

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

**APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD PARA LA
GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE SUBSISTEMAS EN TELESCOPIO
ASTRONÓMICO**

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

Alumno:

Oscar Briones Grandón

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González

2025



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 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CRITICIDAD PARA LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE SUBSISTEMAS EN TELESCOPIO ASTRONÓMICO

Nombre del candidato(a): Oscar Antonio Briones Grandón

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial, con Licenciatura en Ingeniería

Campus: Viña del Mar

Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Carlos Andrés Baldi González, 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: 19/03/26

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 19/03/26

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 CRITICIDAD; PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP); GESTIÓN DE ACTIVOS; GESTIÓN DE MANTENIMIENTO; CONTINUIDAD OPERACIONAL; TELESCOPIOS ASTRONÓMICOS.

Las metodologías de análisis de criticidad que integran criterios operacionales, técnicos y de riesgo, constituyen herramientas esenciales para la gestión del mantenimiento en la industria. Este tipo de estudio permite identificar la importancia de cada activo, equipo o sistema analizado dentro de la operación de una planta o de un sistema de mayor escala al que pertenezcan. Los resultados que se obtienen de la jerarquización en base a la criticidad facilitan la asignación eficiente de los recursos humanos, económicos y tecnológicos requeridos para asegurar la continuidad operacional y también representan un insumo relevante para la toma de decisiones.

El presente trabajo desarrolla un modelo de análisis de criticidad aplicado a un conjunto de subsistemas del Telescopio Extremadamente Grande (ELT por sus siglas en inglés), actualmente en construcción en Cerro Armazones, Chile. La motivación surge de la ausencia de una jerarquización formal que permita orientar la elaboración, priorización y validación de los Job Plans (JP), elemento clave para la gestión del mantenimiento. El documento se estructura en un único capítulo en el que se presentará la aplicación del estudio en formato de artículo para publicación en revista de ingeniería.

Para la aplicación se revisará el contexto organizacional, el estado actual del mantenimiento y la estructura que define la descomposición del telescopio en subsistemas. Junto con ello, se determinará y cuantificará la problemática asociada a la ausencia de una jerarquización.

Se evaluarán dos metodologías de criticidad y, mediante un análisis comparativo, se seleccionará el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) debido a su capacidad de integrar criterios heterogéneos, exigir consistencia en los juicios y ofrecer trazabilidad. El proceso contará con el apoyo de un panel de expertos con experiencia directa en operación y mantenimiento de telescopios astronómicos.

Finalmente, se expondrá el ranking de criticidad obtenido y la clasificación de los subsistemas en niveles High, Medium, Low, alineando los resultados con el esquema de criticidad utilizado por el CMMS IBM MAXIMO®. También se presentarán las recomendaciones y propuestas derivadas del análisis.

ÍNDICE

RESUMEN	
ÍNDICE	
ÍNDICE DE FIGURAS	
INDICE DE TABLAS	
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN ARCHIVO PUBLICABLE	3
1.1. Introducción	5
1.2 Caso de estudio: Contexto y Problemática	7
1.2.1 Organización y entorno	7
1.2.2 Contexto actual del mantenimiento	8
1.2.3 Problemática	9
1.2.4 Impacto por falta de jerarquización	10
1.2.5 Estructura PBS e información disponible	11
1.2.6 Alcance de estudio y selección de subsistemas	13
1.3. Modelos de Criticidad: Opciones y Selección	16
1.3.1 Tipos de análisis de criticidad	16
1.3.2 Criterios para seleccionar el método	17
1.3.3 Opciones y selección	17
1.4. Aplicación AHP	18
1.4.1 Metodología AHP	18
1.4.2 Aplicación AHP a subsistemas ELT	19
1.5. Análisis de resultados y propuestas de mejora	25
1.5.1 Limitaciones y alcance propuestas de mejora	25
1.5.2 Propuestas para la toma de decisiones y la gestión de activos	25
1.5.3 Cómo disminuir la criticidad	26
1.6. Referencias	27
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	29
BIBLIOGRAFÍA	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Modelo del proceso de gestión del mantenimiento (MGM)
Figura 1-2	VLT Observatorio Paranal
Figura 1-3	ELT Cerro Armazones
Figura 1-4	Planilla elaboración Job Plans
Figura 1-5	Vista de Job Plan en CMMS MAXIMO®
Figura 1-6	Extracto PBS
Figura 1-7	RBD Severidad 1 DMS
Figura 1-8	Subsistemas seleccionados
Figura 1-9	Dome Rotating Structure
Figura 1-10	Driving Mechanisms
Figura 1-11	Windscreen
Figura 1-12	Latching System
Figura 1-13	Sealing System
Figura 1-14	Cladding, Sealing & Drainage
Figura 1-15	Louvers
Figura 1-16	Modelo jerárquico AHP
Figura 1-17	Modelo jerárquico AHP caso de estudio
Figura 1-18	Código Google Colab

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1	Resultados impacto
Tabla 1-2	Severidades DMS
Tabla 1-3	Evaluación metodologías
Tabla 1-4	Escala de Saaty para comparación de criterios
Tabla 1-5	Valores RI según tamaño de matriz
Tabla 1-6	Comparación por pares de criterios
Tabla 1-7	Cálculo pesos y CR
Tabla 1-8	Escala evaluación HH
Tabla 1-9	Escala evaluación M
Tabla 1-10	Escala evaluación FF
Tabla 1-11	Escala evaluación HSE
Tabla 1-12	Escala evaluación IO

Tabla 1-13	Escala evaluación DR
Tabla 1-14	Escala evaluación NHR
Tabla 1-15	Prioridades locales
Tabla 1-16	Priorización Global
Tabla 1-17	Obtención cuartiles y rangos
Tabla 1-18	Clasificación final subsistemas

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

AHP	Analytic Hierarchy Process (Proceso de Análisis Jerárquico)
ARM	Azimuth Rotation Mechanism (Mecanismo de Rotación de Azimuth)
AT	Auxiliary Telescopes (Telescopios Auxiliares)
CI	Consistency index (Índice de consistencia)
CR	Consistency ratio (Ratio de consistencia)
CMMS	Computerized Maintenance Management System (Sistema Computarizado de Gestión del Mantenimiento)
DMS	Dome & Main Structure (Cúpula y Estructura Principal)
DR	Disponibilidad de repuestos
DSD	Dome Slit Doors (Puertas de la Cúpula)
ELT	Extremely Large Telescope (Telescopio Extremadamente Grande)
ESO	European Southern Observatory (Observatorio Europeo Austral)
FF	Frecuencia de fallas
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (Análisis de Modo, Efecto y Criticidad de Fallas)
HH	Horas-Hombre
HSE	Health, Safety, Environment (Salud, Seguridad y Medio Ambiente)
IO	Impacto Operacional
JP	Job Plan (Plan de Trabajo)
M	Mantenibilidad
MGM	Modelo de Gestión del Mantenimiento
MTBF	Mean Time Between Failures (Tiempo Medio Entre Fallas)
MTTR	Mean Time To Repair (Tiempo Medio Para Reparar)

NHR	Nivel de habilidad requerido
PBS	Product Breakdown Structure (Estructura de Desglose de Producto)
RAM	Reliability, Availability and Maintainability (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad)
RBD	Reliability Block Diagram (Diagrama de Bloques de Confiabilidad)
RI	Random Index (Índice Aleatorio)
UT	Unit Telescopes (Telescopios Unitarios)
VLT	Very Large Telescope (Telescopio Muy Grande)
WO	Work Order (Órden de Trabajo)

B. SIMBOLOGÍA

λ max	Autovalor máximo de la matriz de comparaciones
n	Tamaño de la matriz (número de criterios o alternativas)
m	Metros

INTRODUCCIÓN

La operación de telescopios en observatorios astronómicos exige altos niveles de disponibilidad y confiabilidad en sus sistemas estructurales, mecánicos, de control y ópticos. En el Observatorio Paranal (Región de Antofagasta, Chile) se operan los Telescopios Unitarios del Telescopio Muy Grande y, a pocos kilómetros, en Cerro Armazones, se construye el Telescopio Extremadamente Grande, cuya primera observación se proyecta para 2029 (UT, VLT y ELT respectivamente por sus siglas en inglés). En este entorno, la gestión del mantenimiento es vital para asegurar la continuidad de la observación, la protección de los activos y la calidad de los datos científicos.

El presente trabajo surge ante la ausencia de una jerarquización formal de los subsistemas que compondrán el ELT. Dicha ausencia dificulta la elaboración de los Job Plans (JP) debido a la falta de información para determinar con certeza las prioridades, frecuencias, asignación de recursos y estrategias de mantenimiento. Además, esta carencia propicia eventuales reprocesos al momento de que se cuente con la información, que implica un mayor consumo de horas y desvíos en los plazos de entrega de los JPs.

Bajo este marco, el trabajo está orientado a jerarquizar un conjunto de subsistemas del telescopio de acuerdo con su criticidad relativa, con el fin de apoyar a la gestión de mantenimiento y proponer un procedimiento replicable a otros subsistemas. Este enfoque se justifica, por una parte, por la gran envergadura del proyecto, que hace inviable abordar el telescopio completo en un solo análisis; y, por otra, porque trabajar al nivel de subsistema permite aprovechar la analogía tecnológica con los Telescopio Unitarios de Paranal, dada la homología de múltiples subsistemas con los del ELT.

El documento se organiza del siguiente modo: en primera instancia, se presenta el caso de estudio, su contexto, alcance y limitaciones; luego, se revisan opciones metodológicas de análisis de criticidad y se selecciona el enfoque más adecuado al contexto; posteriormente, se aplica el método a los subsistemas definidos y se exponen los resultados; finalmente, se formulan recomendaciones orientadas a la gestión del mantenimiento en el ámbito del observatorio.

OBJETIVO GENERAL

Jerarquizar un conjunto de subsistemas de un telescopio en un observatorio astronómico mediante una metodología de análisis de criticidad, en apoyo de la gestión del mantenimiento, de riesgos y de inventarios de repuestos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar los antecedentes del observatorio, estableciendo el contexto actual del mantenimiento y presentando la problemática asociada a la falta de jerarquización de subsistemas.
- Seleccionar la metodología de análisis de criticidad más adecuada, considerando el contexto y limitaciones, para ser aplicada al conjunto de subsistemas del alcance del estudio.
- Proponer planes de mejora basados en los resultados de la jerarquización y del análisis de criticidad de los subsistemas, como apoyo a la gestión del mantenimiento, de riesgos y de inventarios de repuestos.

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN ARCHIVO PUBLICABLE

Aplicación de metodología de análisis de criticidad para la gestión de mantenimiento de subsistemas en telescopio astronómico

Application of a criticality analysis methodology for maintenance management of subsystems in an astronomical telescope

Recebido: xxxxxxxx

Aprovado: xxxxxxxx

Publicado: xxxxxxxx

Autor/a 1: Oscar Briones Grandón, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, obriones@usm.cl.

Resumo

Las metodologías de análisis de criticidad que integran criterios operacionales, técnicos y de riesgo constituyen herramientas esenciales para la gestión del mantenimiento en la industria. Este tipo de estudio permite identificar la importancia de cada activo, equipo o sistema analizado dentro de la operación de una planta o de un sistema de mayor escala al que pertenezcan. Los resultados que se obtienen de la jerarquización en base a la criticidad facilitan la asignación eficiente de los recursos humanos, económicos y tecnológicos requeridos para asegurar la continuidad operacional y también representan un insumo relevante para la toma de decisiones.

El presente artículo explica los aspectos teóricos básicos de un modelo de análisis de criticidad basado en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Junto a ello, se presenta un caso de estudio en el que se aplica el análisis a un conjunto de subsistemas pertenecientes al telescopio astronómico Extremely Large Telescope (ELT) en Chile. Como principal resultado, se obtiene un ranking de criticidad que clasifica los subsistemas en niveles High, Medium y Low, según su impacto relativo en la operación del telescopio.

A continuación, se destacan algunas de las aportaciones y consideraciones más relevantes de este estudio:

- La correcta aplicación de la metodología de criticidad permitirá reducir la incertidumbre en la toma de decisiones relacionadas con la elaboración, planificación y ejecución de los Job Plans (JP), priorizando aquellos subsistemas donde el riesgo operacional y de seguridad es más significativo.
- La metodología propuesta integra criterios propios del proceso de mantenimiento—como frecuencia de fallas y mantenibilidad—junto con factores de seguridad y variables operacionales específicas de la astronomía, tal como la continuidad de observación del telescopio. La aplicación se propone como un método replicable para los demás grupos de subsistemas del ELT, sin embargo, es de vital importancia señalar que los criterios deben replantearse dependiendo de la naturaleza de los subsistemas a los que se les quiera aplicar este modelo.

Finalmente, la implementación adecuada de las propuestas y recomendaciones derivadas del análisis de criticidad contribuirá a optimizar la gestión del mantenimiento, del riesgo y de los inventarios; permitirá una asignación eficiente de recursos, reducirá reprocesos, mejorará la eficiencia operativa y fortalecerá la disponibilidad de los sistemas y subsistemas del telescopio a lo largo de todo su ciclo de vida.

