

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (MCC), BASADO EN LAS NORMAS ISO 14224, SAE JA1011 Y SAE JA1012, EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA COCA CODO SINCLAIR – CELEC E.P.

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DE GRADO DE MAGISTER (MSc.) EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y PRODUCTIVIDAD

ING. CHRISTIAN IVÁN PROAÑO CÁRDENAS
fagothcp@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ÁLVARO GONZALO XAVIER AGUINAGA BARRAGÁN
alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. MAURICIO HERNÁN ROJAS DÁVALOS
mauricio.rojas@epn.edu.ec

Quito, octubre 2018

©Escuela Politécnica Nacional (2018)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Christian Iván Proaño Cárdenas, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluye en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Christian Iván Proaño Cárdenas

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Christian Iván Proaño Cárdenas, bajo mi supervisión.

Ing. Álvaro Gonzalo Xavier
Aguinaga Barragán MSc. PhD.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Mauricio Hernán
Rojas Dávalos MSc.
CODIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Primero agradezco a Dios, que me da la fortaleza, sabiduría y perseverancia para seguir adelante en los momentos más complicados de mi vida estudiantil y profesional.

A mis abuelitos, mamá y tíos, quienes, con ternura, abnegación y ejemplo maravilloso de fe, amor, honestidad, sacrificio y mucha perseverancia, supieron sembrar en mí el anhelo de superación, me enseñaron a seguir adelante a pesar de los inconvenientes presentes día a día en mi vida estudiantil, me tendieron la mano y me ayudaron a levantarme en los momentos difíciles; a avanzar, y así poder llegar a conseguir el objetivo plasmado en este trabajo.

A mi querida Escuela Politécnica Nacional que me abrió las puertas una vez más y me ha permitido formar parte de la mejor universidad del país, entregándome el conocimiento y la formación necesaria para complementar mi vida profesional.

A mis profesores, que hoy pueden ver un reflejo de lo que han formado y que sin duda han calado hondo en mi vida, permitiéndome tener mayores y mejores herramientas para enfrentar el día a día en mi vida profesional.

DEDICATORIA

A Dios, por ser nuestro creador, amparo y fortaleza, cuando más lo necesitamos, y por hacer palpable su amor a través de todo lo que nos rodea.

A mi familia, amigos, compañeros de trabajo y profesores; que sin esperar nada a cambio, han sido pilares en mi camino y así, forman parte de este logro que me abrirá puertas inimaginables en el desarrollo de mi vida profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN	xvi
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Confiabilidad	1
1.2. Mantenibilidad	4
1.3. Estudio de mantenimiento	7
1.3.1. Mantenimiento correctivo	8
1.3.2. Mantenimiento modificativo	9
1.3.3. Mantenimiento preventivo	10
1.4. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad	11
1.4.1. Norma ISO 14224	13
1.4.2. Norma SAE JA1011 y SAE JA1012	15
1.5. Herramientas de análisis	16
1.6. Descripción de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair 1500 MWh	21
1.6.1. Descripción de Corporación Eléctrica del Ecuador	21
1.6.2. Unidad de negocio Coca Codo Sinclair	23
1.6.2.1. Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair	24

1.7. Módulo de Mantenimiento del Sistema Financiero Industrial IFS	30
2. METODOLOGÍA	42
2.1. Organización de los datos de confiabilidad y mantenimiento	42
2.1.1. Norma ISO 14224	42
2.1.2. Calidad de los datos y estructura de la información	42
2.1.2.1. Obtención de datos de calidad	43
2.1.2.2. Fuentes de datos	44
2.1.2.3. Formato y estructura de la base de datos	44
2.2. Jerarquización de activos	45
2.2.1. Datos de los equipos	46
2.2.2. Datos de averías	47
2.2.3. Datos de mantenimiento	47
2.3. Estudio de las funciones	48
2.4. Estudio de las fallas	49
2.4.1. Identificación de los modos de falla	49
2.4.2. Efectos y consecuencias de la falla	49
2.5. Determinación de la estrategia	50
2.6. Evaluación del módulo de mantenimiento del sistema financiero industrial IFS	51
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
3.1. Estimación de la confiabilidad de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair	54

3.1.1. Descripción del regulador de velocidad	59
3.2. Aplicación de la Norma ISO 14224	61
3.2.1. Límites y jerarquías de los equipos	64
3.2.2. Estructura de la información	67
3.2.3. Información de equipos, averías y mantenimiento	72
3.2.3.1. Información de equipos	72
3.2.3.2. Información de averías	74
3.2.3.3. Información de mantenimiento	74
3.3. Aplicación de la norma SAE JA1012	75
3.3.1. Contexto operacional	76
3.3.2. Análisis funcional	81
3.3.3. Identificación de modos de falla	84
3.3.4. Efectos y consecuencia de la falla	87
3.3.4.1. Manejo de las consecuencias de los modos de falla	93
3.3.4.2. Políticas de tareas programadas	95
3.3.4.3. Políticas de manejo de fallas - Cambio de especificaciones y operar hasta fallar	96
3.3.4.4. Selección de la política de manejo de fallas	97
3.3.5. Programa de vida	102
3.4. Evaluación del sistema IFS	104

	vii
3.4.1. Evaluación del sistema financiero industrial	104
3.5. Evaluación del aumento de confiabilidad y productividad	107
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
4.1 Conclusiones	115
4.2 Recomendaciones	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
ANEXOS	126

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Evolución del mantenimiento	11
Tabla 1.2.	Cuestionario para realizar un análisis de MCC	16
Tabla 1.3.	Escala del índice de severidad	18
Tabla 1.4.	Escala del índice de frecuencia	19
Tabla 1.5.	Escala del índice de detección	19
Tabla 1.6.	Ejemplo de aplicación de AMEF	20
Tabla 3.1.	Indicadores de Generación	54
Tabla 3.2.	Horas de indisponibilidad total por fallas	56
Tabla 3.3.	Subsistemas del regulador de velocidad	57
Tabla 3.4.	Escala de frecuencia	57
Tabla 3.5.	Criterios de frecuencia	58
Tabla 3.6.	Criterios de consecuencia	58
Tabla 3.7.	Lista de verificación: Calidad de los datos	61
Tabla 3.8.	Lista de verificación: Calidad de los datos (Continuación)	62
Tabla 3.9.	Lista de verificación: Sistemas de fuentes de datos	62
Tabla 3.10.	Lista de verificación: Límites y jerarquías de los equipos	63
Tabla 3.11.	Lista de verificación: Estructura de la información	63
Tabla 3.12.	Lista de verificación: Información de equipos, averías y mantenimiento	63
Tabla 3.13.	Lista de verificación: Información de equipos, averías y mantenimiento (Continuación)	64
Tabla 3.14.	Codificación	65

Tabla 3.15. Información del Regulador de Velocidad de la Unidad de Generación 1	73
Tabla 3.16. Información de las averías	74
Tabla 3.17. Información de mantenimiento	75
Tabla 3.18. Matriz de modos de fallo	86
Tabla 3.19. Matriz de consecuencias de los modos de falla	92
Tabla 3.20. Matriz de consecuencias de los modos de falla (Continuación)	93
Tabla 3.21. Lista de verificación: Estándares de la información	104
Tabla 3.22. Lista de verificación: Definición de la información	105
Tabla 3.23. Lista de verificación: Calidad de la información	106
Tabla 3.24. Lista de verificación: Calidad de la información (Continuación)	107

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1.1. Disposición en serie	3
Figura 1.2. Disposición en paralelo	4
Figura 1.3. Tipos de mantenimiento	7
Figura 1.4. Instalación de una pantalla de seguridad	9
Figura 1.5. Turbina en mantenimiento de un Boeing 747	12
Figura 1.6. Organigrama de CELEC EP	22
Figura 1.7. Unidades de negocio de CELEC EP	23
Figura 1.8. Organigrama Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair	24
Figura 1.9. Ubicación geográfica de la central	25
Figura 1.10. Obras de captación	26
Figura 1.11. Obras de conducción	27
Figura 1.12. Obras del embalse compensador	28
Figura 1.13. Esquema de la central hidroeléctrica	29
Figura 1.14. Aplicaciones con las que cuenta el sistema IFS	30
Figura 1.15. Opciones para servicio y mantenimiento	31
Figura 1.16. Opciones para equipo	31
Figura 1.17. Opciones para objeto funcional	32
Figura 1.18. Formulario de información para objetos funcionales	33
Figura 1.19. Opciones para objeto seriado	33
Figura 1.20. Opciones para objeto	34
Figura 1.21. Opciones para lista repuestos	34

Figura 1.22. Explorador objetos de Unidades de Negocio	35
Figura 1.23. Explorador objetos Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair	35
Figura 1.24. Explorador objetos Unidad 1 / Regulador de Velocidad	36
Figura 1.25. Opciones para Mantenimiento Preventivo	36
Figura 1.26. Estructura de Mantenimiento Preventivo	37
Figura 1.27. Estructura de Mantenimiento Preventivo - IFS	38
Figura 1.28. Flujo y estados de la Orden de Trabajo – Planificación y Preparación	40
Figura 1.29. Flujo y estados de la Orden de Trabajo - Ejecución	41
Figura 1.30. Flujo y estados de la Orden de Trabajo – Reporte	41
Figura 3.1. Índice de confiabilidad y productividad	55
Figura 3.2. Pareto de fallas	56
Figura 3.3. Evaluación de criticidad	59
Figura 3.4. Diagrama del sistema de regulación de velocidad	60
Figura 3.5. Matriz de interrelaciones	66
Figura 3.6. Diagrama de interrelaciones	66
Figura 3.7. Jerarquía del sistema de regulación de velocidad (Parte I)	68
Figura 3.8. Jerarquía del sistema de regulación de velocidad (Parte II)	69
Figura 3.9. Jerarquía del sistema de regulación de velocidad (Parte III)	70
Figura 3.10. Lazo de control – Subsistema hidráulico mecánico	79
Figura 3.11. Plano de diseño – Subsistema hidráulico mecánico	80
Figura 3.12. Subsistema de presión de aire	81
Figura 3.13. Desgaste de bus de alimentación del módulo de salida analógica	101
Figura 3.14. Escenario 1	109
Figura 3.15. Escenario 2	110

Figura 3.16. Escenario 3	110
Figura 3.17. Escenario 4	111
Figura 3.18. Escenario 5	111
Figura 3.19. Escenario 6	112
Figura 3.20. Escenario 7	112
Figura 3.21. Escenario 8	113
Figura 3.22. Comparativo de escenarios	114
Figura AI.1. Organización del mantenimiento de la central	127
Figura AI.2. Estructura organizacional	129
Figura AI.3. Estructura organizacional: área de mantenimiento eléctrico y electrónico	130
Figura AI.4. Estructura organizacional: área de mantenimiento mecánico	131
Figura AI.5. Estructura organizacional: área de mantenimiento civil	132
Figura AII.1. Subproceso de planificación y programación del mantenimiento	133
Figura AII.2. Subproceso de ejecución del mantenimiento	135
Figura AII.3. Subproceso de evaluación del mantenimiento	136
Figura AII.4. Subproceso de planteamiento de mejoras	137

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Organización de mantenimiento	126
ANEXO II	
Procesos del área de mantenimiento	126
ANEXO III	
Funciones del personal del área de mantenimiento	126

RESUMEN

El trabajo desarrollado propone una metodología de implementación de un sistema de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad MCC, basado en las normas ISO 14224, SAE JA1011 y SAE JA1012 en la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair - CELEC EP, motivado por la importancia que tiene la central analizada dentro del Sistema Nacional Interconectado (SNI), lo cual obliga a CELEC EP a invertir recursos humanos, económicos y técnicos con la finalidad de mantener la confiabilidad de la central en un nivel adecuado.

La metodología de implementación planteada brindó a la central hidroeléctrica, una herramienta adecuada para aumentar el índice de confiabilidad y desempeño operacional de los equipos y sistemas, reduciendo fallas y sus consecuencias en la estabilidad del SNI, además de disminuir los tiempos de mantenimiento, tiempos muertos de producción e incrementando la vida útil de los activos.

Inicialmente se realizó la estimación de la confiabilidad, en el momento del análisis, la central tuvo una capacidad de producción de 64 128 horas en sus 8 unidades de generación durante al año 2017. Se evidenció que el índice de confiabilidad estaba por sobre el 99%, lo cual dejaba un margen para mejorar del 1%. Este comportamiento es normal, al considerar que la central viene operando un tiempo relativamente corto. Además se realizó un estudio de las horas de indisponibilidad que tuvo la planta durante el período analizado, y se halló que el sistema regulador de velocidad registró un total de 214,65 horas, lo cual concentró el 48% del total de fallas. Una vez identificado el sistema regulador de velocidad se procedió a su descripción, con sus principales componentes: sistema de control del gobernador, sistema hidráulico mecánico y el dispositivo de presión de aire.

La metodología de implementación consideró el uso de la norma ISO 14224, con la cual se elaboró listas de verificación, para posteriormente, realizar un diagnóstico de la situación bajo la cual se maneja la información de la central en cuanto a los siguientes criterios: calidad de datos, sistema de fuentes de datos, límites y jerarquías de los equipos, estructura de la información, información de equipos,

averías, y mantenimiento. En cada uno de estos aspectos evaluados, se observó que la central se encuentra cumpliendo de manera parcial, es decir, cumple con ciertos requisitos, y con otros no, lo cual plantea un escenario de mejora.

La norma SAE JA1012, la cual define las políticas de manejo de fallas, fue aplicada a la válvula piloto de control de deflectores. Primero, se estructuró el contexto operacional de acuerdo a los siguientes criterios: descripción del bien, como y donde se utiliza el activo, los criterios de desempeño (producción, rendimiento, y otros) y estándares propios de la operación e intensidad, seguridad, ambientales, etc. A continuación, se realizó el análisis funcional, con el cual fueron definidas las funciones principales y secundarias. Posterior a esto, fueron identificados los modos de falla, lo cual consiste en considerar todas las formas en las que puede fallar el activo. Para la función de regulación de velocidad, se encontraron 8 fallas funcionales, y en total, estas fallas tienen 42 modos de fallar. Las fallas fueron analizadas, y con ello se identifican los efectos y las consecuencias que tienen sobre el activo.

Además, se evaluó el Sistema Financiero Industrial considerando los estándares de información, definición de la información y calidad de la información; dicho software es el ERP de la CELEC EP, entre los hallazgos se obtuvieron: no existe evidencia de la existencia de un estándar de información registrada y parametrizada, no existe evidencia de un plan de recolección de información, existe una codificación de los activos y con la codificación única de los órdenes de trabajo.

Finalmente, se evaluó el aumento de confiabilidad y productividad, para ello fueron definidos 8 escenarios, los cuales consideraban una reducción del 20 % en horas de mantenimiento programado, horas fuera de servicio por fallas internas y horas fuera de servicio por mantenimiento correctivo. Con lo se identificó que el escenario 2, el cual planteaba la reducción de un 20 % en horas de servicio por fallas internas y mantenimiento programado, se mantiene igual las horas fuera de servicio por mantenimiento correctivo, genera el mayor aumento de productividad, con lo cual, este indicador alcanza 86,19 MWh/h.

