

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA
A LOS SERVOMOTORES UTILIZADOS EN EL PROCESO DE
RECONDICIONAMIENTO DE MAQUINAS CNC**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero en MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL.

Alumno:

Andrés Alexander Araya Valdebenito

Profesor Guía:

Sr. Carlos Alberto Parra Márquez



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA A LOS SERVOMOTORES UTILIZADOS EN EL PROCESO DE REACONDICIONAMIENTO DE MAQUINAS CNC

Nombre del candidato(a): Andrés Alexander Araya Valdebenito

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial - Diurno

Campus: Sede Viña del Mar, José Miguel Carrera **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Alberto Parra Marquez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24-11-2025

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 24-11-2025

Firma:



Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

KEYWORDS: ANÁLISIS DE COSTOS, CICLO DE VIDA, CNC, MTTR, WOODWARD, MASCONVEYOR, REACONDICIONAMIENTO.

Para comenzar el proyecto ponemos en contexto, la problemática presente en la empresa Más Conveyor, antecedentes generales, y conceptos clave que ayudarán a entender la necesidad de la empresa de aplicar metodologías de análisis de costo de ciclo de vida.

Continuando se introduce la metodología de análisis de costo de ciclo de vida y se detalla cómo se calculará el impacto de los costes por fallas de los servomotores.

Finalmente, se llevará a cabo la aplicación de la metodología de Woodward utilizando datos reales concernientes a los servomotores, tomando en cuenta sus tipos de fallas, frecuencia, tiempo medio de reparación (MTTR) y los costos asociados a cada uno, para luego realizar una comparación del impacto económico generado por ambas opciones de repuestos, identificando las diferencias en los costos y evaluando la contribución de cada elemento en el costo total del reacondicionamiento tomando en cuenta las características fundamentales y diferencias correspondientes los servomotores originales y alternativos.

Esta evaluación busca proporcionar una visión amplia de los costos relacionados en el proceso de reacondicionamiento, permitiendo un análisis comparativo detallado de los componentes en estudio. El objetivo de este análisis es identificar la categoría que tiene el mayor impacto en el coste total del ciclo de vida del reacondicionamiento. Además, se incluirá una categoría adicional que evaluará el impacto de los costes totales generados por fallas. Este enfoque permitirá tomar decisiones más informadas que maximicen los beneficios, considerando los costos asociados al ciclo de vida del equipo.

ÍNDICE

RESUMEN	2
ÍNDICE	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	5
INDICE DE GRAFICOS	6
INDICE DE DIAGRAMAS CONCEPTUALES	6
INDICE DE ECUACIONES	6
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	7
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVO GENERAL	10
OBJETIVO ESPECÍFICO	10
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	11
1.1. problemática	12
1.2. MAESTRANZA MASCONVEYOR	13
1.2.1. Misión	13
1.2.2. Visión	14
1.2.3. Valores	14
1.2.4. Historia	14
1.3. DIVISIONES DE MASCONVEYOR LTDA	15
1.4. máquinas de control numérico computarizado (cnc)	15
1.5. servomotores	18
1.6. CONCEPTO DE REACONDICIONAMIENTO	19
1.6.1. Proceso:	20
1.6.2. Beneficios:	20
1.6.3. Renovación o reparación:	20
1.6.4. Objetivos:	21
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE ACCV DE WOODWARD ADAPTADA	
AL PROCESO DE REACONDICIONAMIENTO DE MÁQUINAS CNC.	22
2. METODOLOGÍA DE ACCV DE WOODWARD ADAPTADA AL PROCESO DE REACONDICIONAMIENTO DE MÁQUINAS CNC	23
2.1. ANTECEDENTES DE ANÁLISIS	23
2.2. ASPCTOS TEÓRICOS BÁSICOS DE LOS COSTES	25
2.2.1. Coste de investigación y desarrollo:	26
2.2.2. Coste de producción y construcción.	27

2.2.3.	Coste de operación y mantenimiento:	27
2.2.4.	Coste de desincorporación y desmantelamiento:	28
2.3.	Aplicación de técnicas ACCV	29
2.4.	evaluación del impacto en la confiabilidad en los modelos accv	31
2.5.	MODELO DE ACCV DE WOODWARD	33
2.5.1.	características del modelo de Woodward:	33
2.5.2.	Procedimiento de implementación del modelo de Woodward:	34
CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DEL ACCV AL REACONDICIONAMIENTO DEL TORNO CNC PUMA 15 – DAEWOO.		41
3.1.	TORNO CNC PUMA 15 - DAEWOO	42
3.2.	CI – COSTO INICIAL DE ADQUISICIÓN E INSTALACIÓN	45
3.2.1.	Costes de desarrollo	45
3.2.2.	Costes de adquisición	45
3.3.	CO – COSTOS OPERACIONALES	46
3.4.	CMP – COSTES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	47
3.5.	CMM – COSTES DE MANTENIMIENTO MAYOR	48
3.6.	TCPf – COSTES POR FIABILIDAD	48
3.6.1.	Frecuencia de fallos	48
3.6.2.	Costos asociados a cada tipo de fallo	51
3.6.3.	Calcular los costes totales por fallos por año TCPf [\$/año]	55
3.6.4.	Costos totales por fallos en valor presente	58
3.7.	CTCV – costo total del ciclo de vida	61
3.8.	ANALISIS DE RESULTADOS	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		67
BIBLIOGRAFÍA		69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Ubicación casa matriz, Masconveyor Ltda.	13
Figura 1-2: Torno CNC CK6147H.	16
Figura 1-3: Mesa de corte por fibra láser CNC.	17
Figura 1-4: Centro de mecanizado CNC VMC 540.	17
Figura 1-5: Servomotores.	18
Figura 1-6: Circuito cerrado CNC.	19
Figura 3-1: Circuito cerrado del CNC.	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Frecuencia de fallos – Reacondicionamiento con FANUC.	49
Tabla 3-2: Frecuencia de fallos – Reacondicionamiento con SZGH.	50
Tabla 3-3: Frecuencia de fallos – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.	51
Tabla 3-4: Costos por fallos – Reacondicionamiento con FANUC.	52
Tabla 3-5: Costos por fallos – Reacondicionamiento con SZGH.	53
Tabla 3-6: Costos por fallos – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.	54
Tabla 3-7: Costos totales por fallos por año – Reacondicionamiento con FANUC.	55
Tabla 3-8: Costos totales por fallos por año – Reacondicionamiento con SZGH.	56
Tabla 3-9: Costos totales por fallos por año – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.	57
Tabla 3-10: Costos totales por fallos en valor presente – Reacondicionamiento con FANUC.	58
Tabla 3-11: Costos totales por fallos en valor presente – Reacondicionamiento con SZGH.	59
Tabla 3-12: Costos totales por fallos en valor presente – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.	60
Tabla 3-13: CTCV – Reacondicionamiento con FANUC.	62
Tabla 3-14: CTCV – Reacondicionamiento con SZGH.	62
Tabla 3-15: CTCV – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.	63
Tabla 3-16: CTCV Comparativo – Reacondicionamiento con FANUC, SZGH y SZGH Pesimista.	63

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 3-1: División de costos del reacondicionamiento – Reacondicionamiento con SZGH.	65
Gráfico 3-2: División de costos del reacondicionamiento – Reacondicionamiento con FANUC.	65
Gráfico 3-3: División de costos del reacondicionamiento – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.	66

INDICE DE DIAGRAMAS CONCEPTUALES

Diagrama conceptual 2-1: Clasificación de costos.	26
Diagrama conceptual 2-2: Procedimiento Woodward.	35

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Tiempo medio entre fallos.	32
Ecuación 2-2: Tiempo medio de reparación.	32
Ecuación 2-3: Tiempo medio de reparación.	35
Ecuación 2-4: Frecuencia de fallos.	38
Ecuación 2-5: Costos por fallos.	39
Ecuación 2-6: Costos totales por fallos.	39
Ecuación 2-7: Costos totales por fallos en valor presente.	39

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

ACCV: Análisis de Coste de Ciclo de Vida.

CTCV: Costos Totales de Ciclo de Vida.

CAD: Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora).

CAM: Computer-Aided Manufacturing (Manufactura Asistida por Computadora).

USD: United States Dollar (dólar estadounidense).

CNC: Control Numero Computarizado.

CTCV: Costo Total del Ciclo de Vida.

FANUC: Fabricante de sistemas CNC y automatización industrial.

SZGH: Marca de sistemas de control y automatización industrial.

TCPf: Costos Totales por Fiabilidad.

MTTR: Medium Time To Repair (Tiempo Medio de Reparación).

MTBF: Mean Time Between Failures (Tiempo Medio Entre fallos).

PTFR: Proportional time failure rate (Tasa de Fallos Proporcional al Tiempo).

LCCA: Life Cycle Cost Analysis (Análisis de Costo de Ciclo de Vida).

PLC: Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable).

AC: Alternating Current (Corriente Alterna).

DC: Direct Current (Corriente Continua).

Encoder: Codificador.

B. SIMBOLOGÍA

h: hora

\$: dólar (USD)

%: Porcentaje

r.p.m: Revoluciones por minuto

kW: Kilovatios

INTRODUCCIÓN

En la industria minera chilena, donde la continuidad operacional es crítica, las máquinas CNC son clave para la fabricación de componentes como polines transportadores. Más Conveyor Ltda. enfrenta desafíos técnicos y económicos al reacondicionar sus tornos CNC obsoletos, donde la elección entre repuestos originales y alternativos impacta tanto en costos como en confiabilidad. Este trabajo propone una metodología basada en el ACCV para optimizar esta decisión.

Más Conveyor Ltda. se posiciona como un actor clave en la fabricación de componentes esenciales para la industria de extracción minera, destacándose por su capacidad de innovación y adaptación a las necesidades del mercado. Dentro de este contexto, la empresa enfrenta desafíos significativos relacionados con el mantenimiento y la modernización de sus equipos CNC, los cuales son fundamentales para la producción eficiente de polines y otros productos utilizados en el transporte de materiales.

El reacondicionamiento de estas máquinas, mediante la incorporación de nuevos kits CNC que incluyen servomotores y sistemas de control actualizados, surge como una solución viable frente a la obsolescencia de los equipos originales. Este proceso no solo busca restaurar la funcionalidad de los equipos, sino también optimizar su rendimiento y reducir costos operativos a largo plazo. Sin embargo, la elección entre repuestos originales y alternativos plantea un dilema crítico, ya que implica evaluar cuidadosamente los costos asociados al ciclo de vida de cada opción.

Dada esta problemática, resulta esencial realizar un análisis detallado del costo de ciclo de vida de los servomotores utilizados en el reacondicionamiento de las máquinas CNC. Para ello, en el Capítulo 1 se presentan los antecedentes generales de la empresa Más Conveyor Ltda., su historia, misión, visión y la importancia de los servomotores en el proceso de fabricación. Además, se introduce el concepto de reacondicionamiento, detallando sus beneficios y objetivos.

En el Capítulo 2, se aborda la metodología de análisis de costo de ciclo de vida (ACCV) basada en el modelo propuesto por Woodward en 1997. Se explica su origen, fundamentos teóricos y aplicación en la toma de decisiones industriales. Este enfoque permite evaluar el impacto económico de los costos operacionales, de mantenimiento

y de confiabilidad de los servomotores a lo largo del tiempo, proporcionando una base sólida para comparar distintas alternativas de repuestos.

El Capítulo 3 se centra en la aplicación del ACCV en el proceso de reacondicionamiento del torno CNC Puma 15 - Daewoo, una de las máquinas clave en la producción de Más Conveyor Ltda. Se analizan dos opciones de servomotores: FANUC, reconocido por su alta calidad y confiabilidad, y SZGH, una alternativa más económica, pero con una tasa de fallos más elevada. A través del análisis de costos de adquisición, operación, mantenimiento y confiabilidad, se busca identificar cuál de las dos opciones representa la mejor inversión en términos de rentabilidad y eficiencia.

Finalmente, el análisis de los resultados permitirá determinar la opción más conveniente para la empresa, optimizando la gestión de sus activos y asegurando la continuidad operativa de su maquinaria CNC. Con esta información, Más Conveyor Ltda. podrá tomar decisiones informadas sobre el reacondicionamiento de sus equipos, maximizando beneficios y reduciendo costos a largo plazo.

OBJETIVO GENERAL

Aplicar un proceso de análisis de coste de ciclo de vida al procedimiento de reacondicionamiento de un equipo crítico CNC, comparando repuestos originales v/s alternativos, para determinar la opción que genere el mayor beneficio económico.

OBJETIVO ESPECÍFICO

1. Definir el contexto operacional de la empresa Más Conveyor, relacionado con el proceso de reacondicionamiento del equipo CNC Puma 15 de Fanuc.
2. Desarrollar el procedimiento de análisis de ciclo de vida basado en el modelo de Woodward que evalúa el impacto económico de los costes por fallas.
3. Determinar la opción que genere el menor coste de ciclo de vida en el proceso de reacondicionamiento del equipo CNC Puma 15 (Repuestos originales v/s Alternativos).

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. PROBLEMÁTICA

La empresa Más Conveyor Ltda. posee diversos contratos con compañías mineras en las cuales se compromete a la entrega de conjuntos de polines para el transporte de material bruto, estos polines conocidos como autocentrantes en retorno logran solucionar problemas con las desviaciones en las correas de transporte, lo que los hace indispensable para las industrias mineras ya que reducen costos por fallas en la correa transportadora, es por esto, que la demanda de estos productos está en aumento. Para la manufactura eficaz de los polines, Más Conveyor cuenta con un equipo de trabajo especializado en maquinaria CNC específicamente tornos y centros de mecanizado.