Palavras-Chave: Criticidad; Jerarquización; Proceso Analítico Jerárquico (AHP); Gestión del mantenimiento; Continuidad operacional; Telescopios astronómicos; Gestión de riesgos.

Abstract

The criticality analysis methodologies that integrate operational, technical, and risk-based criteria constitute essential tools for maintenance management in the industry. This type of study allows identifying the importance of each asset, equipment, or system within the operation of a plant or a larger system to which they belong. The results obtained from the criticality-based hierarchy facilitate the efficient allocation of human, economic, and technological resources required to ensure operational continuity and also provide valuable input for informed decision-making.

This article explains the fundamental theoretical aspects of a criticality analysis model based on the Analytic Hierarchy Process (AHP). Additionally, a case study is presented in which the analysis is applied to a group of subsystems belonging to the astronomical Extremely Large Telescope (ELT) in Chile. As a main result, a criticality ranking is obtained that classifies the subsystems into High, Medium, and Low levels according to their relative impact on telescope operations.

Below are some of the most relevant contributions and considerations from this study:

- The correct application of the criticality methodology will reduce uncertainty in decision-making processes related to the development, planning, and execution of Job Plans (JP), prioritizing those subsystems where operational and safety risk are most significant.
- The proposed methodology integrates criteria inherent to the maintenance process —such as failure frequency and maintainability— together with safety considerations and operational variables specific to astronomical facilities, such as the continuity of telescope observations. Although its application is proposed as a replicable method for other subsystem groups of the ELT, it is essential to emphasize that the criteria must be adjusted depending on the nature of the subsystems to which the model is applied.

Finally, the proper implementation of the proposals and recommendations derived from the criticality analysis will contribute to optimizing maintenance, risk, and inventory management; enable efficient resource allocation; reduce rework; improve operational efficiency; and strengthen the availability of the telescope's systems and subsystems throughout their lifecycle.

Keywords: Criticality; Prioritization; Analytic Hierarchy Process (AHP); Maintenance management; Operational continuity; Astronomical telescopes; Risk management.

1. Introducción

Según la norma UNE-EN 13306 (AENOR, 2018), la gestión de mantenimiento se describe como el conjunto de actividades de dirección y organización que determinan los requisitos, objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento, además de la implantación de dichas actividades mediante la planificación, su control y mejora continua.

Tomando como referencia el modelo genérico de gestión del mantenimiento (MGM) propuesto por Parra y Crespo (2015), las actividades nombradas en la definición de gestión del mantenimiento se despliegan en sus fases, situando a la jerarquización de activos como segundo paso luego de la definición estratégica, debido a que la política y objetivos se traducen en prioridades de intervención que ayudan a distribuir los recursos y orientar los planes de mantenimiento a diseñar. Véase la Figura 1.

Figura 1: Modelo del proceso de gestión del mantenimiento (MGM)



Fuente: Adaptado de Parra y Crespo (2015, p. 4)

En este contexto, la jerarquización de los activos de una empresa u organización responde a la necesidad de identificar cuáles de estos activos son los más críticos para el proceso según criterios previamente definidos. Dicha necesidad se basa en las preguntas ¿a qué subsistemas conviene dedicar mayores recursos (humanos, técnicos, logísticos), ¿cuáles son más importantes para el proceso y cuáles generan mayores consecuencias ante fallas potenciales? Atender estas preguntas orienta la toma de decisiones en la gestión y planificación del mantenimiento.

El problema que aborda este trabajo es la ausencia de una jerarquización formal de los subsistemas de un telescopio astronómico, lo que en su fase de diseño de planes de mantenimiento (Fase 4 del modelo) se traduce en dificultades para la asignación de recursos, priorización de tareas y selección de estrategias de mantenimiento.

La ausencia de una jerarquización de dichos subsistemas genera impactos que se pueden estimar. Al momento de la elaboración del presente estudio, se han generado alrededor de 600 Planes de Trabajo (JPs, por sus siglas en inglés)—plantillas que definen tareas, frecuencias, recursos, repuestos y medidas de seguridad para cada actividad de mantenimiento— cuya cantidad corresponde a aproximadamente el 48 % del total considerado para el año 2025. Dichos JPs se han desarrollado sin indicar la prioridad y criticidad del trabajo, de esta manera, un tiempo de reproceso conservador de 5 minutos por JP implica más de 50 horas-hombre solo para actualizar estos datos. Este tiempo sería aún mayor en caso de que los JPs se encuentren cargados en el software de mantenimiento utilizado.

Para poder materializar dicha jerarquización se recurre al análisis de criticidad, el cual tiene, entre otras, la siguiente definición: “El análisis de criticidad es una técnica para identificar y jerarquizar eventos indeseados potenciales por importancia” (Moss & Woodhouse, 1999, p. 1, traducción propia). “El término “crítico” y la propia definición de criticidad pueden tener diferentes interpretaciones dependiendo del objetivo que se está tratando de jerarquizar” (Crespo, 2009). Esta definición puede trasladarse desde un enfoque de eventos al enfoque en el activo, de modo que el análisis de criticidad se entienda como un procedimiento que permite ordenar estos activos de acuerdo con su riesgo e impacto sobre el proceso.

De acuerdo con la ISO 55000 (International Organization for Standardization [ISO], 2024), un activo crítico se define como aquel que tiene el potencial de impactar significativamente el logro de los objetivos de la organización, considerando aspectos de seguridad, desempeño, medioambiente y cumplimiento legal. En este contexto, la ISO 55001 establece que la organización debe determinar la criticidad de los activos como parte de las acciones para abordar el riesgo asociado a los éstos, con el propósito de asegurar el logro de los objetivos de gestión de activos (ISO, 2024).

Para poder realizar una jerarquización de los activos de una empresa u organización se requiere conocer la importancia e impactos de cada uno de ellos para el proceso. Según Parra y Crespo (2015, p. 58), algunos de los criterios más comunes de evaluación son:

- Flexibilidad operacional (disponibilidad de función alterna o de respaldo).
- Efecto en la continuidad operacional / capacidad de producción.
- Efecto en la calidad del producto.
- Efecto en la seguridad, ambiente e higiene.
- Costos de paradas y del mantenimiento.
- Frecuencia de fallos / confiabilidad.
- Condiciones de operación (temperatura, presión, fluido, caudal, velocidad).
- Flexibilidad / accesibilidad para inspección y mantenimiento.
- Requerimientos / disponibilidad de recursos para inspección y mantenimiento.

Dependiendo de los objetivos que se quieran cumplir existe una diversidad de metodologías de análisis de criticidad creadas a lo largo de los años y la elección dependerá del contexto y los requerimientos específicos de la organización, la cual puede también, combinar metodologías y adaptarlas según sus intereses (Moss & Woodhouse, 1999).

La literatura ofrece una diversidad de métodos cualitativos y Cuali-cuantitativos que requieren cada uno de ellos diferentes tipos de información, por ello, la selección del método a utilizar debe responder al alcance, los objetivos que se desean cumplir y el contexto operacional. En consecuencia, el presente trabajo:

- Define la problemática, el alcance del estudio y los criterios de evaluación.
- Compara alternativas metodológicas de análisis de criticidad y selecciona la más adecuada.
- Aplica el método seleccionado para jerarquizar los subsistemas.
- Presenta los resultados y entrega recomendaciones para la gestión del mantenimiento.

Bajo este marco, en este trabajo se presenta la aplicación estructurada de una metodología de criticidad— particularmente el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés)— como herramienta central para obtener una jerarquización consistente, transparente y replicable.

2. Caso de estudio: Contexto y Problemática

El caso práctico del estudio corresponde al análisis de los subsistemas del “Telescopio Extremadamente Grande” (Extremely Large Telescope, ELT), actualmente en construcción en el Cerro Armazones, en el desierto de Atacama, Chile.

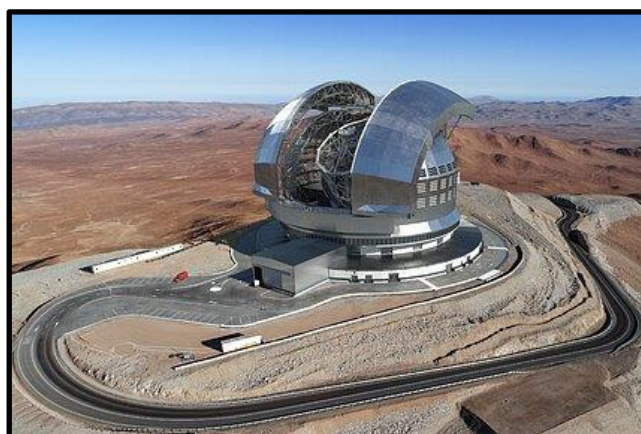
2.1 Organización y entorno

El Observatorio Europeo Austral (European Southern Observatory, ESO) opera actualmente en Chile el Observatorio Paranal (Figura 2), referencia mundial de la astronomía debido a la magnitud de sus telescopios y a la ubicación estratégica que asegura las mejores condiciones climáticas y de calidad de cielo para la observación. En él, se encuentran, entre otros, los 4 “Telescopios Unitarios” (Unit Telescopes, UT) que conforman, junto con los 4 “Telescopio Auxiliares” (Auxiliary Telescopes, AT) el famoso Telescopio Muy Grande” (Very Large Telescope, VLT). En la siguiente figura se pueden apreciar los telescopios mencionados, los AT son los telescopios pequeños en la imagen, mientras que los más grandes corresponden a los UT, quienes cuentan con un espejo primario de 8 metros.

Figura 2: VLT Observatorio Paranal

Fuente: Tomado de ESO (s. f.), Imágenes

A pocos kilómetros de Paranal, en el cerro Armazones, se lleva a cabo la construcción del ELT (Figura 3) cuyo propósito es ampliar de manera significativa las capacidades de observación actuales, el ELT contará con un espejo primario de aproximadamente 39 metros de diámetro conformado por alrededor de 800 segmentos, superando de esta manera el tamaño del espejo primario de los UT que operan actualmente. La proximidad geográfica entre Paranal y Armazones, junto con la pertenencia a una misma organización y al parecido en la construcción de los UT y ELT, favorecen sinergias en planificación, logística, mantenimiento e intercambio de conocimiento técnico.

Figura 3: ELT Cerro Armazones

Fuente: Tomado de ESO (s. f.), Imágenes.

2.2 Contexto actual del mantenimiento

La operación de telescopios astronómicos, tal como el ELT exige niveles elevados de disponibilidad y confiabilidad de sus sistemas y subsistemas, entre los cuales encontramos del tipo mecánico, eléctrico, ópticos y de control. En este contexto, la gestión del mantenimiento de estos sistemas debe garantizar la continuidad de observación del telescopio y la confiabilidad operativa de dichos sistemas.

El objetivo de análisis de este trabajo son un conjunto de subsistemas del telescopio, agrupados según sus funciones operativas y relación con otros subsistemas.

Actualmente, para el proyecto del ELT existe un equipo encargado de la elaboración de los Job Plans (JPs) de los diversos subsistemas del telescopio. Los JPs consisten en plantillas de mantenimiento por actividad, que especifican la secuencia de tareas, frecuencias, recursos (HH y perfiles profesionales), repuestos, materiales y herramientas requeridas, tiempos y medidas de seguridad. Estos JPs se desarrollan en una planilla Excel (Ver figura 4), y una vez que se encuentran validados son cargados al software CMMS IBM-MAXIMO®.

