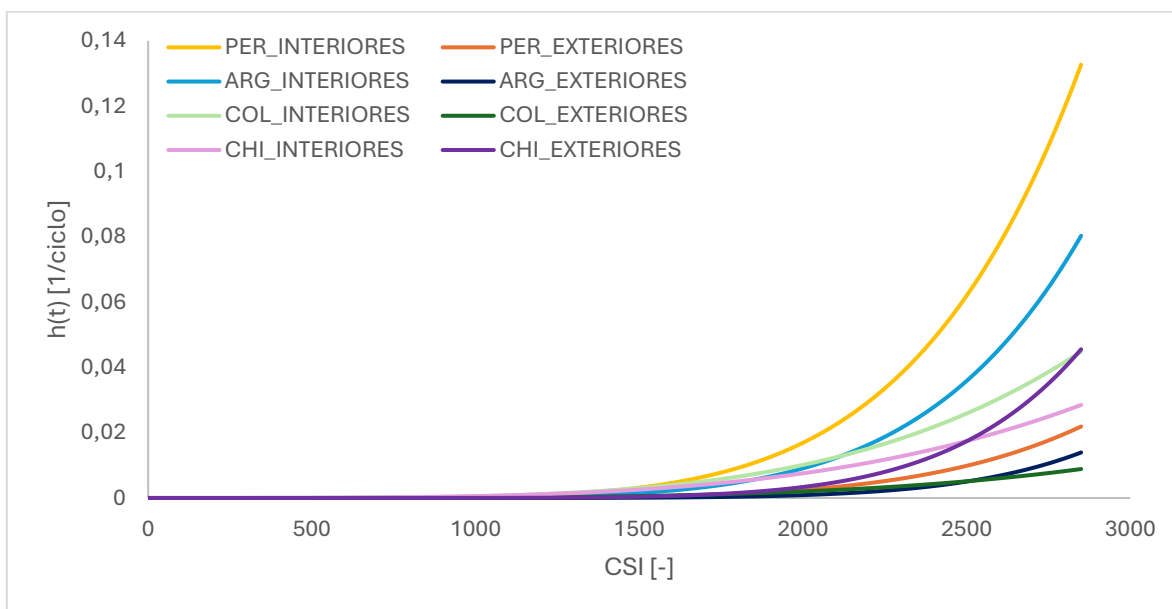
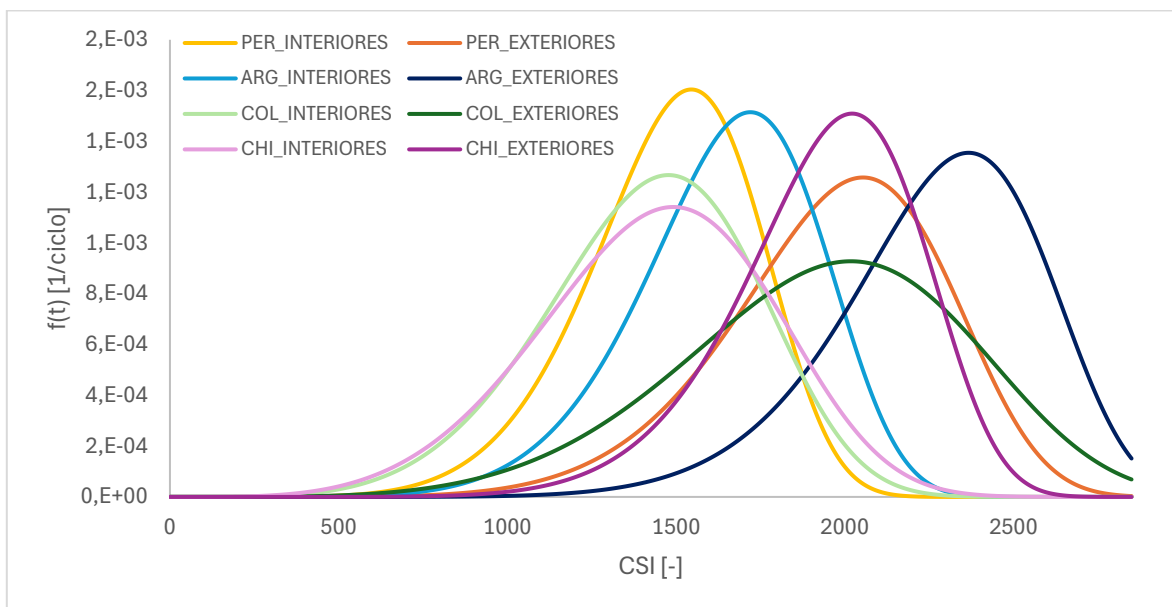




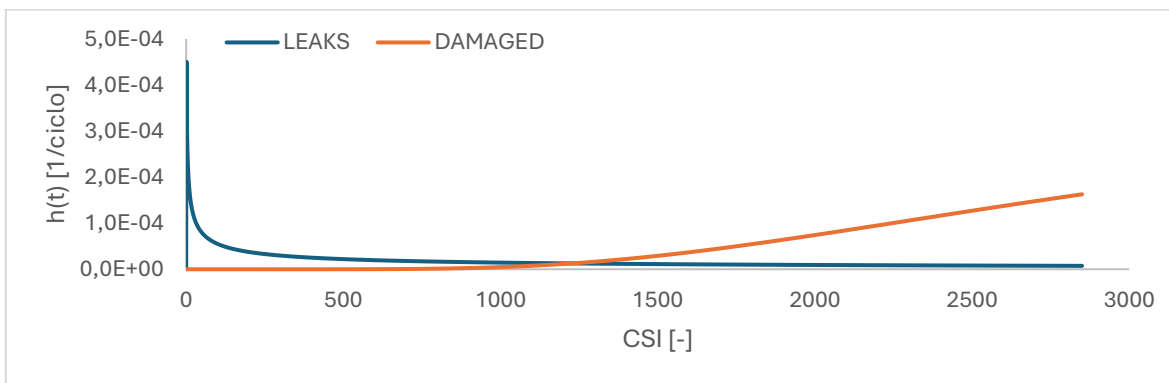