INTRODUCCIÓN

La Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, fue construida con una inversión total de US\$1'979.700.000, de los cuales, US\$534'519.000 corresponden a Equipamiento Electromecánico y aporta 1500 MW al Sistema Nacional Interconectado, que corresponde alrededor del 30% de la demanda energética del país, esto equivale a 1'391.350 hogares ecuatorianos. Como antecedente, alrededor de 1.320 MW se desconectaron del Sistema Nacional Interconectado (SNI) (46% de la demanda del país); producto de la salida de la Central Coca Codo Sinclair por un problema externo a la misma. La falla provocó un apagón masivo en 11 provincias del país, entre ellas las más pobladas como son: Pichincha, Guayas y Manabí; con lo cual demuestra las consecuencias ante una salida abrupta de servicio de esta importante fuente de generación eléctrica. La importancia de la Central dentro del SNI, obliga a la CELEC E.P. a invertir todos los recursos necesarios para mantener una confiabilidad muy alta de sus sistemas y equipos, no solo por la posible afectación al usuario final de la energía eléctrica producida, sino también, debido al costo del equipamiento instalado en esta central.

La implementación de un sistema de gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad MCC, brindará a la CHCCS, una herramienta adecuada para conseguir mayor grado de confiabilidad y desempeño operacional de los equipos y sistemas, reduciendo fallas y sus posibles consecuencias en la estabilidad del Sistema Nacional Interconectado, además de disminuir los tiempos de mantenimiento, tiempos muertos de producción e incrementando la vida útil de los activos.

La propuesta metodológica servirá como punto de partida para la ejecución del proyecto de implementación del MCC en la Central Coca Codo Sinclair; a tiempo que permite desarrollar las destrezas para mejorar la calidad y productividad de la central, reduciendo costos de mantenimiento y evitando pérdidas económicas por indisponibilidades de las máquinas. Para el efecto, principalmente se utilizarán los datos de control de procesos y control de la calidad disponibles, herramientas estadísticas y técnicas de moda. Los objetivos del presente proyecto son:

- Evaluar la metodología de recolección de datos de Confiabilidad y Mantenimiento de los activos de la Central Coca Codo Sinclair, de acuerdo a la norma ISO 14224 (jerarquía, estructura de información, averías y mantenimiento).
- Plantear una metodología de definición del equipo o sistema desde el punto de vista operacional, describiendo sus funciones y parámetros de funcionamiento, de acuerdo a las normas SAE JA1011 y SAE JA1012 – Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad MCC.
- Establecer el proceso de Análisis de Modos, Efectos y Consecuencias de las Fallas (AMEF), a ser utilizado en la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair con base en las normas SAE JA1011 y SAE JA1012 – Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad MCC.
- Presentar estrategias de mantenimiento que pudieran prevenir las posibles fallas, y que alcancen a ser aplicadas en la CHCCS para administrar correctamente los activos.
- Evaluar el Módulo de Mantenimiento disponible en el Software “Sistema Financiero Industrial IFS” que es el ERP utilizado por la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC E.P., para mostrar las oportunidades de implementación, de un posible Plan de Mantenimiento de Activos, basado en los resultados de la Metodología propuesta.

En la primera parte del trabajo, se expone la revisión bibliográfica de sustento. Se revisa información sobre confiabilidad, mantenibilidad, se analiza el estudio del mantenimiento, se revisa la información necesaria sobre el mantenimiento centrado en la confiabilidad MCC, se estudian las herramientas de análisis disponibles; con lo cual se describe la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, y el módulo de mantenimiento del Sistema Financiero Industrial IFS.

En el segundo capítulo, se plantea la metodología a usarse para la realización del presente trabajo. Se expone el camino a seguir para la organización de los datos de confiabilidad y mantenimiento para la jerarquización de los activos en base a la norma ISO 14224. De la misma manera, se establece la sistemática para el estudio

de las funciones, de las fallas y determinación de la estrategia en base a las normas SAE JA 1011 y SAE JA 1012. Finalmente, se presentan las herramientas a utilizar para evaluar el módulo de mantenimiento con el que cuenta el Sistema Financiero Industrial IFS.

En el tercer capítulo, se detalla la metodología aplicable de acuerdo a las normas planteadas, con el fin de cumplir con cada uno de los puntos recomendados por las mismas. Se establecen los pasos a seguir para evaluar la organización y jerarquización de los activos, de tal forma que permitan la comparación requerida en MCC; además los pasos para realizar los estudios de funciones, fallas y determinar las estrategias aplicables.

Finalmente, en el cuarto capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones producto de la investigación y la metodología planteada, la cual corresponde al objetivo del este trabajo.

El presente proyecto, brindará una aplicación real de Sistemas de Gestión integrados, perfeccionando las competencias en el diseño de la gestión y de la operación de los activos físicos, enfocándose en mayor medida en mejorar la confiabilidad de los mismos, y de esta manera brindando herramientas para mejorar productividad y calidad en la empresa.

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 CONFIABILIDAD

La confiabilidad surge como una herramienta para la estimación de la cantidad necesaria de repuestos para el correcto funcionamiento de ciertos equipos durante la segunda guerra mundial, entre los años 1941 a 1950. Adicional a esto, la teoría de confiabilidad tuvo un gran impulso dados los desarrollos para la industria espacial, al ser ingentes las inversiones, la confiabilidad ayudaba a la reducción de costos, por ejemplo, en el envío de un número menor de piezas de recambio, lo cual impactaba en la productividad del proyecto (Escobar, Villa, y Yañez, 2003).

En el área de producción, es normal que ocurran ciertas fallas en los equipos que se utilizan, sin embargo, estos problemas pueden ser anticipados con la finalidad de reducir el impacto en la productividad, para esto se aplican las técnicas de confiabilidad (Acuña, 2003).

Con el paso del tiempo, la confiabilidad ha ganado espacio en todas las industrias a nivel mundial, se puede encontrar ejemplos en la industria aeroespacial en Estados Unidos, la fabricación de maquinaria en Japón, y el diseño de motores en Italia, prácticamente, la confiabilidad pasó de ser una herramienta considerada en la guerra a convertirse en una importante fuente de diferenciación en el mercado. En la actualidad, algunas industrias aplican confiabilidad para aumentar el tiempo de vida de sus activos y así diferenciarse (generando una estrategia competitiva) para generar mayores ventas, otras industrias aplican estas técnicas a sus procesos productivos, generando planes preventivos para evitar las fallas que se puedan presentar.

De acuerdo a la Real Academia de la Lengua, la confiabilidad se define como: “probabilidad de buen funcionamiento de algo” (Real Academia , 2017). Considerando un criterio más técnico, Creus (2005) indica que la confiabilidad “es la probabilidad de que un aparato o dispositivo trabaje correctamente durante un tiempo determinado y en las condiciones de servicio que se encuentre” (p.27).

Tomando en cuenta estas definiciones previas, para este trabajo la confiabilidad o fiabilidad es la probabilidad de buen funcionamiento de un sistema, parte o pieza en condiciones normales del proceso de producción y en un período de tiempo; su principal objetivo es, identificar las fallas y su frecuencia de ocurrencia, para así minimizar los tiempos de para (por mantenimiento, reparación, o correctivas) y con ello incrementar la productividad por un aumento en las horas hábiles (Griful, 2004).

En la definición previa hay que hacer énfasis en tres aspectos fundamentales:

Probabilidad: es una cantidad positiva que puede tomar un valor entre 0 y 1, e indica qué tan seguro es que se presente un evento aleatorio, entre más se acerca a 1, existe mayor certeza de que el evento aleatorio se presente (Acuña, 2003).

Período: corresponde al intervalo de tiempo con el cual el producto fue diseñado, y en el que se espera mantenga un buen funcionamiento de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

Condiciones normales: hace referencia a las condiciones bajo las cuales el sistema opera y está en concordancia con el diseño del producto (claramente puntualizadas en manuales, instructivos, capacitaciones brindadas por los fabricantes) y las necesidades del cliente (interno o externo).

Para la estimación de la confiabilidad de un sistema, Acuña (2013) menciona que se puede dividir en cuatro etapas a este proceso, las cuales son:

1. Definición de objetivos y requerimientos de confiabilidad: en esta etapa se definen los objetivos de acuerdo a las necesidades del cliente y a las posibilidades de producción.
2. Desagregación del producto en componentes y estimación de sus confiabilidades: es necesario realizar el análisis de confiabilidad a nivel micro a cada uno de los componentes del producto.

3. Predicción de la confiabilidad: una vez determinadas las confiabilidades micro, se debe aplicar la teoría de probabilidades para obtener la confiabilidad de todo el producto.
4. Análisis del producto: se debe aplicar un FODA¹ al producto, con la finalidad de identificar oportunidades de mejora y fortalezas a proyectar al cliente.

Cuando se hace referencia a la confiabilidad de un equipo, se debe tomar en cuenta que dicho equipo está compuesto por distintos elementos, y que cada uno de ellos tendrá una confiabilidad distinta dependiendo de las condiciones bajo las que opera el equipo y el esfuerzo al que está sometido. Con el avance de la tecnología, los equipos vienen diseñados con un mayor nivel de sofisticación, es decir, diseños más complejos, mayor número de partes, por ende aumenta la posibilidad de que algo se dañe y no funcione correctamente (Besterfield, 2009).

Al realizar un análisis de la confiabilidad de un sistema, se ubican sus componentes en serie o en paralelo, de acuerdo a:

- En serie, si es el único componente que puede realizar esa función y por lo tanto, la afectación por una para sería grave, ocasionando una para total. De acuerdo a Besterfield (2009), cuando los componentes están en serie, la confiabilidad del sistema es igual al producto de las confiabilidades de cada uno de los componentes. Entre mayor sea el número de componentes en serie, la confiabilidad será menor. La Figura 1.1 muestra la disposición en serie de los elementos A, B, y C. La confiabilidad del sistema es igual al producto de las confiabilidades de cada uno de los componentes. Entre mayor sea el número de componentes en serie, la confiabilidad será menor.



Figura 1.1. Disposición en serie

¹Diagrama de: Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas

- En paralelo, si existen dos componentes que realicen la misma actividad, en ese caso, la para de una de ellas disminuirá la capacidad del sistema, pero, no parará totalmente. A diferencia de la configuración anterior, un componente puede tomar el lugar de otro que se encuentre en paralelo, esto es una ventaja ya que, al aumentar la configuración de componentes en paralelo, la confiabilidad también aumenta. En la Figura 1.2, se observa que los elementos B, C y D se encuentran en paralelo realizando la misma función.

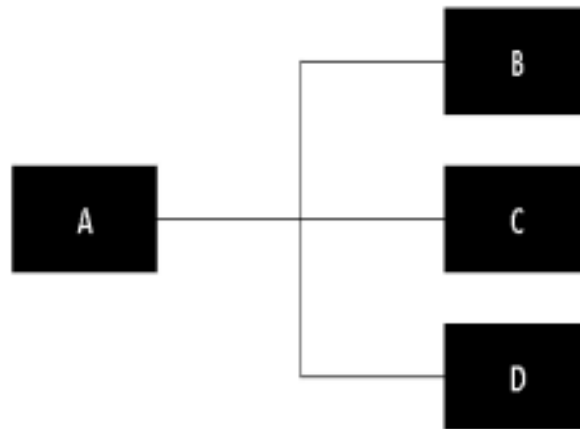


Figura 1.2. Disposición en paralelo

1.2 MANTENIBILIDAD

La mantenibilidad se menciona que surgió en 1901, cuando los Hermanos Wright realizaron un diseño de aeronave que sea simple de operar y de mantener, algunos años después, esta herramienta retoma fuerza en la segunda guerra mundial, es por esto que se desarrolla este concepto en MIL-STD-721C, en este documento se definió la mantenibilidad como una característica del diseño de un equipo y fue desarrollada como una herramienta para ingenieros y administradores (Knezevic, 1997).

Uno de los aspectos importantes a considerar por el área de mantenimiento de cualquier industria, corresponde a la mantenibilidad, este concepto está relacionado con la facilidad de recuperar un equipo a su estado original de funcionamiento después de aplicar un proceso de mantenimiento adecuado, posterior a la presencia

de alguna falla y con la efectividad en la reducción de tiempos y costos de mantenimiento.

Una definición que combina a la probabilidad y al tiempo de mantenimiento necesario para reparar un equipo indica que: la mantenibilidad se encuentra relacionada con la probabilidad de que un equipo en situación de fallo sea recuperado completamente dentro de un período de tiempo y con la aplicación de los procesos adecuados (Solé, 1991).

Además, al momento de aplicar la mantenibilidad a un equipo, se debe tomar en cuenta que, los equipos o sistemas están conformados por algunos elementos y, por ende, los tiempos de reparación serán distintos dependiendo la parte que se averió. Esto muchas veces complica la reparación ya que no necesariamente se tienen disponibles todas las partes de recambio, equipos y recursos necesarios para realizar la corrección (Solé, 1991).

La mantenibilidad juega un rol fundamental junto con la confiabilidad, si bien la confiabilidad se enfoca en ver que el equipo este funcionando adecuadamente, la mantenibilidad se centra en el tiempo que se demora una reparación de un equipo para que este nuevamente se encuentre a disposición de las operaciones de la industria, es decir, estos aspectos interactúan para generar la disponibilidad del equipo.

La teoría de probabilidad es la herramienta fundamental a implementar al momento de calcular la mantenibilidad de un equipo, esto debido a que el tiempo necesario para devolver a un equipo a su estado de funcionamiento, corresponde a una variable aleatoria y la cual incluye la variabilidad que presentan estos procedimientos (Arata, 2005).

Una de las ventajas del uso de este criterio es reducción del número de veces que se realiza el mantenimiento, al analizar la mantenibilidad e identificar las fallas mas costosas y la forma de evitarlas, los mantenimientos preventivos aumentan, y como consecuencia los costos de mantenimiento correctivo caen. Un ejemplo de aplicación de esto fue desarrollado por Cortez (2017), en su trabajo menciona que

la reducción en costos en mantenimientos correctivos fue del 21 %, directamente esta reducción de costos hace que la productividad de los generadores aumente (aumento de tiempo de operación, disminución de costos, disminución de horas de paro por mantenimiento correctivo, etc) (Cortez, 2017).

Adicional, el control de la mantenibilidad, mediante el uso de índices facilita la toma de decisiones de una manera óptima, rápida y con mayor certeza siempre y cuando el seguimiento sea continuo, esto se extrae después de la aplicación de la mantenibilidad en el Bloque 15 de Petroamazonas en la provincia de Sucumbíos (Sánchez, 2015).

Otra de las definiciones vinculadas con la confiabilidad y mantenibilidad corresponde a la disponibilidad de un equipo, la cual se encuentra relacionada con el tiempo; básicamente, vincula la capacidad de un equipo para realizar la tarea para la cual fue diseñado, es decir, el equipo está disponible cuando se lo puede utilizar y cuando está en espera de ser usado nuevamente. Uno de los artículos más comunes son los vehículos familiares, un vehículo de este tipo está disponible cuando sus dueños lo usan o cuando el vehículo está estacionado en espera de ser usado nuevamente (Besterfield, 2009).

La disponibilidad puede ser cuantificada de la siguiente forma:

$$\text{disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo dentro}}{\text{Tiempo dentro} + \text{Tiempo fuera}} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTDT}} \quad [1.1]$$

Donde:

Tiempo dentro: corresponde al tiempo que el artículo es usado o estuvo en espera de ser usado.

Tiempo fuera: corresponde al tiempo que estuvo en reparación y no podía ser usado.

MTBF: tiempo medio entre fallas.

MTDT: tiempo fuera total medio.

En el caso del vehículo, el tiempo fuera puede corresponder al tiempo que es necesario para cambiar el aceite del motor, o el tiempo necesario para mandar al vehículo a un taller mecánico. Sin embargo, cuando se aplica este criterio a equipos grandes y costosos, puede presentarse el caso de que sea necesario el reemplazo de alguna pieza y esta deba ser importada, lo que ocasiona que este tiempo fuera se alargue hasta que sea reemplazada la parte afectada. El tiempo fuera deberá ser analizado dependiendo de las condiciones que se presenten.