Figura 4: Planilla elaboración Job Plans

PMDTIW0002 - PM - 3M - Az Driving Trolley Idle Wheels - Bearings check for noise and vibrations				
1. JOB PLAN				
JOB PLAN ID	PMDTIW0002	REVISION	0	
DESCRIPTION	PM - 3M - Az Driving Trolley Idle Wheels - Bearings check for noise and vibrations	STATUS	Draft	
2. BASIC DEFINITIONS				
MAINTENANCE TYPE	Preventive	MAINTENANCE ACTIVITY	Inspection	
PRIORITY	TBD	NEEDS READINESS REV.	No	
INSPECTION FORM ID	TBD			
3. SCHEDULING DEFINITIONS				
TOTAL DURATION	0:15	INTERRUPTABLE	Yes	
SHUTDOWN ACTIVITY	No	INCL. in SCHEDULE VIEW	Yes	
ASSETS OFFLINE		LOCATIONS BLOCKED		
ASSET ITSELF BLOCKED?	No	LOCATION ITSELF BLOCKED?	TBD	
EAS of HIGHEST & LOWEST ASSETS in IMPACTED HIERARCHY		ELO of HIGHEST & LOWEST LOCATIONS in IMPACTED HIERARCHY		
N/A	N/A	TBD	TBD	
4. PREVENTIVE MAINTENANCE				
TIME-BASED FREQUENCY				
FREQUENCY	3	FREQUENCY UNIT	Months	
METER-BASED FREQUENCY				
METER ID	N/A	FREQUENCY	N/A	
5a. APPLICABLE to ITEMS (JP)				
EIN / Inventory Number	200-32-11-00-00	DESCRIPTION	AZ Rotation Mechanism Driving Trolley	
5b. APPLICABLE to ASSETS & LOCATIONS (PM)				
ESO ASSET NUMBER (EAS)	TBD	DESCRIPTION	ESO LOCATION ID (ELO)	DESCRIPTION
		AZ Rotation Mechanism Driving Trolley TR-02	TBD	L03
6. TEAM				
SYSTEM RESPONSIBLE	TBD	EXECUTION TEAM	MECH	
7. JOB PLAN TASKS				
TASK ID	DESCRIPTION	REFERENCE / PROCEDURE ID	FAILURE MODE	DURATION (WRENCH TIME)
100	Ask the operator to move the Dome (Operator?)	N/A	N/A	0:02
200	During movement, check for strange noises and excessive vibrations on the bearings of the external idle wheel	ESO-347910	ME Vibrating / ME Deteriorated / ME Noise	0:04
300	During movement, visually check for oil leakage at the radial shaft seals and at the O-rings of the external idle wheel	ESO-347910	ME Worn / ME Leaking / ME Deteriorated	0:02
400	During movement, check for strange noises and excessive vibrations on the bearings of the internal idle wheel	ESO-347910	ME Vibrating / ME Deteriorated / ME Noise	0:04
500	During movement, visually check for oil leakage at the radial shaft seals and at the O-rings of the internal idle wheel	ESO-347910	ME Worn / ME Leaking / ME Deteriorated	0:02
600	Ask the operator to move the Dome at parking position (Operator?)	N/A	N/A	0:01
8. MATERIAL / CONSUMABLES / SPARE PARTS				
EIN / Inventory Number	N/A	DESCRIPTION	STOREROOM	QUANTITY
		N/A	N/A	N/A
9. TOOLS				
EIN / Inventory Number	N/A	DESCRIPTION	HOURS	QUANTITY
		N/A	N/A	N/A
10. LABOR				
CRAFT	REQUIRED SKILL LEVEL	QUANTITY	REQUIRED QUALIFICATIONS	HOURS
MECH	TECHNICIAN	2	PENDING SKILLS	0:15
11. SERVICES				
SERVICE ID	DESCRIPTION	QUANTITY		
N/A	N/A	N/A		
12. DOCUMENTS				
TYPE	DOCUMENT TITLE	DOCUMENT NUMBER	DOCUMENT URL	VERSION

Fuente: Tomado de Briones (2025), 200-32-11-51-00 DT Idle Wheel 1 (Job Plan PMDTIW0002, rev. 0) [Archivo de Excel interno no publicado].

2.3 Problemática

Entre los elementos que se deben incluir en el diseño del JP se encuentra la prioridad (Priority en Figura 4) de ejecución de la orden de trabajo derivada del propio JP y su criticidad (ver figura 5), información clave para la su programación, ya que, para poder programar las diversas órdenes de trabajo a realizar en el telescopio, es imprescindible conocer que actividades tienen preferencia sobre otras en función del impacto de no poder realizarlas por diversos factores.

Figura 5: Vista de Job Plan en CMMS MAXIMO®

Job Plan: PMAHU0020	PM - 3M - ETF - AHU #1 Smart 6.8 - Mechanical Routine Mainten	Organization: ESO	Site:
Revision: 0			
Details			
Status: DRAFT	Default WO Class: WORKORDER		
Template Type: Maintenance	WO Priority: _____		
Duration: 2:30	Criticality: _____		

Fuente: Adaptado de IBM MAXIMO® Asset Management (interfaz de usuario), captura del autor.

En la Figura 5 se destacan los dos elementos que requieren definición en los JPs para la posterior creación de las órdenes de trabajo (WO) asociadas. En primera instancia, el “WO Priority” indica el nivel de prioridad y el plazo para la programación de la WO y puede tener 4 valores:

- Valor 1: Más de 1 semana
- Valor 2: Menos de 1 semana
- Valor 3: Antes de 2 días
- Valor 4: Lo más pronto posible

Luego, “Criticality” indica el nivel de criticidad de la WO y tiene 3 valores posibles:

- High
- Medium
- Low

Para definir adecuadamente los valores de prioridad y criticidad mencionados, se requiere conocer la criticidad del subsistema afectado, pues solo así se puede estimar el impacto de retrasar o no ejecutar sus mantenimientos. En la actualidad, no existe una jerarquización formal de los subsistemas según su criticidad funcional y operativa. Esta brecha, en la fase de diseño de planes de mantenimiento, se traduce en:

- Dificultad para definir la prioridad de los distintos JPs y sus WO asociadas.
- Disminución en la calidad de los JPs diseñados.
- Incertidumbre en la selección de estrategias de mantenimiento (preventivo, correctivo).
- Riesgo de sub-atención a subsistemas de alto impacto.

Esta situación no es coherente con el modelo MGM, el cual sitúa la jerarquización de los equipos/activos en la fase 2 y luego, en la fase 4, el diseño de los planes de mantenimiento, es decir, al momento de elaborar los JPs las prioridades deberían estar definidas.

La ausencia de jerarquización conlleva un reproceso sistemático de los JPs, debido a que una vez que se cuente con la información de criticidad, será necesario revisarlos y reconfigurarlos para incorporar el dato de prioridad y modificar frecuencias y estrategias de mantenimiento según posibles cambios al momento de contar con la jerarquización de los subsistemas. Este reproceso implica:

- Consumo adicional de HH de los ingenieros a cargo del trabajo.
- Reprogramación de actividades.
- Desviaciones en plazos de entrega de JPs (Cronograma Gantt).

2.4 Impacto por falta de jerarquización

A la fecha se han elaborado ≈600 JPs para el ELT, lo que representa ≈48 % del universo previsto para el 2025. El plan del proyecto contempla completar el 100 % de los JP del ELT hacia fines de 2027. Dado que, todavía no existen JPs cargados en MAXIMO®, si la jerarquización de subsistemas se obtiene con posterioridad será necesario reprocesar cada uno de ellos para incorporar prioridad y criticidad (abrir archivo, editar, guardar y actualizar el registro de avance).

Bajo el supuesto conservador de 5 minutos por JP para ese reproceso, las horas-hombre (HH) se estiman según:

$$HH = \text{Cantidad de JP} \times \text{Tiempo Reproceso}$$

$$HH = \frac{\text{Cantidad de JP} \times 5 \left[\frac{\text{min}}{\text{JP}} \right]}{60 \left[\frac{\text{min}}{\text{h}} \right]}$$

La cantidad de JPs totales para 2025 se estima de la siguiente forma:

$$HH = \frac{\text{Cantidad de JPs actuales}}{\% \text{ avance actual}}$$

Tabla 1: Resultados impacto

Escenario	JP a reprocesar	HH totales	Jornadas equivalentes (1 planificador)*	Días efectivos del equipo
Reproceso de Job Plans vigentes	600	50.0	8.9	2.2
Reproceso del universo total estimado para 2025	1250	104.2	18.6	4.7
Reproceso potencial evitado mediante jerarquización temprana	650	54.2	9.7	2.4

Fuente: Elaboración propia en base a estimación hecha por equipo de planificación.

* 70% de jornada de 8 h para 1 trabajador del grupo de planificación.

Los días efectivos del equipo representan la cantidad de jornadas completas durante las cuales el equipo de planificación, compuesto por cuatro planificadores con una dedicación aproximada del 70% a la elaboración de Job Plans, debería trabajar de manera exclusiva en el reproceso. Esta métrica permite visualizar de forma directa el impacto real de este reproceso sobre la capacidad disponible del equipo, mostrando cuántos días de trabajo se verían completamente absorbidos por actividades de reproceso y, en consecuencia, desplazando las tareas programadas, entre ellas, el avance en la elaboración de Job Plans.

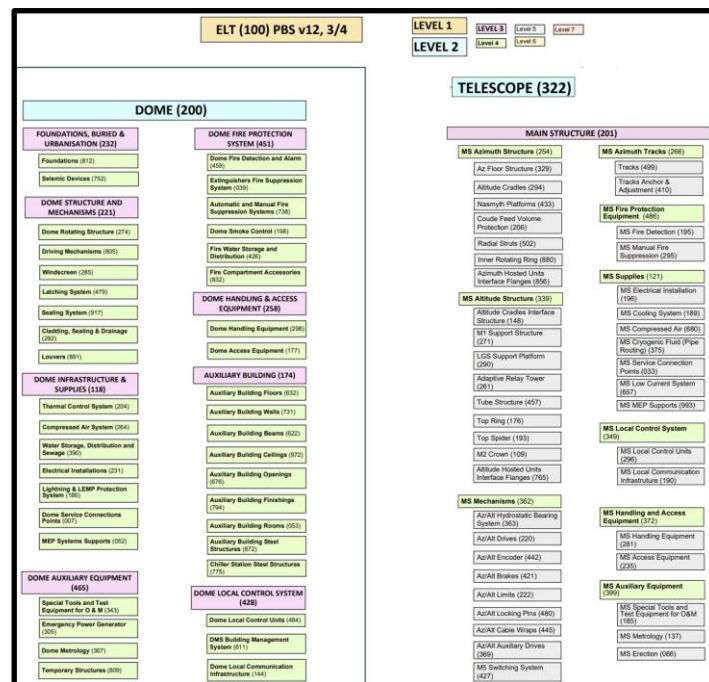
Cabe señalar que para el caso hipotético de que los JPs se encuentren cargados en MAXIMO®, el tiempo que toma el reproceso es mucho mayor debido a la complejidad de la actualización de JPs que ya se encuentran subidos al software, lo cual, a su vez, aumentaría sustancialmente las horas de reprocesos para aquel caso.

Esta estimación permite dimensionar el efecto del reproceso que eventualmente se tendrá que realizar para los JPs actuales y cómo afectaría para los próximos en caso de no tomar acciones. Por otra parte, comprender este impacto deja en evidencia el hecho de que cuanto antes se disponga de la jerarquización, menor será el retrabajo y más expedita la incorporación de prioridades en los JPs, lo que contribuye a disminuir HH de reproceso, a mejorar la calidad de los planes entregados y al cumplimiento de los plazos correspondientes.

2.5 Estructura PBS e información disponible

El telescopio y su conjunto de sistemas se descomponen en un Product Breakdown Structure (PBS), que en español se traduce como “Estructura de desglose de producto”. El PBS constituye una descomposición jerárquica del telescopio en 7 niveles con los sistemas y subsistemas que lo componen.

Figura 6: Extracto PBS



Fuente: Adaptado de Kurlandczyk & Gago (2025), ELT product breakdown structure (Design Report ESO-232484, versión 11 | 12.24) [Informe interno no publicado, European Southern Observatory (ESO)]

Por ejemplo, en la figura anterior podemos observar 2 subsistemas que se descomponen jerárquicamente:

- Dome: Sistema de PBS nivel 2 y corresponde a la cúpula que cubre al telescopio y sus subsistemas.
- Main Structure (MS por sus siglas en inglés): Subsistema de PBS nivel 3 que corresponde a los subsistemas que componen la estructura principal del telescopio, y que pertenece al sistema Telescope de nivel 2.

Para dimensionar la envergadura del proyecto, es importante indicar que el Dome es tan solo 1 de los 7 sistemas de nivel 2 que componen al ELT.

Dado a que el telescopio se encuentra en fase de construcción, aún no se disponen de históricos operacionales medidos, tales como Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF por sus siglas en inglés) y Tiempo Medio Para Reparar (MTTR por sus siglas en inglés). Pero, si existe un análisis RAM (Reliability, Availability and Maintainability) diseñado para estimar estos indicadores para el grupo de subsistemas DMS (Dome & Main Structure), este DMS tal como lo indica su nombre, es una mezcla los subsistemas pertenecientes al Dome y Main Structure mencionados anteriormente.

Este análisis RAM considera al DMS como un sistema completo y, dentro de los pasos aplicados, se incluye la clasificación de las severidades de servicio del sistema, las cuales se describen a continuación:

Tabla 2: Severidades DMS

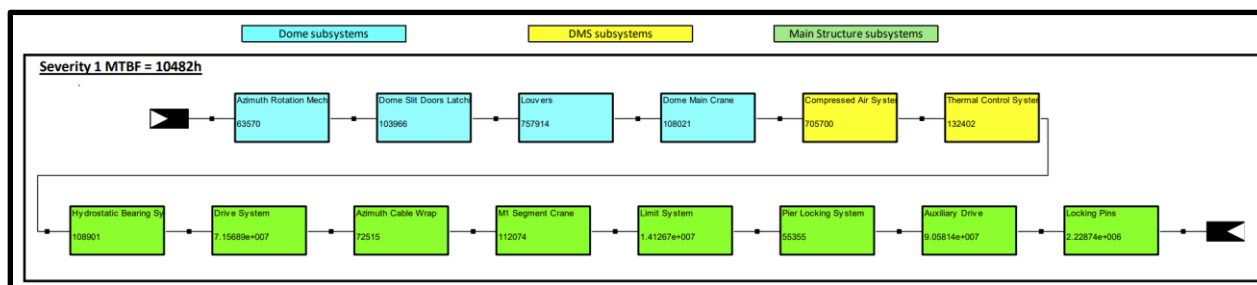
Severidad	Consecuencia
Severidad 3	La ocurrencia de una falla funcional del DMS que, si no se corrige, ocasionará directa o indirectamente una pérdida de tiempo de observación científica.
Severidad 2	La ocurrencia de una falla funcional del DMS que, si no se corrige, ocasionará directa o indirectamente una degradación del desempeño de la observación científica.
Severidad 1	La ocurrencia de una falla funcional del Domo y de la Estructura Principal que no pertenece a las categorías de severidad 3 ni 2.