La alta exigencia de trabajo ha llevado a las máquinas a su máxima capacidad, lo que ha provocado fallas en sus subsistemas dejando los equipos en detención total, la inexistencia de servicio técnico por parte de los proveedores y la escasez de repuestos compatibles con las máquinas ya consideradas obsoletas por los propios fabricantes ha llevado a la compañía Mas Conveyor a buscar nuevas soluciones que pongan en marcha nuevamente sus equipos.

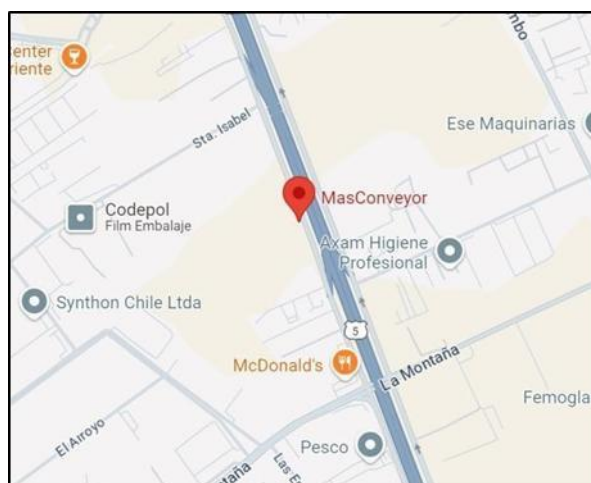
Una propuesta poco implementada pero eficaz consiste en el reacondicionamiento de los equipos instalando nuevos kits CNC incluyendo servomotores, drivers, variadores de frecuencia y sistemas de control número. Este tipo de kits de reacondicionamiento tiene un amplio margen de costo, existiendo repuestos originales de la marca en sus versiones actualizadas, pero con un alto costo de adquisición y por otro lado se tienen kits de repuestos alternativos que cumplen las mismas funciones, pero a un menor costo, pero con una tasa de falla más alta debido a la calidad de sus componentes. El dilema que enfrenta la empresa es la consideración de los costos, que abarcan la adquisición e instalación de los kits CNC, entre otros aspectos. Por lo tanto, se vuelve crucial llevar a cabo un análisis exhaustivo de los costos del ciclo de vida de ambos motores antes de tomar una decisión definitiva.

1.2. MAESTRANZA MASCONVEYOR

Más Conveyor es una empresa especializada en la fabricación de rodillos, polines y poleas, así como en la alineación de correas para el transporte de minerales. La empresa se destaca por ofrecer productos de alta calidad, con el objetivo de mejorar la eficiencia y la seguridad en los procesos de transporte de materiales. Además, busca destacarse por su compromiso con la satisfacción del cliente y la innovación en sus productos y servicios.

Más Conveyor Ltda. Posee sucursales en el norte y centro de Chile, siendo Santiago hogar de su casa matriz, ubicada en la comuna de Lampa, Av. Pdte. Eduardo Frei Montalva 17110. Esta ubicación se encuentra a solo metros de la carretera 5-Sur, lo que es ventajoso para una empresa de su rubro.

La figura 1-1 indica la ubicación de la casa matriz, cuya privilegiada ubicación permite la accesibilidad a proveedores y clientes, en esta sucursal se realiza la manufactura de sus productos.



Fuente: Google Maps.

Figura 1-1. Ubicación casa matriz, Masconveyor Ltda.

1.2.1. Misión

Transferir valor, desde una perspectiva de mejora e innovación continua, orientando y adaptando las necesidades del cliente, con un equipo profesional y técnico del más alto nivel.

1.2.2. Visión

Ser el principal asesor técnico y proveedor de soportes para correas transportadoras de la industria extractiva minera nacional e internacional.

1.2.3. Valores

- ✓ Responsabilidad.
- ✓ Organización.
- ✓ Limpieza.
- ✓ Disciplina.

Valores que permiten entregar innovación, confianza y calidad.

1.2.4. Historia

La compañía fue constituida como sociedad comercial el 19 de enero de 2010.

Hitos históricos:

- ❖ 2010 ingresó al mercado nacional de minería.
- ❖ 2014 Disminución del 18,75% a 0,15% por desalineamientos por correas, en Collahuasi.
- ❖ 2015 Consolidación de sus equipos en el gran mercado nacional minero.
- ❖ 2017 Ingresó al mercado peruano, pequeña, mediana y gran minería.
- ❖ 2019 Potenciación del equipo de asesoría técnica. Más Conveyor Ltda. en convenio marco.
- ❖ 2020-2023 Repotenciación del sistema productivo aplicando tecnología de última generación.
- ❖ 2024 Se adjudicó contrato marco con grupo Antofagasta Minerals.

1.3. DIVISIONES DE MASCONVEYOR LTDA

La empresa cuenta con diferentes rubros a nivel nacional e internacional

- ❖ MACRI CNC.
- ❖ INGENIERIA DEL SUR (Sucursal en Perú).

1.4. MÁQUINAS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC)

Las máquinas de control numérico computarizado (CNC) son herramientas que utilizan un sistema de control informático para operar maquinaria, y son ampliamente utilizadas en la fabricación y producción debido a su precisión y eficiencia. Estas máquinas están diseñadas para realizar tareas de corte, fresado, torneado, grabado y otras operaciones de fabricación mediante el control de sus movimientos a través de comandos computarizados. Generalmente, son alimentadas por software de diseño asistido por computadora (CAD) y software de manufactura asistida por computadora (CAM), lo que permite a los operadores diseñar piezas con gran exactitud.

Para mecanizar una pieza, se utiliza un sistema de coordenadas que especifica el movimiento de la herramienta de corte. Este sistema controla los movimientos de la herramienta de trabajo en relación con los ejes de coordenadas de la máquina, utilizando un programa informático ejecutado por una computadora. En el caso de un torno, es necesario controlar los movimientos de la herramienta en dos ejes: el eje Z para los desplazamientos longitudinales y el eje X para los desplazamientos transversales de la torreta. En los centros de mecanizado, también se controlan los desplazamientos del eje Y. Dependiendo de la capacidad de la máquina, esto puede ampliarse a sistemas que operan en cinco ejes o más, incorporando servomotores en los mecanismos de desplazamiento del carro, la torreta (en el caso de los tornos) y la mesa de los centros de mecanizado.

El control del movimiento de los ejes de una máquina CNC se realiza a través de lazos de control que comprenden encoders, guías lineales y una unidad central. Cada eje está gestionado por un lazo de control, mientras que las maniobras no relacionadas con el movimiento de los ejes son controladas por un módulo PLC.

Además de su aplicación en las máquinas-herramienta para mecanizar metales con alta precisión, el CNC se utiliza en la fabricación de diversos productos, independientemente del material empleado. La incorporación de sistemas CNC en las máquinas-herramienta ha incrementado notablemente la producción, facilitando operaciones de conformado que eran difíciles de realizar con máquinas convencionales, como la creación de superficies esféricas con un elevado grado de precisión dimensional. Por último, el uso de CNC contribuye a la reducción de costos de producción, propiciando la disminución en los costos de fabricación de muchas máquinas, sin comprometer la calidad.

Existen varios tipos de máquinas CNC, cada una diseñada para llevar a cabo tareas específicas en la producción de piezas y componentes. Entre las más comunes en la industria se encuentran:

- Tornos CNC: Operan una pieza de trabajo en rotación mientras una herramienta de corte se mueve linealmente, siendo ideales para fabricar piezas cilíndricas como ejes, tuercas y tornillos.



Fuente: CNC Máster.

Figura 1-2: Torno CNC CK6147H.

- Máquinas de corte por láser CNC: Utilizan un láser de alta potencia para cortar o grabar materiales. Son especialmente efectivas en metales, madera, acrílicos y otros materiales, y se utilizan en la fabricación de piezas decorativas, trofeos y en la industria automotriz.



Fuente: CNC Máster.

Figura 1-3: Mesa de corte por fibra láser CNC.

- Centros de mecanizado CNC: Combinan diversas funciones de fresado, torneado y perforado en una sola máquina, siendo ideales para la producción de piezas complejas en menor tiempo.



Fuente: CNC Máster.

Figura 1-4: Centro de mecanizado CNC VMC 540.

1.5. SERVOMOTORES

Los servomotores son dispositivos eléctricos que permiten un control preciso del movimiento, la velocidad y la posición de los ejes en las máquinas CNC. Estos dispositivos suelen incluir un sistema de realimentación que monitorea la posición o velocidad del motor y ajusta su operación en consecuencia. Los sistemas de realimentación más comunes son los encoders integrados en los servomotores.

Existen varios tipos de servomotores, cada uno con características y aplicaciones específicas:

- Servomotores DC: Utilizan corriente continua y son generalmente más simples y económicos, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren menor potencia.
- Servomotores Paso a Paso: Dividen la rotación en pequeños pasos discretos, permitiendo un control preciso de la posición sin la necesidad de un sistema de realimentación complicado.
- Servomotores AC: Usan corriente alterna y son más comunes en aplicaciones industriales debido a su eficiencia y capacidad para manejar cargas más grandes.



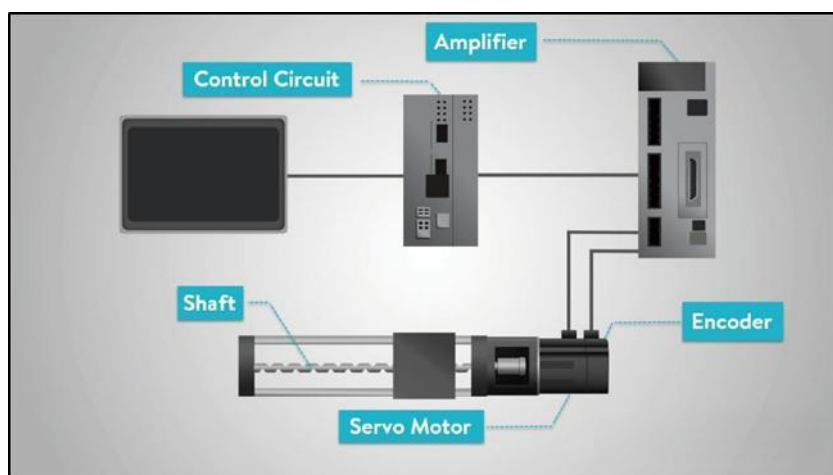
Fuente: FANUC América.

Figura 1-5: Servomotores.

Los servomotores son capaces de generar un alto torque a bajas velocidades, lo que les permite mover cargas pesadas de manera precisa y controlada. Además, la capacidad de ajustar la velocidad de giro proporciona un amplio rango de operación, adaptándose a las necesidades del usuario.

Los componentes principales de un circuito de servomotor son:

1. Motor: Es el componente principal que genera el movimiento.
2. Controlador: Procesa las señales de entrada y determina cómo debe operar el motor. Este controlador se comunica con el sistema de realimentación para ajustar el movimiento según sea necesario.
3. Sistema de Realimentación (encoder): Incluye dispositivos como encoders o potenciómetros, que proporcionan información continua sobre la posición del motor. Esta información es fundamental para que el controlador realice los ajustes necesarios en el funcionamiento del motor.
4. Fuente de Alimentación: Proporciona la energía necesaria para operar el motor.



Fuente: CNC Máster.

Figura 1-6: Circuito cerrado CNC.

1.6. CONCEPTO DE REACONDICIONAMIENTO

El concepto de reacondicionamiento se refiere al proceso de restaurar o mejorar un producto, equipo o componente para que funcione como nuevo, o al menos cumpla con un estándar de rendimiento significativamente mejorado. Este proceso puede incluir reparaciones, mantenimiento, reemplazo de partes y actualización de tecnología, con el objetivo de extender la vida útil del producto y optimizar su funcionamiento.

1.6.1. Proceso:

- Inspección: Evaluación del estado del producto para identificar las áreas que requieren atención.
- Reparación: Realización de los arreglos necesarios para corregir fallas o daños en el equipo.
- Reemplazo de componentes: Sustitución de piezas desgastadas o defectuosas por nuevas o reacondicionadas.
- Pruebas: Verificación del rendimiento del producto después de haber sido reacondicionado para asegurar que cumple con los estándares requeridos.
- Actualización: Incorporación de tecnología o características modernas para mejorar el rendimiento o la funcionalidad.

1.6.2. Beneficios:

- Costo-Efectividad: Permite a las empresas y consumidores obtener un producto en buen estado a un costo inferior al de uno nuevo.
- Sostenibilidad: Contribuye a la reducción de desechos al prolongar la vida útil de los productos y disminuir la demanda de nuevos recursos.
- Mejora del Rendimiento: A menudo, el reacondicionamiento puede resultar en mejoras significativas en el rendimiento y la eficiencia del producto.

1.6.3. Renovación o reparación:

Aunque estos términos pueden solaparse, el reacondicionamiento no se limita únicamente a la reparación; también abarca la modernización y mejora general del producto. Por otro lado, la renovación se enfoca más en mejorar el aspecto estético o funcional de un producto sin necesariamente implicar el reemplazo de partes internas.

1.6.4. Objetivos:

Los objetivos del reacondicionamiento incluyen restaurar la precisión para asegurar que la máquina funcione dentro de las tolerancias específicas requeridas para las aplicaciones de mecanizado. Además, se busca reducir los tiempos de inactividad al minimizar el tiempo que la máquina esté fuera de servicio debido a fallas o problemas de rendimiento. Por último, otro objetivo fundamental es aumentar la eficiencia, mejorando la velocidad y eficacia de las operaciones, lo que puede traducirse en un incremento de la productividad.