1.3 ESTUDIO DE MANTENIMIENTO

En la actualidad, el mantenimiento industrial tomó un papel importante, esto debido a que la industria se viene transformando y cambiando en favor de lograr, costos menores de producción (en los cuales están inmersos los costos de mantenimiento), menor tiempo de producción para que los productos estén terminados cumpliendo con la calidad requerida por el cliente y una mayor confiabilidad a la hora de poner a trabajar los equipos cuando sea necesario.

Antes de introducir los conceptos relacionados a las estrategias de mantenimiento industrial, es necesario, definir que el mantenimiento es un conjunto de actividades realizadas con la finalidad de cuidar o reestablecer un equipo, parte, sistema, etc, a un estado adecuado que brinde seguridad y confiabilidad para realizar una acción requerida. Las actividades encomendadas al mantenimiento, van en pro de alargar los tiempos de operación, y aumentar la productividad del bien, de reducir costos de operación, mantenimiento y sobre todo de tratar de reducir los paros imprevistos (Maldonado y Sigüenza, 2012). El mantenimiento puede ser clasificado como se observa en la Figura 1.3.



Figura 1.3. Tipos de mantenimiento

1.3.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

El mantenimiento correctivo, como su nombre lo indica, busca corregir o reparar cualquier desviación o daño que se ha presentado en un equipo, estas reparaciones suelen ser más costosas, porque el daño presentado tiene una mayor gravedad lo que obliga al recambio de elementos en su totalidad. Este tipo de enfoque del mantenimiento es el que se manejaba desde el principio de la revolución industrial hasta antes de la segunda guerra mundial (Tamariz, 2014) y estaba orientada en esperar a que suceda el fallo, no había ningún tipo de seguimiento sobre lo que podría pasar en la maquinaria.

El mantenimiento correctivo puede ser paliativo, ya que solo se utilizan soluciones provisionales para que el equipo siga funcionando, la causa raíz no suele ser atacada y lo más probable es que se deba realizar un paro nuevamente. También puede ser el mantenimiento correctivo curativo, el cual está enfocado en devolver las funciones requeridas al equipo, pero, atacando a la causa raíz, suele tomar más tiempo, sin embargo, garantiza un mayor tiempo de desempeño adecuado.

Ventajas:

- No se realiza ningún seguimiento de la maquinaria, por ende no hay recursos o infraestructura dedicada a esta tarea.
- Se aprovecha en su totalidad la vida útil de equipo.

Desventajas:

- Los fallos son de forma imprevista, por ende suelen afectar drásticamente a la producción.
- El mantenimiento suele ser deficiente porque se dispone de poco tiempo para poner la maquina a funcionar nuevamente y que no se vea afectada gravemente la producción.
- No se tiene un stock de repuestos para reaccionar inmediatamente ante el fallo.

1.3.2 MANTENIMIENTO MODIFICATIVO

El mantenimiento modificativo busca adaptar el equipo a las condiciones en las que está operando, suele realizar modificaciones al diseño del equipo, logrando que aumente la disponibilidad del mismo. Dependiendo del tipo de modificaciones que se practiquen suelen ser mas o menos costosas. Muchas veces este tipo de mantenimiento se practica para atacar una causa que este generando un fallo recurrente en la máquina.

El mantenimiento modificativo puede ser aplicado para cambiar las condiciones del equipo, para un determinado proyecto, al término de éste, la máquina vuelve a ser modificada a su estado inicial, o se puede aplicar un reacondicionamiento para que un equipo funcione con un determinado material, o con algún instrumento adicional, también se lo aplica en caso de prevención de fallos o accidentes. Por ejemplo, se puede observar en la Figura 1.4, la instalación de una pantalla de seguridad en un troquel mecánico.



Figura 1.4. Instalación de una pantalla de seguridad
(SIS DEVICES, 2017)

1.3.3 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo, trata de prevenir la presencia de daños o de cualquier desviación en un equipo, estas reparaciones son proactivas y suelen ser menos costosas, porque al evitar el daño se reducen costos de recambio y paros prolongados. El éxito de este tipo de mantenimiento radica en su sistema de seguimiento y control, ya que estos mantenimientos son planificados de acuerdo al horario de menor afectación a la producción.

Ventajas:

- Reducción del tiempo de paro por realizar reparaciones más complejas.
- Mantenimiento planificado de acuerdo a la necesidad y al horario de menor afectación en las operaciones.
- Inventario de partes y piezas que pueden fallar para un recambio más rápido por parte del área de mantenimiento.
- Prevenir el daño de piezas adicionales producto de una afectación colateral por fallas en otros elementos del equipo.
- Aumento de confiabilidad de los equipos utilizados.

El mantenimiento preventivo se divide en tres tipos: mantenimiento sistemático, el cual es practicado por el operario que tiene un mayor conocimiento del equipo, mediante inspecciones periódicas; el mantenimiento “hard time”, el cual es realizado por el personal de mantenimiento de acuerdo a una planificación, en este mantenimiento se realizan paros para recambios u otras actividades en el equipo. Y el mantenimiento predictivo, el cual se enfoca en un sistema de indicadores y pronostica cuándo se dará la falla y que tipo de falla, para así reducir el inventario de repuestos, solamente se compran los que se van a usar de acuerdo al pronóstico del área de mantenimiento (Tamariz, 2014).

1.4 MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD

En los últimos 20 años, la forma de realizar el mantenimiento varió debido a los diferentes cambios que se han presentado: nuevas técnicas de mantenimiento, cambios de tecnología, adaptación a diversas infraestructuras (Moubray, 1997). Estos cambios demandan mejores aptitudes y conocimientos del personal a cargo del mantenimiento, además, de un trabajo en equipo, en donde participen técnicos, ingenieros y gerentes, con la finalidad de que tipo de trabajos sean llevados a cabo con efectividad (cumplir con las metas establecidas para el mantenimiento con el uso óptimo de recursos). Como respuesta a estas condiciones aparece el mantenimiento centrado en confiabilidad.

Moubray (1997) menciona que el mantenimiento ha venido evolucionando a lo largo del tiempo, con tres generaciones claramente definidas, las cuales poseen sus propias características y se las puede revisar en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Evolución del mantenimiento

Desde	Hasta	Características
1940	1950	El mantenimiento se aplica solo de forma reactiva, si se presentó el daño hay que arreglarlo
1950	1975	Inicia el mantenimiento predictivo, planes de mantenimiento y control excesivamente largo, inventario excesivo de repuestos y piezas de recambio
1975	ahora	Alta disponibilidad y confiabilidad de equipos, mejora de la calidad de los productos, aparece como prioridad el cuidado del medio ambiente, mantenimiento predictivo enfocado a reducción de corrección de fallas y disminución del inventario de piezas de recambio

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) (*Reliability Centred Maintenance, RCM*) corresponde a una técnica aplicada a la elaboración del plan de mantenimiento industrial. En breves palabras Moubray (1997) indica que el mantenimiento centrado en confiabilidad es un proceso utilizado para determinar qué acciones se deben tomar para asegurar el funcionamiento adecuado de un bien, con la finalidad de que cumpla con los requerimientos y tareas que las personas desean que se hagan. Por lo tanto, se asume durante todo el presente trabajo que el MCC buscará los posibles modo de fallo para prevenirlos y que

un determinado bien se encuentre disponible para ser utilizado. Garrido (2011) establece dos objetivos que tiene el MCC, el primero, aumentar la disponibilidad de los bienes, y el segundo, disminuir los costos incurridos por gastos de mantenimiento.

Esta técnica fue implementada en la industria de la aviación, específicamente en el área de mantenimiento, donde el cambio de elementos o piezas de una aeronave implicaba altos costos (Garrido, 2011). Fernández (2005) menciona que esta técnica se aplicó por primera vez y ampliamente durante el mantenimiento del avión Boeing 747 con resultados extraordinarios, esto catapultó al MCC a ser aplicado en otras áreas. La Figura 1.5 muestra la turbina de un avión Boeing 747, uno de los elementos más costosos de la aeronave.



Figura 1.5. Turbina en mantenimiento de un Boeing 747
(Garrido, 2011)

Para llevar a cabo el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, se recurre al análisis de modos y efectos de falla (AMEF), el cual se revisará más adelante. Para la realización del MCC, Garrido (2011) sugiere un conjunto de fases a seguir, las cuales son:

Fase 1: codificación y listado de cada uno de los elementos que componen el sistema, con la finalidad de generar una fuente de consulta para las siguientes fases.

Fase 2: estudio de funcionamiento en donde se encuentren las funciones de cada elemento que compone el sistema.

Fase 3: determinación de fallas que se pueden presentar en los elementos que constituyen el sistema.

Fase 4: identificación de consecuencias que se pueden presentar dependiendo de cada fallo posible.

Fase 5: listado de medidas preventivas que ayudarán a mitigar la posible consecución de los fallos revisados previamente, además de su frecuencia de aplicación al sistema.

Fase 6: agrupamiento de medidas preventivas para definir el plan de mantenimiento a ser utilizado.

Fase 7: aplicación de las medidas preventivas para aumentar el tiempo de uso del sistema y reducción de costos en el mantenimiento.

Gracias a los resultados exitosos con la aplicación de esta metodología, en 1999 surge la NORMA SAE JA1011 y con ella un conjunto de requerimientos necesarios para cumplir con el proceso de MCC. Posteriormente, en el 2002, se genera la Norma SAE JA1012, la cual profundiza los criterios importantes que se introdujeron en la Norma SAE JA1011 y agrega aspectos esenciales para llevar a cabo el MCC (Garrido, 2011). En el MCC, se debe hacer hincapié en la medición, y por ende, en la recolección de información de estas medidas, para realizar un contraste con la información histórica de los fallos y eventos presentados, es por esta razón que, la NORMA ISO 14224 funciona como un referente para la recolección de información relacionada con confiabilidad y mantenimiento, a pesar de estar diseñada para industrias del petróleo, petroquímica y gas natural.

1.4.1 NORMA ISO 14224

La norma ISO 14224: Industria de petróleo y gas natural - Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos, se posiciona como una referencia en cuanto a la forma de recolectar información y una guía a la hora de categorizar las causas que originan fallas en los equipos (Walls, Revie, y

Bedford, 2016). Si bien esta norma fue diseñada para recolección de información de confiabilidad y mantenimiento en la industria del petróleo, y gas natural, sirve también como fuente de consulta de los lineamientos para la especificación, recolección y aseguramiento de información de confiabilidad y mantenimiento para otras industrias (ISO 14224, 2016).

Al tener una norma que estandariza los procesos de recolección de información, se pueden utilizar estos datos para realizar la comparación de la confiabilidad entre equipos iguales o similares. A continuación, se citan los objetivos de la norma (ISO 14224, 2016, p.4):

- Especificar los datos que serán recolectados para el análisis de:
 - Diseño y configuración del sistema.
 - Seguridad, confiabilidad y disponibilidad de los sistemas y las plantas.
 - Costo del ciclo de vida.
 - Planteamiento, optimización y ejecución del mantenimiento.

- Especificar datos en un formato normalizado, a fin de:
 - Permitir el intercambio de datos sobre confiabilidad y mantenimiento entre plantas, propietarios, fabricantes y contratistas.
 - Asegurar que los datos sobre confiabilidad y mantenimiento son de calidad suficiente, según requiere el análisis que se pretende realizar.

La aplicación de esta norma sirve para el establecimiento de límites y la generación de una jerarquía de los equipos utilizados, y también la clasificación de las fallas (Salguero, 2010).

Esta norma establece que la calidad de los datos recopilados en cuando a confiabilidad y mantenimiento influye en los análisis que se realicen, para asegurar esta calidad, los datos deben tener las siguientes características:

- La información recolectada debe ser de manera exhaustiva en cuanto la especificación.
- Los datos deben estar apegados a las definiciones de los parámetros de confiabilidad, tipos y formatos establecidos.
- La información debe ser ingresada, transferida, manejada y almacenada de manera exacta, ya sea usando medios manuales o electrónicos.

1.4.2 NORMA SAE JA1011 y SAE JA1012

El mantenimiento basado en confiabilidad estaría incompleto al aplicarlo por si solo, es por esta razón que se desarrolló la norma SAE JA1011² y SAE JA1012³ (Soto, Rodríguez, Sandoval, Valenzuela, y Lizárraga, 2012). Ante la masificación del uso del MCC, urgía establecer un conjunto de reglas que sirvan de guía con los criterios que se deben cumplir para llevar a cabo este tipo de análisis, sin embargo, se debe tomar en cuenta que estas normas no establecen un procedimiento para realizar el mismo (SAE JA1011, 1999) (SAE JA1012, 2002).

La norma SAE JA1011 sirve para establecer conceptos y terminología a ser usada en el MCC, sin embargo, la norma SAE JA1012 retoma ciertos criterios ya expuestos en la norma anterior y los amplifica para generar un mayor entendimiento, además de incluir ciertos problemas que se presentan al realizar este tipo de análisis. Nuevamente, esta norma no es una guía del procedimiento a usar para llevar a cabo el MCC .

De acuerdo a la Norma SAE JA1011 (1999), un proceso MCC debe responder satisfactoriamente al conjunto de preguntas que se exponen en la Tabla 1.2.

²SAE JA1011: Criterios de evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

³SAE JA1012: Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

Tabla 1.2. Cuestionario para realizar un análisis de MCC

Pregunta	Lineamiento
¿ Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente?	Funciones y estándares de mantenimiento
¿ De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones?	Fallas funcionales
¿ Qué causa cada falla funcional?	Modos de falla
¿ Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional?	Efectos de la falla
¿ De qué manera afecta cada falla?	Consecuencias de la falla
¿ Qué se debe hacer para predecir o prevenir cada falla?	Tareas proactivas e intervalos de tareas
¿ Qué se debe hacer si una tarea proactiva que conviene no está disponible?	Acciones predeterminadas

(SAE JA1011,1999)

Cuando se aplica este cuestionario, la información obtenida debe ser recopilada mediante documentos normalizados, y estos deben estar disponibles para el dueño y el usuario (SAE JA1011, 1999).

1.5 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

Una de las herramientas comúnmente utilizadas en el área de mantenimiento, es el análisis de los modos de fallo (IEC 60812, 2006), esta herramienta permite la detección de errores en los procesos correctivos y preventivos, se lo identifica como AMEF (*o, Failure Mode and Effects Analysis, FMEA* por sus siglas en inglés) (Fernández, 2005). Este tipo de análisis define, identifica y elimina las potenciales fallas a presentarse en diseño, proceso y operación, con el único objetivo que no afecte al cliente (Santos, 2001).

Cuando puede ser aplicado al producto (para realización del estudio de su diseño), y para el proceso de producción (se ocupa de las fallas que se presentan en la operación), siempre se debe tener en cuenta las especificidades del producto o del proceso, por lo tanto, se los debe tratar por separado (Cintas y Llabres, 1995).

Existen varias formas de aplicar este análisis, la primera se basa en información histórica y la segunda, más técnica, ya que considera modelos matemáticos,

simulación de ingeniería concurrente, y otros. Se debe tomar en cuenta que el AMEF parte de una suposición, muy importante y característica de esta herramienta, la prevención de la falla (muchas técnicas analizan los efectos una vez presentada la falla) (Santos, 2001), por esto, el AMEF ha ganado espacio en las distintas áreas de la industria, especialmente en el mantenimiento industrial.