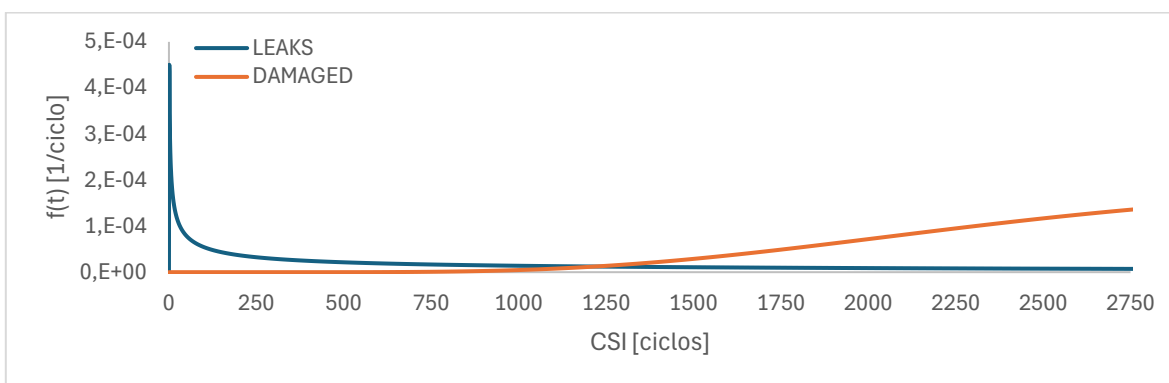
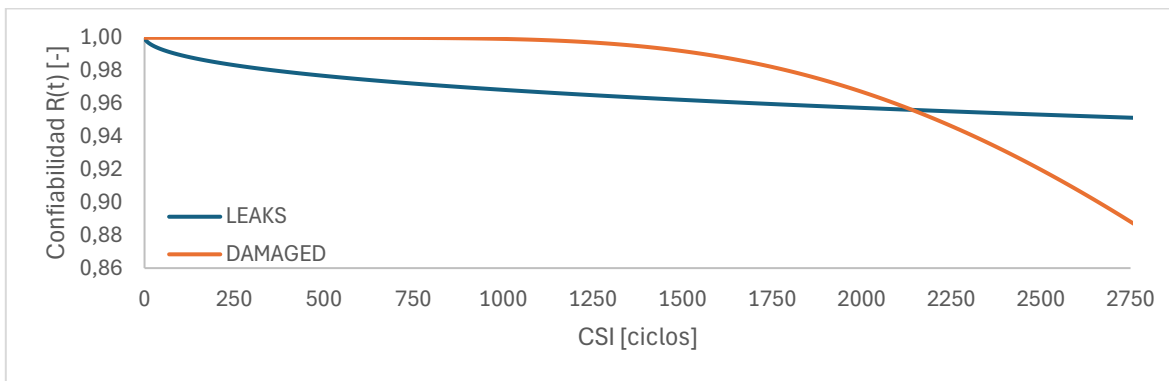
ANEXO M. Curvas otros modos de falla ruedas.