Con respecto al ámbito de las máquinas CNC es posible aplicar metodologías de análisis de costo de ciclo de vida a los procesos de reacondicionamiento con la finalidad de identificar los costos asociados a este proceso, la importancia de tener claridad sobre este indicador es crucial a la hora de tomar decisiones y obtener una mayor cantidad de beneficios, esto porque existen distintos tipos de repuestos para el reacondicionamiento, variando proveedores, calidad y precio, desde los de certificación original de la marca del equipo hasta alternativos que se adaptan de igual forma a las máquinas. La realización de una evaluación en los costos de ciclo de vida de estos componentes instalados es esencial al momento de decidir qué repuestos utilizar en el reacondicionamiento, la variación de precios de mercado y la confiabilidad de los productos son indicadores clave que pueden marcar una notable diferencia en la obtención de beneficios. Es por esto, que el proyecto se justifica de la aplicación del proceso de reacondicionamiento, específicamente tomando como referencia el caso de estudio de la máquina PUMA 15 ubicada en Más Conveyor, en donde se aplicaran metodologías de análisis de costo de ciclo de vida para determinar la opción de repuestos que genere el menor coste de ciclo de vida.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE ACCV DE WOODWARD
ADAPTADA AL PROCESO DE REACONDICIONAMIENTO DE
MÁQUINAS CNC.

2. METODOLOGÍA DE ACCV DE WOODWARD ADAPTADA AL PROCESO DE REACONDICIONAMIENTO DE MÁQUINAS CNC

2.1. ANTECEDENTES DE ANÁLISIS

El concepto de análisis de costo de ciclo de vida (ACCV) comenzó a aplicarse de manera estructurada en los años 70, desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos en el contexto de la aviación militar. Sin embargo, la mayoría de las metodologías creadas en esa época se centraban en los procesos de adquisición y logística, dejando de lado las fases de diseño y producción.

Una vez que se reconoce la necesidad de aplicar metodologías del análisis de costo de ciclo de vida en el diseño, la planificación y el control de los procesos de producción, la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos patrocinó una conferencia en 1984. En este evento, participaron las principales academias y organizaciones industriales, logrando identificar 34 áreas de investigación. Entre ellas, se destacaron especialmente las relacionadas con la evaluación económica en la fase de diseño, el análisis del ciclo de vida y el diseño asistido por ordenador.

Con la finalidad de mejorar el diseño de los activos y reducir cambios a lo largo del tiempo se desarrolló una técnica efectiva dentro del proceso de optimización de costes. Esta ingeniería de ciclo de vida considera la fase inicial del desarrollo de un activo, comenzando por la identificación de su necesidad y a través de esta se genera el diseño conceptual preliminar detallado, la utilización sobre operaciones y mantenimientos, el apoyo logístico y la desincorporación.

En los últimos años, los especialistas en el campo de la ingeniería de valor, el diseño y la organización de la producción han incluido técnicas que cuantifican el factor de fiabilidad y evalúan el impacto de los eventos de fallos sobre los costes totales del sistema de producción a lo largo del costo de ciclo de vida. Estas mejoras han logrado reducir la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones sobre áreas de diseño, desarrollo, sustitución y adquisición de activos de producción.

Es relevante aclarar que a lo largo de todo el proceso del análisis de costo de ciclo de vida se toman muchas decisiones técnicas y no técnicas, que deben ser adecuadas al tiempo de utilización del activo en estudio.

La mayoría de las acciones, sobre todo las correspondientes a la fase de diseño del sistema de producción, presentan un alto impacto sobre el proceso de ciclo de vida del activo, influyendo en gran medida en los costes totales de producción. Cabe destacar que las decisiones relacionadas con el proceso de mejora del factor de fiabilidad son de un interés particular sobre el análisis, ya que influyen en gran medida sobre los costes totales del ciclo de vida y las expectativas que prolongan la vida útil de los sistemas de producción, manteniéndolo bajo costes razonables.

Recientes investigaciones sobre la aplicación del análisis amplían las aristas de esta metodología, tanto en las consideraciones relativas como en los procesos de mantenimiento, además de la aplicación de esta técnica en nuevos campos de investigación. En este contexto diversos expertos del área han propuesto diferentes metodologías y definiciones. A continuación, se presentan algunas de estas:

Woodhouse define el análisis de costo de ciclo de vida (ACCV) como un enfoque que evalúa todos los costos asociados a un producto o sistema a lo largo de su vida útil. Esto incluye no solo los costos de adquisición, sino también los costos de operación, mantenimiento y disposición al final de su vida. El objetivo del ACCV es proporcionar una visión completa de los costos para ayudar en la toma de decisiones informadas, promover la sostenibilidad y optimizar el uso de recursos.

Este enfoque permite a las organizaciones identificar áreas donde se pueden reducir costos y mejorar la eficiencia, así como evaluar el impacto ambiental de diferentes opciones a lo largo de su ciclo de vida.

Kirt and Dell'Isola definen el análisis de costo de ciclo de vida (ACCV) como una metodología que busca identificar, evaluar y sumar todos los costos asociados a un producto o proyecto durante su vida útil. Esto incluye costos iniciales de diseño y adquisición, costos de operación y mantenimiento, así como costos de desecho o reciclaje al final de su vida útil.

Esta definición enfatiza la importancia de considerar todos los costos relevantes en lugar de solo los costos directos iniciales, lo que ayuda a las organizaciones a tomar decisiones más informadas sobre inversiones y a mejorar la sostenibilidad económica y ambiental de sus productos o servicios. También resalta la

necesidad de un enfoque integral que contemple todas las fases del ciclo de vida del producto.

En términos generales, la metodología de ACCV permite seleccionar el activo que genere el menor coste, ayudando a maximizar la obtención de beneficios económicos del proceso de producción.

2.2. ASPCTOS TEÓRICOS BÁSICOS DE LOS COSTES

Los costes totales de un activo, desde su conceptualización hasta su retirada, son asumidos por el usuario y tienen un impacto directo en su comercialización. Como compradores, se incurre en gastos para diseñar y comercializar el activo, y como usuarios, se pagan los recursos necesarios para su operación y desincorporación. Estos costes totales del ciclo de vida pueden descomponerse en diferentes categorías a través de una estructura de desglose de costes (CBS), que organiza los gastos según las actividades que originan el sistema productivo. La CBS representa los principales tipos de costes asociados a los procesos de diseño, producción, comercialización, uso y desincorporación, aunque el nivel de desglose y las categorías específicas dependen de factores como la naturaleza del activo, la información disponible, el proceso de diseño y fabricación, variables económicas, recursos humanos y tecnología existente.

Otro aspecto relevante es la variación en la importancia de los diferentes tipos de costes. Mientras que la organización se interesa por los costes totales del activo a desarrollar, al diseñador solo le conciernen los costes inherentes al diseño original. Algunos costes asociados a la vida del equipo son difíciles de visualizar en la fase de diseño, ya que dependen de cómo la organización desarrollará el producto. Por ello, la definición de los costes totales del ciclo de vida del activo debe clasificarse en dos categorías: los relacionados con el proceso global de desarrollo y aquellos asociados al proceso de diseño. A menudo, el diseñador no considera los costes de producción y construcción del activo, lo que puede perjudicar los esfuerzos por reducir costes en esta fase. Aunque para el diseñador estos costes pueden no ser relevantes en ese momento, la organización no debe ignorarlos, ya que más adelante deben ser tenidos en cuenta por quienes están a cargo de la producción y fabricación del activo.

El diagrama conceptual 2-1 ilustra la manera de clasificar las categorías de los costes del ciclo de vida.



Fuente: Elaboración propia.

Diagrama conceptual 2-1: Clasificación de costos.

2.2.1. Coste de investigación y desarrollo:

Los costes de investigación y desarrollo comprenden todos los gastos asociados con las fases iniciales de concepción, diseño y desarrollo de nuevos productos o sistemas. En esta etapa, se incluyen actividades cruciales como la conceptualización del proyecto, la ingeniería básica y el diseño detallado. Es esencial resaltar que los análisis de costes realizados durante estas etapas resultan ser significativamente más efectivos, ya que aproximadamente dos tercios de los costes totales del ciclo de vida de un activo quedan determinados en la fase conceptual y de diseño preliminar. Una vez que se finaliza el diseño, realizar modificaciones sustanciales en los aspectos económicos puede ser complicado y costoso.

Por tanto, es crucial aplicar consideraciones económicas desde el inicio para maximizar las oportunidades de una ingeniería económica eficiente. Los gastos en esta categoría incluyen las inversiones en tecnología, la creación de prototipos, la realización de pruebas de viabilidad y el análisis profundo, además de la compensación del personal involucrado en estas actividades. El objetivo primordial es desarrollar el producto o sistema de manera eficaz, maximizando su potencial de éxito en el mercado y minimizando el riesgo de fallos en las fases de diseño.

2.2.2. Coste de producción y construcción.

Los costes de producción y construcción abarcan todos los gastos incurridos en la fabricación, ensamblaje y pruebas de los productos, así como en las instalaciones de producción. Esta etapa incluye también los costos asociados con las operaciones en la línea de producción, el control de calidad y los gastos iniciales relacionados con el soporte logístico, como repuestos necesarios para el proceso de manufactura, equipos de prueba y herramientas de soporte de producción.

El objetivo primordial de esta fase es determinar los procesos más eficientes para llevar a cabo la producción del activo diseñado, garantizando que se maximice la calidad del producto y se minimicen los costes. Además, un control eficiente de los costos es fundamental para asegurar que el sistema se fabrique dentro del presupuesto estimado y cumpla con los estándares de calidad requeridos, permitiendo una respuesta rentable a la demanda del mercado. A través de una planificación y gestión efectiva, se busca optimizar todos los recursos involucrados en la producción, asegurando así el éxito del producto en el mercado.

2.2.3. Coste de operación y mantenimiento:

Los costes de operación y mantenimiento incluyen una amplia gama de gastos relacionados con el funcionamiento efectivo del sistema a lo largo de su vida útil. Estos gastos abarcan el consumo de energía, la adquisición de insumos y materias primas, así como el mantenimiento preventivo y correctivo, revisiones generales y modificaciones de ingeniería. También engloban costes logísticos asociados con la gestión de repuestos, formación del personal y cualquier otro gasto que pueda surgir durante la operación del activo.

Dentro de esta categoría, los costes de operación y soporte son los más significativos y, al mismo tiempo, los más difíciles de prever. Un aspecto crucial en esta etapa es la disponibilidad del activo, que debe mantenerse para cumplir con las expectativas de producción establecidas. La disponibilidad está directamente relacionada con la capacidad de mantener el activo en funcionamiento con el menor tiempo y costo posible, sin comprometer su confiabilidad y seguridad. En la mayoría de los procesos de producción, cada minuto de inactividad puede traducirse en pérdidas financieras considerables. En este contexto, el tiempo se convierte en un coste crítico, lo que implica que las actividades de mantenimiento deben llevarse a cabo de manera eficiente y rápida, con tiempos de reparación cortos, para cumplir con los niveles de disponibilidad requeridos por el usuario.

2.2.4. Coste de desincorporación y desmantelamiento:

Los costes de desincorporación y desmantelamiento se relacionan con las actividades necesarias para la finalización del ciclo de vida de un activo, abarcando la transformación de materiales y la gestión de recursos energéticos. Esta fase implica la generación de residuos, lo que plantea serias preocupaciones ambientales, como el consumo de energía, la contaminación del aire y la correcta gestión de desechos, temas que son cada vez más relevantes en la discusión pública global. Por lo tanto, es fundamental que los sistemas de producción del futuro desarrollen procesos y tecnologías de fabricación sostenibles.

Un análisis exhaustivo de los costes del ciclo de vida debe incluir todas las actividades necesarias para la retirada y el desmantelamiento de activos, que abarcan desde la limpieza de residuos hasta el control de emisiones al medio ambiente y la restauración ambiental en las áreas de producción. Además, es crucial incluir la gestión y almacenamiento de productos desechados, así como otras actividades relacionadas. Este enfoque no solo busca minimizar el impacto ambiental, sino también optimizar los recursos y aprovechar las oportunidades de reciclaje y recuperación de valor, asegurando un desmantelamiento responsable y sostenible.

2.3. APLICACIÓN DE TÉCNICAS ACCV

Los aspectos de costes y diseño son considerados y evaluados como procesos separados. En el caso del diseño, su objetivo principal es crear el mejor activo posible. Por otro lado, el enfoque en los costes busca minimizar los gastos de diseño y producción. Sin embargo, estos procesos comparten un objetivo común: desarrollar un activo que cumpla y satisfaga de manera eficiente las necesidades de los usuarios, al mismo tiempo que sea competitivo desde el punto de vista económico.

El uso de técnicas de Análisis de Coste del Ciclo de Vida (ACCV) ha aumentado notablemente, principalmente debido al desarrollo de diversas metodologías que proponen métodos de evaluación para distintos diseños o alternativas de acción. El objetivo de estas técnicas es seleccionar la forma más efectiva de utilizar los recursos humanos y económicos al desarrollar un sistema de producción.

Es fundamental resaltar que los resultados obtenidos en los análisis de coste de ciclo de vida alcanzan su máxima efectividad durante las fases de diseño conceptual y preliminar. Una vez completada la fase de diseño, resulta difícil realizar modificaciones sustanciales en los resultados económicos. Por lo tanto, las consideraciones económicas vinculadas al ciclo de vida deben abordarse de manera específica durante la fase de diseño del activo.