Fuente: Adaptado de Porcelli (2021), RAM Analysis: DMS MS FDR DP Part 16 (Analysis Report ESO-301204, versión 4/5) [Informe interno no publicado, European Southern Observatory (ESO)].

Teniendo las severidades de servicio, se definen los subsistemas relacionados a ella, y para cada uno, se realiza una predicción de confiabilidad y calcula su tasa de fallos y MTBF. Luego, se realiza un Análisis de Modos de Fallo y Efectos (**FMECA, por sus siglas en inglés**), que entrega para cada modo de fallo su frecuencia, criticidad y tiempos de reparación asociados (**MTTR**, tiempos de intervención, recursos, etc.). Con estos datos se construyen **Diagramas de Bloques de Confiabilidad (RBD, por sus siglas en inglés)**, este RBD representa el “camino al éxito” del DMS, y para este caso, se organiza principalmente en serie, lo que quiere decir que la falla de un bloque (subsistema) interrumpe la función este sistema.

A continuación, se presenta, a modo de ejemplo los resultados del RBD para Severidad 1 del DMS:

Figura 7: RBD Severidad 1 DMS



Fuente: Adaptado de Porcelli (2021), RAM Analysis: DMS MS FDR DP Part 16 (Analysis Report ESO-301204, versión 4/5) [Informe interno no publicado, European Southern Observatory (ESO)].

Los resultados del análisis RAM sirven como insumo cuantitativo importante para tener en consideración al momento de aplicar el análisis de criticidad. Sin embargo, este análisis al considerar el DMS como un sistema, de alguna manera “mezcla” subsistemas de distinto nivel del PBS y para el caso del presente estudio, la aplicación del análisis se desea realizar de manera estructurada según el PBS, en otras palabras, tomar un sistema/subsistema de

nivel X y poder aplicar el análisis a los subsistemas que lo componen.

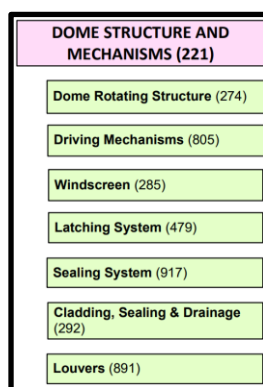
Se debe tomar en cuenta que no todos los subsistemas que serán considerados para el análisis forman parte del análisis RAM, por lo que es requerido el uso de criterios técnicos sustentados en juicio experto, obtenido de los profesionales del Observatorio Paranal (ESO), cercano al ELT. La validez de estos criterios se basa en la similitud de los Telescopios Unitarios (UT) de Paranal con el ELT. Guardando las diferencias de escala, la arquitectura y numerosos sistemas son homólogos y, de hecho, al menos cuatro de los siete subsistemas considerados en este estudio están presentes en los UT del VLT.

2.6 Alcance de estudio y selección de subsistemas

Si bien el análisis de criticidad comúnmente se realiza a nivel de activos/equipos, este trabajo prioriza la jerarquización a nivel de subsistemas debido a la gran envergadura del proyecto, a la definición del PBS y a la modalidad de desarrollo de los JPs — los cuales se generan por subsistemas —. Este enfoque reduce la complejidad, genera resultados trazables y una metodología replicable a los demás subsistemas de telescopios, y si se quiere, a los equipos que los conforman.

El grupo de subsistemas seleccionado para el análisis son quienes pertenecen al DOME, STRUCTURE AND MECHANISMS de nivel 3 en el PBS.

Figura 8: Subsistemas seleccionados



Fuente: Adaptado de Kurlandczyk y Gago (2025), ELT product breakdown structure (Design Report ESO-232484, versión 11 | 12.24) [Informe interno no publicado, European Southern Observatory (ESO)]

La selección de estos subsistemas se fundamenta en diversos criterios operativos, documentales y de oportunidad facilitados por el contexto en el que se desarrolla este trabajo, que son los siguientes:

- **Cronograma:**

Para el seguimiento del proceso de elaboración de JPs existe un diagrama Gantt que contiene cada uno de los subsistemas del ELT como tarea, con sus duraciones, plazos y porcentajes de avances. Actualmente, de acuerdo con el cronograma, se está llevando a cabo la elaboración de los JPs de estos subsistemas.

- **Información disponible:**

El trabajo reciente del equipo de planificación sobre estos JPs proporciona conocimiento actualizado, documentación técnica suficiente (planos, manuales) y acceso a expertos. Al ser subsistemas pertenecientes al DMS varios de ellos están incluidos en el análisis RAM presentado anteriormente (p. ej., Latching System, Windscreen, Louvers y el Azimuth Rotation Mechanism contenido en Driving Mechanisms).

- **Impactos:**

Cada uno de los subsistemas tiene un impacto identificable sobre la operación del telescopio, riesgos asociados (seguridad y ambiente) y se pueden explicar de manera concreta gracias a la información disponible.

- **Homología con los UT del VLT:**

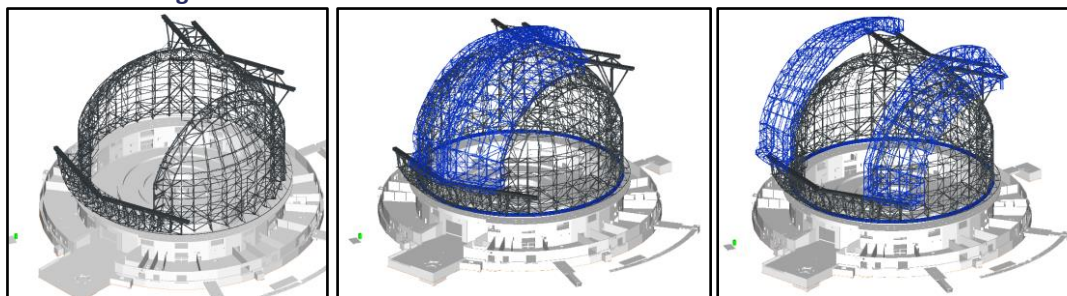
Gran parte de los subsistemas seleccionados son, guardando las proporciones, homólogos a subsistemas de los UT de Paranal. Lo cual permite transferir experiencia e indicadores referenciales reforzando el juicio experto ante la falta de históricos del ELT.

Es importante destacar que el subsistema Driving Mechanisms se compone a su vez de dos subsistemas que, debido a sus funciones e impactos, deben tratarse de manera individual, por lo que, serán considerados de esta manera para la aplicación del análisis. A continuación, se presenta una descripción funcional mínima y el primer impacto de cada uno de los subsistemas seleccionados:

a. Dome Rotating Structure:

La estructura del domo es una cúpula hemisférica de acero de 86 [m] de diámetro, que protege al telescopio del entorno y es capaz de girar alrededor del eje vertical. Cuenta con unas puertas correderas (DSD por sus siglas en inglés) para ofrecer una abertura libre sobre toda la estructura principal (estructuras en azul en figura). La cúpula se apoya en un anillo/riel principal (anillo azul en figura) y en el resto de la estructura superior, la cual que transmite las cargas hacia un pilar de hormigón.

Figura 9: Dome Rotating Structure



Fuente: Captura del autor del modelo 3D DMS Composite Model (Navisworks), adaptado de Selva (2025).

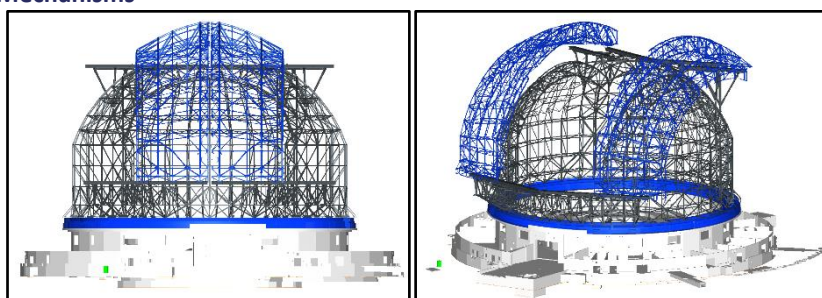
Impacto en la observación: Daños o deformaciones serias limitan la capacidad apertura y giro del telescopio, que a su vez se traduce en pérdida de tiempo de observación y aumento del riesgo.

b. Driving Mechanisms:

Conjunto de sistemas de accionamiento conformado por 2 subsistemas principales, el mecanismo de rotación Azimuth y el mecanismo de las puertas correderas del domo.

- Azimuth Rotation Mechanism (ARM): Carros motorizados y de apoyo, ruedas, motores, reductores y frenos que permiten el giro de la cúpula sobre el riel.
- Dome Slit Doors Translation Mechanism (DSD): Carros motorizados, ruedas, railes y sistema piñón-cremallera que desplazan las dos slit doors a lo largo de su carrera.

Figura 10: Driving Mechanisms



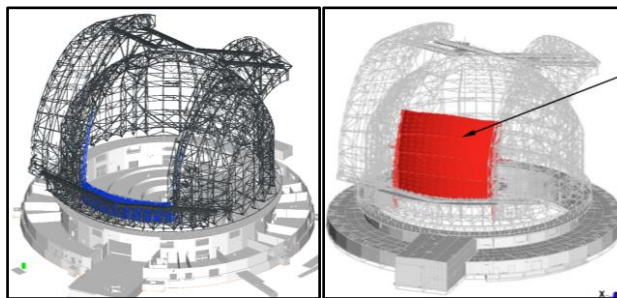
Fuente: Captura del autor del modelo 3D DMS Composite Model (Navisworks), adaptado de Selva (2025).

Impacto en la observación: Fallas en estos subsistemas se traducen directamente en imposibilidad de observar (no se puede apuntar ni abrir/cerrar) o en restricciones operacionales fuertes (velocidad de seguimiento, ventanas de observación).

c. Windscreen:

Estructura móvil ubicada en el interior del domo, compuesta por paneles/segmentos que se desplazan guiados y accionados por motores, siguiendo la abertura. Su función es “recortar” el viento que incide sobre el telescopio y reducir turbulencias.

Figura 11: Windscreen



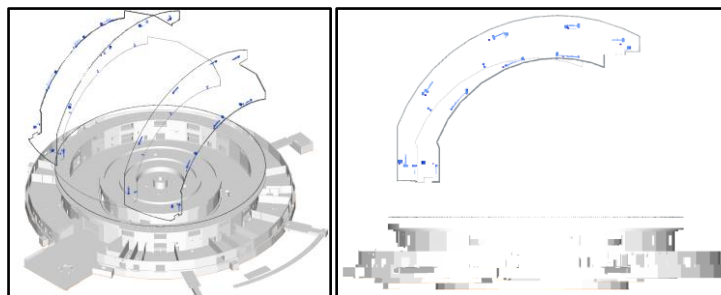
Fuente: Captura del autor del modelo 3D DMS Composite Model (Navisworks), adaptado de Selva (2025).

Impacto en la observación: En caso de fallas (no se posiciona, se queda trabado, pierde rigidez), disminuye el rango de velocidades de viento admisibles y empeora la calidad de imagen (seeing), limitando las condiciones en que se puede observar.

d. Latching System:

Sistema de enclavamiento mecánico de las DSD: conjuntos de pestillos, ganchos, cuñas y actuadores distribuidos en la estructura de las puertas y el bastidor del domo, con sensores y lógica de enclavamiento.

Figura 12: Latching System



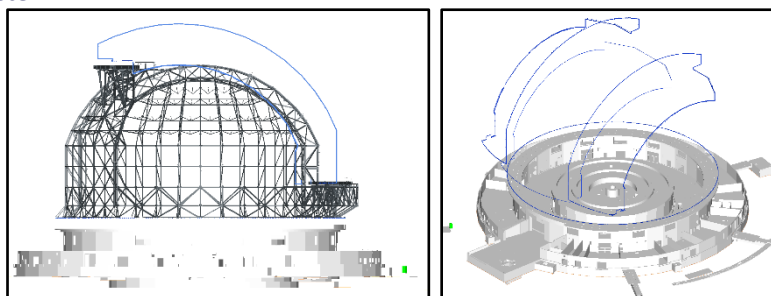
Fuente: Captura del autor del modelo 3D DMS Composite Model (Navisworks), adaptado de Selva (2025).