Esta herramienta, viene a ser un complemento para el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), inicialmente fue aplicado en la industria de la aviación, pero gracias a los beneficios generados, actualmente se aplican en plantas de producción de energía térmica o centrales eléctricas (Santos, 2001). Es evidente, que al ser inversiones muy altas, ya sea en dinero, esfuerzo, y en los posibles efectos de una falla que se pueda presentar en una central hidroeléctrica, AMEF permitiría una reducción de gastos en mantenimiento correctivo y en el planteamiento de mejoras.

La realización de este análisis implica la generación de un equipo multidisciplinario conformado por las áreas de producción, mantenimiento, seguridad industrial y otros (Romeva, 2002). Para llevar a cabo este análisis, es necesario seguir los siguientes pasos (González, Mera, y Lacoba, 2007):

1. Identificación de partes: se debe identificar las partes que componen el sistema y sus respectivas funciones que desempeñan en el mismo, en esta etapa puede ser de ayuda la inclusión de un diagrama de flujo en donde se explique la interacción entre las partes.
2. Identificación de potenciales fallos: hay que analizar en cada una de las partes, cuales son las potenciales fallas a darse, aquí se utiliza los manuales del fabricante y la experiencia del equipo de mantenimiento.
3. Estudios de los síntomas: una falla no aparece por sí sola, y el sistema, por lo general, empieza a dar síntomas de lo que podría ocurrir, por lo tanto, esta parte es fundamental para la prevención del fallo.
4. Estudios de las causas raíz: cuando la falla se presenta, es necesario plantear un

análisis de causa raíz para encontrar la fuente del problema, y una vez atacada la causa, el fallo no volverá a aparecer o será menos recurrente.

5. Categorización de las fallas: se debe clasificar las fallas, para posteriormente, asignarles una prioridad. Esa clasificación, debe tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Gravedad o severidad (S): esta categoría mide la importancia del fallo dadas las consecuencias que se presentarían. Existe una escala definida para este índice (Merchán, 2015). Una referencia de la escala usada para esta clasificación se observa en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Escala del índice de severidad

Efecto	Efecto en el cliente	Valor
Ninguno	sin efecto perceptible	1
Muy menor	no se cumplen las expectativas, en un 25 %	2
Menor	no se cumplen las expectativas, en un 50 %	3
Muy bajo	no se cumplen las expectativas, en un 75 %	4
Bajo	se brinda el servicio, pero cliente está insatisfecho	5
Moderado	nivel de desempeño medio, cliente esta insatisfecho	6
Alto	nivel de desempeño reducido, cliente muy insatisfecho	7
Muy alto	no se puede brindar el servicio	8
Peligroso con aviso	severidad muy alta, no se puede brindar el servicio de manera segura y/o involucra incumplimiento de normas gubernamentales, con aviso	9
Peligroso sin aviso	severidad muy alta, no se puede brindar el servicio de manera segura y/o involucra incumplimiento de normas gubernamentales, sin aviso	10

(Merchán, 2015)

- Frecuencia (O): mide la probabilidad ($P(x)$) de que aparezca el fallo, una vez que se ha generado una causa. Existe una escala definida para este índice (Merchán, 2015), la cual se expone en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Escala del índice de frecuencia

P(x)	Criterio	Valor
<1/1 500 000	Remota: muy improbable, o nunca ha sucedido previamente	1
<1/150.000	Muy baja: algunos fallos puntuales se presentaron en sistemas idénticos	2
<1/15.000	Baja: fallos puntuales asociados a sistemas idénticos	3
<1/2.000	Moderada: se presentan fallos esporádicos en bajas proporciones	4
<1/400	Moderada: pero 5 veces más frecuente	5
<1/80	Moderada: pero 25 veces más frecuente	6
<1/20	Alta: sistemas similares han tenido este fallo con regularidad	7
<1/4	Alta: pero 5 veces más frecuente	8
<1/3	Muy alta: con certeza aparecerá este error y de forma reiterada	9
<1/2	Muy alta: con mayor frecuencia de recurrencia	10

(Merchán, 2015)

- **Detección (D):** corresponde a la probabilidad de no detección del fallo antes de que este suceda. Existe una escala definida para este índice (Merchán, 2015), la cual se encuentra en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Escala del índice de detección

Criterio	Valor
Muy alta: probabilidad remota de detección, detectable fácilmente en un 99,99 %	1 - 2
Alta: los controles tienen una gran probabilidad de detectar el fallo, detectable fácilmente en un 99,99 %	3 - 4
Moderada: los controles pueden detectar la falla, pero no a simple vista, detectable en el 98 %	5 - 6
Baja: es posible que algunos defectos no sean detectados, detectable en el 90 %	7 - 8
Muy baja: los controles no detectan la mayoría de los defectos	9
Baja: no son detectables	10

(Merchán, 2015)

6. **Priorización de las fallas:** se ordena los fallos en función de su prioridad, para obtener el índice de prioridad de riesgo (*IPR*), se aplica ecuación [1.2].

$$IPR = S \times O \times D \quad [1.2]$$

Donde:

S : valor en la escala del índice de severidad.

O : valor en la escala del índice de frecuencia.

D : valor en la escala del índice de detección.

7. Elaboración del plan de solución: una vez definidas las prioridades de atención, hay que dar solución a los de mayor prioridad, con esto, se evita generar gastos infructuosos o que tengan poco impacto en las operaciones de la empresa.

En la Tabla 1.6 se observa la matriz utilizada para la aplicación del AMEF, Merchán (2015) realiza esta aplicación a un proceso de producción de tableros eléctricos y detalla cada uno de los pasos a seguir para llegar a completar este tipo de análisis.

Tabla 1.6. Ejemplo de aplicación de AMEF

Modo de fallo	Efecto	Causas de fallo	O	S	D	IPR
Trazo no preciso en el tool	Cortes incorrectos del tool	No se tiene la herramienta a la mano, se usa un clavo	6	4	6	144
	Remarcar el trazo del tool	La herramienta usada, el Gramil, se descalibra				
Personal sin mucha experiencia no sabe con certeza las medidas precisas para el trazo de cada parte en el tool	Demora en la etapa de diseño y corte del tool	No se tiene definida una metodología o un manual de procesos y procedimientos	7	5	5	175
El agujero para el candado en la puerta inferior no queda centrado	Reproceso de la operación y desperdicio de recursos	No se coloca de forma precisa el tool en la troqueladora que realiza el agujero	4	8	2	64
Trazos innecesarios para cortes en la troqueladora de corte esquinero eléctrico en las partes de: puerta inferior, doubles fondos y visera	Demora y desperdicio de recursos en esta etapa del proceso	No existe una estandarización en el proceso de fabricación utilizado	10	7	8	560
		No se ha planteado una optimización de los recursos disponibles				
El pulido de los bordes de la estructura y la puerta superior que sale de la máquina CNC es ineficiente y demorada	No se logra el acabado esperado en la etapa de pulido y doblado, por lo que se tiene que volver hacer esta actividad (reproceso)	No se tiene los recursos disponibles de inmediato, por lo que no se usa la herramienta adecuada para esta actividad	7	8	3	168
		No se tiene un espacio físico definido para esta actividad				
Operación ineficiente en el doblado del suelo en la dobladora de muelas manual	Proceso ineficiente en el desarrollo de esta actividad, demora y trabajo operativo innecesario para el desarrollo de la misma	No se mantiene esta estandarizada esta actividad	10	7	7	490

(Merchán, 2015)

Se puede observar, los modos de fallo y los efectos que estos producen, además, de la causa de falla que provocan estos problemas. Finalmente se aplica la evaluación de las escalas y la priorización en función de la prioridad de atención. En el Ecuador, el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) presenta la norma NTE INEN-IEC 60812, la cual estandariza las Técnicas de Análisis de la Fiabilidad de Sistemas - Procedimientos de Análisis de los Modos de Fallo y de sus Efectos.

1.6 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA COCA CODO SINCLAIR 1500 MW

1.6.1 DESCRIPCIÓN DE CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR

La Corporación Eléctrica del Ecuador, CELEC EP al ser una Empresa Pública y por su ámbito de acción, se la define como un servicio público estratégico. Su finalidad es la provisión de servicio eléctrico y éste debe responder a los principios de obligatoriedad, generalidad, uniformidad, responsabilidad, universalidad, accesibilidad, regularidad, continuidad y calidad. La principal actividad de la Empresa Pública Estratégica Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, es la generación, transmisión, distribución, comercialización, importación y exportación de energía eléctrica; para lo cual está facultada a realizar todas las actividades relacionadas.

La VISIÓN de la CELEC EP es: “Ser la Empresa pública líder que garantiza la soberanía eléctrica e impulsa el desarrollo del Ecuador”.

La MISIÓN de la CELEC EP es: “Generamos bienestar y desarrollo nacional, asegurando la provisión de energía eléctrica a todo el país, con altos estándares de calidad y eficiencia, con el aporte de su talento humano comprometido y competente, actuando responsablemente con la comunidad y el ambiente”.

Como se puede observar en la Figura 1.6, el ente máximo es el Directorio que se encuentra conformado por el Presidente de la Empresa Coordinadora de Empresas Públicas EMCO EP, el delegado de la Presidencia de la República y el Ministro

de Electricidad y Energía Renovable. En la Administración de la CELEC EP, se tiene la Gerencia General, la Dirección Administrativa Financiera, la Dirección de Generación, la Dirección Jurídica, la Dirección de Gestión Estratégica, la Dirección de Auditoría Interna y la Dirección de la Planificación de la Expansión (CELEC EP, 2017a).

De forma transversal, se tienen las Filiales y Unidades de Negocio. Las Unidades de Negocio son las encargadas de administrar las áreas de generación, transmisión y distribución. La Figura 1.7 muestra la organización de la Unidades de Negocio que pertenecen a la CELEC EP.

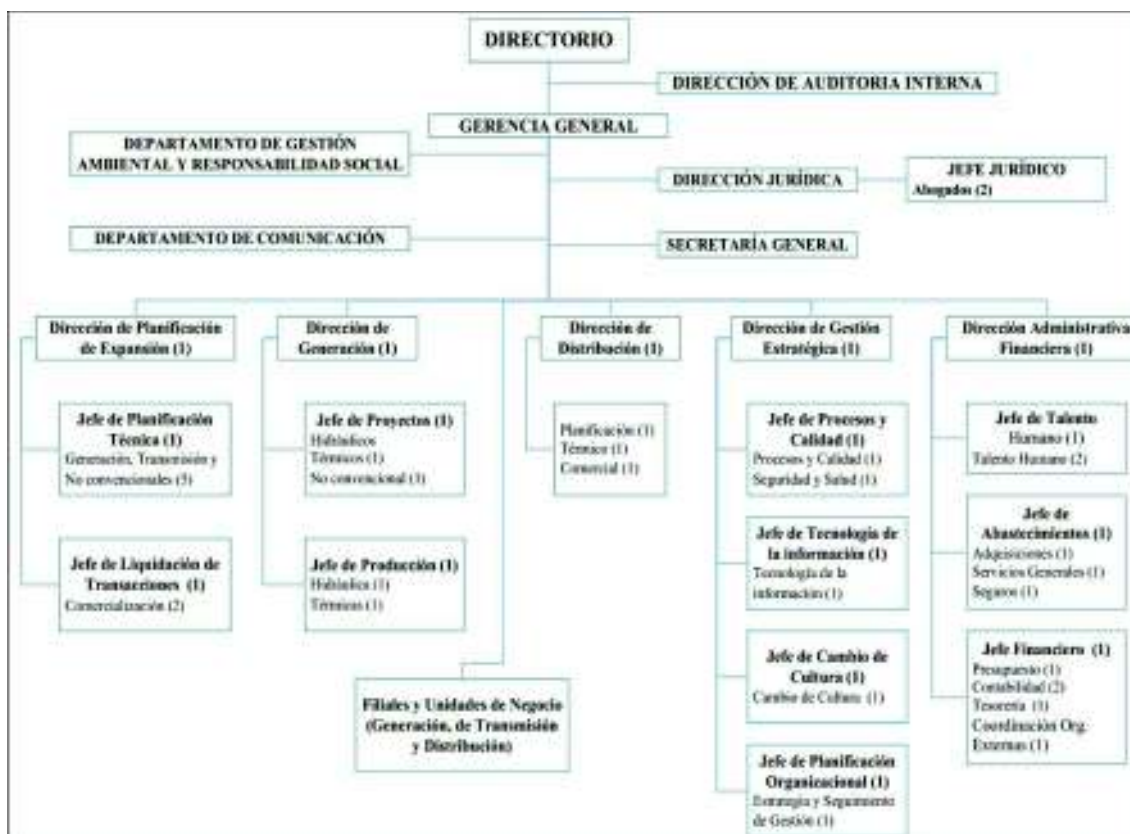


Figura 1.6. Organigrama de CELEC EP
(CELEC EP, 2017)



Figura 1.7. Unidades de negocio de CELEC EP
(CELEC EP, 2017)

1.6.2 UNIDAD DE NEGOCIO COCA CODO SINCLAIR

La Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair es parte de la CELEC EP y es la encargada de Administrar las Centrales de Generación Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair y Manduriacu; así como el proyecto Quijos. La Estructura Organizacional de la Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair se muestra en la Figura 1.8 . Está conformada por la Gerencia de Unidad de Negocio, las Áreas Jurídicas y de Gestión Organizacional como Habilitantes de Asesoría, el Área Administrativa – Financiera como Habilitantes de Apoyo y las Áreas de Producción y Proyectos como Agregadores de Valor.

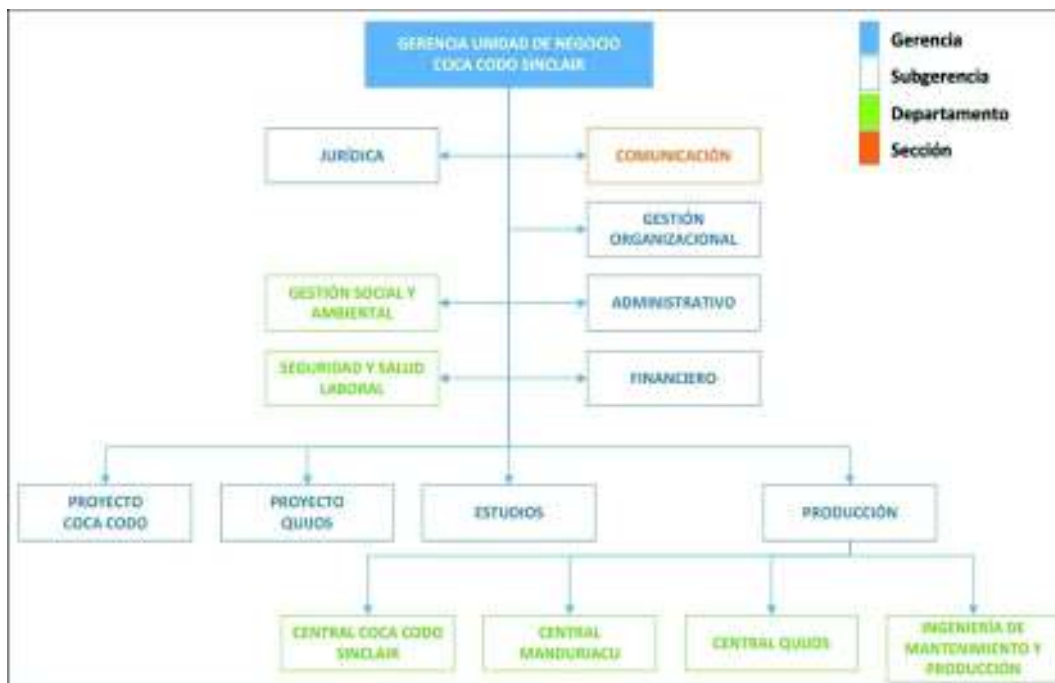


Figura 1.8. Organigrama Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair (CELEC EP, 2017)

El área de Producción entre otras funciones, es la encargada de Administrar los procesos de producción y mantenimiento de las Centrales de Generación Hidroeléctrica a cargo de la Unidad de Negocios Coca Codo Sinclair (CELEC EP, 2017b).