Cabe destacar que casi dos tercios del coste de ciclo de vida de un activo se determina en esta etapa inicial. El cálculo del ciclo de vida debe aplicarse en todas las fases del sistema: diseño, desarrollo, producción, construcción, uso operativo y apoyo logístico. Desde el inicio del ciclo de vida, es esencial poner énfasis en los aspectos de costes, y a medida que avanza el ciclo, los costes se convierten en un parámetro clave para evaluar configuraciones de diseños alternativos y seleccionar escenarios de solución.

Así, los datos de costes utilizados se elaboran en función de las características del diseño y la producción, y se emplean para desarrollar la estimación del coste de ciclo de vida. Estas estimaciones se comparan con los requisitos iniciales, lo que permite determinar el grado de cumplimiento y las necesidades de acciones correctivas.

La falta de precisión en el proceso de estimación de costes es un factor crítico que puede generar consecuencias financieras desastrosas durante el desarrollo de un proyecto. Esta falta de precisión puede presentarse en dos escenarios principales:

1. Estimación de costes por debajo de los costes reales: En este caso, los planes iniciales de contratación de mano de obra, ejecución de actividades clave y adquisición de materiales y equipos resultan inalcanzables. Aunque se deberán continuar con los planes de desarrollo, será necesario recurrir a procesos de replanificación y reorganización, lo que conducirá a un incremento en los costes para poder cumplir con las metas y objetivos del proyecto.
2. Estimación de costes por encima de los costes reales: En este escenario, se esperaría un incremento en los beneficios del proyecto. Sin embargo, esto frecuentemente no ocurre y el dinero disponible es gastado sin obtener los resultados esperados. Solo si la organización tiene un control estricto sobre los costes este dinero no será utilizado, cosa que en la práctica resulta poco probable.

La exactitud de las estimaciones de costes varía considerablemente según la fase del programa de diseño y producción, así como la complejidad del proyecto y las técnicas de análisis empleadas. En las etapas de desarrollo y diseño conceptual, los niveles de precisión de los datos suelen oscilar entre el 20% y el 50%. Esta baja precisión se debe a la disponibilidad limitada de datos y a que los análisis de costes dependen de modelos paramétricos.

En las fases intermedias de diseño, se tiene acceso a una mayor cantidad de información y se pueden emplear modelos análogos de costes para comparar los costes de activos similares. En esta etapa, el nivel de precisión de los datos se encuentra entre el 70% y el 85%.

Finalmente, en la fase de diseño a nivel de detalle, se cuenta con información completa sobre el activo, incluidas las especificaciones de producción, los procesos de fabricación y los requisitos de soporte y logística. En esta fase, es habitual utilizar modelos detallados de estimación de costes, y el nivel de precisión de los datos puede alcanzar entre el 85% y el 95%.

2.4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA CONFIABILIDAD EN LOS MODELOS ACCV

Woodhouse sostiene que, en el contexto industrial actual, es fundamental realizar una evaluación detallada y cuantitativa del impacto económico de la confiabilidad a lo largo del ciclo de vida de un activo industrial. Esta evaluación resulta clave para diseñar un sistema de producción que sea eficiente y competitivo. La cuantificación de la confiabilidad persigue dos objetivos principales: en primer lugar, anticipar las interrupciones en los procesos de producción debido a fallos imprevistos y la variabilidad en la frecuencia de dichos fallos; en segundo lugar, facilitar el análisis y la evaluación de los costos asociados a estos contratiempos en términos de seguridad, medio ambiente, operaciones y producción.

Así, la confiabilidad se define como la capacidad de un sistema de producción para mantener un funcionamiento seguro y eficiente durante todo su ciclo de vida. Un sistema es considerado "confiable" si puede desempeñar su función sin interrupciones significativas. Sin embargo, cuando la confiabilidad disminuye y el proceso de producción se ve afectado por un elevado número de fallos imprevistos, se generan costos considerables. Estos costos se dividen principalmente en dos categorías: la restauración de la funcionalidad del sistema (costes directos) y el impacto en el proceso de producción (costes de penalización).

Los costes totales por confiabilidad provocados por fallos imprevistos se pueden caracterizar de la siguiente forma:

1. Costes por penalización:

Down time (indisponibilidad de producción), pérdidas de oportunidades/producción diferida, pérdidas de producción, pérdidas operacionales, impacto en la calidad, impacto en seguridad y ambiente.

2. Costes directos por mantenimiento correctivo:

- Mano de obra: Costes directos relacionados con la mano de obra (propia o contratada) en caso de una acción no planificada.

- Materiales y repuestos: costes directos relacionados con los consumibles y los repuestos utilizados en caso de una acción no planificada.

El impacto en los costos generado por un activo de baja confiabilidad está directamente relacionado con el comportamiento de los siguientes dos índices:

- El tiempo promedio entre fallos (MTBF):

$$MTBF = \frac{\textit{tiempos operacionales}}{\textit{número de fallos}}$$

Ecuación 2-1: Tiempo medio entre fallos.

Sistema con MTBF pequeño, reflejan valores de confiabilidad bajos y un alto número de fallos.

- Tiempo promedio para reparar (MTTR):

$$MTTR = \frac{\textit{tiempos de reparación}}{\textit{número de fallos}}$$

Ecuación 2-2: Tiempo medio de reparación.

Sistemas con MTTR largos, reflejan valores de mantenibilidad bajos, estos son sistemas que necesitan gran cantidad de tiempo para poder recuperar su función.

Según Woodhouse, un factor importante en el aumento de costos a lo largo del ciclo de vida de un activo es la falta de previsión ante la aparición inesperada de fallos. Este escenario ocurre, en muchas ocasiones, debido al desconocimiento y a la insuficiencia de análisis en la fase de diseño relacionados con el factor de confiabilidad. Como resultado, se genera un incremento en los costos operativos (costos que no fueron considerados inicialmente), lo que afecta la rentabilidad del proceso de producción. En la siguiente sección, se detalla un modelo que permitirá evaluar el impacto económico de la confiabilidad a lo largo del ciclo de vida de un activo industrial.

2.5. MODELO DE ACCV DE WOODWARD

El modelo de Woodward (1997) se emplea para cuantificar costos por fallos en el ACCV, asumiendo una tasa de fallos constante durante la vida útil del equipo. Esta simplificación es útil cuando los datos históricos son limitados —como en el caso de Más Conveyor—, aunque requiere ajustes para capturar variaciones en la confiabilidad. La ecuación fundamental del modelo (Ecuación 2-3) integra costos iniciales (CI), operacionales (CO), de mantenimiento (CMP) y por fallos (TCPf), descontados a valor presente.

Al aplicar el Modelo de Woodward en el ACCV, se busca cuantificar las consecuencias de los fallos y su impacto en los costos totales de producción. Esto implica analizar los costos asociados a la baja confiabilidad, incluyendo los gastos de mantenimiento preventivo y correctivo, la frecuencia de los fallos y otros factores relacionados con la confiabilidad del activo.

2.5.1. características del modelo de Woodward:

- Suposición de tasa de fallos constante

El modelo se basa en la suposición de que la tasa de fallos de un activo es constante durante su vida útil. Esto significa que el activo tiene una probabilidad constante de fallar en cualquier momento, independientemente del tiempo transcurrido desde su puesta en funcionamiento.

- Ventajas del modelo

El modelo de Tasa de Fallos Constante es relativamente simple y fácil de aplicar. Resulta especialmente útil en situaciones donde no se dispone de datos detallados sobre la confiabilidad del activo y se busca una estimación rápida de los costos asociados a los fallos.

- Limitaciones del modelo

Sin embargo, la suposición de una tasa de fallos constante puede no reflejar la realidad de todos los activos. La confiabilidad puede variar a lo largo del tiempo debido

a factores como el envejecimiento, el desgaste y las condiciones de operación. Además, este modelo no considera las tasas de fallos iniciales más altas o bajas que pueden presentarse al principio o al final de la vida útil del activo.

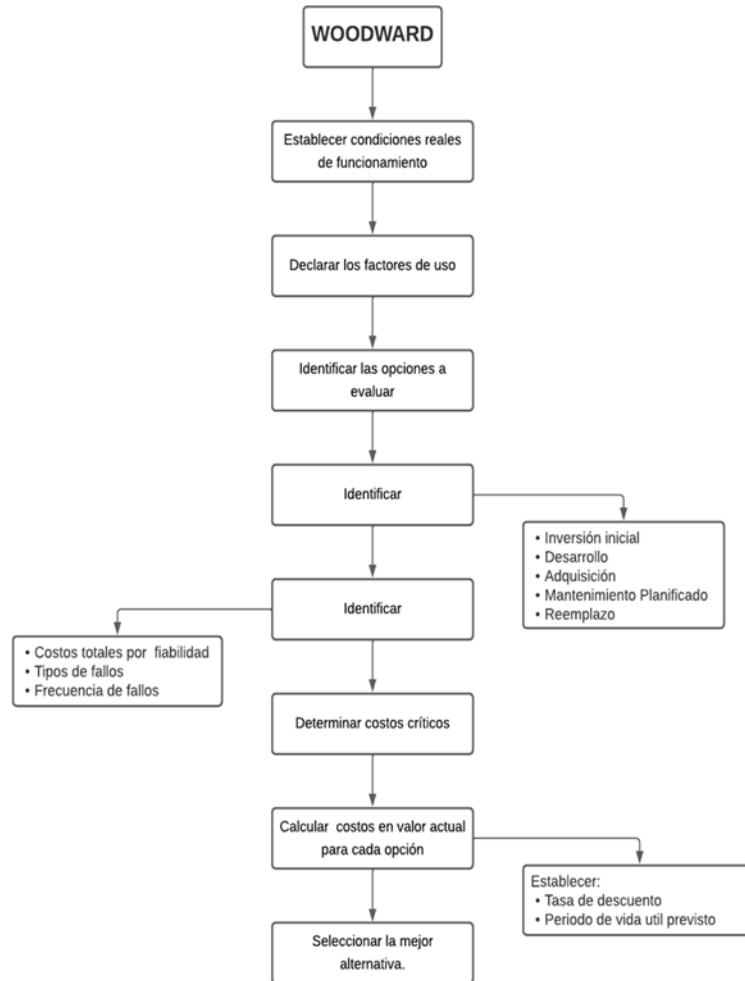
- Alternativas al modelo de Tasa de Fallos Constante

Existen otros modelos más avanzados que tienen en cuenta las variaciones en la tasa de fallos a lo largo del tiempo, como el modelo de Tasa de Fallos Weibull y el modelo de Tasa de Fallos Proporcional al Tiempo (PTFR). Estos modelos son más flexibles y se adaptan mejor a las características de confiabilidad de los activos en diferentes etapas de su ciclo de vida.

En resumen, el Modelo de Woodward es una herramienta valiosa en el Análisis de Coste de Ciclo de Vida (ACCV) para evaluar los eventos de fallos y su impacto en los costos totales de producción. Su enfoque en la suposición de una tasa de fallos constante permite un análisis inicial, aunque es importante considerar sus limitaciones y explorar modelos alternativos para una evaluación más completa.

2.5.2. Procedimiento de implementación del modelo de Woodward:

El modelo de ACCV de Woodward establece un método secuencial para calcular el impacto de los costes por fallas durante el ciclo de vida de un activo industrial. A continuación, se presenta este método en forma gráfica y se detalla el procedimiento que se debe aplicar.



Fuente: Elaboración propia.

Diagrama conceptual 2-2: Procedimiento Woodward.

El modelo de Woodward establece la siguiente expresión para calcular los diferentes costes que genera un activo industrial a lo largo del ciclo de vida.

Donde:

$$CTCV(P) = \sum_{T=1}^T CI + CO + CMP + TCP_f + CMM - VR$$

Ecuación 2-3: Tiempo medio de reparación.

- (P) = Valor presente.
- $CTCV(P)$ = Costes totales del ciclo de vida en valor presente (P) , para una tasa de descuento (i) y un periodo de vida útil esperado (T) .

- CI = Coste inicial de adquisición e instalación, normalmente dado en valor presente.
- CO = Costes operacionales, normalmente dado como valor anualizado.
- CMP = Costes de mantenimiento preventivo, normalmente dado como valor anualizado.
- $TCPf$ = Costes totales por confiabilidad (costes por fallos), normalmente dado como valor anualizado. En este caso se asume una tasa de fallos constante, por lo cual el impacto en costes es igual en todos los años.
- CMM = Costes de mantenimiento mayor – especiales, normalmente dado como valor futuro.
- VR = valor de reposición.

El Modelo de Woodward presenta la ecuación 2.3, que evalúa el impacto de los fallos más significativos en la estructura de costos de un sistema de producción. Esta evaluación es especialmente relevante en el análisis de costo de ciclo de vida del reacondicionamiento de maquinaria CNC. Por lo tanto, es importante adaptar este modelo a este contexto y explicar en detalle el proceso de aplicación de la ecuación mencionada.

El primer paso para calcular los $CTCV$, es determinar los costos iniciales (CI), donde se consideran el costo de adquisición e instalación de los componentes necesarios en el reacondicionamiento (servomotores, control CNC, variador de frecuencia, etc.) además de considerar los costos de investigación, mano de obra del reacondicionamiento y los otros costos administrativos, materiales eléctricos, licitaciones, y notas de garantías.