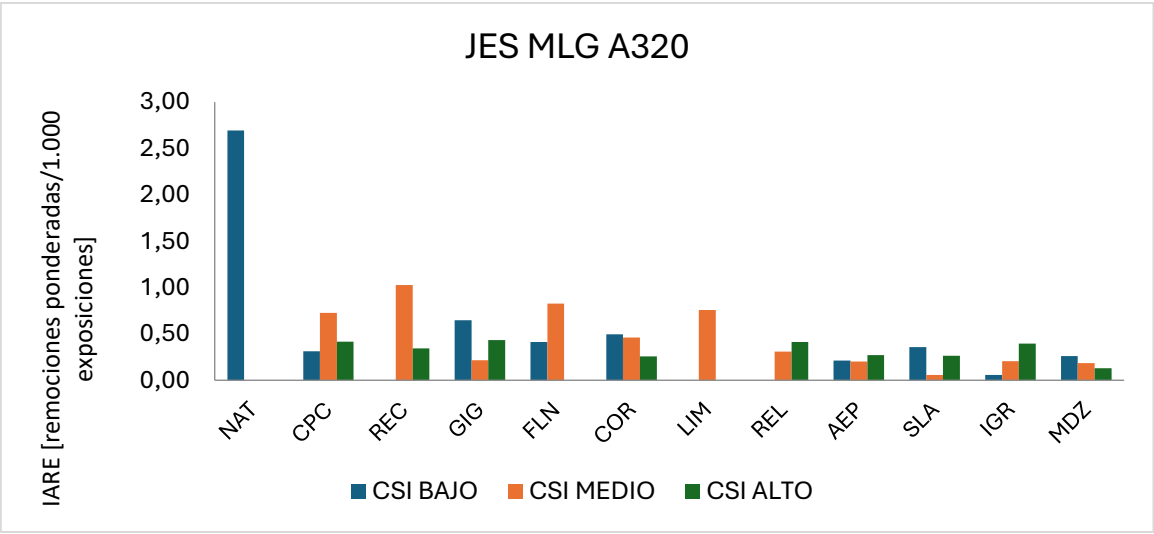
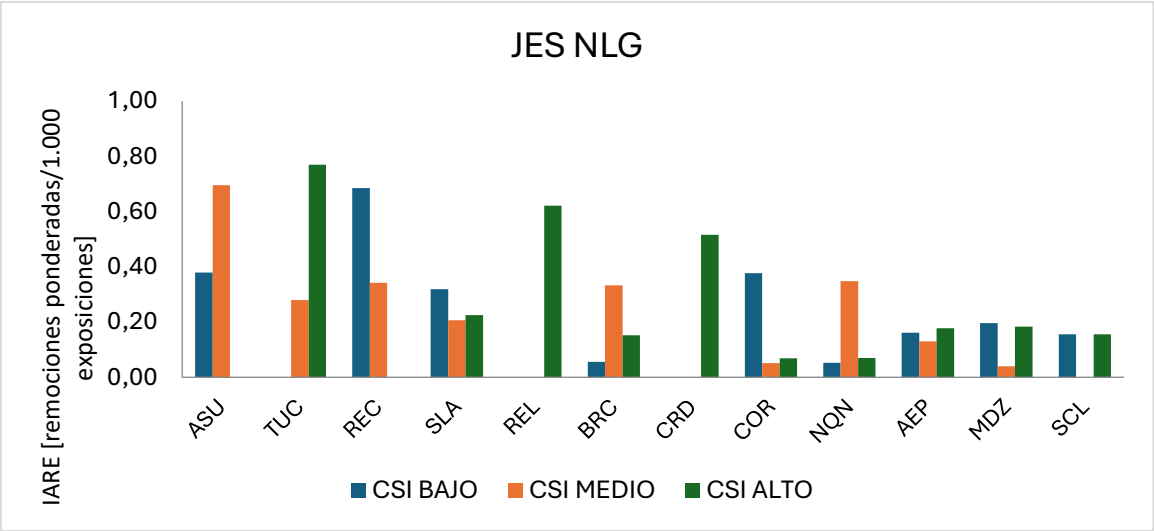
ANEXO N. Curvas desgaste normal frenos.

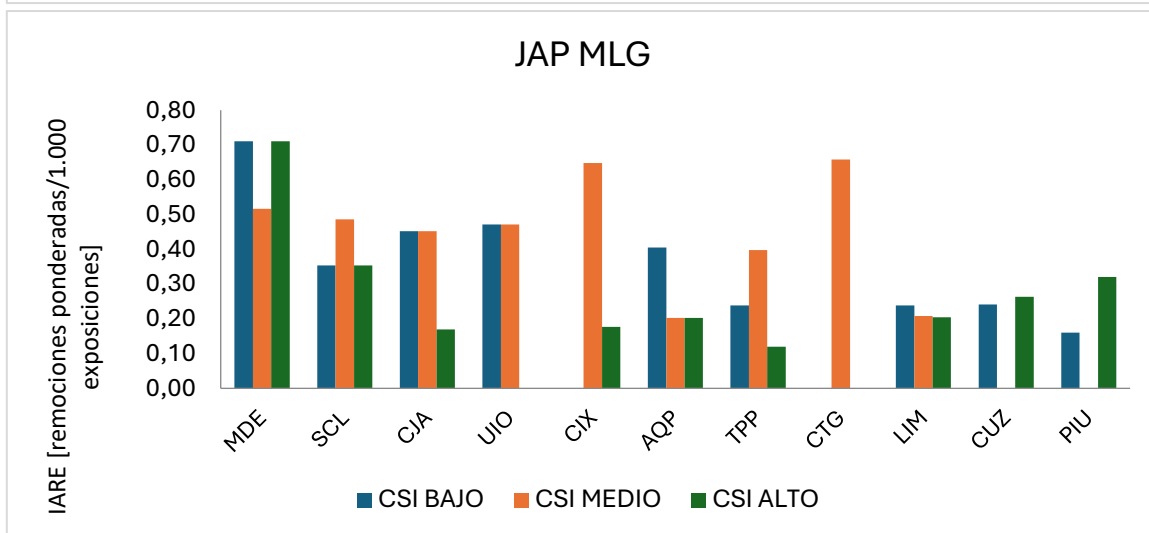