1.6.2.1. Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair

La central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair se encuentra ubicada en las Provincias de Napo y Sucumbíos en el territorio nacional ecuatoriano como se muestra en la Figura 1.9 (Fundación Proteger, 2017). Se construyó en el origen del curso fluvial del río Coca, en la unión de los ríos Quijos y Salado. En esta zona, se encuentra la obra de captación (CAP), la cual tiene por objeto captar un caudal promedio de $222 \text{ m}^3/\text{s}$ del río Coca (utilizado para la generación).



Figura 1.9. Ubicación geográfica de la central
(Fundación Proteger, 2017)

Entre sus principales componentes tenemos (CELEC EP, 2017); la bocatoma, que es la puerta de entrada de las aguas del río hacia los desarenadores, donde se realiza un tratamiento de decantación para separar los sedimentos del agua captada. El agua tratada es liberada en un cuenco amortiguador para continuar con la siguiente parte del proceso. Otra parte importante de la obra de captación es el vertedero, el cual es el encargado de permitir el paso del caudal normal del río Coca. La Figura 1.10 muestra de forma general la estructura de la obra de captación y sus principales componentes.



Figura 1.10. Obras de captación
(CELEC EP, 2017)

Desde el cuenco amortiguador, el agua es transportada por medio de la obra de conducción hacia la obra de Embalse Compensador. La Figura 1.11 muestra la estructura del túnel de conducción con las ventanas de construcción.

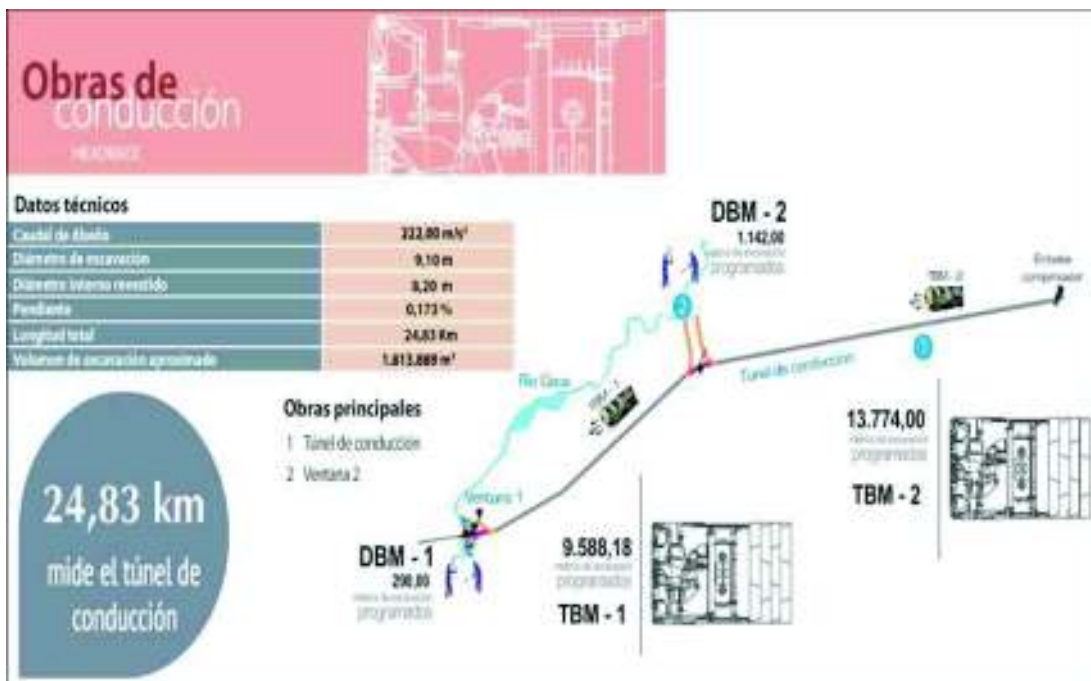


Figura 1.11. Obras de conducción
(CELEC EP, 2017)

El agua conducida llega a la obra de Embalse Compensador, la capacidad total aproximada del embalse compensador es de 1 000 000 m³ y la capacidad útil es de 800 000 m³ de agua. Además del agua proveniente de la obra de captación, el embalse compensador toma agua de la quebrada Granadillas. El agua del embalse compensador es llevada hacia las tuberías de alta presión (2 en total, una para cada fase). La Figura 1.12 muestra de forma general la estructura de la obra embalse compensador y sus principales componentes.



Figura 1.12. Obras del embalse compensador
(CELEC EP, 2017)

Una vez que el agua ingresa a las tuberías de alta presión, se tiene una caída de aproximadamente 620 m de altura, para llegar a la casa de máquinas donde se transforma la energía potencial en energía eléctrica a través de sus ocho unidades de generación tipo Pelton de 187,5 MW cada una. Finalmente, el agua turbinada es regresada al río Coca por el túnel de descarga. La Figura 1.13 muestra un esquema general de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2017).



Figura 1.13. Esquema de la central hidroeléctrica
(MEER, 2017)

La Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, tiene una capacidad instalada de 1 500 MW con sus 8 unidades de generación de 187,5 MW cada una. La Central se encuentra conectada al anillo de transmisión de 500 kV con lo cual aporta al Sistema Nacional Interconectado (SNI). Según los datos estadísticos reportados mensualmente por el Operador Nacional de Electricidad CENACE en su portal web, la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair desde el mes de septiembre del 2016 hasta el mes de septiembre 2017, ha generado en promedio el 30% del total de generación hidroeléctrica del país y un 23% de la demanda total del país.

1.7 MÓDULO DE MANTENIMIENTO DEL SISTEMA FINANCIERO INDUSTRIAL IFS

El seguimiento y control se lo realiza mediante el software denominado Sistema Financiero Industrial (IFS), este sistema informático permite la planificación de recursos empresariales (ERP), además, tiene funcionalidades de gestión de proyectos, gestión de activos y gestión de servicios. Dentro de la gestión de activos, se tienen funcionalidades como gestión de integridad de activos, gestión de ciclo de vida de los activos, gestión de mantenimiento, etc.

Dentro de las herramientas informáticas que posee CELEC EP, se encuentra el sistema IFS. Como se puede observar en la Figura 1.14, el sistema IFS permite la planificación de los recursos de la empresa.



Figura 1.14. Aplicaciones con las que cuenta el sistema IFS

El Sistema Financiero Industrial (IFS), es un sistema informático de planificación de recursos empresariales, es del tipo ERP (*Enterprise Resource Planning*), y tiene funcionalidades de gestión de proyectos, gestión de activos y gestión de

servicios. Dentro de la gestión de activos, se tienen funcionalidades como gestión de integridad de activos, gestión de ciclo de vida de los activos, gestión de mantenimiento, etc.

Como se puede observar en la Figura 1.15, son diversas las aplicaciones con las que cuenta el ERP, de las cuales, para el presente trabajo tiene principal interés el módulo de mantenimiento.

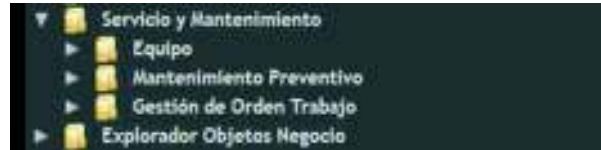


Figura 1.15. Opciones para servicio y mantenimiento

En el caso de equipo, el mismo está formado de 5 partes: objeto funcional, objeto seriado, objeto, lista de repuestos y mediciones, como puede observarse en la Figura 1.16.

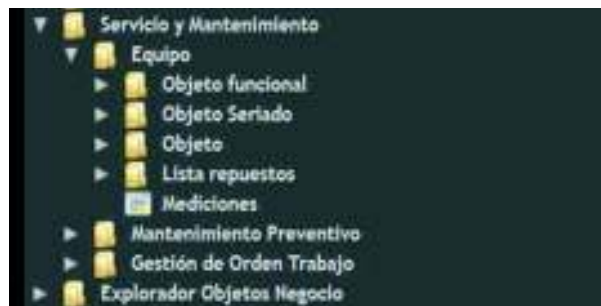


Figura 1.16. Opciones para equipo

Objeto funcional: es aquel que por sí solo es capaz de cumplir una determinada función para la cual fue concebido. Dentro de los lineamientos establecidos por los administradores del sistema IFS, generalmente a estos objetos se los realiza Acciones de Mantenimiento Preventivo AMPs. La Figura 1.17 muestra las opciones para objeto funcional dentro del sistema IFS.



Figura 1.17. Opciones para objeto funcional

Objeto serial: es aquel que forma parte del objeto funcional y que cuya falla podría provocar que todo el objeto funcional no pueda cumplir con sus funciones para las cuales fue creado. Dentro de los lineamientos establecidos por los administradores del sistema IFS, generalmente a estos objetos se los realiza Avisos de Falla.

Existen algunos casos en los cuales el objeto funcional es considerado como objeto serial por su naturaleza de funcionalidad.

Dentro de la carpeta objeto funcional, se tienen dos opciones: objeto funcional, es el formulario a utilizarse para ingresar la información de un objeto funcional nuevo en el sistema IFS como se muestra en la Figura 1.18; mientras que objetos funcionales, es la opción que permite cargar la base con la que cuenta el sistema IFs, en este caso de objetos funcionales. Es importante mencionar que existen varias opciones para filtrar búsquedas cuando se carga la base de datos con la que cuenta el sistema IFS.

Figura 1.18. Formulario de información para objetos funcionales

Dentro de la carpeta objeto seriado, se tienen tres opciones: objeto seriado, es el formulario a utilizarse para ingresar la información de un objeto serial nuevo en el sistema IFS; objetos serie, es la opción que permite cargar la base con la que cuenta el sistema IFs, en este caso de objetos seriales; finalmente, histórico de objeto serie, es la opción para acceder al historial de determinado objeto serial susceptible de mantenimiento. Las tres opciones para objeto seriado se muestran en la Figura 1.19.

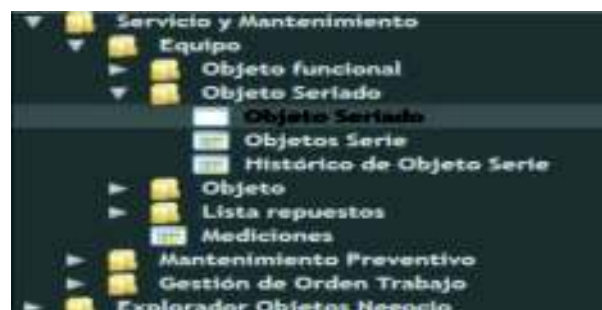


Figura 1.19. Opciones para objeto seriado

Dentro de la carpeta objeto, se tienen dos opciones: objetos permite acceder a las características de cada uno de los objetos que son parte de la base de datos del

sistema IFS; mientras que estructura de objeto, permite acceder a la información estructural de la organización del activo dentro de la planta. La Figura 1.20 muestra las opciones para objeto.

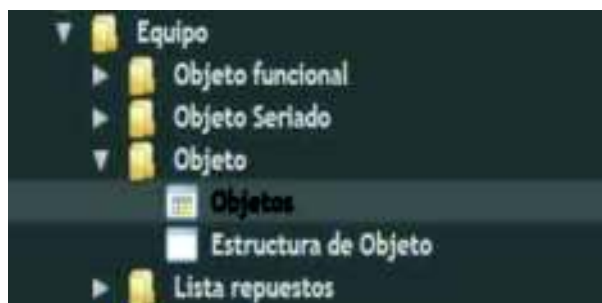


Figura 1.20. Opciones para objeto

Dentro de la carpeta lista repuestos, se tiene acceso a los repuestos relacionados con cada uno de los objetos; sin embargo, aún no se han cargado los elementos en esta aplicación. De la misma manera, se tiene la opción de mediciones históricas. La Figura 1.21 muestra la opción para lista de repuestos.

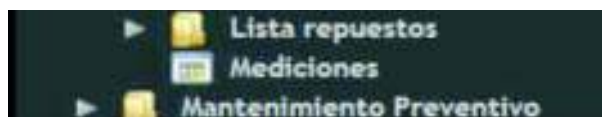


Figura 1.21. Opciones para lista repuestos

Finalmente, la estructura formada por todos los equipos (objetos), está organizada en la Aplicación Explorador de Objetos Negocio, donde la CELEC E.P., tiene todas sus Unidades de Negocio, dentro de las mismas, cada una de sus centrales de generación. Toda la estructura de objetos es organizada en base a niveles según recomendación de la norma PAS55 como referencia. La Figura 1.22 muestra la organización de las Unidades de Negocio.

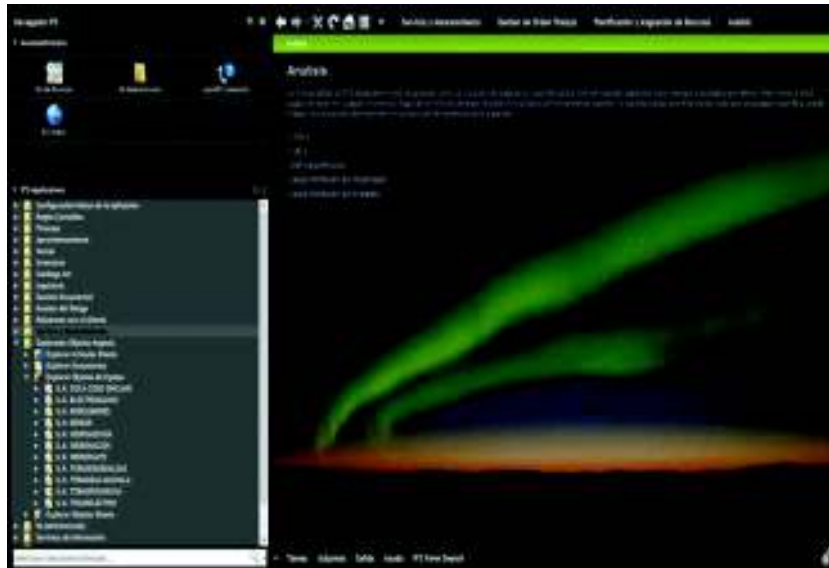


Figura 1.22. Explorador objetos de Unidades de Negocio

Para el caso de la unidad de negocio Coca Codo Sinclair, se tienen las centrales de generación Manduriacu y Coca Codo Sinclair según las zonas donde se encuentran ubicadas, como lo muestra la Figura 1.23.



Figura 1.23. Explorador objetos Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair

Dentro de la Central Coca Codo Sinclair, se encuentran estructurados sus activos en niveles y en el caso específico mostrado en la Figura 1.24, se llega hasta los objetos seriales que son parte del inyector 01 del regulador de velocidad de la unidad de generación 1.