Impacto en la observación: Si el sistema no enclava correctamente, se imponen restricciones de viento, se incrementa el riesgo de daños estructurales y puede impedir la apertura/cierre → pérdida de disponibilidad.

e. Sealing System:

Sistema principal de sellos del domo: sellos inflables y lineales que aseguran la estanqueidad entre componentes móviles (por ejemplo, entre slit doors y estructura, entre domo y estructuras adyacentes).

Figura 13: Sealing System



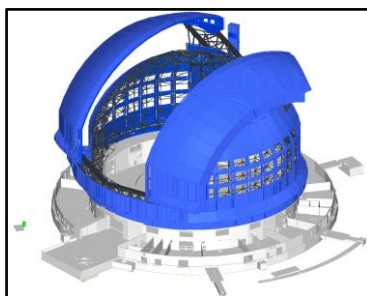
Fuente: Captura del autor del modelo 3D DMS Composite Model (Navisworks), adaptado de Selva (2025).

Impacto en la observación: Si el sellado se degrada, aumenta el riesgo de contaminación de los espejos y equipos, se producen filtraciones y se compromete la estabilidad térmica, lo que deriva en más tiempo de mantenimiento y degradación de la calidad de observación.

f. Cladding Sealing & Drainage:

Envoltorio externa del domo: paneles de recubrimiento fijados a la estructura, sellos secundarios, juntas y sistema de drenaje (canales, bajantes, puntos de descarga) que guían el agua de lluvia y condensación.

Figura 14: Cladding, Sealing & Drainage



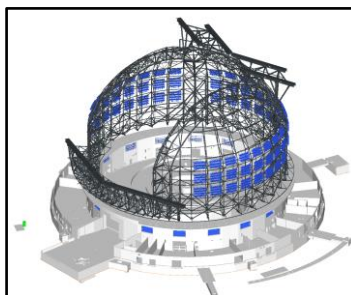
Fuente: Captura del autor del modelo 3D DMS Composite Model (Navisworks), adaptado de Selva (2025).

Impacto en la observación: Fugas, paneles dañados o drenajes obstruidos generan filtraciones, corrosión y degradación de equipos, lo que puede provocar paradas prolongadas para reparación y pérdida de disponibilidad del telescopio.

g. Louvers:

Conjunto de compuertas regulables integradas en el revestimiento del domo. Se abren y cierran mediante actuadores para controlar la ventilación y el intercambio de aire entre interior y exterior.

Figura 15: Louvers



Fuente: Captura del autor del modelo 3D DMS Composite Model (Navisworks), adaptado de Selva (2025).

Impacto en la observación: Son clave para el control térmico: permiten igualar la temperatura interna con el ambiente nocturno y reducir gradientes térmicos que generan turbulencia. Si los Louvers no funcionan (atascos, actuadores fallando, posición incorrecta), se restringen las condiciones en las que se puede observar con buena calidad de imagen.

3. Modelos de Criticidad: Opciones y Selección

3.1 Tipos de análisis de criticidad

Antes de seleccionar la metodología de criticidad más adecuada es necesario conocer los principales enfoques de análisis disponibles, ya que, cada uno de ellos requieren distintos niveles de información y cuentan con ventajas y desventajas dependiendo del contexto de aplicación. A continuación, se presentan los tres enfoques más utilizados en la literatura y en la práctica industrial.

- **Cualitativo:** Clasifican los activos a través de juicio experto estructurado según consecuencias en seguridad, ambiente, continuidad y calidad. Útiles cuando la información disponible es limitada.
- **Cuali–cuantitativos:** Estiman la criticidad como Riesgo combinando frecuencia de falla (FF) y consecuencia (C) en escalas discretas para ubicar cada ítem en una matriz de criticidad y priorizar acciones.
- **Multicriterio:** Organizan objetivo–criterios–alternativas y producen un ranking integrando criterios heterogéneos; métodos como AHP permiten ponderaciones explícitas y control de consistencia.

El concepto de Riesgo es definido por (Woodhouse, 1996) como: “posibilidad de ocurrencia de un evento que puede generar consecuencias sobre los humanos, el ambiente y las instalaciones”.

3.2 Criterios para seleccionar el método

Se definieron los siguientes criterios que deben estar cubiertos por el método a utilizar:

- Capacidad de adecuar los criterios de evaluación con las estimaciones del análisis RAM.
- Combinar criterios de distinta naturaleza (continuidad, mantenibilidad, seguridad, repuestos, etc.)
- Trazabilidad y auditabilidad: Pesos de criterios visibles, reglas claras, reproducibilidad.
- Consistencia interna: Posibilidad de medir y mejorar la coherencia de juicios.
- Esfuerzo de aplicación: Tiempo y carga cognitiva razonable para el panel de expertos.
- Replicabilidad: Facilidad para aplicar el mismo procedimiento a otros subsistemas/PBS.

3.3 Opciones y selección

Para seleccionar el método adecuado al caso de estudio se consideraron dos metodologías utilizadas en la gestión de activos y que se adecúan al contexto del presente trabajo. La Matriz de Criticidad Cualitativa de Riesgo (MCCR) y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Ambas permiten priorizar activos o subsistemas a partir de criterios técnicos, pero difieren en ciertos aspectos.

- Opción A — Matriz de Criticidad Cualitativa de Riesgo (MCCR)**

La MCCR evalúa el factor riesgo por activo/sistema combinando la Frecuencia de Falla (FF) y sus consecuencias (C), cuyos valores se encuentran establecidos en escalas definidas por expertos y ubica cada uno de los elementos evaluados en una matriz con zonas de riesgo (verde, amarillo y rojo) que indican el nivel de criticidad.

- Opción B — Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)**

El AHP es un método del tipo multicriterio que organiza en una estructura jerárquica el análisis (objetivo-criterio-alternativas). Estos criterios son evaluados a través de comparaciones pareadas para asignar pesos relativos a cada uno de ellos. Al igual que la MCCR permite integrar juicios expertos, combinar criterios de distinta naturaleza, pero su diferencia radica en que existe una medición de la consistencia de los juicios utilizados para determinar el peso de cada criterio.

Con los criterios presentados anteriormente se evaluaron ambas alternativas, asignando puntajes relativos (entre 1 y 5) según su desempeño en cada uno de ellos. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos, los cuales ayudan a fundamentar la decisión metodológica.

Tabla 3: Evaluación metodológicas

Criterio de selección	MCCR	Puntaje (1-5)	AHP	Puntaje (1-5)
Combinación de criterios	La consecuencia se desglosa en sub criterios que pueden definirse (seguridad, ambiente, calidad, producción, etc.)	5	Permite integrar múltiples criterios heterogéneos (MTBF, MTTR, continuidad, seguridad, higiene, ambiente, repuestos, etc).	5
Ponderación de criterios	No existe ponderación por criterio	2	Ponderaciones explícitas	5
Consistencia de los juicios	No verifica consistencia	1	Incluye índice y razón de consistencia (CI/CR); permite validar y corregir juicios.	5
Esfuerzo de aplicación	Medio; relativamente rápido de aplicar.	5	Medio-alto; requiere sesiones facilitadas y comparaciones.	3
Replicabilidad	Fácilmente replicable	5	Fácilmente replicable	5
-----	Total MCCR	18	Total AHP	23

Fuente: Elaboración propia en base a criterios de selección.

Los resultados obtenidos permiten concluir que, bajo los criterios definidos para este estudio, el método AHP resulta el más adecuado debido a su capacidad para integrar múltiples criterios, exigir consistencia en los juicios y ofrecer trazabilidad en la jerarquización.

4. Aplicación AHP

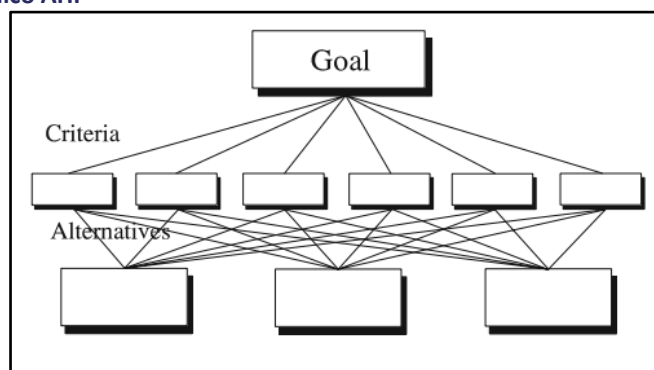
4.1 Metodología AHP

“El proceso jerárquico analítico (AHP) es un enfoque básico para la toma de decisiones. Está diseñado para abordar tanto lo racional como lo intuitivo con el fin de seleccionar la mejor opción entre varias alternativas evaluadas en función de varios criterios” (Saaty & Vargas, 2012, p. 1). En otras palabras, el AHP es una metodología del tipo multicriterio utilizada para apoyar decisiones complejas donde intervienen una diversidad de factores tanto cualitativos como cuantitativos. De acuerdo con Parra (2006), esta metodología permite estructurar un problema en niveles jerárquicos, facilitando la comparación sistemática de criterios y alternativas para obtener una priorización consistente y trazable. La metodología se desarrolla en 4 pasos principales:

4.1.1 Definir los criterios y la estructura jerárquica

La mejor y más simple forma de estructurar un problema de decisión es a través de una jerarquía que considera 3 niveles: el objetivo, los criterios y las alternativas (Saaty & Vargas, 2012). En la figura presentada a continuación se aprecia de manera gráfica el modelo que considera esta estructura.

Figura 16: Modelo jerárquico AHP



Fuente: Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process (2.ª ed., p. 3). Springer.

4.1.2 Llevar a cabo las comparaciones pareadas

“El responsable de la toma de decisiones lleva a cabo simples juicios de comparación por pares que luego se utilizan para desarrollar prioridades generales para clasificar las alternativas” (Saaty y Vargas, 2012, p. 1). Para ello, los autores establecen una escala fundamental para realizar la comparación pareada entre criterios.

Tabla 4: Escala de Saaty para comparación de criterios

Valor	Descripción	Explicación
1	Igual importancia	Ambos elementos contribuyen por igual al objetivo.
2	Importancia débil	Preferencia muy leve por un elemento.
3	Importancia moderada	Experiencia y juicio favorecen levemente a un elemento.
4	Moderado plus	Preferencia algo más marcada que una moderada.
5	Importancia fuerte	Un elemento es claramente preferido.
6	Fuerte plus	Preferencia muy marcada, pero sin llegar a ser extrema.
7	Muy fuerte / demostrada	Dominancia evidente basada en la experiencia.
8	Muy, muy fuerte	Grado de afirmación casi máximo.
9	Importancia extrema	La evidencia es del nivel más alto posible.

Fuente: Elaboración propia a partir de Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012, p. 6), Models, methods, concepts & applications of the Analytic Hierarchy Process (2.ª ed.). Springer.

4.1.3 Calcular pesos y evaluar la consistencia de los juicios

La comparación por pares se realiza mediante una matriz de juicios, a partir de la cual se obtiene el **vector propio principal**, que permite determinar los pesos relativos de los criterios evaluados.

La metodología AHP permite evaluar la consistencia de los juicios de la evaluación de los criterios, a través del cálculo del índice de consistencia (CI) y el ratio de consistencia (CR) de una matriz de juicios $n \times n$. Estos valores vienen dados por:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad CR = \frac{CI}{RI}$$

Donde:

- $\lambda_{\max}$. corresponde al mayor valor propio de la matriz de comparación.
- RI es el **Índice Aleatorio**, que representa el valor promedio del CI obtenido a partir de matrices aleatorias de tamaño $n \times n$.

Los valores de RI utilizados en este estudio se presentan en la Tabla 5 a continuación.

Tabla 5: Valores RI según tamaño de matriz

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random consistency index (R.I.)	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Fuente: Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012, p. 9), Models, methods, concepts & applications of the Analytic Hierarchy Process (2.ª ed.). Springer.

Se consideran aceptables los juicios si $CR \leq 0,1$. De no ser así, se estaría en presencia de inconsistencia en los juicios para evaluar los criterios, y en este caso debería repetirse inmediatamente la evaluación, además de ahondar más en los criterios evaluados (Parra, 2006).

4.1.4 Obtención del ranking final

Una vez calculados los pesos de los criterios, se calculan las “jerarquizaciones locales” para cada alternativa, lo que consiste en evaluar su desempeño en cada criterio, de esta manera cada criterio obtiene una jerarquización interna de las opciones evaluadas.

Luego, siguiendo la metodología AHP, cada prioridad local se multiplica por el peso del criterio correspondiente, incorporando así la contribución (peso) de cada criterio en el resultado final. Tal como señala Parra (2006), “el valor final de cada alternativa se obtiene de la combinación lineal entre la ponderación del criterio y el puntaje de la alternativa respecto de ese criterio”.

Finalmente, se realiza la suma de los puntajes de cada alternativa a través de todos los criterios, obteniendo así su valor global o jerarquización final. Estos valores permiten construir el ranking final de criticidad ordenando de mayor a menor las alternativas en base a su puntaje total.

4.2 Aplicación AHP a subsistemas ELT

Antes de presentar la aplicación del método, es importante señalar que, tanto para la definición de los criterios, como para la evaluación de pesos, se reunió a un grupo de trabajo conformado por el autor del presente estudio y un grupo de expertos con experiencia en el observatorio y en el mantenimiento de sus equipos y sistemas, lo anterior con la intención de contar con una evaluación realista y fundamentada con experiencia tangible.