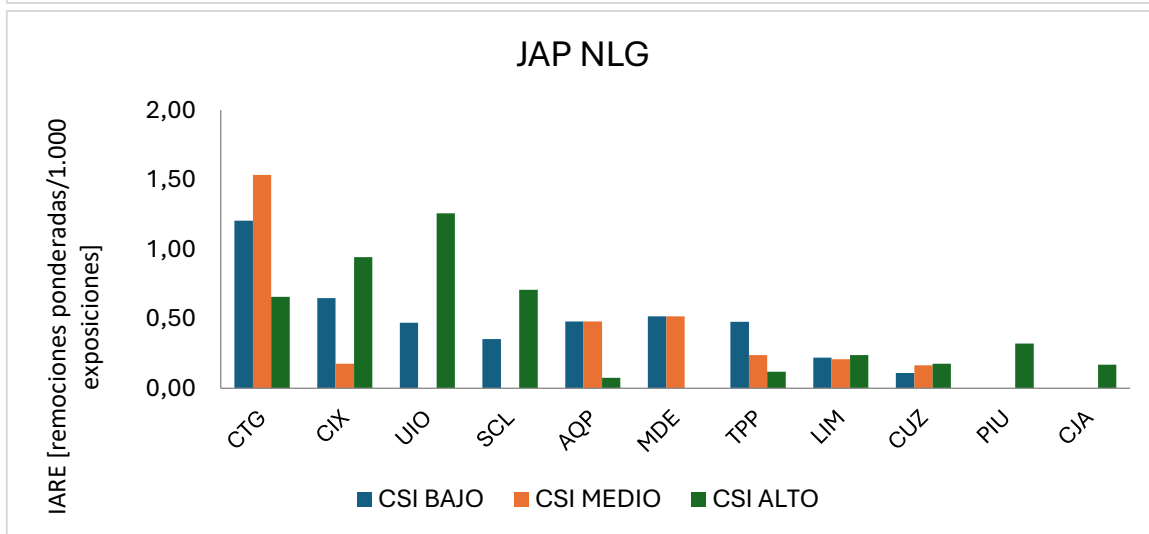
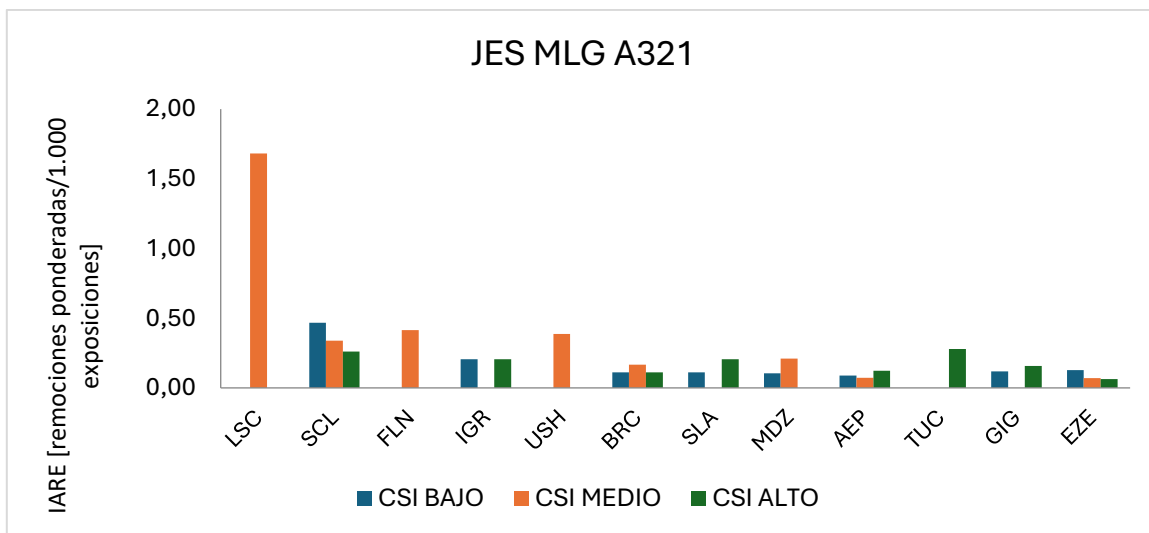


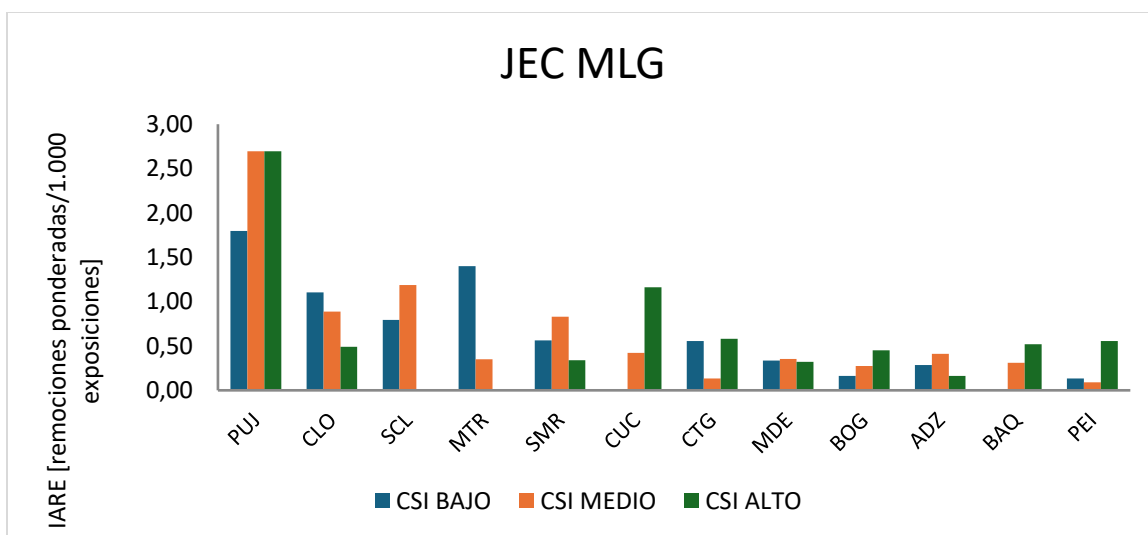
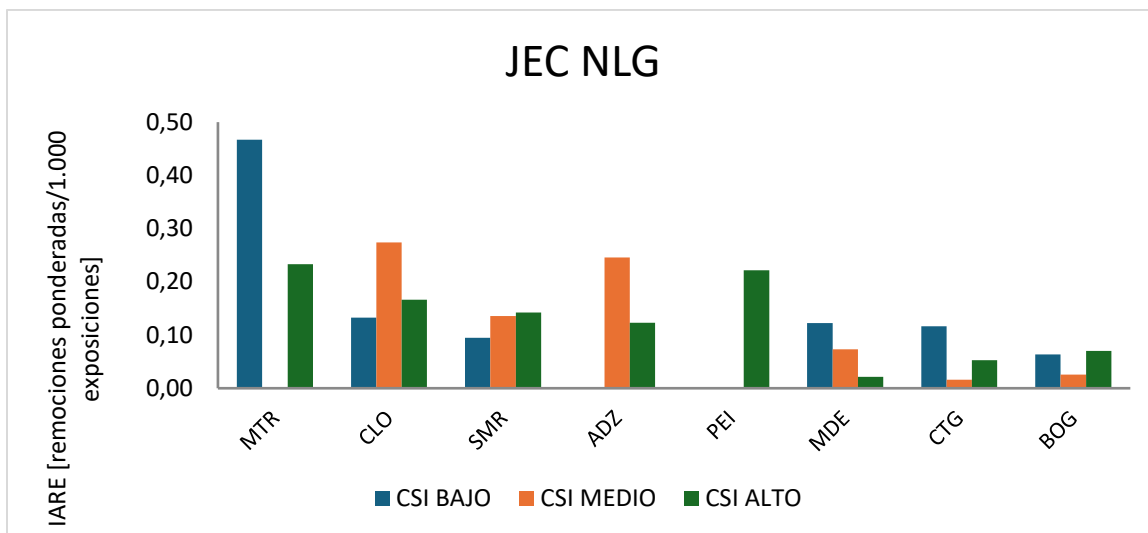