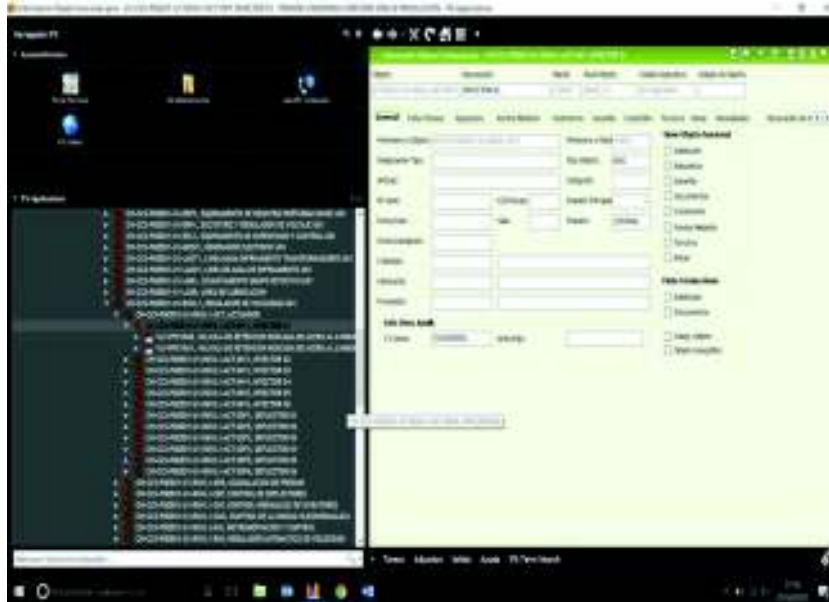


Figura 1.24. Explorador objetos Unidad 1 / Regulador de Velocidad

Mantenimiento Preventivo: en el caso de Mantenimiento Preventivo, el mismo está formado de 4 partes: Trabajo Estándar, Programa Trabajo, Acciones MP y Mediciones, como puede observarse en la Figura 1.25.

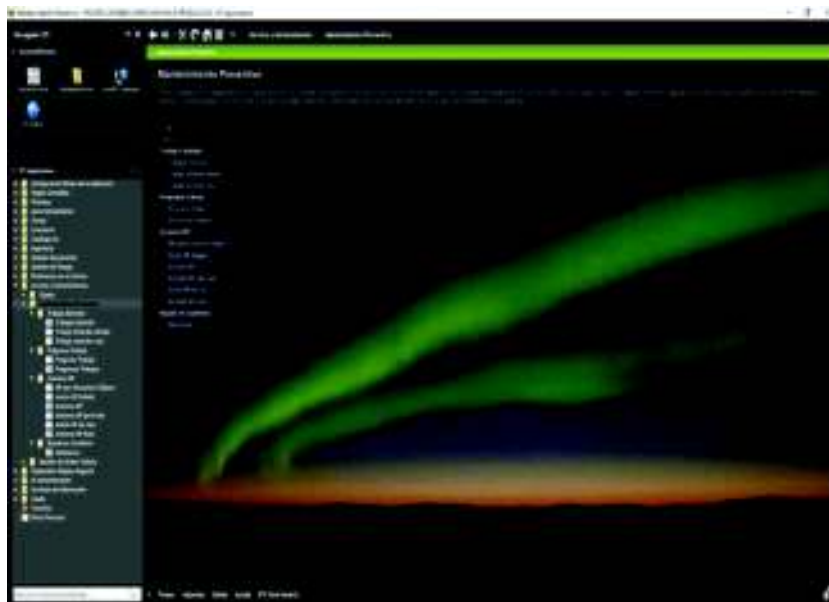


Figura 1.25. Opciones para Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo se fundamenta en el plan de mantenimiento, el cual, permitirá mantener controlados los activos de la estructura de objetos disponible en el Módulo de Mantenimiento del sistema IFS. Las acciones de mantenimiento preventivo, conocidas en el sistema IFS como AMP, se generan por calendario o por condición. La Figura 1.26 muestra a estructura de mantenimiento preventivo en el sistema IFS.



Figura 1.26. Estructura de Mantenimiento Preventivo

Trabajos Estándar: son plantillas donde se incluyen procedimientos de trabajo y recursos (personal, tiempos, materiales, repuestos, herramientas, etc.); son utilizadas en AMP y en órdenes de trabajo. En el sistema IFS, se tienen las opciones respectivas para el manejo de los trabajos estándar.

Programa Trabajo: es la programación detallada en el programa de mantenimiento y cuya frecuencia de trabajos es ingresada al sistema IFS.

Acción de Mantenimiento Preventivo: consiste en crear un modelo (trabajo estándar) aplicado a un objeto y basado en el plan de mantenimiento establecido.

Basado en Condición: es donde se ingresan las mediciones, para en base a los resultados programar los trabajos de mantenimiento requeridos por determinado activo. Las herramientas con las que cuenta el IFS, permiten implementar y gestionar el mantenimiento desde el punto de vista predictivo.

Basado en Condición: en el caso de Gestión de Orden de Trabajo, el mismo está formado de 7 partes: Informe de Fallo / Solicitud de Servicio, Preparación,

Planificación y Asignación de Recursos, Reporte, Órdenes de Aislamiento y Permisos; y Análisis, como se observa en la Figura 1.27.



Figura 1.27. Estructura de Mantenimiento Preventivo - IFS

La Orden de Trabajo, conlleva toda una serie de procesos internos que pretenden entregar un “Trabajo Completo” sobre un objeto de mantenimiento que se encuentra en la “Estructura de Objetos” con la que cuenta el IFS de la Central Coca Codo Sinclair.

Dentro de su ciclo de ejecución, se encuentran las siguientes etapas:

Planificación y preparación: el primer paso dentro del flujo de Planificación y Preparación de la Orden de Trabajo, es la Generación de la orden; las cuales se crean de tres formas diferentes:

1. Mantenimiento Preventivo corresponde a las ordenes de trabajo creadas a partir del Programa de Mantenimiento establecido, a partir de las AMP's y a partir de las mediciones, es decir, basadas en condición. De esta manera se genera la orden de trabajo planificada.

2. Adecuaciones / Mejoras hace referencia a las órdenes de trabajo generadas manualmente a manera de petición de trabajo y que normalmente responden a trabajos de mejoras. De esta manera se genera la orden de trabajo manual.
3. Mantenimiento Correctivo utiliza las órdenes de trabajo generadas a partir de Avisos de Falla, los cuales se utilizan para informar sobre una novedad, defecto o falla en un equipo (objeto serial). De esta manera se genera dicha solicitud.

Una vez generada la orden de trabajo, el siguiente estado es “observada”, que es el punto de autorización de la Jefatura de Mantenimiento para iniciar la gestión de la orden. El siguiente paso es asignación de recursos (tiempo, materiales, repuestos, herramientas, etc.). En este punto, el analista de programación y control, consolida y verifica recursos en base a otras ordenes generadas.

En el siguiente paso, intervienen de forma transversal el Proceso de Producción, donde verifican la necesidad de permisos y aislamientos, para finalmente “Lanzar” la orden de trabajo y este es el punto donde la orden se encuentra lista para su Ejecución.

La Figura 1.28 muestra el flujo y estados de las ordenes de trabajo en la fase de planificar y preparar, con permisos y aislamientos que se aplica en la CELEC EP.

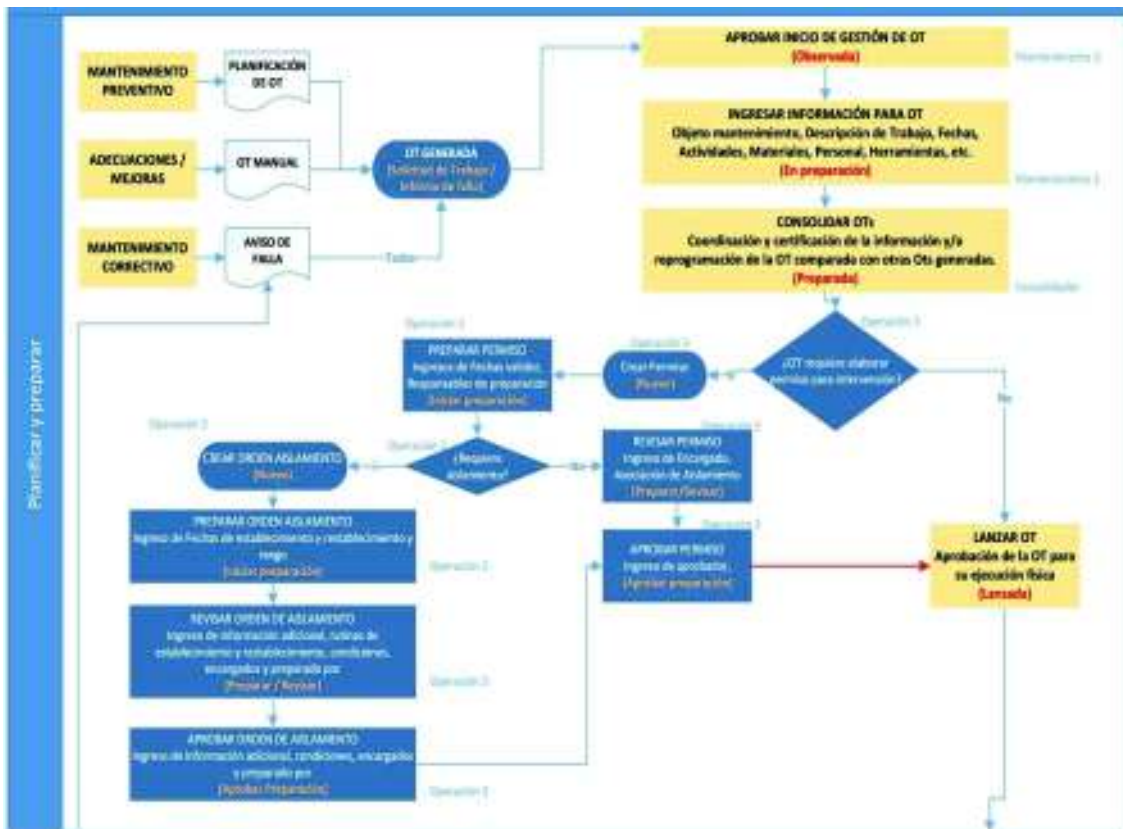


Figura 1.28. Flujo y estados de la Orden de Trabajo – Planificación y Preparación

Ejecución: al inicio de la ejecución, es necesario proceder con los permisos y aislamientos que tienen relación con las áreas de Seguridad Industrial y Operación; y que no son parte del proceso de Gestión de Mantenimiento. Luego de lo finalizado el paso anterior, se inicia la ejecución de los tareas sobre el activo. Después de finalizado el trabajo y verificado el correcto funcionamiento del equipo, se pasa al estado de Realizado. Una vez concluido el mantenimiento, se liberan los permisos y aislamientos los cuales son responsabilidad de las áreas correspondientes.

La Figura 1.29 muestra el flujo y estados de la orden de trabajo en la fase de Ejecutar, con permisos y aislamientos que se aplica en la CELEC EP.

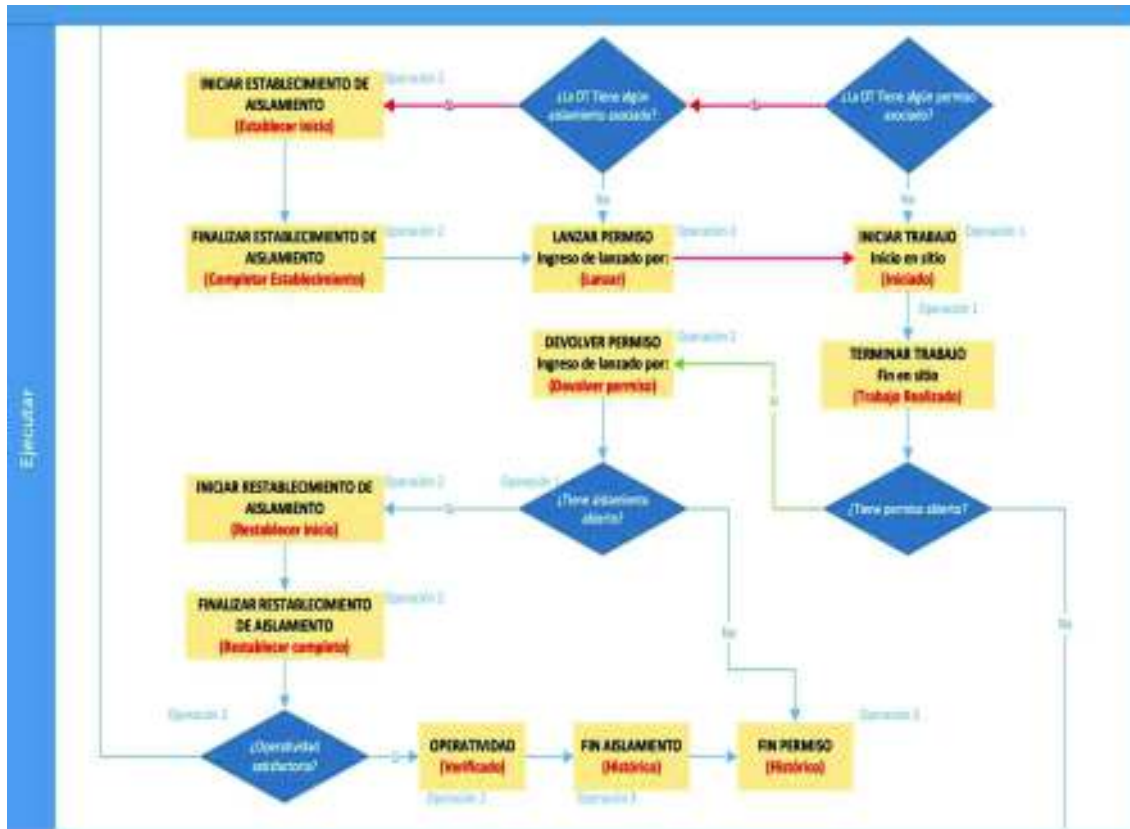


Figura 1.29. Flujo y estados de la Orden de Trabajo - Ejecución

Reporte y cierre: la etapa de Reporte viene una vez “Terminada” la orden de trabajo. Cuando se realiza el reporte en el sistema IFS, se incluyen todos los recursos realmente utilizados en la ejecución del trabajo. Luego de realizado el reporte, la Jefatura de Mantenimiento revisa el mismo y aprueba los costos relacionados con el trabajo para pasar al estado de “Terminar” la orden de trabajo. Finalmente todas las ordenes de trabajo son almacenadas en la base de datos histórica del sistema IFS. La Figura 1.30 muestra el flujo y estados de la orden de trabajo en la fase de Reportar, con permisos y aislamientos que se aplica en la CELEC EP.



Figura 1.30. Flujo y estados de la Orden de Trabajo – Reporte

2 METODOLOGÍA

2.1 ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS DE CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO

2.1.1 NORMA ISO 14224

Como guía para la organización de los datos de confiabilidad y mantenimiento, se utilizó la norma ISO 14224 la cual permitió registrar eventos y experiencias diarias de la vida de los activos que posee la Central Coca Codo Sinclair.

Además, se verificó la recolección de datos y el método utilizado para asegurar la calidad de la información. Finalmente, las recomendaciones de la norma permitieron verificar si la estructura de los datos recolectados, permiten la estimación de la confiabilidad de determinado equipo; así como la comparación con otros equipos de similares características y condiciones de funcionamiento.

2.1.2 CALIDAD DE LOS DATOS Y ESTRUCTURA DE LA INFORMACIÓN

Uno de los aspectos importantes dentro de análisis de confiabilidad, correspondió a la calidad de la información a ser utilizada, por ende, se aplicó la norma ISO 14224, la cual brindó las siguientes características para asegurar que los datos sean de calidad:

- Se verificó que la información sea exhaustiva en cuanto a la especificación del estudio.
- Se identificó el cumplimiento del uso de las definiciones para los parámetros de confiabilidad, tipos y formato de los datos.
- Además, se revisó que la trazabilidad (ingreso, transferencia, manejo y almacenamiento) de la información esté controlada.