Segundo paso, es establecer los costos operacionales (CO), donde se establecen las cantidades y costos de los lubricantes, refrigerantes, licencia de software y consumo eléctrico, para el caso de este último se debe medir el consumo del equipo en sus fases de operación; para una mayor simplificación del cálculo, lo ideal es establecer el consumo eléctrico en kWh y luego llevarlo a un costo anual, de la misma

forma se debe establecer el costo de los lubricantes y del refrigerante (para ambos casos sería $\frac{mL}{min}$), en un valor de operación, además de adicionar el costo del operador.

En el tercer paso del cálculo principal de los costos totales, se determinan los costos de mantenimiento preventivo (*CPM*). La mayoría de los fabricantes de máquinas CNC proporcionan un plan de mantenimiento que detalla los repuestos, las actividades requeridas y los períodos en los que debe realizarse cada actividad de mantenimiento. A partir de esta información, se selecciona un plan de mantenimiento en función del tiempo de operación del equipo reacondicionado, que en el ámbito industrial se mide en horas.

Una vez seleccionado el plan, se calculan todos los costos asociados a los mantenimientos del equipo, incluidos los costos de mano de obra, repuestos e insumos. Finalmente, el costo de mantenimiento preventivo se expresa en valor anual.

En el cuarto paso, se deben determinar los costos totales por confiabilidad (*TCPf*). Para esta determinación, se desarrollará una secuencia de pasos y cálculos que se explicarán en detalle más adelante.

El costo de mantenimiento mayor (*CMM*) es el quinto paso por desarrollar. Para determinar estos costos, se utilizarán las indicaciones del fabricante del equipo, que especifica los componentes a reemplazar, limpiar o inspeccionar. A partir de esta información, se calculan los costos de los repuestos, insumos y el valor de la mano de obra. El costo total obtenido debe expresarse en valor futuro.

En el ámbito de las máquinas CNC industriales que han llegado al final de su vida útil, generalmente se venden en el estado en que dejaron de operar. La mayoría de estas ventas se realizan a empresas dedicadas a la gestión de residuos metálicos, aunque, en casos excepcionales, otras empresas de manufactura también las compran para repararlas y volver a ponerlas en funcionamiento.

En el cálculo de los costos totales del ciclo de vida, la venta de estas máquinas al finalizar su vida útil se denomina valor de reposición (*VR*).

En relación con la cuantificación de los costos por Confiabilidad (*TCPf*), el modelo de Woodward propone evaluar el impacto de los principales fallos sobre la estructura de costos de un sistema de producción mediante un proceso sencillo, que se resume a continuación:

- a) Identificación de fallos: Se determinan los tipos de fallos más importantes.
- b) Frecuencia de ocurrencia: Se asigna a cada tipo de fallo un valor constante de frecuencia de ocurrencia por año (este valor no cambiará a lo largo de la vida útil esperada).
- c) Estimación del impacto en costos: Se estima el impacto en costos por año, generado por los fallos en la producción, las operaciones, el ambiente y la seguridad.
- d) Cálculo del valor presente: Se estima, a una tasa de descuento específica, el impacto total en costos de los fallos para los años de vida útil esperada.

A continuación, se detallan los pasos a seguir para estimar los costos por fallos según el modelo de Woodward:

1. Definir los tipos de fallos (f). Dónde $f = 1 \dots F$ para F tipos de fallos.
2. Definir la frecuencia de fallos esperada por año δ_f . Se expresa en fallos por año. Esta frecuencia se asume como un valor constante por año para el ciclo de vida útil esperado y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\delta_f = \frac{N}{T} = \frac{\text{fallos}}{\text{año}}$$

Ecuación 2-4: Frecuencia de fallos.

Donde:

N: Número total de fallos.

T: Número total esperado de años de vida útil.

3. Calcular los costes asociados a cada tipo de fallo C_f [$\frac{\$}{\text{fallo}}$]. Estos costes incluyen: costos de repuestos, mano de obra, penalización por pérdida de producción e impacto operacional.

$$C_f = \sum_{f=1}^F MTTR_f \times Cpe_f \left[\frac{\$}{fallo} \right]$$

Ecuación 2-5: Costos por fallos.

Donde:

MTTR: Tiempo medio para reparar cada fallo $\left[\frac{\$}{fallo} \right]$.

Cpe : costes de penalización por hora (producción, mano de obra, repuestos) $\left[\frac{\$}{hora} \right]$.

4. Calcular los costes por fallos por año $TCP_f \left[\frac{\$}{año} \right]$, que se calculan a partir de la siguiente expresión:

$$TCP_f = \sum_{f=1}^F C_f \times \delta_f \left[\frac{\$}{fallo} \right]$$

Ecuación 2-6: Costos totales por fallos.

Donde:

C_f : Costos por fallo.

δ_f : Frecuencia de fallos.

5. Calcular los costes totales por fallo en el valor presente $PTCP_f [\$]$. Dado un valor anualizado TCP_f , se estima su valor monetario en función del número de años de vida útil esperada (T), para una tasa de descuento (i). La expresión por utilizar para estimar los $PTCP_f$ en valor presente es:

$$PTCP_f = TCP_f \times \frac{(1 - i)^T - 1}{i \times (1 - i)^T}$$

Ecuación 2-7: Costos totales por fallos en valor presente.

Dónde:

TCP_f : Costes totales por fallos por año.

i: Tasa de descuento.

T: Número total esperado de año de vida útil.

Posteriormente, a los costos calculados por Confiabilidad se agregarían el resto de los costos evaluados (inversión, mantenimiento planificado, operaciones, etc.). Se calcularía el costo total en valor presente para la tasa de interés seleccionada y los años de vida útil esperada. Finalmente, se comparará el resultado obtenido con los costos totales de las otras opciones evaluadas.

**CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DEL ACCV AL
REACONDICIONAMIENTO DEL TORNO CNC PUMA 15 – DAEWOO.**

3. APLICACIÓN DEL ACCV AL REACONDICIONAMIENTO DEL TORNO CNC PUMA 15 – DAEWOO

3.1. TORNO CNC PUMA 15 - DAEWOO

En la compañía Más Conveyor se realiza el reacondicionamiento de sus máquinas CNC, un proceso que implica la sustitución completa del sistema de control numérico interno. Dentro de este proceso, los componentes más críticos son los servomotores y controladores. Para este proyecto específico, se utilizó el torno CNC Puma 15 de Daewoo. Se analizó a fondo el proceso de reacondicionamiento considerando dos marcas como opciones viables: FANUC (original) y SZGH (alternativa).

Ambos conjuntos de componentes requieren alimentación eléctrica a través de un circuito cerrado del CNC. A pesar de que cumplen funciones similares, existen notables diferencias en calidad, durabilidad, precisión y, especialmente, en precio.

A continuación, se presentan las características principales y las diferencias fundamentales entre ambos conjuntos de reacondicionamiento. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis del costo del ciclo de vida de los componentes utilizando la metodología desarrollada por Woodward.

- Las compañías SZGH y FANUC se dedican a la fabricación de los mismos componentes para CNC, pero esta última tiene a su merced más de 40 años consolidada en el mercado siendo esta una de las más conocidas en el área, lo que genera una incertidumbre en cuanto a calidad sobre los componentes SZGH, ya que cuenta con solo 15 años en el mercado.

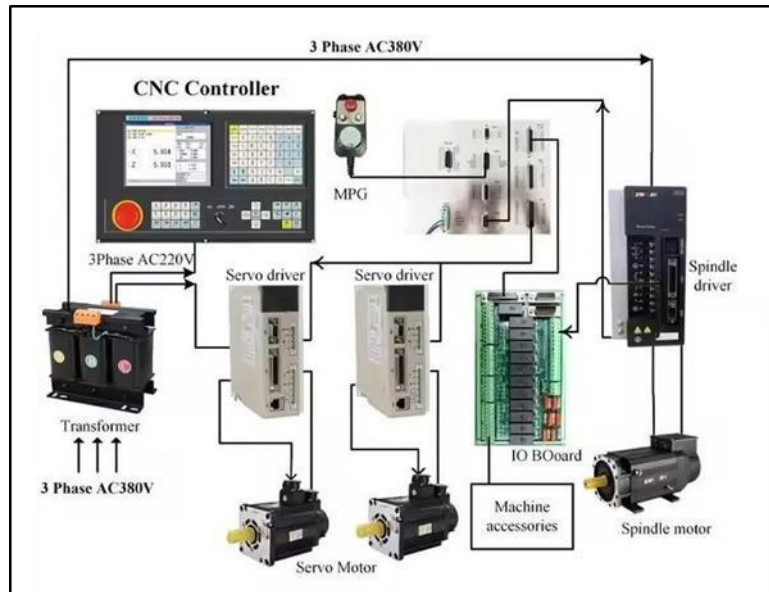
- FANUC es una marca tope de gama en CNC, destacada por la alta calidad y fiabilidad de sus componentes. Su tecnología ofrece precisión, rapidez y fácil integración, siendo ideal para entornos industriales exigentes. Además, cuenta con soporte técnico global que asegura continuidad operativa.

- La configuración de los drivers FANUC es compleja, pero a la vez versátil ofreciendo una mayor posibilidad de personalización para el usuario, pero es necesario un mayor conocimiento técnico sobre él la programación de esta, en cambio

los drivers SZGH son simples de configurar no necesitando conocimientos avanzados, pero estos son de lazo cerrado es decir la mayoría de los cambios son configuraciones ya predispuestas por el fabricante.

- Los repuestos de SZGH son $\frac{1}{3}$ más económicos que su contraparte FANUC.
- Una cualidad que comparten ambas marcas es la sencillez al momento de operación.
- Aunque ambas marcas permiten la incorporación de accesorios externos como brazos robóticos, la marca FANUC simplifica el proceso y permite la utilización de accesorios de distintos tipos y marcas, no así SZGH que solo permite los especificados por el modelo del control y exclusivos de su compañía.
- La precisión es un factor para considerar al momento del reacondicionamiento ya que se es necesario mecanizar con una alta precisión, el reacondicionamiento con FANUC es indiscutible.
- El reacondicionamiento con ambas marcas varía significativamente su valor esto por el reconocimiento y calidad que entrega cada una de las marcas, siendo el reacondicionamiento con FANUC un 75% más caro que SZGH.

A continuación, se presenta una imagen del conjunto del reacondicionamiento, donde se pueden observar los principales componentes del circuito cerrado del CNC, los cuales están instalados en el interior de la estructura del torno Puma 15.



Fuente: CNC Máster.

Figura 3-1: Circuito cerrado del CNC.

- ❖ Transformador trifásico reductor de 380v a 220v.
- ❖ Control CNC.
- ❖ Servo driver.
- ❖ Servo motor.
- ❖ MPG.
- ❖ Placa IO
- ❖ Driver del husillo.
- ❖ Motor de husillo
- ❖ Accesorios de la máquina.
 - Mordazas.
 - Portaherramientas.
 - Refrigerantes y sistemas de lubricación.
 - Sensores y finales de carrera.
 - Extractores de viruta.
 - Etc.

El conjunto de estos componentes y sistemas permite el funcionamiento del Torno CNC Puma 15. La mayoría de estos elementos incluye piezas mecánicas, electromecánicas y eléctricas/electrónicas, las cuales están sujetas a fallas debido al desgaste al que están expuestas.

3.2. CI – COSTO INICIAL DE ADQUISICIÓN E INSTALACIÓN

3.2.1. Costes de desarrollo

En el costo de investigación y diseño se incluyen todos los gastos necesarios para llevar a cabo la investigación del reacondicionamiento. Esto abarca la logística de transporte, el presupuesto de los materiales requeridos y la planificación del proceso de reacondicionamiento. También se consideran los costos relacionados con los trabajos de licitación y la subcontratación a terceros. El costo de investigación y diseño para el reacondicionamiento del Torno Puma 15 es de 250 USD.

3.2.2. Costes de adquisición

Los costos de adquisición incluyen tanto la compra de los componentes y materiales como el costo de su traslado e instalación, ya sea desde China o Estados Unidos (dependiendo del caso), a Santiago de Chile por vía marítima. Estos costos varían entre las dos versiones de motor, y a continuación se presentan los valores correspondientes.

Coste de adquisición:

- Componentes SZGH: \$5.176 USD
- Componentes FANUC: \$12.940 USD

Con respecto a los materiales utilizados en el reacondicionamiento se consideran elementos como: automáticos, contactores, relés, cables eléctricos, entre otros insumos.

Coste de materiales:

- En ambos casos el valor de los materiales es el mismo: \$989 USD

Coste del traslado:

- En ambos casos el valor del traslado es el mismo: \$1.983 USD

Costo de mano de obra del reacondicionamiento:

- SZGH: \$6.500 USD
- FANUC: \$11.375 USD

CI - 1 SZGH: \$250 USD + \$5.176 USD + \$1.983 USD + \$989 USD + \$6.500 USD = \$14.898 USD

CI - 2 FANUC: \$250 USD + \$12.940 USD + \$1.983 USD + \$989 USD + \$11.375 USD = \$27.537 USD

3.3. CO – COSTOS OPERACIONALES

El consumo eléctrico de la máquina en operación normal, detenida, con plena carga y a carga máxima es de 10 kW por hora. El torno opera 10 horas al día, 5 días a la semana, y el costo promedio de la electricidad es de 0,22 USD por kW-hora, dato entregado por la compañía de electricidad Enel.

- Costo eléctrico de la maquina por día: \$22 USD
- Costo por año: \$5.720 USD

La capacidad total de lubricante de la máquina es de 2,5 litros. Se utiliza aceite ISO VG 68, que tiene un costo de \$4,5 USD por litro. Según el manual, se realizan 40 recargas de aceite al año, además de 15 recargas adicionales por sobreconsumo debido a posibles fugas. Cada recarga es realizada manualmente por el operario.