ANEXO O. Curvas otros modos de falla frenos.



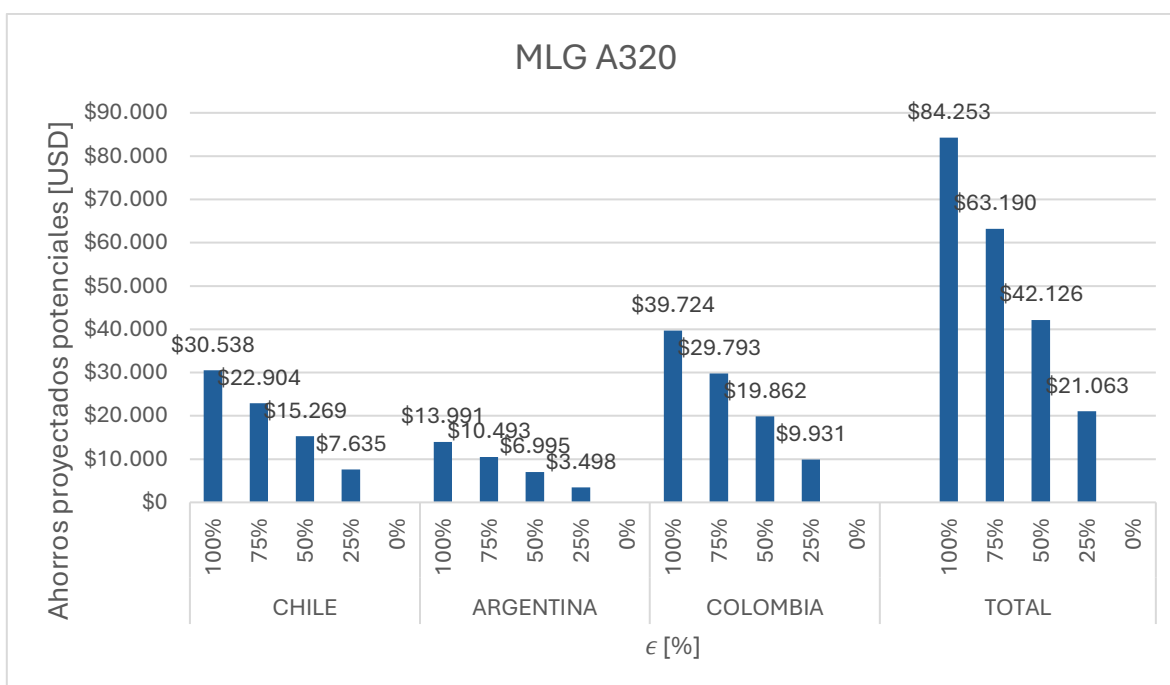
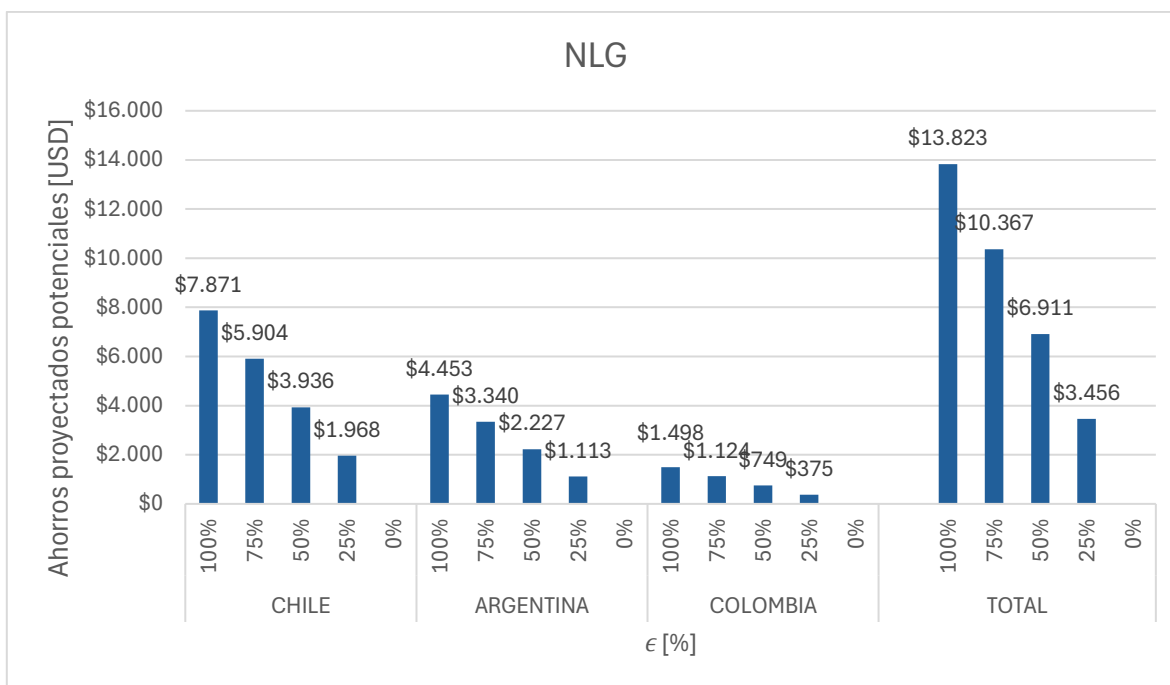
ANEXO P. Índice de Agresividad relativa (IARE) en JES y JAP.