A continuación, se presentan las personas que participaron en el proceso:

- Matteo Pozzobon
Supervisor técnico de integración mecánica proyecto ELT-DMS.
12 años de experiencia directa en Paranal en roles de integración y liderazgo mecánico.
- Juan Millar
Ingeniero de mantenimiento y soporte.
10+ años de experiencia directa en observatorios (ALMA, VLT y ELT), con foco en confiabilidad y Job Plans de alta criticidad.
- Waldo Siclari
Ingeniero de planificación.
22 años de experiencia directa en el observatorio (Paranal), en roles técnicos y de planificación.

- d. Oscar Briones (Autor)
Planificador de mantenimiento
5 años de experiencia en observatorio Paranal, 4 como técnico mecánico.

Para la aplicación del presente caso de estudio se llevaron a cabo, de manera estructurada, los 4 pasos presentados anteriormente.

4.2.1 Elaboración de modelo jerárquico

Para iniciar la aplicación del AHP, en primera instancia se construyó un modelo jerárquico que estructura el problema de decisión en tres niveles: el objetivo, los criterios y las alternativas.

Para este modelo, el principal objetivo es jerarquizar los subsistemas del grupo seleccionado. Los criterios para evaluar fueron propuestos por el grupo de expertos según su experiencia y se presentan a continuación.

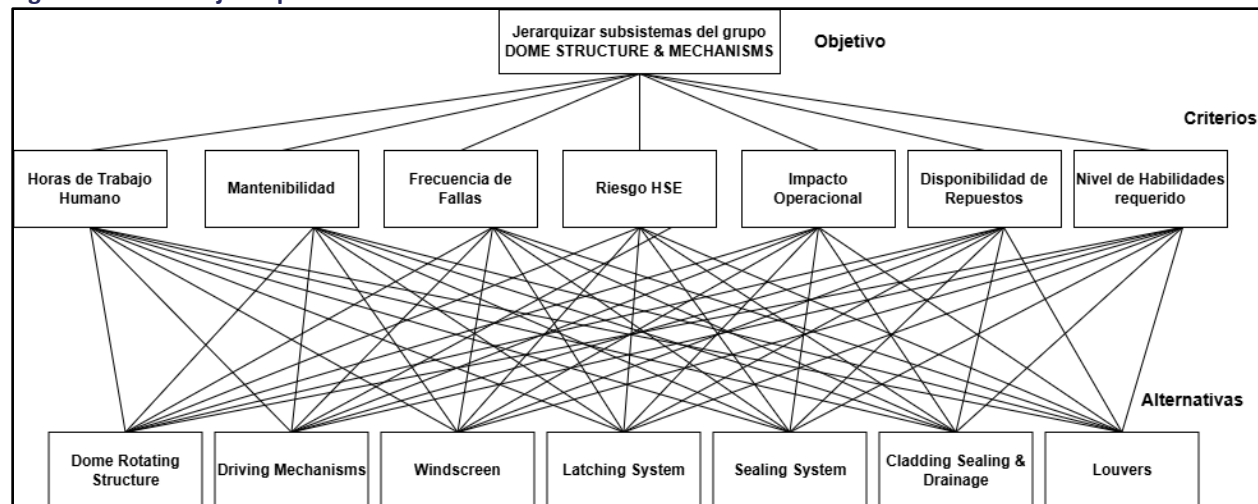
- **Horas de trabajo humano (HH):** En base a datos de MLH (Man Labor Hours) anuales obtenidos de la cantidad de recursos por Job Plan.

$$MLH_{anual} = Duración\ JP\ [h] \times Cantidad\ de\ personal \times Cantidad\ de\ activos \times Frecuencia\ anual\ \left[\frac{1}{y}\right]$$

- **Mantenibilidad (M):** Apoyado en valores de MTTR provenientes del análisis RAM.
- **Frecuencia de Fallas (FF):** Apoyado en valores de MTBF provenientes del análisis RAM
- **Riesgo salud, seguridad y medio ambiente (HSE):** Riesgos asociados a la ocurrencia de fallas y a la elaboración de actividades de mantenimiento.
- **Impacto Operacional (IO):** Impacto de las fallas en la operación del telescopio.
- **Disponibilidad de repuestos (DR):** Nivel de disponibilidad de repuestos, plazos de entrega, complejidad de adquisición de repuestos.
- **Nivel de Habilidades Requerido (NHR):** Nivel de capacitación/certificación del personal, necesaria para la realización de las actividades de mantenimiento.

Establecidos los criterios, se agregan las alternativas a evaluar al modelo, las cuales corresponden al grupo de subsistemas de DOME STRUCTURE & MECHANISMS seleccionados anteriormente. El modelo desarrollado para este estudio se presenta a continuación.

Figura 17: Modelo jerárquico AHP caso de estudio



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Comparaciones pareadas

Una vez definido el modelo, se llevaron a cabo, junto al grupo de expertos, las comparaciones pareadas de los criterios utilizando la escala propuesta por Saaty presentada anteriormente (ver tabla 4).

Tabla 6: Comparación por pares de criterios

Matriz comparaciones pareadas	HH	M	FF	HSE	IO	DR	NHR
HH	1.000	3.000	0.500	0.143	0.250	0.333	0.500
M	0.333	1.000	0.333	0.143	0.167	0.333	2.000
FF	2.000	3.000	1.000	0.143	1.000	2.000	2.000
HSE	7.000	7.000	7.000	1.000	7.000	7.000	7.000
IO	4.000	6.000	1.000	0.143	1.000	4.000	4.000
DR	3.000	3.000	0.500	0.143	0.250	1.000	1.000
NHR	2.000	0.500	0.500	0.143	0.250	1.000	1.000

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Cálculo pesos y evaluación de consistencia

Realizadas las comparaciones pareadas, se obtuvo el vector de prioridades que refleja el peso relativo (W) de cada criterio dentro del análisis. Posteriormente, se evaluó la coherencia interna de los juicios mediante el índice de consistencia (CI) y el ratio de consistencia (CR), verificando que el valor de CR sea menor a 0,1. Cabe señalar que el cálculo de λ máx se realizó con un código de Google Colab® (ver figura 18) y, a modo de doble chequeo, se utilizaron la página web www.matrixcalc.org y herramientas IA tales como Chat GPT®, Gemini® y MS Copilot® para comparar los resultados.

Tabla 7: Cálculo pesos y CR

Matriz comparaciones pareadas	Mi Geométrica	Peso (W)	Lambda max	7.79
HH	0.51	0.05	CI	0.13
M	0.40	0.04	RI	1.35
FF	1.19	0.11	CR	0.098
HSE	5.30	0.50		
IO	1.77	0.17		
DR	0.77	0.07		
NHR	0.56	0.05		
Total	10.51	1.00		

Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Código Google Colab

```

Método de autovalores a través de numpy

if matriz_A.shape != (7, 7):
    raise ValueError(f"Esperaba una matriz 7x7 y obtuve {matriz_A.shape}")

# Autovalores
eig_vals, eig_vecs = np.linalg.eig(matriz_A)
eigen_max = float(np.max(eig_vals.real))

print(f"λmax = {eigen_max:.4f}")

# Escribir en la hoja
worksheet.update_cell(row=10, col=2, value=eigen_max)

λmax = 7.7949
    
```

Fuente: Elaboración propia; captura del notebook Lambda max.ipynb en Google Colab.

4.2.4 Priorización local y ranking final

Con los pesos ya determinados y la consistencia evaluada, se determinó el desempeño de cada subsistema en cada criterio para obtener las prioridades locales. Para los criterios de Mantenibilidad y Frecuencia de Fallas, hay casos en los que el subsistema no cuenta con un valor numérico, por lo que, en su lugar se evalúa de manera cualitativa. Las evaluaciones se realizaron en base a las tablas presentadas a continuación.

Tabla 8: Escala evaluación HH

Horas de trabajo humano (HH)		
Valor	Rango MLH	Descripción del esfuerzo
1	≤ 40	Esfuerzo muy bajo
2	40–60	Muy bajo
3	60–80	Bajo
4	80–100	Bajo–medio
5	100–130	Medio
6	130–160	Medio
7	160–200	Medio–alto
8	200–250	Alto
9	250–300	Muy alto
10	> 300	Extremadamente alto

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Escala evaluación M

Tipo de evaluación	Rango / Categoría	Valor	Definición
MTTR cuantitativo	≤ 1.5 h	2	Muy alta mantenibilidad (recuperación muy rápida)
	1.5–2.0 h	3	Alta mantenibilidad
	2.0–2.5 h	4	Mantenibilidad media-alta
	2.5–3.0 h	6	Mantenibilidad media
	3.0–3.5 h	7	Mantenibilidad media-baja
	> 3.5 h	8	Baja mantenibilidad (recuperación lenta)
Evaluación cualitativa (cuando MTTR no aplica)	Muy alto	2	Acceso directo, tareas simples, recuperación rápida
	Alto	3–4	Intervenciones planificables, medios estándar
	Medio	6	Acceso restringido, coordinación y permisos requeridos
	Medio-bajo	7	Equipamiento auxiliar requerido, mayor esfuerzo de preparación
	Bajo	8	Intervenciones mayores, alto impacto operacional
	Muy bajo	9	Obras estructurales complejas, plazos largos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Escala evaluación FF

Tipo de evaluación	MTBF / Categoría	Valor	Definición
MTBF cuantitativo	> 1,000,000 h	2	Fallas extremadamente raras
	500,000 – 1,000,000 h	3	Frecuencia muy baja
	200,000 – 500,000 h	4	Frecuencia baja
	100,000 – 200,000 h	6	Frecuencia media
	50,000 – 100,000 h	7	Frecuencia media-alta
	< 50,000 h	8	Alta frecuencia de fallas
Evaluación cualitativa (cuando MTBF no aplica)	Muy bajo	2	Fallas excepcionales / históricas
	Bajo	3–4	Fallas poco frecuentes
	Medio	6	Fallas ocasionales
	Medio-alto	7	Fallas recurrentes
	Alto	8	Fallas frecuentes
	Muy alto	9	Fallas dominantes / sistémicas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Escala evaluación HSE

Valor	Nivel de impacto HSE	Definición
1	Impacto muy bajo	Sin impacto HSE relevante por falla del subsistema o por actividades de mantenimiento; limitado a perturbaciones menores u orden y aseo.
3	Impacto bajo	La falla o el mantenimiento pueden causar incidentes de primeros auxilios o fugas menores, con baja exposición y sin impacto ambiental significativo.
5	Impacto medio	La falla o el mantenimiento pueden causar lesiones leves a moderadas, caída de objetos pequeños o fugas localizadas, controlables con medidas estándar.
7	Impacto alto	La falla o el mantenimiento pueden resultar en lesiones graves, caída de cargas, atrapamientos o daño ambiental localizado significativo.
10	Impacto muy alto	La falla o el mantenimiento pueden conducir a fatalidad(es), colapso parcial, liberación mayor de energía o contaminación ambiental severa.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Escala evaluación IO

Valor	Nivel de impacto en la Operación (IO)	Definición (en términos de pérdida de tiempo)
1	Impacto muy bajo	El subsistema casi nunca genera pérdida de tiempo; solo eventos menores y ocasionales.
3	Impacto bajo	Genera pérdidas de tiempo esporádicas, pero manejables.
5	Impacto medio	Provoca pérdidas de tiempo de manera recurrente.
7	Impacto alto	Fuente significativa de pérdida de tiempo.
10	Impacto muy alto	Problema crónico; restringe seriamente la disponibilidad científica del telescopio.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13: Escala evaluación DR

Valor	Nivel de impacto DR	Definición
1	Muy bajo	Repuestos estándar; fácilmente disponibles en stock o con proveedores locales.
3	Bajo	Disponibles internamente o con plazos de entrega cortos.
5	Medio	Stock limitado; se requiere compra con plazo de entrega moderado.
7	Alto	Plazos de entrega largos; dependencia de proveedores o fabricación específica.
10	Muy alto	Repuestos únicos o a medida; plazos de entrega muy largos o suministro de fuente única.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Escala evaluación NHR

Valor	Nivel de impacto NHR	Definición
1	Muy bajo	Tareas mecánicas básicas; técnicos generales, capacitación mínima.
3	Bajo	Tareas estándar de mantenimiento; técnicos capacitados fácilmente disponibles.
5	Medio	Se requieren técnicos especializados; se necesita experiencia interna.
7	Alto	Habilidades o certificaciones altamente especializadas; personal limitado.
10	Muy alto	Se requiere conocimiento a nivel experto; fuerte dependencia de individuos clave o soporte externo.

Fuente: Elaboración propia

De la evaluación se obtuvieron las prioridades locales por cada criterio, cuyos resultados se presentan a continuación.