2.1.2.1. Obtención de datos de calidad

Según la norma ISO 14224, la alta calidad en los datos viene caracterizada por:

- La exhaustividad que tienen los datos de acuerdo a las especificaciones.
- El cumplimiento de todas las definiciones de los parámetros de confiabilidad, tipos y formatos de datos.
- Ingreso, transferencia, manejo y almacenamiento exacto de datos (manual o a través de medios electrónicos).

En la norma ISO 14224 punto 4, se encuentra especificada la guía para la obtención de datos de calidad, en este apartado están las medidas consideradas para para el levantamiento de los datos con el fin de realizar un estudio de confiabilidad y que su resultado sea válido. La guía dada por la norma, sirvió de camino para el desarrollo del presente trabajo.

Del apartado 4, se evaluó los siguientes puntos; esto finalmente fue plasmado en una lista de verificación la cual fue aplicada y más adelante se evidencia sus resultados al momento de realizar el diagnóstico del sistema de información.

- Se verificó las diferentes fuentes de información que posee la empresa, y con ello se comprobó la existencia de información suficiente de inventario y de operaciones.
- Se revisó los objetivos de levantamiento de información y cuál fue su uso final.
- Se identificó las fuentes de información que aseguran la calidad de los datos.
- Se contrató las fechas de instalación de los equipos estudiados con los periodos que han estado en operación.
- Se analizó los procesos de recolección de información.

- Se constató la existencia de capacitaciones al personal relacionado con la recolección de información, y de planes de incentivos para los mismos por su participación.
- Se comprobó planes de mejoramiento de los procedimientos de recolección de información y del control de calidad de los datos.

2.1.2.2. Fuentes de datos

Como primera consideración, se verificó que la principal fuente de información corresponde a los sistemas de mantenimiento propios de la empresa, por lo tanto, los procesos de levantamiento de información que mantienen estas áreas, fueron ser los necesarios para asegurar la calidad de la información. Además, se verificó que ésta información esté estrictamente relacionada con la generada por producción, ya que esto da la importancia del mantenimiento en un equipo.

En este punto, fue necesario revisar:

- La existencia de un sistema de seguimiento y control de los datos de mantenimiento.
- El nivel de detalle de la información recolectada de acuerdo a los objetivos de seguimiento.
- Las prioridades generadas de acuerdo a la influencia o importancia de los equipos.
- El involucramiento del personal y la concientización de recolectar bien la información para beneficio de la empresa y de todos los que trabajan en ella.

2.1.2.3. Formato y estructura de la base de datos

Para el formato y estructura de la base de datos, se consideró el punto 6 de la norma ISO 14224, el cual está estrictamente relacionado con los datos recolectados y su

forma de hacerlo. La norma establece que, la categoría de los datos y su forma de recolección debe ser de manera organizada y estructurada. Con ello se verificó cumplimiento de acuerdo a los siguientes puntos:

- Datos del equipo: contenían datos de identificación (ubicación, clasificación, instalación), datos del diseño (datos del fabricante, especificaciones de diseño) y datos de aplicación (operación y medio ambiente).
- Datos de averías: estaban conformados por datos de identificación, registro de averías y ubicación de equipo, datos de la avería (fecha, partes afectadas, severidad, modo de falla).
- Datos de mantenimiento: estuvieron conformados por datos de identificación (registro de mantenimiento, ubicación del equipo, averías pasadas), datos de mantenimiento (fechas, tipos, recursos usados, etc).

Se constato que el formato de los datos, haya estado de acuerdo al tipo de información recopilada y a los atributos que la información brinda, en esta sección, el uso de códigos facilitó el registro y la interpretación de la información generada, estos códigos fueron óptimos, por lo tanto, aportaron información para el análisis. Además, que la información estuvo almacenada en una base de datos, la cual registró las relaciones entre los datos recolectados, solo así, el acceso a la información facilitó cualquier tipo de análisis posterior.

2.2 JERARQUIZACIÓN DE ACTIVOS

Los límites indican los datos RM que se recopilarán y serán establecidos en cada paso para el activo especificado analizado.

Se comprobó la especificación de límites, la cual permitió realizar el análisis de datos compatibles, por lo tanto, fue necesario tener definidos los límites que indiquen qué tipo de información es la que se debe recolectar y cuáles fueron los rangos considerados como normales.

Se verificó que la definición de los límites, haya tomado en cuenta la ubicación de los elementos y evidencie las subunidades que componen una clase de equipo. Mediante una descripción textual, se clarificó cuales fueron los elementos que están dentro y fuera de los límites.

Una vez revisados los límites, se revisó la jerarquía del equipo, la cual constó de varios niveles, en el más alto se estableció la clase de unidad de equipo, a partir de este nivel, el número de subdivisiones varió de acuerdo al análisis y a la complejidad que tuvo el equipo estudiado.

2.2.1 DATOS DE LOS EQUIPOS

Se verificó que para iniciar con la recolección de información, previamente se haya establecido una clasificación al equipo considerando: parámetros técnicos específicos del equipo, información de operaciones y producción del equipo, y datos del entorno y medio ambiente en el que opera. Para cumplir con los requisitos de la norma, se observó que la recopilación de información tenga al menos de los siguientes aspectos:

- Identificación
 - Número de identificación del equipo
 - Clase de unidad del equipo
 - Tipo de equipo
 - Aplicación
 - Nombre de la instalación
 - Categoría de la instalación
 - Categoría de operación
- Diseño
 - Datos del fabricante

- Designación del modelo del fabricante
- Características del diseño
- Aplicación
 - Período de mantenimiento

2.2.2 DATOS DE AVERÍAS

Para la recolección de información relacionada con las averías, se verificó que el sistema de codificación, el conjunto de averías sea uno solo para todos los equipos, incluso varias plantas.

Los datos mínimos a recolectados fueron:

- Identificación
 - Registro de averías
 - Ubicación del equipo
- Datos de la avería
 - Fecha de la avería
 - Modo de avería
 - Clase de severidad

2.2.3 DATOS DE MANTENIMIENTO

Se consideró que el objetivo fue corregir y evitar la ocurrencia de las averías, para ello, se tomó en cuenta el seguimiento de todas las averías presentadas en los equipos, y de ser posible en las plantas que utilicen equipos similares.

Los datos mínimos a considerados y requeridos por la norma fueron:

- Identificación
 - Registro de mantenimiento
 - Ubicación del equipo
 - Registro de la avería
- Datos del mantenimiento
 - Fecha del mantenimiento

2.3 ESTUDIO DE LAS FUNCIONES

El estudio de las funciones tiene el objetivo de identificar cuales de ellas son primarias y cuales son secundarias, para ello se utilizó la siguiente metodología:

- En base al contexto operacional, se identificaron las funciones primarias, las cuales deben estar trabajando correctamente para asegurar el funcionamiento del sistema
- Posteriormente, se identificaron las funciones secundarias considerando los aspectos:
 - Integridad ambiental
 - Seguridad
 - Integridad estructural
 - Control
 - Contención
 - Confort
 - Apariencia
 - Protección
 - Economía / eficiencia
 - Funciones superfluas

- Funciones confiables

Una vez definida cada una de las funciones primarias, las funciones secundarias aportan con mayor información del contexto bajo el cual opera el sistema y sus subsistemas.

2.4 ESTUDIO DE LAS FALLAS

2.4.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS MODOS DE FALLA

Se planteó una metodología la cual permitió que una vez identificado el contexto operacional y las funciones que tiene el equipo, identificar sus fallos. Es decir, mediante la investigación de cada una las posibles fallas a presentarse en los equipos, específicamente, los fallos que provocaron que el equipo funcione fuera de los parámetros establecidos, y genere operaciones irregulares. El fallo funcional a ubicar correspondió al que generó incapacidad de realizar las operaciones, a esto se le conoce como identificación de modos de fallo. La metodología permitió identificar claramente los puntos descritos.

2.4.2 EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LA FALLA

Después de realizada la identificación del contexto operacional y de las posibles fallas, fue necesario responder la siguiente pregunta: ¿qué efectos se presentan después de la ocurrencia de la falla?. Para responder a esta pregunta se revisó un registro histórico de las fallas.

Los registros de efectos y consecuencias de falla permitieron establecer la prioridad de atención a las fallas, además, generar conocimiento para la identificación de los efectos producidos por los modos de falla.

Las consecuencias de las fallas, pudieron diferenciarse debido a su gravedad en el impacto que tienen sobre las funciones del equipo analizado:

Muy alta: se presentan consecuencias en la seguridad y en el medio ambiente.

Alta: relacionada con los efectos sobre dispositivos de seguridad y exponen a un fallo múltiple.

Media: caracterizado por presentar fallas con consecuencias operacionales, afecta a la producción en sus características.

Baja: consecuencias no operacionales.

El AMEF fue aplicado con los siguientes propósitos:

- Identificar los modos de fallas posibles a presentarse y los ya presentados.
- Identificar las causas y efectos de cada modo de falla tiene.

Los problemas identificados fueron priorizados de acuerdo a los criterios:

Ocurrencia: responde con qué frecuencia se presentó esta falla.

Severidad: está relacionada a los efectos que tuvo la presencia de la falla.

Detección: indicó cuán fácil es detectar esta falla.

2.5 DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA

Para determinar la estrategia, se consideró el programa de vida, y los siguientes criterios:

- El grado de imprecisión que podía tener la información debido a que el proceso de recolección de la misma es nuevo.
- Las expectativas o requisitos de desempeño del activo.

- El establecimiento de una evaluación continua del cumplimiento del proceso MCC, tanto en el cumplimiento de las expectativas funcionales, como en la toma de decisiones.

Posterior a esto, se evaluó el grado de cumplimiento del proceso MCC mediante la resolución de un cuestionario, el cual tomó en cuenta: cambios en el contexto operacional, expectativas operacionales, modos, efectos y consecuencias de falla, políticas de manejo de falla, etc.

2.6 EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE MANTENIMIENTO DEL SISTEMA FINANCIERO INDUSTRIAL IFS

Para la evaluación del Módulo de Mantenimiento del Sistema Financiero Industrial IFS, se utilizó una lista de verificación acorde a los puntos recomendados en la norma ISO 14224; lo cual sirvió para encontrar los puntos de mejora para la recolección de datos de calidad.

El siguiente cuestionario fue utilizado para la evaluación del módulo de mantenimiento:

- ¿Existe un estándar en la información registrada en el sistema IFS?
- ¿Existe un estándar en los procesos registrados en el sistema IFS?
- ¿Existe una definición del objetivo de recolección de información?
- ¿Existe una clasificación de activos con una topología adecuada?
- ¿Están definidos los atributos y criterios de calidad que deben ser considerados el momento de recoger la información de cada activo?
- ¿Existen enfoques comunes para la evaluación y registro de la condición de un activo?

- ¿Están definidos los métodos para categorizar las fallas y defectos de los activos?
- ¿Está definida la información taxonómica de los activos en una base de datos?
- ¿Se encuentran definidos los límites para cada clase de equipo?
- ¿Existe una definición uniforme de la falla y un método de clasificarlas?
- ¿Existe un registro de definición de los puntos de verificación de la calidad de la información?
- ¿El sistema permite definir criterios de priorización para la recolección de la información?
- ¿Existe una definición de un plan de recolección de información?
- ¿La información es precisa y refleja a la entidad que representa?
- ¿La información es completa de cada activo?
- ¿La información es consistente a las definiciones, reglas, formatos y estándares que usa la compañía?
- ¿La información recolectada es válida o cumple con las reglas de almacenamiento de información?
- ¿La información refleja el estado temporal del activo y es actualizada de acuerdo a las definiciones de la empresa?
- ¿La información recolectada es registrada con códigos únicos para evitar duplicidad?
- ¿El sistema permite la trazabilidad de la información recolectada?
- ¿Se realiza una revisión periódica de las fuentes de datos utilizadas por el sistema IFS?
- ¿La información recolectada está de acuerdo al estándar de interpretación?

- ¿El sistema permite recolectar información suficiente para dar validez estadística?
- ¿El sistema permite realizar análisis costo beneficio?
- ¿Existe una herramienta dentro del sistema que permita realizar calidad de datos?
- ¿Se puede realizar un proceso de verificación de calidad de datos documentado?

El resultado de la aplicación de este cuestionario se presenta en el capítulo siguiente, en donde se detallan los hallazgos.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA COCA CODO SINCLAIR

Durante el año 2017, la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, tuvo una capacidad de producción en tiempo de 64 128 horas para sus 8 unidades de generación. Como se mencionó en el capítulo anterior, el método para el cálculo de la confiabilidad, se describe en el “INSTRUCTIVO PARA EL SEGUIMIENTO DE LA GESTIÓN TÉCNICA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS CENTRALES DE GENERACIÓN”. Los datos utilizados para el presente análisis, provienen de los Informes Mensuales de Generación. Con las fuentes mencionadas, se realiza el siguiente análisis:

Tabla 3.1. Indicadores de Generación

Mes	HP (horas)	HMProg (horas)	HFFI (horas)	HMCOR, For, Emerg (horas)	Producción (horas)	Energía (MWh)
Enero	5 952	560,56	2,60	24,59	5 363	582 277
Febrero	5 376	239,62	1,45	29,18	5 099	495 091
Marzo	5 952	403,25	7,37	16,90	5 497	515 815
Abril	5 760	302,32	63,60	2,60	5 350	387 508
Mayo	5 952	86,22	0,92	60,13	5 778	413 215
Junio	5 760	347,90	3,87	119,95	4 822	399 735
Julio	5 952	357,32	1,27	4,08	5 168	442 922
Agosto	5 952	1 850,32	8,30	0,00	3 942	413 405
Septiembre	5 760	829,98	16,42	20,90	4 892	579 423
Octubre	5 952	290,27	3,47	0,00	5 647	567 529
Noviembre	5 760	243,33	4,52	29,58	5 478	535 377
Diciembre	5 952	546,73	10,03	157,73	5 234	612 459

En la Tabla 3.1, se puede observar Producción (horas), este indicador hace referencia a las horas reales que la central estuvo generando potencia según la demanda del sistema. El número total de horas utilizadas en producción alcanzó 62 270 h durante todo el año (período analizado), y la energía generada fue de 5 944 756 MWh, lo que da una potencia promedio de 95,5 MW. Con esta información se obtiene la Figura 3.1:

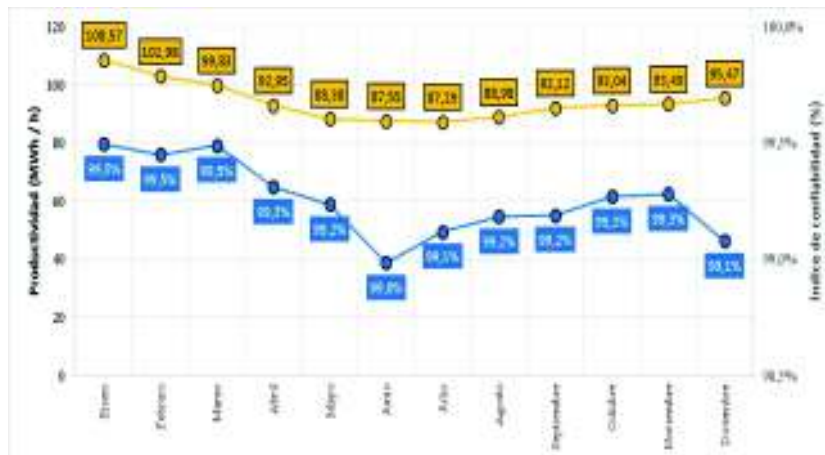


Figura 3.1. Índice de Confiabilidad y productividad

El índice de confiabilidad acumulado se encuentra alrededor del 99%; lo que deja un rango del 1 % para la mejora de este índice; sin embargo, uno de los objetivos de mejorar la confiabilidad es mejorar también la productividad. La productividad corresponde al cociente de la energía generada respecto de la cantidad de horas utilizadas en la generación (horas reales de producción).