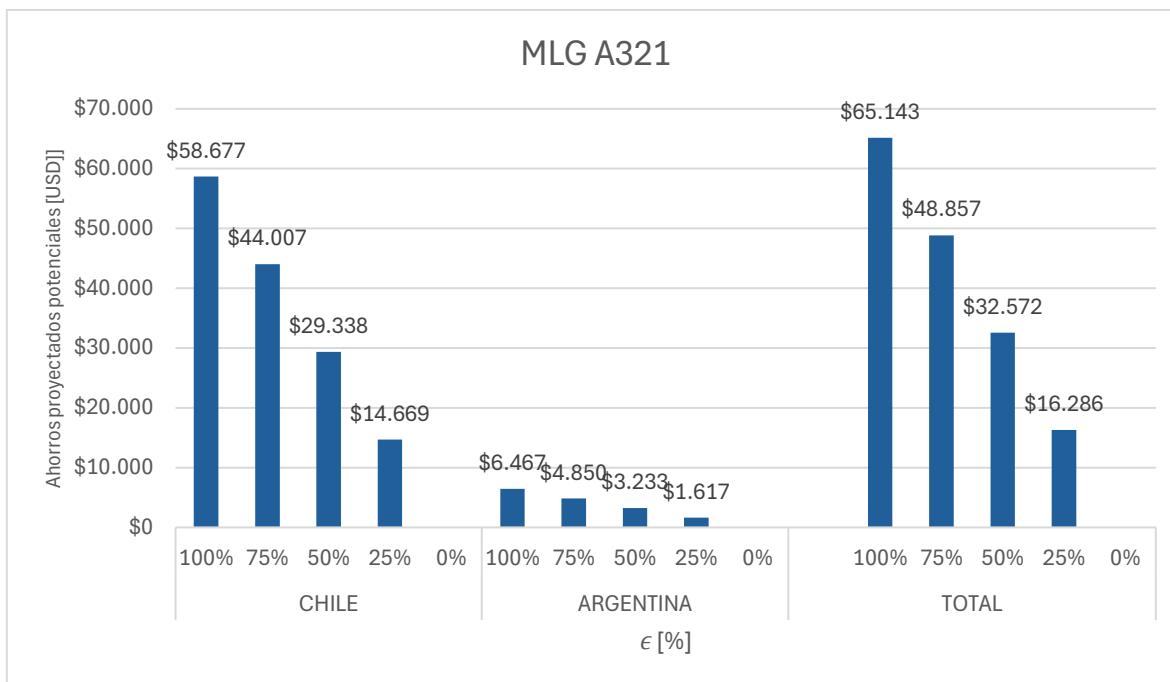




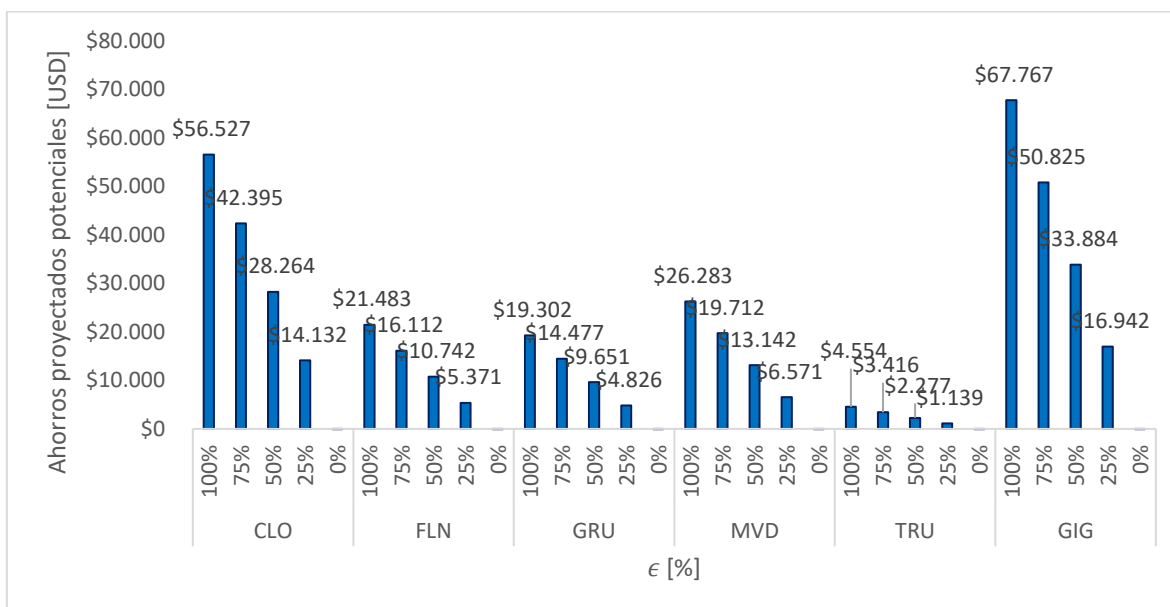


ANEXO Q.1. Cuantificación económica total por componente y AOC.

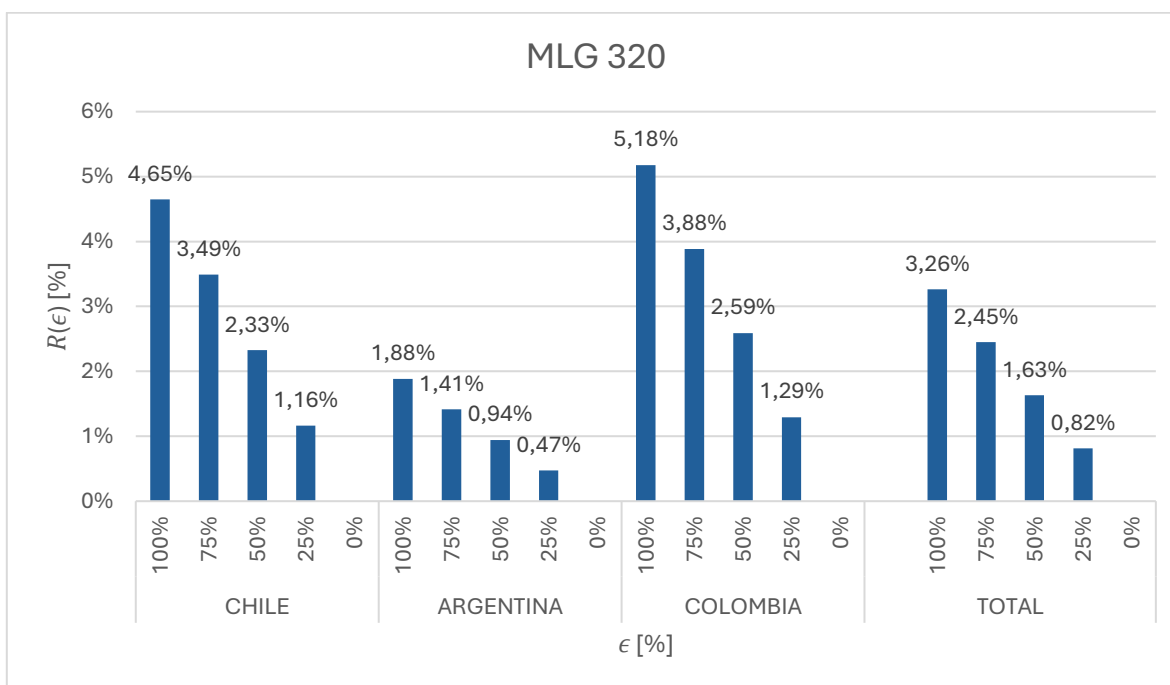