- Costo por un cambio de aceite: \$11,25 USD
- Costo por año (40 cambios de aceite): \$450 USD
- Costo por año (15 cambios adicionales de aceite): \$168,75 USD El costo total anual del lubricante es de: \$618,75 USD

Con relación al líquido refrigerante del torno, su capacidad aproximada es de 120 litros. El refrigerante se cambia dos veces al año y se utiliza Mobilcut 100, que viene en envases de 20 litros. Este producto se disuelve al 10%, lo que permite obtener un total de 200 litros de refrigerante a un costo de \$0,98 USD por litro.

El costo anual por refrigerante es de: \$235,20 USD

A continuación, se muestran los costos de los operadores en un año:

- Costos operadores anual: \$8.286 USD

Costes operacionales anual para ambas opciones de reacondicionamiento es de:

$$\text{CO} = \$5.720 \text{ USD} + \$618,75 \text{ USD} + \$235,20 \text{ USD} + \$8.286 \text{ USD} = \$14.859,95 \text{ USD}$$

3.4. CMP – COSTES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

MTU establece el mantenimiento preventivo del torno según las horas de operación, que para el área de manufactura es de 1,024 horas, aproximadamente cada 6 meses. Este plan incluye detalles sobre las inspecciones y el mantenimiento del equipo, así como los cambios de componentes necesarios.

La compañía Más Conveyor externaliza sus mantenimientos mediante la contratación de “Aplica CNC”, que proporciona un informe detallado de las labores realizadas. Además, el costo del mantenimiento varía según el tipo de máquina, la marca y la complejidad de las reparaciones correctivas que se deban llevar a cabo ofreciendo valores de 790 USD por mantenimiento a maquinaria con componentes FANUC y 526,5 USD por mantenimiento a maquinaria con componentes SZGH.

CMP ANUALIZADO - FANUC = \$1.580 USD

CMP ANUALIZADO - SZGH = \$1.053 USD

3.5. CMM – COSTES DE MANTENIMIENTO MAYOR

En este caso de estudio no se han considerado los costos asociados al mantenimiento mayor. Si bien el reacondicionamiento podría ser clasificado dentro de esta categoría, en el presente análisis se ha definido de manera distinta. Al momento de llevarse a cabo un reacondicionamiento, se requiere seleccionar nuevamente la alternativa a utilizar, lo cual implica reiniciar el proceso de evaluación desde su fase inicial. Por lo tanto, el costo asociado al reacondicionamiento se ha clasificado como un costo inicial, ya que representa una nueva inversión en el ciclo de vida del activo.

3.6. TCPf – COSTES POR FIABILIDAD

3.6.1. Frecuencia de fallos

Se determinó la frecuencia de cada tipo de fallo para las opciones de reacondicionamiento evaluadas, considerando estas frecuencias como constantes a lo largo de un año. Para establecer los tipos de fallos, se recopiló información real sobre la vida útil operativa de motores en la faena de Más Conveyor, así como datos de otros tornos reacondicionados con FANUC que habían alcanzado las horas de funcionamiento estimadas por el fabricante. Para ambas opciones de reacondicionamiento, se estableció una vida útil de 12 años, equivalente a 105,192 horas. A continuación, se presentan tablas que muestran los resultados de la frecuencia de fallos, desglosando cada tipo de fallo para cada opción de reacondicionamiento, utilizando la ecuación 2.4.

Adicionalmente, se incorporará una tabla complementaria correspondiente a la opción de reacondicionamiento con componentes SZGH, modelada bajo un escenario pesimista. En este caso, se considera un aumento del 50 % en la cantidad de eventos de falla, con el fin de evaluar la sensibilidad del modelo frente a un posible deterioro en la confiabilidad de esta alternativa. Esta decisión se adoptó debido a que los datos utilizados en las tablas de SZGH provienen directamente del fabricante, por lo que no constituyen una base de datos plenamente confiable. En base a experiencia profesional, se estimó necesario incrementar la frecuencia de fallos para obtener proyecciones más cercanas a condiciones reales de operación.

Reacondicionamiento con FANUC		
Componente	Tipo de falla	N° de eventos por año
Guías lineales	Desgaste residual, desalineamiento	3
Husillo principal	Vibraciones, sobre calentamiento, ruidos anormales	2
Husillo de bolas (ejes X/Z)	Holguras, falta de precisión en el movimiento	4
Servomotores (X/Z)	sobrecalentamiento, pérdida de pasos	3
Sistema de lubricación	Obstrucción en líneas o insuficiente lubricación	5
Fuente de alimentación	Sobrecarga o fallos intermitentes	2
Panel de control CNC	Errores de software, pantalla congelada	4
Encoders	Lecturas imprecisas, pérdida de señal	6
Sensores (finales de carrera o inductivos)	Perdida de lectura del sensor, falsa lectura (sensor en mala posición)	6
Torreta portaherramientas	Bloqueo en el cambio de herramienta, falta de precisión	3
Sistema hidráulico	Fugas, caída de presión	4
Bomba de refrigerante	Obstrucción o insuficiente flujo	5
Sistema eléctrico (conexiones)	Cortocircuitos, conexiones sueltas	3
Sistema neumático	Fugas de aire, válvulas defectuosas	2
Carcasa y protecciones	Mal ajuste, vibraciones	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-1: Frecuencia de fallos – Reacondicionamiento con FANUC.

Reacondicionamiento con SZGH		
Componente	Tipo de falla	N° de eventos por año
Guías lineales	Desgaste residual, desalineamiento	3
Husillo principal	Vibraciones, sobre calentamiento, ruidos anormales	5
Husillo de bolas (ejes X/Z)	Holguras, falta de precisión en el movimiento	5
Servomotores (X/Z)	sobrecalentamiento, pérdida de pasos	4
Sistema de lubricación	Obstrucción en líneas o insuficiente lubricación	5
Fuente de alimentación	Sobrecarga o fallos intermitentes	4
Panel de control CNC	Errores de software, pantalla congelada	5
Encoders	Lecturas imprecisas, pérdida de señal	6
Sensores (finales de carrera o inductivos)	Perdida de lectura del sensor, falsa lectura (sensor en mala posición)	7
Torreta portaherramientas	Bloqueo en el cambio de herramienta, falta de precisión	5
Sistema hidráulico	Fugas, caída de presión	4
Bomba de refrigerante	Obstrucción o insuficiente flujo	5
Sistema eléctrico (conexiones)	Cortocircuitos, conexiones sueltas	5
Sistema neumático	Fugas de aire, válvulas defectuosas	2
Carcasa y protecciones	Mal ajuste, vibraciones	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-2: Frecuencia de fallos – Reacondicionamiento con SZGH.

Reacondicionamiento con SZGH (Pesimista)		
Componente	Tipo de falla	N° de eventos por año
Guías lineales	Desgaste residual, desalineamiento	4,5
Husillo principal	Vibraciones, sobre calentamiento, ruidos anormales	7,5
Husillo de bolas (ejes X/Z)	Holguras, falta de precisión en el movimiento	7,5
Servomotores (X/Z)	sobrecalentamiento, pérdida de pasos	6
Sistema de lubricación	Obstrucción en líneas o insuficiente lubricación	7,5
Fuente de alimentación	Sobrecarga o fallos intermitentes	6
Panel de control CNC	Errores de software, pantalla congelada	7,5
Encoders	Lecturas imprecisas, pérdida de señal	9
Sensores (finales de carrera o inductivos)	Perdida de lectura del sensor, falsa lectura (sensor en mala posición)	10,5
Torreta portaherramientas	Bloqueo en el cambio de herramienta, falta de precisión	7,5
Sistema hidráulico	Fugas, caída de presión	6
Bomba de refrigerante	Obstrucción o insuficiente flujo	7,5
Sistema eléctrico (conexiones)	Cortocircuitos, conexiones sueltas	7,5
Sistema neumático	Fugas de aire, válvulas defectuosas	3
Carcasa y protecciones	Mal ajuste, vibraciones	3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-3: Frecuencia de fallos – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.

3.6.2. Costos asociados a cada tipo de fallo

Una vez identificados los tipos de fallos y sus respectivas frecuencias, se estimaron los costos asociados a cada uno, basándose en la información proporcionada por mecánicos y personal administrativo. Estos costos se detallan en las tablas siguientes para cada opción estudiada.

Para la compañía Más Conveyor, el costo por, no producción es de \$80 por pieza. Dado que el Torno Puma 15 genera 5 piezas por hora, el costo total por hora de inactividad asciende a \$400. Para el cálculo de los costos asociados a cada tipo de fallo, se utilizó la ecuación 2.5.

Reacondicionamiento con FANUC					
Componente	MTTR	Costo mano de obra [USD]	Costos repuestos [USD]	Costo por no producción [USD x HORA]	Costo por fallos [USD]
Guías lineales	6	\$ 450	\$ 1.200	\$ 2.400	\$ 4.050
Husillo principal	10	\$ 750	\$ 3.500	\$ 4.000	\$ 8.250
Husillo de bolas (ejes X/Z)	8	\$ 600	\$ 800	\$ 3.200	\$ 4.600
Servomotores (X/Z)	4	\$ 300	\$ 3.000	\$ 1.600	\$ 4.900
Sistema de lubricación	2	\$ 150	\$ 300	\$ 800	\$ 1.250
Fuente de alimentación	3	\$ 225	\$ 500	\$ 1.200	\$ 1.925
Panel de control CNC	5	\$ 375	\$ 1.350	\$ 2.000	\$ 3.725
Encoders	3	\$ 225	\$ 700	\$ 1.200	\$ 2.125
Sensores (finales de carrera o inductivos)	3	\$ 225	\$ 100	\$ 1.200	\$ 1.525
Torreta portaherramientas	6	\$ 450	\$ 500	\$ 2.400	\$ 3.350
Sistema hidráulico	5	\$ 375	\$ 300	\$ 2.000	\$ 2.675
Bomba de refrigerante	3	\$ 225	\$ 500	\$ 1.200	\$ 1.925
Sistema eléctrico (conexiones)	4	\$ 300	\$ 200	\$ 1.600	\$ 2.100
Sistema neumático	3	\$ 225	\$ 300	\$ 1.200	\$ 1.725
Carcasa y protecciones	2	\$ 150	\$ 100	\$ 800	\$ 1.050

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-4: Costos por fallos – Reacondicionamiento con FANUC.

Reacondicionamiento con SZGH					
Componente	MTTR	Costo mano de obra [USD]	Costos repuestos [USD]	Costo por no producción [USD x HORA]	Costo por fallos [USD]
Guías lineales	6	\$ 300	\$ 1.200	\$ 2.400	\$ 3.900
Husillo principal	10	\$ 500	\$ 3.500	\$ 4.000	\$ 8.000
Husillo de bolas (ejes X/Z)	8	\$ 400	\$ 800	\$ 3.200	\$ 4.400
Servomotores (X/Z)	6	\$ 200	\$ 1.000	\$ 2.400	\$ 3.600
Sistema de lubricación	2	\$ 100	\$ 300	\$ 800	\$ 1.200
Fuente de alimentación	3	\$ 150	\$ 500	\$ 1.200	\$ 1.850
Panel de control CNC	5	\$ 250	\$ 450	\$ 2.000	\$ 2.700
Encoders	4	\$ 150	\$ 233	\$ 1.600	\$ 1.983
Sensores (finales de carrera o inductivos)	3	\$ 150	\$ 100	\$ 1.200	\$ 1.450
Torreta portaherramientas	8	\$ 300	\$ 167	\$ 3.200	\$ 3.667
Sistema hidráulico	5	\$ 250	\$ 300	\$ 2.000	\$ 2.550
Bomba de refrigerante	3	\$ 150	\$ 500	\$ 1.200	\$ 1.850
Sistema eléctrico (conexiones)	6	\$ 200	\$ 200	\$ 2.400	\$ 2.800
Sistema neumático	3	\$ 150	\$ 300	\$ 1.200	\$ 1.650
Carcasa y protecciones	2	\$ 100	\$ 100	\$ 800	\$ 1.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-5: Costos por fallos – Reacondicionamiento con SZGH.

Reacondicionamiento con SZGH (Pesimista)					
Componente	MTTR	Costo mano de obra [USD]	Costos repuestos [USD]	Costo por no producción [USD x HORA]	Costo por fallos [USD]
Guías lineales	6	\$ 300	\$ 1.200	\$ 2.400	\$ 3.900
Husillo principal	10	\$ 500	\$ 3.500	\$ 4.000	\$ 8.000
Husillo de bolas (ejes X/Z)	8	\$ 400	\$ 800	\$ 3.200	\$ 4.400
Servomotores (X/Z)	6	\$ 200	\$ 1.000	\$ 2.400	\$ 3.600
Sistema de lubricación	2	\$ 100	\$ 300	\$ 800	\$ 1.200
Fuente de alimentación	3	\$ 150	\$ 500	\$ 1.200	\$ 1.850
Panel de control CNC	5	\$ 250	\$ 450	\$ 2.000	\$ 2.700
Encoders	4	\$ 150	\$ 233	\$ 1.600	\$ 1.983
Sensores (finales de carrera o inductivos)	3	\$ 150	\$ 100	\$ 1.200	\$ 1.450
Torreta portaherramientas	8	\$ 300	\$ 167	\$ 3.200	\$ 3.667
Sistema hidráulico	5	\$ 250	\$ 300	\$ 2.000	\$ 2.550
Bomba de refrigerante	3	\$ 150	\$ 500	\$ 1.200	\$ 1.850
Sistema eléctrico (conexiones)	6	\$ 200	\$ 200	\$ 2.400	\$ 2.800
Sistema neumático	3	\$ 150	\$ 300	\$ 1.200	\$ 1.650
Carcasa y protecciones	2	\$ 100	\$ 100	\$ 800	\$ 1.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-6: Costos por fallos – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.