Tabla 15: Prioridades locales

Subsistema	HH	Prioridad Local HH	M	Prioridad Local M	FF	Prioridad Local FF	HSE	Prioridad Local HSE	IO	Prioridad Local IO	DR	Prioridad Local DR	NHR	Prioridad Local NHR
Dome Rotating Structure	3	0.09	7	0.15	2	0.06	10	0.15	8	0.16	7	0.16	7	0.18
Azimuth Rotation Mechanism	10	0.29	4	0.09	7	0.21	5	0.08	10	0.20	5	0.11	4	0.10
Dome Slit Doors	5	0.14	4	0.09	3	0.09	10	0.15	10	0.20	5	0.11	4	0.10
Windscreen	6	0.17	8	0.17	4	0.12	7	0.11	7	0.14	6	0.14	5	0.13
Latching System	3	0.09	3	0.07	3	0.09	7	0.11	5	0.10	6	0.14	5	0.13
Sealing System	2	0.06	6	0.13	4	0.12	10	0.15	5	0.10	7	0.16	6	0.15
Cladding Sealing & Drainage	2	0.06	8	0.17	3	0.09	10	0.15	3	0.06	4	0.09	4	0.10
Louvers	4	0.11	6	0.13	7	0.21	6	0.09	3	0.06	4	0.09	4	0.10
TOTAL	35		46		33		65		51		44		39	

Fuente: Elaboración propia

Luego, estas prioridades se combinaron linealmente con los pesos de los criterios, obteniendo así los valores globales de cada subsistema.

Tabla 16: Priorización Global

Subsistemas	Prioridad Local HH		Prioridad Local M		Prioridad Local FF		Prioridad Local HSE		Prioridad Local IO		Prioridad Local DR		Prioridad Local NHR		Jerarquización Final
	Peso	0.05	Peso	0.04	Peso	0.11	Peso	0.50	Peso	0.17	Peso	0.07	Peso	0.05	
Dome Rotating Structure	0.09		0.15		0.06		0.15		0.16		0.16		0.18		0.14
Azimuth Rotation Mechanism	0.29		0.09		0.21		0.08		0.20		0.11		0.10		0.13
Dome Slit Doors	0.14		0.09		0.09		0.15		0.20		0.11		0.10		0.15
Windscreen	0.17		0.17		0.12		0.11		0.14		0.14		0.13		0.12
Latching System	0.09		0.07		0.09		0.11		0.10		0.14		0.13		0.10
Sealing System	0.06		0.13		0.12		0.15		0.10		0.16		0.15		0.14
Cladding Sealing & Drainage	0.06		0.17		0.09		0.15		0.06		0.09		0.10		0.12
Louvers	0.11		0.13		0.21		0.09		0.06		0.09		0.10		0.10

Fuente: Elaboración propia

Con todo lo anterior, se puede obtener el ranking final que ordena los subsistemas según su nivel de criticidad, junto a ello, se debe determinar el nivel de criticidad que utiliza el CMMS MAXIMO®. Para esto último se aplicó un criterio basado en cuartiles, utilizando los valores de jerarquización obtenidos en el análisis, dicho criterio ayuda a determinar umbrales de clasificación y ayuda a evitar arbitrariedad en la asignación de los niveles de criticidad. Se presenta en la siguiente tabla la obtención de dichos cuartiles y la determinación de los rangos a utilizar.

Tabla 17: Obtención cuartiles y rangos

Subsistemas	Jerarquización Final	Posición		Cuartil	Posición	Valor
Louvers	0.10	1		Q1	2	0.10
Latching System	0.10	2		Q2	4	0.125
Cladding Sealing & Drainage	0.12	3		Q3	6	0.14
Windscreen	0.12	4				
Azimuth Rotation Mechanism	0.13	5				
Sealing System	0.14	6				
Dome Rotating Structure	0.14	7				
Dome Slit Doors	0.15	8				
Total	1.00					
				Rango cuartil	Rango valor	Criticidad
				≥ Q3	≥ 0.14	High
				Q1 < valor < Q3	0.1 < valor < 0.14	Medium
				≤ Q1	≤ 0.10	Low

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se obtiene la clasificación de los subsistemas en base a su ranking y el nivel de criticidad de acuerdo con el valor de jerarquización obtenido y su posición en los rangos de los cuartiles.

Tabla 18: Clasificación final subsistemas

Subsistemas	Jerarquización Final	Ranking	Criticidad CMMS
Dome Slit Doors	0.15	1	High
Dome Rotating Structure	0.14	2	High
Sealing System	0.14	3	High
Azimuth Rotation Mechanism	0.13	4	Medium
Windscreen	0.12	5	Medium
Cladding Sealing & Drainage	0.12	6	Medium
Latching System	0.10	7	Low
Louvers	0.10	8	Low
Total	1.00		

Fuente: Elaboración propia

Esta clasificación no forma parte intrínseca del método AHP, sino que corresponde a una decisión de gestión posterior, orientada a traducir los resultados obtenidos en las categorías que indica el CMMS y que se deben incluir en los Job Plans.

5. Análisis de resultados y propuestas de mejora

5.1 Limitaciones y alcance propuestas de mejora

Para poder determinar los planes de mejora propuestos a raíz de los resultados obtenidos de la jerarquización, se deben tener en cuenta las limitaciones propias del contexto del estudio. En primer lugar, el uso de la metodología AHP es una propuesta que se fundamenta bajo la ausencia de históricos operacionales del ELT en construcción y el uso de juicio experto apoyado en la homología de los subsistemas presentes en ambos telescopios. Bajo esta premisa, se debe indicar que tanto la metodología aplicada como los resultados obtenidos son susceptibles a cambios una vez que se cuente con datos operacionales reales, sin embargo, los resultados obtenidos representan una priorización relativa inicial que busca ser un aporte a la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento del telescopio.

Por otra parte, debido a la envergadura del proyecto y para ajuste al presente trabajo, la jerarquización se realiza a nivel de subsistemas del ELT, lo que permite apoyar el proceso de creación de Job Plans estableciendo el nivel de criticidad de estos según el subsistema al que pertenezcan, de la misma manera, los resultados se proponen como un recurso para la asignación de recursos y la gestión de los riesgos y de inventario. Sin embargo, esta jerarquización no sustituye el análisis más detallado a nivel de equipos, modos de fallo y tareas específicas, tales como RCM (Reliability - Centered Maintenance) y Análisis de costo de ciclo de vida (ACCV) por ejemplo.

5.2 Propuestas para la toma de decisiones y la gestión de activos

Los resultados obtenidos de la jerarquización mediante la metodología AHP representan un insumo relevante para la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento, ya que, permiten determinar la prioridad de los Job Plans actualmente en desarrollo y abordar la problemática identificada. La jerarquización de subsistemas desarrollada en este estudio contribuye a la gestión de activos del observatorio al proporcionar un criterio objetivo para orientar la toma de decisiones, alineando las acciones de mantenimiento con los objetivos de disponibilidad, seguridad y calidad de observación. En este sentido, la jerarquización permite focalizar los recursos y esfuerzos de gestión en aquellos subsistemas cuya falla genera mayores impactos

Con la clasificación obtenida, es posible identificar aquellos subsistemas sobre los cuales vale la pena concentrar los esfuerzos analíticos adicionales, tales como ACCV y RCM, que forman parte también del proceso de gestión de mantenimiento propuesto por el MGM. Debido a que este tipo de estudios requieren un consumo significativo de tiempo, información, y recursos especializados, no pueden simplemente aplicarse a todos los subsistemas. En el caso del ACCV, esta focalización cobra especial relevancia, considerando que “todos los costos asociados al ciclo de vida de un activo, desde la necesidad de adquirirlo hasta su retiro, son soportados por el usuario” (Wilson, 1986). Es por ello por lo que **una de las propuestas** guarda relación con la aplicación de este tipo de análisis a los subsistemas clasificados con criticidad “High”, tanto para los subsistemas analizados en el presente estudio y los que se aborden en el futuro.

Cabe mencionar que existe, para el proceso de elaboración de los JPs, una etapa de validación por los ingenieros a cargo de los subsistemas, por lo que, desde el punto de vista de la toma de decisiones en la planificación de mantenimiento, **la segunda propuesta** consiste en utilizar los resultados obtenidos en esta etapa de validación, y determinar en base al nivel de criticidad, un orden tanto para la elaboración como para el proceso de revisión y validación de estos JPs. Una de las ventajas que ofrece esta propuesta es que, de esta manera, es posible atender de manera temprana, las desviaciones, comentarios y eventuales reprocesos provenientes de la revisión.

Adicionalmente, los resultados de la jerarquización permiten reforzar la gestión de riesgos asociadas a las actividades de mantenimiento. En el contexto de la elaboración de los JPs, existe en la planilla de la figura 4, una sección donde se debe indicar la documentación adjunta al JP. En ella, se deben incluir obligatoriamente para el subsistema/equipo en cuestión: el manual de mantenimiento/procedimiento de referencia, él o los planos y el **análisis de riesgo asociado**. Es bajo este requerimiento, que la jerarquización se propone como un criterio objetivo para establecer los plazos, niveles de profundidad y rigor requerido para la elaboración de estos análisis de riesgo, apoyados, además, en el hecho de que uno de los criterios para la evaluación de los subsistemas, y que cuenta con un mayor peso, es justamente el nivel de riesgo asociados a la ocurrencia de fallas y la realización de las actividades de mantenimiento. En este sentido, los Job Plans asociados a subsistemas de **alta criticidad** deben contar con análisis de riesgos más exhaustivos, incorporando una identificación detallada de peligros y medidas de control reforzadas.

Otro aporte de la clasificación obtenida guarda relación con el apoyo que generan los resultados para la gestión de inventarios y repuestos críticos. Dicha identificación permite orientar la definición de políticas de stock diferenciadas, priorizando la adquisición y disponibilidad de repuestos asociados a aquellos subsistemas cuyas fallas tendrían mayores consecuencias sobre la continuidad operacional, o bien, a los subsistemas cuyos valores de prioridad local para el criterio **DR** sean mayores. Esto también se traduce en una contribución a reducir el riesgo de paradas prolongadas por falta de repuestos y a mejorar la toma de decisiones en la planificación de inventarios.

Finalmente, la metodología aplicada se propone como una guía replicable para la jerarquización de otros subsistemas del observatorio, con la indicación de que, dependiendo de la naturaleza de los subsistemas, se deben adecuar los criterios al contexto técnico de estos. En particular, para subsistemas de naturaleza distinta a los evaluados en este estudio —como sistemas ópticos, criogénicos o instrumentos— el equipo de trabajo debe componerse de expertos que conozcan este tipo de sistemas y los criterios de evaluación deben ser revisados y replanteados, ya que los criterios a evaluar pueden diferir significativamente a los trabajados en este estudio.

5.3 Cómo disminuir la criticidad

La criticidad expuesta en este estudio no se debe entender como una característica fija o rígida en el tiempo para todos los criterios evaluados. El valor de criticidad puede variar durante el ciclo de vida del subsistema, dependiendo del criterio evaluado. Si bien hay criterios cuyo valor probablemente será siempre el mismo —como el impacto operacional— hay otros criterios para los cuales se pueden implementar mejoras y acciones que mitiguen los impactos que generan las fallas de los subsistemas. Lo anterior, no implica necesariamente reducir su probabilidad de falla, sino actuar sobre aquellos factores que determinan las consecuencias de dicha falla y la capacidad del sistema para recuperarse de ella. En este sentido, la jerarquización desarrollada en este trabajo permite establecer una guía para que para dichos subsistemas de **alta criticidad** se consideren como principales candidatos a acciones de mitigación que ayuden a disminuir dicha criticidad.

Desde esta perspectiva, los resultados del análisis permiten identificar de manera explícita **qué criterios contribuyen en mayor medida a la criticidad de cada subsistema**, habilitando la definición de acciones orientadas a su mitigación. A modo de ejemplo, si el criterio de mantenibilidad tiene un peso relevante, acciones como la mejora en accesibilidad, estandarización de procedimientos, disponibilidad de repuestos críticos o reducción de tiempos de intervención contribuyen directamente a disminuir la prioridad local del subsistema este criterio.

Para el caso de subsistemas con alta puntuación en el criterio de salud, seguridad y medio ambiente (HSE), la implementación y/o mejora de medidas de control de riesgo, tales como mejoras de diseño, barreras de protección, procedimientos operativos reforzados y análisis de riesgos más detallados en los Job Plans asociados, pueden ayudar a disminuir la criticidad de los subsistemas asociada a este criterio, que además es el que cuenta con mayor peso en el análisis. En este sentido, la jerarquización permite determinar aquellos subsistemas donde resulta más relevante invertir esfuerzos en la reducción de consecuencias.