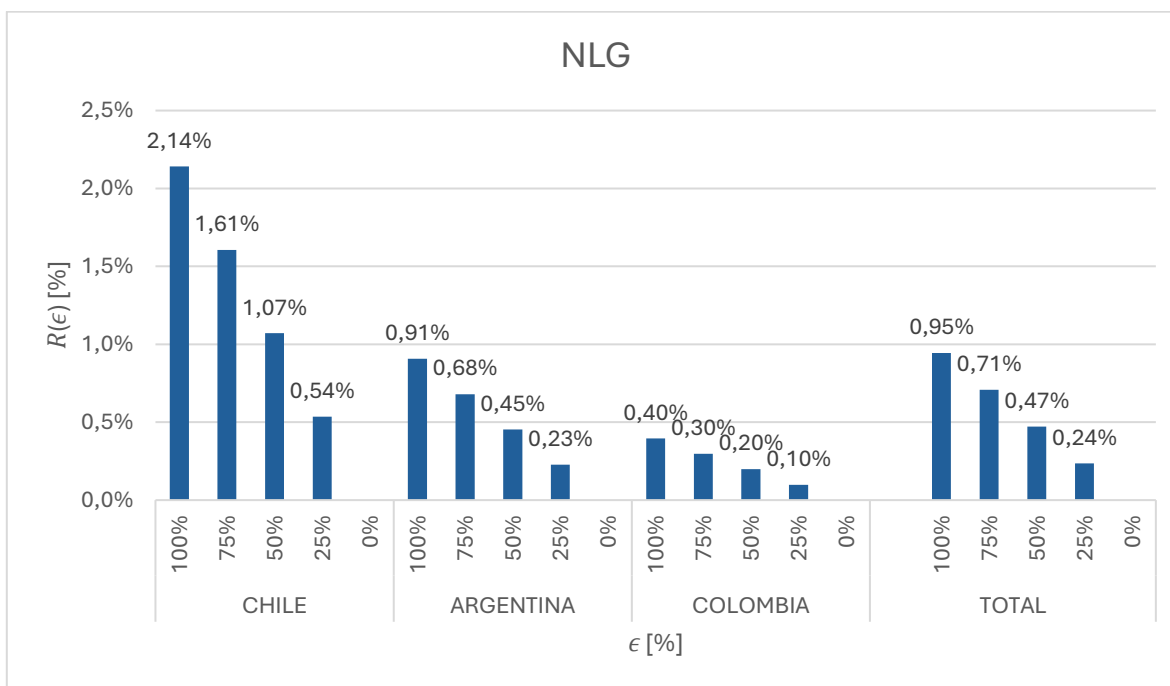


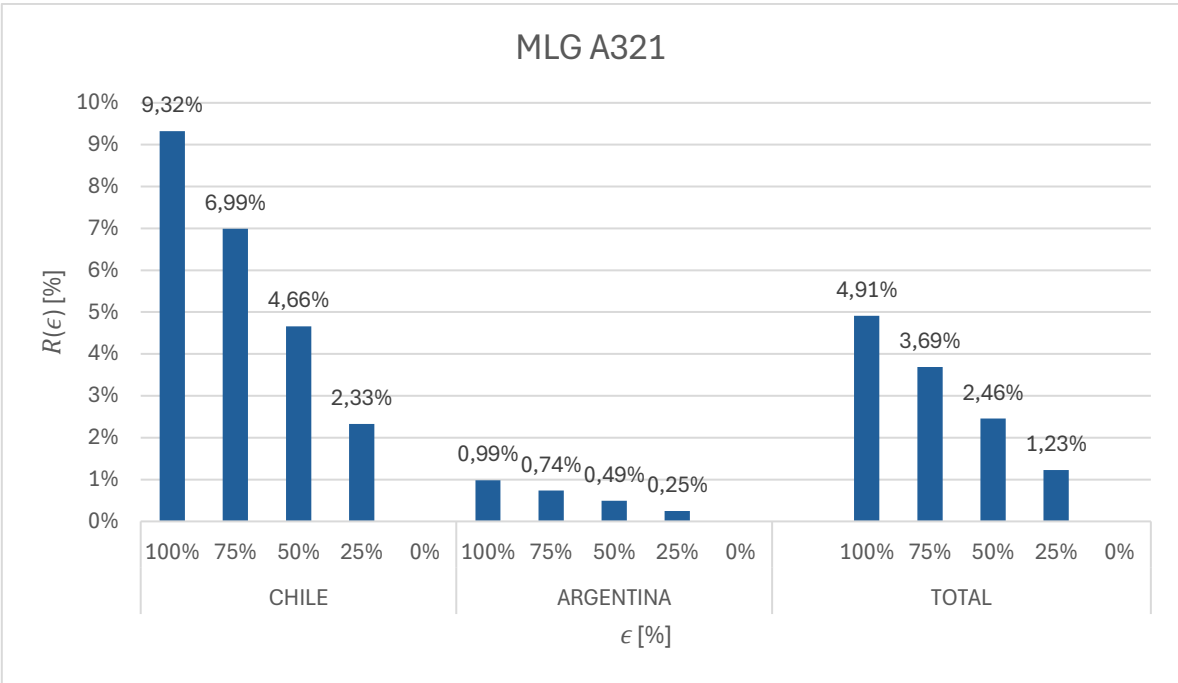


ANEXO Q.2. *Cuantificación económica total por estaciones priorizadas mediante cortes.*



ANEXO R. Cuantificación económica porcentual de vida potencial recuperable por componente y AOC.





Anexo S. Efecto proyectado sobre la vida operacional.