3.6.3. Calcular los costes totales por fallos por año TCPf [\$/año]

Para calcular los costos totales por fallos, se utiliza la ecuación 2,6.

Reacondicionamiento con FANUC			
Componente	N° de eventos por año	Costo por fallos [USD]	Costos totales por fallos por año por componente [USD]
Guías lineales	3	\$ 4.050	\$ 12.150
Husillo principal	2	\$ 8.250	\$ 16.500
Husillo de bolas (ejes X/Z)	4	\$ 4.600	\$ 18.400
Servomotores (X/Z)	3	\$ 4.900	\$ 14.700
Sistema de lubricación	5	\$ 1.250	\$ 6.250
Fuente de alimentación	2	\$ 1.925	\$ 3.850
Panel de control CNC	4	\$ 3.725	\$ 14.900
Encoders	6	\$ 2.125	\$ 12.750
Sensores (finales de carrera o inductivos)	6	\$ 1.525	\$ 9.150
Torreta portaherramientas	3	\$ 3.350	\$ 10.050
Sistema hidráulico	4	\$ 2.675	\$ 10.700
Bomba de refrigerante	5	\$ 1.925	\$ 9.625
Sistema eléctrico (conexiones)	3	\$ 2.100	\$ 6.300
Sistema neumático	2	\$ 1.725	\$ 3.450
Carcasa y protecciones	2	\$ 1.050	\$ 2.100
Costes totales por fallos anualizado			\$ 150.875

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-7: Costos totales por fallos por año – Reacondicionamiento con FANUC.

Reacondicionamiento con SZGH			
Componente	N° de eventos por año	Costo por fallos [USD]	Costos totales por fallos por año por componente[USD]
Guías lineales	3	\$ 3.900	\$ 11.700
Husillo principal	5	\$ 8.000	\$ 40.000
Husillo de bolas (ejes X/Z)	5	\$ 4.400	\$ 22.000
Servomotores (X/Z)	4	\$ 3.600	\$ 14.400
Sistema de lubricación	5	\$ 1.200	\$ 6.000
Fuente de alimentación	4	\$ 1.850	\$ 7.400
Panel de control CNC	5	\$ 2.700	\$ 13.500
Encoders	6	\$ 1.983	\$ 11.900
Sensores (finales de carrera o inductivos)	7	\$ 1.450	\$ 10.150
Torreta portaherramientas	5	\$ 3.667	\$ 18.333
Sistema hidráulico	4	\$ 2.550	\$ 10.200
Bomba de refrigerante	5	\$ 1.850	\$ 9.250
Sistema eléctrico (conexiones)	5	\$ 2.800	\$ 14.000
Sistema neumático	2	\$ 1.650	\$ 3.300
Carcasa y protecciones	2	\$ 1.000	\$ 2.000
Costes totales por fallos anualizado			\$ 194.133

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-8: Costos totales por fallos por año – Reacondicionamiento con SZGH.

Reacondicionamiento con SZGH (Pesimista)			
Componente	N° de eventos por año	Costo por fallos [USD]	Costos totales por fallos por año por componente [USD]
Guías lineales	4,5	\$ 3.900	\$ 17.550
Husillo principal	7,5	\$ 8.000	\$ 60.000
Husillo de bolas (ejes X/Z)	7,5	\$ 4.400	\$ 33.000
Servomotores (X/Z)	6,0	\$ 3.600	\$ 21.600
Sistema de lubricación	7,5	\$ 1.200	\$ 9.000
Fuente de alimentación	6,0	\$ 1.850	\$ 11.100
Panel de control CNC	7,5	\$ 2.700	\$ 20.250
Encoders	9,0	\$ 1.983	\$ 17.850
Sensores (finales de carrera o inductivos)	10,5	\$ 1.450	\$ 15.225
Torreta portaherramientas	7,5	\$ 3.667	\$ 27.500
Sistema hidráulico	6,0	\$ 2.550	\$ 15.300
Bomba de refrigerante	7,5	\$ 1.850	\$ 13.875
Sistema eléctrico (conexiones)	7,5	\$ 2.800	\$ 21.000
Sistema neumático	3,0	\$ 1.650	\$ 4.950
Carcasa y protecciones	3,0	\$ 1.000	\$ 3.000
Costes totales por fallos anualizado			\$ 291.200

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-9: Costos totales por fallos por año – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.

3.6.4. Costos totales por fallos en valor presente

En cálculo de los costos totales por fallos en valor presente, se ocupó la ecuación 2.7.

Reacondicionamiento con FANUC		
Componente	Costos totales por fallos por año [USD]	Costos totales por fallos en valor presente [USD]
Guías lineales	\$ 12.150	\$ 82.786
Husillo principal	\$ 16.500	\$ 112.426
Husillo de bolas (ejes X/Z)	\$ 18.400	\$ 125.372
Servomotores (X/Z)	\$ 14.700	\$ 100.161
Sistema de lubricación	\$ 6.250	\$ 42.586
Fuente de alimentación	\$ 3.850	\$ 26.233
Panel de control CNC	\$ 14.900	\$ 101.524
Encoders	\$ 12.750	\$ 86.875
Sensores (finales de carrera o inductivos)	\$ 9.150	\$ 62.345
Torreta portaherramientas	\$ 10.050	\$ 68.478
Sistema hidráulico	\$ 10.700	\$ 72.907
Bomba de refrigerante	\$ 9.625	\$ 65.582
Sistema eléctrico (conexiones)	\$ 6.300	\$ 42.926
Sistema neumático	\$ 3.450	\$ 23.507
Carcasa y protecciones	\$ 2.100	\$ 14.309
Costes totales por baja confiabilidad		\$ 1.028.016

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-10: Costos totales por fallos en valor presente – Reacondicionamiento con FANUC.

Reacondicionamiento con SZGH		
Componente	Costos totales por fallos por año [USD]	Costos totales por fallos en valor presente [USD]
Guías lineales	\$ 11.700	\$ 79.720
Husillo principal	\$ 40.000	\$ 272.548
Husillo de bolas (ejes X/Z)	\$ 22.000	\$ 149.901
Servomotores (X/Z)	\$ 14.400	\$ 98.117
Sistema de lubricación	\$ 6.000	\$ 40.882
Fuente de alimentación	\$ 7.400	\$ 50.421
Panel de control CNC	\$ 13.500	\$ 91.985
Encoders	\$ 11.900	\$ 81.083
Sensores (finales de carrera o inductivos)	\$ 10.150	\$ 69.159
Torreta portaherramientas	\$ 18.333	\$ 124.918
Sistema hidráulico	\$ 10.200	\$ 69.500
Bomba de refrigerante	\$ 9.250	\$ 63.027
Sistema eléctrico (conexiones)	\$ 14.000	\$ 95.392
Sistema neumático	\$ 3.300	\$ 22.485
Carcasa y protecciones	\$ 2.000	\$ 13.627
Costes totales por baja confiabilidad		\$ 1.322.765

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-11: Costos totales por fallos en valor presente – Reacondicionamiento con SZGH.

Reacondicionamiento con SZGH (Pesimista)		
Componente	Costos totales por fallos por año [USD]	Costos totales por fallos en valor presente [USD]
Guías lineales	\$ 17.550	\$ 119.580
Husillo principal	\$ 60.000	\$ 408.822
Husillo de bolas (ejes X/Z)	\$ 33.000	\$ 224.852
Servomotores (X/Z)	\$ 21.600	\$ 147.176
Sistema de lubricación	\$ 9.000	\$ 61.323
Fuente de alimentación	\$ 11.100	\$ 75.632
Panel de control CNC	\$ 20.250	\$ 137.977
Encoders	\$ 17.850	\$ 121.624
Sensores (finales de carrera o inductivos)	\$ 15.225	\$ 103.738
Torreta portaherramientas	\$ 27.500	\$ 187.377
Sistema hidráulico	\$ 15.300	\$ 104.249
Bomba de refrigerante	\$ 13.875	\$ 94.540
Sistema eléctrico (conexiones)	\$ 21.000	\$ 143.088
Sistema neumático	\$ 4.950	\$ 33.728
Carcasa y protecciones	\$ 3.000	\$ 20.441
Costes totales por baja confiabilidad		\$ 1.984.147

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-12: Costos totales por fallos en valor presente – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.

TCPf - FANUC = 1.028.016 USD

TCPf - SZGH = \$1.322.765 USD

TCPf – SZGH PESIMISTA = \$1.984.147 USD

3.7. VR – VALOR DE REPOSICIÓN

La variación en el valor de reposición de esta máquina dependerá de los componentes internos que puedan ser reutilizados por un comprador. Si se vende únicamente como chatarra, su valor base se estima en USD 3.000. A este monto puede agregarse un valor aproximado de USD 2.500 por componentes FANUC en buen estado y de USD 1.500 por componentes SZGH en buen estado. Sin embargo, considerando que los equipos SZGH presentan una tasa de fallas cercana al 50% en condiciones normales, el valor real de reposición de estos últimos se reduce a aproximadamente USD 750.

$$\text{VR - FANUC} = \$3.000 + \$2.500 = \$5.500 \text{ USD}$$

$$\text{VR - SZGH} = \$3.000 + \$1.500 = \$4.500 \text{ USD}$$

$$\text{VR - SZGH PESIMISTA} = \$3.000 + \$750 \text{ USD} = \$3.750 \text{ USD}$$

3.7. CTCV – COSTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA

A continuación, se presentan tres tablas, una para cada opción de reacondicionamiento en estudio. Estas tablas muestran los resultados de los principales costos calculados y explicados anteriormente. Según el tipo de costo, se determinará si corresponde a valor presente o valor futuro, considerando la tasa de interés aplicable. Para ambas opciones, la tasa y la vida útil son iguales.

Reacondicionamiento con FANUC		
Interés (i) = 10%	Total, años: 12 (105.120 horas)	
TIPOS DE COSTES	Valor [USD]	Valor por vida útil (12 años) [USD]
COSTOS INICIALES		
Reacondicionamiento utilizando componentes FANUC, originales de la maquina	\$ 27.537	\$ 27.537
COSTOS ANUALES		
Costos operacionales	\$ 14.860	\$ 101.251
Costos por mantenimiento preventivo	\$ 1.580	\$ 10.765
Costos por confiabilidad	\$ 150.875	\$ 1.028.016
COSTOS FUTUROS		
Costos por mantenimiento mayor (12 años)	\$ -	\$ -
Valor de reposición (12 años)	\$ -5.500	\$ -1.752
COSTOS TOTALES DE CICLO DE VIDA		\$ 1.165.816

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-13: CTCV – Reacondicionamiento con FANUC.

Reacondicionamiento con SZGH		
Interés (i) = 10%	Total, años: 12 (105.120 horas)	
TIPOS DE COSTES	Valor [USD]	Valor por vida útil (12 años) [USD]
COSTOS INICIALES		
Reacondicionamiento utilizando componentes SZGH, alternativos	\$ 14.8G8	\$ 14.8G8
COSTOS ANUALES		
Costos operacionales	\$ 14.860	\$ 101.251
Costos por mantenimiento preventivo	\$ 1.053	\$ 7.177
Costos por confiabilidad	\$ 1G4.133	\$ 1.322.765
COSTOS FUTUROS		
Costos por mantenimiento mayor (12 años)	\$ -	\$ -
Valor de reposición (12 años)	\$ -4.500	\$ -1.434
COSTOS TOTALES DE CICLO DE VIDA		\$ 1.444.675

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-14: CTCV – Reacondicionamiento con SZGH.

Reacondicionamiento con SZGH (Pesimista)		
Interés (i) = 10%	Total, años: 12 (105.120 horas)	
TIPOS DE COSTES	Valor [USD]	Valor por vida útil (12 años) [USD]
COSTOS INICIALES		
Reacondicionamiento utilizando componentes SZGH, pesimista	\$ 14.8G8	\$ 14.8G8
COSTOS ANUALES		
Costos operacionales	\$ 14.860	\$ 101.251
Costos por mantenimiento preventivo	\$ 1.053	\$ 7.177
Costos por confiabilidad	\$ 2G1.200	\$ 1.G84.147
COSTOS FUTUROS		
Costos por mantenimiento mayor (12 años)	\$ -	\$ -
Valor de reposición (12 años)	\$ -3.750	\$ -1.1G5
COSTOS TOTALES DE CICLO DE VIDA		\$ 2.106.278

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-15: CTCV – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.

3.8. ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los costos, que conforman el costo total de ciclo de vida de los tres escenarios de reacondicionamiento.

TIPOS DE COSTES	SZGH [USD]	FANUC [USD]	SZGH PESIMISTA [USD]
COSTOS INICIALES			
CI	\$ 14.8G8	\$ 27.537	\$ 14.8G8
COSTOS ANUALES			
Co	\$ 101.251	\$ 101.251	\$ 101.251
CMP	\$ 7.177	\$ 10.765	\$ 7.177
TCPf	\$ 1.322.765	\$ 1.028.016	\$ 1.G84.147
COSTOS FUTUROS			
CMM	\$ -	\$ -	\$ -
Valor de reposición (12 años)	\$ -1.434	\$ -1.752	\$ -1.1G5
COSTOS TOTALES DE CICLO DE VIDA	\$ 1.444.675	\$ 1.165.816	\$ 2.106.278

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-16: CTCV Comparativo – Reacondicionamiento con FANUC, SZGH y SZGH Pesimista.