6. Referencias

1. Ahmed, N. U. (1995). A design and implementation model for life cycle cost management system. *Information & Management*, 28, 261–269.
2. AENOR. (2018). UNE-EN 13306:2018. Mantenimiento: Terminología del mantenimiento. Asociación Española de Normalización.
3. Blanchard, B. S. (1979). Life cycle costing: A review. *Terotechnology*, 1, 9–15.
4. Crespo, A., Moreu de León, P., Gómez, J., Parra, C., & López, M. (2009). The maintenance management framework. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(2), 167–178.
5. Crespo Márquez, A. (2007). *The maintenance management framework: Models and methods for complex systems maintenance*. Springer.
6. Fabrycky, W. J. (1997). Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. ISDEFE.
7. Gaete, A. (2001). Evaluación de ciclo de vida en activos industriales. En *Actas del Congreso Nacional de Mantenimiento* (pp. 113–120). Santiago de Chile.
8. International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO.
9. International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including BIM—Information management using BIM—Part 1: Concepts and principles. ISO.
10. International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including BIM—Information management using BIM—Part 2: Delivery phase of the assets. ISO.
11. International Organization for Standardization. (2024). ISO 55000:2024 Asset management: Vocabulary, overview and principles. ISO.
12. International Organization for Standardization. (2024). ISO 55001:2024 Asset management systems: Requirements. ISO.
13. Levy, H., & Sarnat, M. (1990). *Capital investment and financial decisions* (4th ed.). Prentice Hall.
14. Moss, T. R., & Woodhouse, J. (1999). Criticality analysis revisited. *Quality and Reliability Engineering International*, 15(2), 117–121.
15. Parra, C. (2006). Análisis de criticidad en sistemas del sector de refinación, aplicando la técnica de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP – Analytical Hierarchy Process) [Informe técnico]. Universidad Técnica Federico Santa María.
16. Parra, C., & Crespo, A. (2015). *Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos* (2.ª ed.). INGEMAN.
17. Parra, C., & Crespo Márquez, A. (2020). Métodos de análisis de criticidad y jerarquización de activos (Nota técnica N.º 3, Draft-Spanish-#-01-Rev.Dic.2019). IngeCon / INGEMAN.
18. Parra, C., & Crespo, A. (2020). Whitepaper V: Criticality analysis methods based on the risk assessment process. INGEMAN.

19. Parra, C., Viveros-Gunckel, P., Kristjanpoller-Rodríguez, F., Crespo-Márquez, A., & González-Prida, V. (2020). Life cycle cost techniques for decision making in maintenance optimization. Case study: oil and gas industry. *DYNA Management*, 8(1). <https://doi.org/10.6036/MN9825>
20. Parra, C., Tino, G., Parra, J. A., Viveros, P., & Kristjanpoller, F. A. (2022). Criticality analysis techniques applied to optimize maintenance management processes: Tools based on the qualitative and quantitative risk model. En V. González-Prida, A. Crespo Márquez, & A. Márquez (Eds.), *Cases on optimizing the asset management process* (pp. 180–207). IGI Global.
21. Parra, C., Moreira, G., Pizarro, F., Duque, P., Aránguiz, A., González-Prida, V., & Parra, J. A. (2024). Implementation of the asset management, operational reliability and maintenance survey in recycled beverage container manufacturing lines. *Information*, 15(12), 784. <https://doi.org/10.3390/info15120784>
22. Riddell, H., & Jennings, A. (2001). Asset investment & life cycle costing [Technical paper]. The Woodhouse Partnership.
23. Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). Models, methods, concepts & applications of the Analytic Hierarchy Process (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>
24. Woodhouse, J. (1991). Turning engineers into businessmen. Ponencia presentada en la 14th National Maintenance Conference, London, UK.
25. Woodhouse, J. (1993). Managing industrial risk. Chapman & Hall.
26. Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing: Theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335–344.

Documentos internos (ESO/Ace)

1. Abbatinali, F., & Terrassan, R. (2019, julio 31). Dome structure & mechanisms—Azimuth rotation mechanism: Lower level specifications (Versión 1) [Especificación técnica interna, ACE-245504]. ATI Astaldi Cimolai (ACE) / ESO.
2. Abbatinali, F., & Terrassan, R. (2021, noviembre 30). Dome—DSD translation mechanism: Lower level specifications (Versión 3) [Especificación técnica interna, ACE-245604]. ATI Astaldi Cimolai (ACE) / ESO.
3. ATI Astaldi Cimolai (ACE). (2019, octubre 31). Cladding design report (ACE-253501) [Informe de diseño interno]. ESO / ACE.
4. Mancini, S., & Stella, D. (2019). Dome: Cladding, sealing & drainage—Maintenance manual (Versión 1, ACE-253520) [Manual interno de mantenimiento]. Astaldi-Cimolai (ACE).
5. Maretto, M., Fabris, N., & Amodio, S. (2021, febrero 25). Dome—Dome structure & mechanisms: Windscreen—Lower level specification (Versión 3) [Especificación técnica interna, ACE-247503]. ATI Astaldi Cimolai (ACE) / ESO.
6. Mazzero, J., Tasselli, S., Barbieri, D., & Mattietto, M. (2019, octubre 31). Dome rotating structure—Seal of sealing system: Design report (Versión 1) [Informe de diseño interno, ACE-249501]. ATI Astaldi Cimolai (ACE) / ESO.
7. Molteni, R., Barbaro, D., & Barbieri, G. (2021). Dome structure & mechanisms: Louvers—Maintenance manual (Versión 2, ACE-255520) [Manual interno de mantenimiento]. BOLDROCCHI s.r.l.
8. Parra, C., & Terrassan, R. (2021, febrero 25). Dome—DSD latching system: Lower level specifications (Versión 2) [Especificación técnica interna, ACE-251503]. ATI Astaldi Cimolai (ACE) / ESO.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La aplicación correcta de metodologías de análisis de criticidad permite reducir el grado de incertidumbre en la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento de los subsistemas, activos y equipos del observatorio. En el presente caso de estudio, el modelo AHP permitió establecer una jerarquización objetiva de los subsistemas, generando un ranking que distingue claramente niveles de criticidad High, Medium y Low.

La ausencia de esta clasificación genera reprocesos significativos, afectando la eficiencia del equipo de planificación. El estudio cuantificó este impacto y cuánto puede mitigarse mediante la aplicación del análisis, demostrando que una clasificación adecuada permite evitar carga administrativa y tiempos improductivos asociados al retrabajo en JP.

La integración de criterios operacionales, de mantenimiento, de seguridad y propios del contexto del observatorio evidenció que la criticidad no depende exclusivamente de la frecuencia de fallas. El análisis confirma que, dependiendo del contexto y la naturaleza de los activos, se deben integrar diversos criterios tales como la mantenibilidad, impacto operacional, riesgos HSE y disponibilidad de repuestos. La metodología resulta replicable para otros subsistemas del telescopio, siempre que se replanteen y reevalúen los criterios según su naturaleza técnica.

El apoyo de expertos con experiencia directa en operación y mantenimiento de telescopios astronómicos fortaleció la validez del modelo, asegurando coherencia técnica en los juicios y en la interpretación de los resultados.

Se recomienda estandarizar la criticidad obtenida e incorporarla en el proceso de elaboración y validación de Job Plans, de manera que el nivel de prioridad quede definido desde el inicio y se eviten reprocesos posteriores. También se sugiere integrar la criticidad con la gestión de riesgos y de inventarios, identificando los subsistemas donde el esfuerzo en la evaluación de riesgos debe ser mayor y definiendo niveles mínimos de stock y listas de repuestos críticos.

Finalmente, se propone establecer un procedimiento formal de aplicación y considerar su uso en otros grupos de subsistemas del ELT, realizando los ajustes metodológicos necesarios —replanteo de criterios, revisión de escalas y selección del equipo evaluador— con el fin de mantener la consistencia técnica. Este procedimiento debe incorporar, cuando sea posible, una guía para la actualización periódica de los valores de criticidad.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, N. U. (1995). A design and implementation model for life cycle cost management system. *Information & Management*, 28, 261–269.

AENOR. (2018). UNE-EN 13306:2018. Mantenimiento: Terminología del mantenimiento. Asociación Española de Normalización.

Blanchard, B. S. (1979). Life cycle costing: A review. *Terotechnology*, 1, 9–15.

Crespo, A., Moreu de León, P., Gómez, J., Parra, C., & López, M. (2009). The maintenance management framework. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(2), 167–178.

Crespo Márquez, A. (2007). The maintenance management framework: Models and methods for complex systems maintenance. Springer.

Fabrycky, W. J. (1997). Análisis del coste de ciclo de vida de los sistemas. ISDEFE.

Gaete, A. (2001). Evaluación de ciclo de vida en activos industriales. En *Actas del Congreso Nacional de Mantenimiento* (pp. 113–120). Santiago de Chile.

International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including BIM—Information management using BIM—Part 1: Concepts and principles. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including BIM—Information management using BIM—Part 2: Delivery phase of the assets. ISO.

International Organization for Standardization. (2024). ISO 55000:2024 Asset management: Vocabulary, overview and principles. ISO.

International Organization for Standardization. (2024). ISO 55001:2024 Asset management systems: Requirements. ISO.

Levy, H., & Sarnat, M. (1990). Capital investment and financial decisions (4th ed.). Prentice Hall.

Moss, T. R., & Woodhouse, J. (1999). Criticality analysis revisited. *Quality and Reliability Engineering International*, 15(2), 117–121.

Parra, C. (2006). Análisis de criticidad en sistemas del sector de refinación, aplicando la técnica de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP – Analytical Hierarchy Process) [Informe técnico]. Universidad Técnica Federico Santa María.

Parra, C., & Crespo, A. (2015). Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos (2.^a ed.). INGEMAN.

Parra, C., & Crespo Márquez, A. (2020). Métodos de análisis de criticidad y jerarquización de activos (Nota técnica N.º 3, Draft-Spanish-#-01-Rev.Dic.2019). IngeCon / INGEMAN.

Parra, C., & Crespo, A. (2020). Whitepaper V: Criticality analysis methods based on the risk assessment process. INGEMAN.

Parra, C., Viveros-Gunckel, P., Kristjanpoller-Rodríguez, F., Crespo-Márquez, A., & González-Prida, V. (2020). Life cycle cost techniques for decision making in maintenance optimization. Case study: oil and gas industry. *DYNA Management*, 8(1). <https://doi.org/10.6036/MN9825>

Parra, C., Tino, G., Parra, J. A., Viveros, P., & Kristjanpoller, F. A. (2022). Criticality analysis techniques applied to optimize maintenance management processes: Tools based on the qualitative and quantitative risk model. En V. González-Prida, A. Crespo Márquez, & A. Márquez (Eds.), *Cases on optimizing the asset management process* (pp. 180–207). IGI Global.

Parra, C., Moreira, G., Pizarro, F., Duque, P., Aránguiz, A., González-Prida, V., & Parra, J. A. (2024). Implementation of the asset management, operational reliability and maintenance survey in recycled beverage container manufacturing lines. *Information*, 15(12), 784. <https://doi.org/10.3390/info15120784>

Riddell, H., & Jennings, A. (2001). Asset investment & life cycle costing [Technical paper]. The Woodhouse Partnership.

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). Models, methods, concepts & applications of the Analytic Hierarchy Process (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>

Documentos internos (ESO/ACe):

Woodhouse, J. (1991). Turning engineers into businessmen. Ponencia presentada en la 14th National Maintenance Conference, London, UK.

Woodhouse, J. (1993). Managing industrial risk. Chapman & Hall.

Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing: Theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335–344.

Abbatinali, F., & Terrassan, R. (2019, julio 31). Dome structure & mechanisms—Azimuth rotation mechanism: Lower level specifications (Versión 1) [Especificación técnica interna, ACe-245504]. ATI Astaldi Cimolai (ACe) / ESO.

Abbatinali, F., & Terrassan, R. (2021, noviembre 30). Dome—DSD translation mechanism: Lower level specifications (Versión 3) [Especificación técnica interna, ACe-245604]. ATI Astaldi Cimolai (ACe) / ESO.

ATI Astaldi Cimolai (ACe). (2019, octubre 31). Cladding design report (ACe-253501) [Informe de diseño interno]. ESO / ACe.

Mancini, S., & Stella, D. (2019). Dome: Cladding, sealing & drainage—Maintenance manual (Versión 1, ACe-253520) [Manual interno de mantenimiento]. Astaldi-Cimolai (ACe).

Maretto, M., Fabris, N., & Amodio, S. (2021, febrero 25). Dome—Dome structure & mechanisms: Windscreen—Lower level specification (Versión 3) [Especificación técnica interna, ACe-247503]. ATI Astaldi Cimolai (ACe) / ESO.

Mazzero, J., Tasselli, S., Barbieri, D., & Mattietto, M. (2019, octubre 31). Dome rotating structure—Seal of sealing system: Design report (Versión 1) [Informe de diseño interno, ACe-249501]. ATI Astaldi Cimolai (ACe) / ESO.

Molteni, R., Barbaro, D., & Barbieri, G. (2021). Dome structure & mechanisms: Louvers—Maintenance manual (Versión 2, ACe-255520) [Manual interno de mantenimiento]. BOLDROCCHI s.r.l.

Parra, C., & Terrassan, R. (2021, febrero 25). Dome—DSD latching system: Lower level specifications (Versión 2) [Especificación técnica interna, ACe-251503]. ATI Astaldi Cimolai (ACe) / ESO.