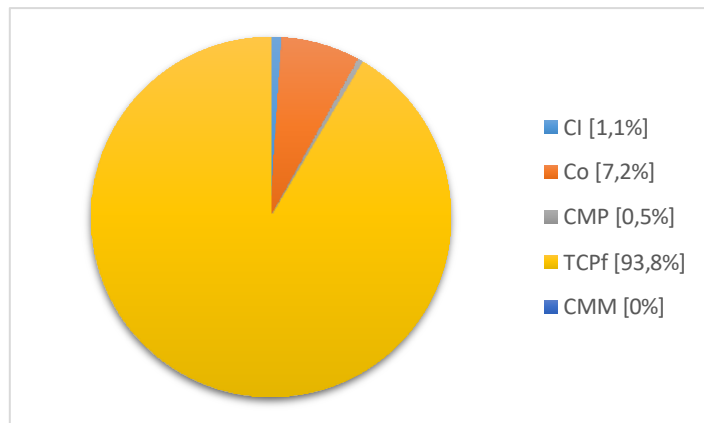
El análisis comparativo revela que la opción de reacondicionamiento con componentes FANUC permite una reducción del 19 % en los costos totales en comparación con la alternativa SZGH bajo condiciones estándar, y del 81 % frente al escenario pesimista de SZGH, en el cual se considera un incremento del 50 % en la frecuencia de fallos. No obstante, esta ventaja en términos de costo total debe ser contrastada con su elevado costo inicial. La alternativa FANUC presenta un sobre costo en la categoría de “Costos iniciales” del 85 % respecto a SZGH, debido principalmente ... a que sus componentes pueden llegar a ser hasta tres veces más costosos, tanto en adquisición como en instalación.

Como se aprecia en la comparación, la mayoría de los costos de la opción FANUC son mayores que los de SZGH, excepto los costos operacionales, que son iguales en ambas opciones. Esto se debe a que los kits de repuesto analizados no afectan mecánicamente al equipo. Por lo tanto, en términos de menores costos, SZGH resulta ser la opción más viable por ser una inversión más baja.

Un punto crucial para considerar antes de tomar una decisión es la diferencia en la calidad de los componentes entre las alternativas evaluadas. FANUC cuenta con una trayectoria consolidada en el mercado, destacándose por su innovación, precisión y alta fiabilidad, mientras que SZGH se encuentra en una etapa inicial de consolidación dentro del ámbito CNC. Esta disparidad en el reconocimiento y madurez tecnológica puede influir significativamente en la elección, especialmente cuando se priorizan estándares de desempeño y confiabilidad. De hecho, esta diferencia en la calidad repercute directamente en la confiabilidad operativa de los componentes, siendo FANUC la opción que genera menores costos en esta categoría, debido a su menor frecuencia de fallos y mayor vida útil efectiva. Por tanto, aunque su costo inicial sea más elevado, su comportamiento confiable a largo plazo puede traducirse en menores costos asociados a fallas, reparaciones no planificadas y paradas operativas.

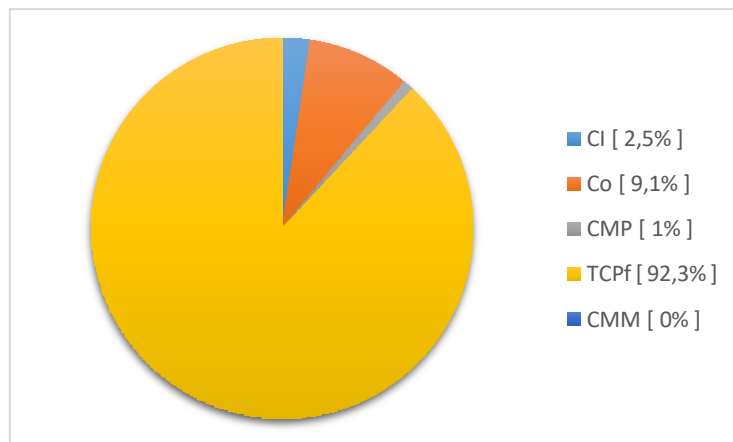
La disparidad en los costos totales de mantenimiento preventivo es significativa. Como marca reconocida en el sector, FANUC cobra precios más elevados por el mantenimiento y reparación de sus componentes, dado que su software es de alta complejidad y sus repuestos, como servodrives y encoders, son costosos. En contraste, SZGH presenta una baja complejidad en mantenimiento y reparación, además de ofrecer repuestos más económicos y accesibles.

A continuación, se presentan gráficos que ilustran de forma clara la distribución y el porcentaje de participación de cada componente en el costo total del ciclo de vida para ambas alternativas de reacondicionamiento. Con el objetivo de facilitar la interpretación visual y resaltar las diferencias más relevantes entre las categorías de costos, se excluyó deliberadamente la categoría de costos operacionales en los gráficos correspondientes a cada alternativa.



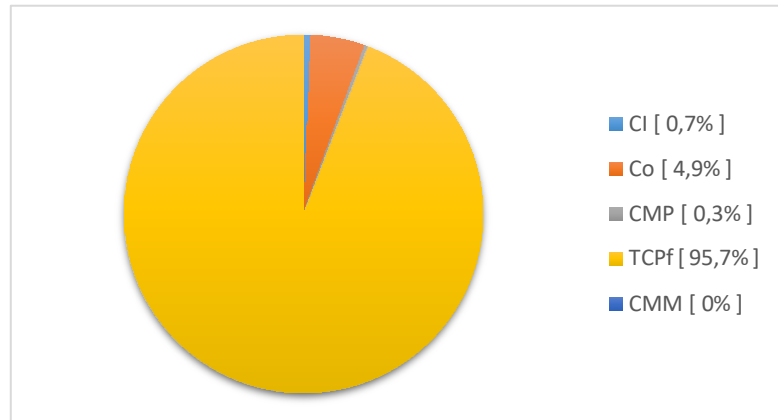
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-1: División de costos del reacondicionamiento – Reacondicionamiento con SZGH.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-2: División de costos del reacondicionamiento – Reacondicionamiento con FANUC.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-3: División de costos del reacondicionamiento – Reacondicionamiento con SZGH Pesimista.

CI: Costos Iniciales

CO: Costos Operacionales

CMP: Costos por mantenimiento Preventivo

TCPf: Costos por confiabilidad

CMM: Costos por Mantenimiento Mayor

En los tres escenarios evaluados, los costos por confiabilidad (TCPf) constituyen el componente más representativo dentro del ciclo de vida de 12 años, con participaciones por sobre el 90 % del total. Este resultado evidencia que la continuidad operativa y los eventos asociados a fallas tienen un peso determinante en la evaluación económica de las alternativas, más aún en contextos donde la disponibilidad de los equipos es crítica.

En segundo lugar, se sitúan los costos operacionales (Co), cuya participación varía entre un 4 % y un 10 % del costo total, consolidándose como el siguiente factor de mayor relevancia en el análisis. Posteriormente, los costos iniciales (CI), junto con los costos por mantenimiento preventivo (CMP), presentan valores relativamente bajos, inferiores al 1 % en todos los escenarios, lo que refleja su menor incidencia en la proyección global.

A pesar de su baja proporción relativa, los costos iniciales (CI) adquieren una importancia clave en el proceso de decisión del cliente, puesto que la inversión inicial está directamente vinculada al retorno esperado. En este sentido, la opción de reacondicionamiento con componentes SZGH se presenta como más atractiva a corto plazo, al requerir una inversión inicial menor y permitir recuperar el capital en un período más reducido, generando beneficios tempranos frente a la alternativa FANUC.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio confirma que el Análisis de Costos del Ciclo de Vida (ACCV) constituye una herramienta eficaz para respaldar la toma de decisiones en procesos de reacondicionamiento de máquinas CNC. A través de la aplicación del modelo propuesto por Woodward (1997), se evaluaron dos alternativas —FANUC y SZGH— considerando los costos iniciales, operacionales y por confiabilidad en un horizonte de 12 años. Los resultados indican que, si bien FANUC requiere una inversión inicial significativamente mayor, presenta los menores costos totales del ciclo de vida.

En un escenario pesimista, con un incremento del 50 % en la tasa de fallas de SZGH, FANUC logra reducir los costos totales en un 44,7% respecto a dicha condición, consolidándose como la opción más confiable. Esta diferencia responde a la mayor calidad de sus componentes, lo que se traduce en una menor frecuencia de fallas y menores costos asociados a interrupciones operativas.

A pesar de su sobre costo inicial —84,8 % superior al de SZGH, con componentes hasta tres veces más caros—, FANUC ofrece beneficios sostenibles en el largo plazo debido a su desempeño confiable. Por su parte, la alternativa SZGH, con menor inversión inicial, permite un retorno más rápido de la inversión, lo que la convierte en una opción atractiva para empresas con restricciones presupuestarias o enfoque a corto plazo.

La metodología de Woodward resultó especialmente útil para esta primera aplicación del ACCV en la empresa, dada la limitada disponibilidad de datos históricos sobre fallas. Su simplicidad y capacidad para generar resultados rápidos bajo el supuesto de una tasa de fallos constante la hacen adecuada en contextos con información incompleta. Sin embargo, dicha suposición puede limitar la precisión del análisis en entornos más dinámicos. Por ello, se recomienda avanzar hacia modelos más robustos, como aquellos basados en distribuciones de Weibull, que permiten representar con mayor realismo el comportamiento de los activos a lo largo del tiempo.

La implementación del ACCV también evidenció la importancia crítica de contar con datos de entrada confiables. La precisión de los resultados depende directamente de la calidad de las proyecciones y estimaciones utilizadas. La recolección de datos puede ser compleja, y muchas organizaciones enfrentan restricciones de acceso por razones legales o de confidencialidad, lo que puede comprometer la validez de los análisis. Por

ello, se recomienda integrar el ACCV con sistemas de gestión del mantenimiento, lo que permitiría alimentar futuros estudios con información más precisa y trazable.

El ACCV se presenta como una herramienta integral para estimar los costos totales asociados al ciclo de vida de un activo, considerando desde su adquisición y operación hasta su disposición final. Su enfoque permite a las organizaciones tomar decisiones fundamentadas que maximicen los beneficios económicos, reduzcan los riesgos operativos y favorezcan una gestión más eficiente y sostenible de los recursos. Además, la inclusión de criterios ambientales y sociales en el análisis contribuye a una gestión de activos alineada con los principios de sostenibilidad.

En el caso específico de Más Conveyor Ltda., la metodología de Woodward resultó adecuada dadas las restricciones de información existentes. El análisis identificó que el reacondicionamiento con componentes SZGH representa, desde una perspectiva económica, la opción más favorable a corto plazo. Aunque presenta menores niveles de precisión y confiabilidad en comparación con FANUC, su menor inversión inicial y su desempeño funcional la posicionan como una solución viable y rentable en el contexto evaluado.

En conclusión, este estudio proporciona un marco cuantitativo útil para fundamentar decisiones de reacondicionamiento. No obstante, se enfatiza que la decisión final debe considerar un equilibrio entre criterios técnicos, económicos y estratégicos, con el fin de garantizar la sostenibilidad y el desempeño eficiente de los activos a lo largo de su vida útil. Asimismo, para tomar una decisión correcta no solo es necesario basarse en los resultados obtenidos y en los datos evaluados internamente, sino también en el contexto político y comercial en el que se encuentra Chile. En este sentido, la adquisición de tecnología proveniente de Estados Unidos —como es el caso de FANUC— puede enfrentar dificultades adicionales debido a los estrictos controles de exportación que mantiene dicho país, así como a la carga de altos impuestos de importación, factores que pueden influir significativamente en la viabilidad final de la inversión.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Crespo Márquez, A., Moreu de León, P., Gómez Fernández, J., Parra Márquez, C., & López Campos, M. (2009). *The maintenance management framework*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(2), 167–178. <https://doi.org/10.1108/13552510910961110>

[2] Fabrycky, W. J. (1997). *Análisis del coste del ciclo de vida de los sistemas*. Gráficas Algorán S.A.

[3] Parra, C., & Crespo, A. (2006). On the consideration of reliability in the life cycle cost analysis (LCCA): A review of basic models. In Guedes Soares, C., & Zio, E. (Eds.), *Safety and reliability for managing risk* (pp. 2203–2214). Taylor & Francis Group. ISBN 0-415-41620-5

[4] Parra, C., & Crespo, A. (2015). *Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos: Desarrollo y aplicación práctica de un modelo de gestión del mantenimiento (MGM)* (2nd ed.). INGEMAN. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29363.66083>

[5] Parra, C., Crespo, A., Kristjanpoller, F., & Viveros, P. (2012). Stochastic model applied to evaluate the economic impact of the failure in the cycle cost analysis (LCCA): Case study for the rail freight and oil industries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 226(4), 392–405. <https://doi.org/10.1177/1748006X12441880>

[6] Woodhouse, J. (1993). *Managing industrial risk: Getting value for money in your business*. Chapman & Hall. ISBN 9780412475900

[7] Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing: Theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335–344. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00089-0](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00089-0)

[8] Enel Chile. (n.d.). *Consumo de artefactos eléctricos*. <https://www.enel.cl/es/clientes/tarifas-y-regulacion/consumo-artefactos-electricos.html>