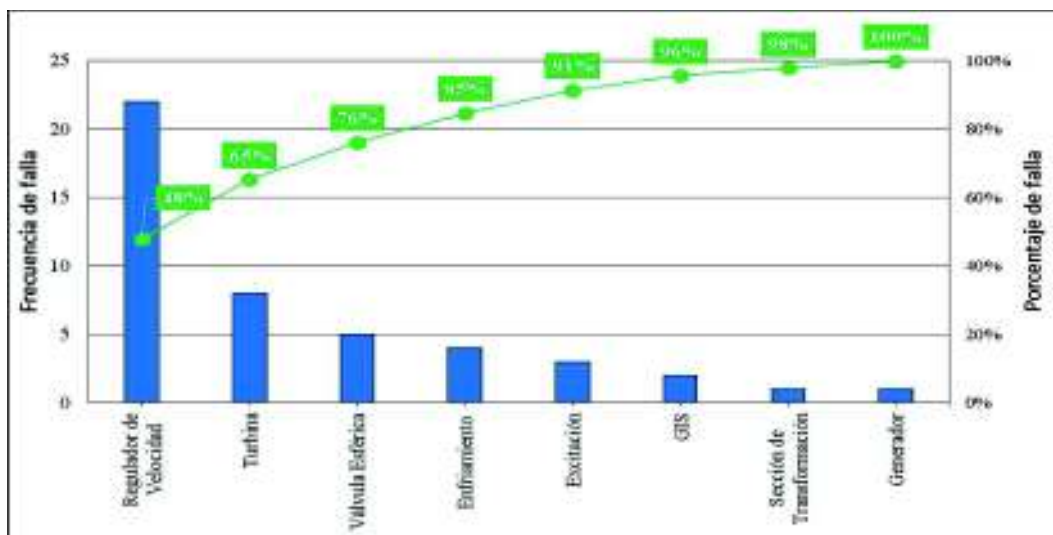
Existen dos motivos que afectan a la productividad. El primero está relacionado con los mantenimientos preventivos que se realizan a las unidades y que básicamente responden al plan de mantenimiento proporcionado por el fabricante. El segundo, que es en el que se enfoca el presente trabajo, es el relacionado con la pérdida de producción debido a fallas en alguno de los sistemas que provoca parada de la unidad.

Las fallas y el estudio de las mismas están directamente relacionadas con la confiabilidad de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. Para el efecto del presente trabajo, se determina cuál es el sistema que presenta mayores inconvenientes en las fallas reportadas por el área de operación. El resumen de las fallas se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Horas de indisponibilidad total por fallas

Sistema	Frecuencia	Total
Regulador de Velocidad	22	214,65
Válvula Esférica	5	162,96
Enfriamiento	4	65,81
Turbina	8	27,39
GIS	2	12,85
Excitación	3	9,12
Sección de Transformación	1	6,17
Generador	1	3,82
Abatimiento de Agua	0	0
Centros de Carga	0	0
IPB	0	0
Unidad de Control Local	0	0
Monitoreo en Línea	0	0
Protecciones	0	0

La frecuencia con la que ha fallado cada uno de los sistemas es un dato importante para determinar el sistema que demanda atención inmediata; para lo cual, se realizó un análisis de Pareto, el cual se puede observar en la Figura 3.2.

**Figura 3.2.** Pareto de fallas

Como se observa en la Figura 3.2, el sistema que representa el mayor número de horas de indisponibilidad, corresponde al Sistema de Regulación de Velocidad, con el 48%; lo que exige, que los esfuerzos mayoritarios, se concentren en dicho sistema, con el fin de priorizar problemas y centrarse en la mejora continua.

El sistema de regulación de velocidad se compone de tres sub sistemas. En la Tabla 3.3, se muestra el análisis para determinar cuál ellos demanda mayor atención:

Tabla 3.3. Subsistemas del regulador de velocidad

Subsistema	Frecuencia	Porcentaje
Hidráulico - Mecánico	16	73 %
Control del gobernador	5	23 %
Presión Aire - Aceite	1	5 %

De los resultados, el enfoque se realizaría para el sistema de regulación de velocidad, subsistema hidráulico mecánico, debido a que demandaría mucho tiempo aplicar la metodología a todos los componentes del sistema de regulación de velocidad, a continuación, se presenta el análisis de criticidad de los componentes del subsistema que mayores inconvenientes presenta por sus eventos de falla.

Siguiendo la metodología descrita (Carranza y Romero, 2014):

- El nivel en el cual se realizará el análisis de criticidad es en elemento mantenible, del subsistema hidráulico – mecánico del sistema de regulación de velocidad.
- Para definir la criticidad, se utilizan los datos de frecuencia y consecuencia. Para la frecuencia, la información disponible es el número de eventos por año; en el análisis se utilizan los criterios mostrados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Escala de frecuencia

Categoría	Interpretación
5	Probabilidad de ocurrencia mayor al 80 %
4	Probabilidad de ocurrencia entre 60 % y 80 %
3	Probabilidad de ocurrencia entre 40 % y 60 %
2	Probabilidad de ocurrencia entre 20 % y 40 %
1	Probabilidad de ocurrencia menor al 20 %

Con los datos recolectados del último año de operación, se extrajo los criterios de frecuencia para distintos elementos mantenibles.

A continuación se presentan los criterios de frecuencia en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Criterios de frecuencia

Parte mantenible	Frecuencia	Probabilidad (%)	Categoría
Válvula piloto control deflectores	9	56	3
Válvula control direcc prop deflectores	5	31	2
Válvula propor control inyectores	2	13	1
Tubería inyectores	0	0	1
Válvula unidirecc inyectores	0	0	1
Válvula unidirecc deflectores	0	0	1
Tubería de deflectores	0	0	1
Válvula de parada de emergencia	0	0	1
Disp. protec. sobre veloc. Mecánica	0	0	1
Tubería dispos emereancia	0	0	1
Medidores analógicos	0	0	1
Gabinete	0	0	1
Elementos de mando y maniobra	0	0	1
Cableado	0	0	1

En base a los datos obtenidos durante el año de operación de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, tenemos los siguientes criterios de consecuencia para distintos elementos mantenibles, los cuales se exponen en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Criterios de consecuencia

Parte mantenible	Tiempo eventos	Probabilidad (%)	Categoría
Válv piloto ctrl deflectores	19,83	83	5
Válv ctrl direcc prop deflectores	2,53	11	1
Válv propor contrl inyectores	1,45	6	1
Tubería inyectores	0	0	1
Válv unidirecc inyectores	0	0	1
Válv unidirecc deflectores	0	0	1
Tubería de deflectores	0	0	1
Válvula de parada de emergencia	0	0	1
Disp. protec. sobre veloc. Mecánica	0	0	1
Tubería dispos emereancia	0	0	1
Medidores analógicos	0	0	1
Gabinete	0	0	1
Elementos de mando y maniobra	0	0	1
Cableado	0	0	1

- Al realizar el cálculo de criticidad (frecuencia \times consecuencia), y en base a la matriz de criticidad presentada en Carranza (2014), la cual se expone en la Figura 3.3, se observa que el elemento mantenible válvula piloto de control de deflectores presenta una Alta Criticidad.

Categoría de Frecuencia	5	M	M	A	A	A
	4	M	M	A	A	A
	3	B	M	M	A	A
	2	B	B	M	M	A
	1	B	B	B	M	A
Categoría de Consecuencias		1	2	3	4	5

Figura 3.3. Evaluación de criticidad

Se utiliza el análisis de criticidad como una herramienta complementaria de decisión sobre el activo o sistema que requiere ser aplicada la metodología con el fin de reducir sus indisponibilidades y de esta manera aumentar su confiabilidad.

3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

Debido a la complejidad del sistema de Regulación de Velocidad, para la aplicación de la metodología, se utilizará únicamente el nivel jerárquico superior de sus componentes como lo muestra la Figura 3.4.



Figura 3.4. Diagrama del sistema de regulación de velocidad

■ Generalidades

De forma general, el sistema de regulación de velocidad, es el encargado de controlar la velocidad de cada una de las turbinas de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, por medio de la apertura y cierre de inyectores / deflectores.

El regulador de velocidad para turbinas Pelton de múltiples inyectores tiene una estructura paralela que consiste en control por velocidad, control por flujo, control por nivel y control por potencia. Antes del ingreso de la turbina al Sistema Nacional Interconectado SNI, se escoge el modo de control por velocidad. En este modo, la turbina es llevada a la velocidad nominal y la mantiene en condiciones requeridas para su ingreso al SNI.

Después del ingreso de la turbina al SNI, el sistema de control de velocidad puede estar en cualquiera de los otros modos disponibles. En estos modos, la turbina generará la potencia activa que el usuario la requiera.

■ Partes del Regulador de Velocidad

El sistema de regulación de velocidad, para cumplir con sus funciones primarias, está formado por las siguientes partes:

- El sistema de control del gobernador es el encargado del monitoreo y control de todo el sistema.

- Sistema hidráulico / mecánico se encarga de tomar las señales de los diferentes elementos y entregar al sistema de control; de la misma manera, toma las órdenes del sistema de control y ejecuta dichas órdenes.
- Sistema hidráulico / mecánico es quien toma las señales de los diferentes elementos y entregar al sistema de control; de la misma manera, toma las órdenes del sistema de control y ejecuta dichas órdenes.
- Dispositivo de presión aire / aceite el cual provee de aire comprimido a determinada presión al sistema hidráulico / mecánico para que pueda realizar su trabajo de actuación.

3.2 APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 14224

Para la aplicación de la norma ISO 14224, fue necesario primero realizar un diagnóstico mediante una lista de verificación, en donde se tomaron en cuenta los siguientes parámetros que fija la norma correspondientes a: control de calidad antes de la recolección de datos, límites y jerarquías de equipos, estructura de la información, e información de equipos, averías y mantenimiento.

Con lo cual se obtuvo las listas de verificación expuestas en las Tablas 3.7 a 3.12.

Tabla 3.7. Lista de verificación: Calidad de los datos

Item	Estado	Evidencia
a. ¿ Se investigaron las fuentes para asegurar datos históricos y que los datos operativos estén completos?	Parcial	Según el diseño de los fabricantes se realiza la toma de datos operativos en el sistema SCADA pero no se han investigado de ninguna manera las fuentes.
b. ¿ Se definieron objetivos de recopilación de datos para su uso específico?	Parcial	Solo han sido definidos para análisis de disponibilidad. Se evidencia en informes mensuales de operación (CEL-FOR-DGN-00X).
c. ¿ Se investigaron la(s) fuente(s) a fin de asegurar disponibilidad de datos de buena calidad?	No	No se ha realizado investigación de fuentes de datos.

Tabla 3.8. Lista de verificación: Calidad de los datos (Continuación)

Item	Estado	Evidencia
d. ¿ Se identificaron fechas de instalación, población y período(s) operativo(s) del equipo que se extraerán los datos?	Parcial	Solo se identifican los períodos operativos. Se evidencia en informes mensuales de operación (CEL-FOR-DGN-00X).
e. ¿ Existen procedimientos planeados de recopilación de datos?	No	No se cuenta con procedimientos planeados de recopilación de datos.
f. ¿ Capacita al personal en la toma de datos?	Parcial	Solo se capacita al personal de mantenimiento en la toma de datos de pruebas realizadas.
g. ¿ Cuenta con un proceso que asegure la calidad del proceso de recopilación de datos (incluye análisis de datos, control de calidad documentado, identificación de datos)?	No	No se cuenta con procesos o procedimientos de calidad .

Tabla 3.9. Lista de verificación: Sistemas de fuentes de datos

Item	Estado	Evidencia
a. ¿ Ha considerado el manejo de datos de confiabilidad y mantenimiento en el módulo correspondiente del ERP (IFS)?	No	El módulo de mantenimiento del sistema IFS cuenta con la opción de mediciones; sin embargo no se encuentra habilitado completamente.
b. ¿ Se ha definido el nivel de detalle de los datos de confiabilidad y mantenimiento recopilados y reportados en base a la producción e importancia de la seguridad del equipo?	No	No se han definido niveles de detalle.
c. ¿ Se han establecido prioridades en base a evaluaciones de criticidad?	Parcial	Se evidencia cumplimiento parcial en informes de mantenimientos realizados a las unidades de generación.
d. ¿ Se a hecho partícipe al personal involucrado sobre los beneficios de reportar datos de calidad en el proceso de confiabilidad y mantenimiento?	No	No se ha socializado con el personal involucrado en la toma de datos.

Tabla 3.10. Lista de verificación: Límites y jerarquías de los equipos

Item	Estado	Evidencia
a. ¿ Cuenta con diagramas de límites para cada equipo, que muestren las subunidades y las interfaces con los equipos adyacentes?	Parcial	No se cuenta con la totalidad de los diagramas y no están disponibles en campo.
b. ¿ Cuenta con una jerarquización de equipos en base a niveles, con subdivisiones que dependen de la complejidad de la unidad de equipo?	Sí	Se evidencia en: Explorador de Objetos de Negocio - Explorador de Objetos de Equipo - U.N. COCA CODO SINCLAIR (IFS).
c. ¿ Los datos de confiabilidad están estructurados de forma que puedan compararse en cada nivel según la jerarquización?	No	No existen reportes de datos de confiabilidad por niveles.

Tabla 3.11. Lista de verificación: Estructura de la información

Item	Estado	Evidencia
a. ¿ El formato de datos contiene la cantidad de atributos necesaria está basado en una lista de códigos definida?	Parcial	Se evidencia cumplimiento parcial en: Servicio y Mantenimiento - Gestión de Orden de Trabajo - Informe de Fallo/Solic. Servicio.
b. ¿ La estructura de la base de datos recopilados se encuentra organizada y relacionada de tal forma que brinda un fácil acceso para actualizaciones, consultas y análisis?	No	El acceso a la base de datos es confusa y no facilita la extracción de datos históricos de los activos.

Tabla 3.12. Lista de verificación: Información de equipos, averías y mantenimiento

Item	Estado	Evidencia
a. En la identificación del equipo, ¿ se incluyen al menos los datos referentes a ubicación del equipo (número de identificación del equipo), clasificación (clase de unidad de equipo, tipo de equipo y aplicación) y datos de instalación (código o nombre de la instalación, categoría de la instalación y categoría de operación)?	Parcial	La identificación del equipo no corresponde a la misma utilizada en campo. No se encuentra información suficiente de clasificación del equipo. No se dispone de información operativa completa.
b. En el diseño del equipo, ¿ se incluyen al menos los datos referentes a datos del fabricante (nombre del fabricante y designación del modelo del fabricante) y características de diseño (dependiente de la clase del equipo)?	No	Las características de diseño no se encuentran completas.

Tabla 3.13. Lista de verificación: Información de equipos, averías y mantenimiento (Continuación)

Item	Estado	Evidencia
c. En la aplicación del equipo, ¿ se incluyen los datos más relevantes de operación del mismo (período de monitoreo / tiempo calendario)?	No	No se tienen implementadas las opciones de medición en el sistema IFS.
d. En la identificación de la avería, ¿ se incluyen al menos los datos referentes al registro único de avería y la ubicación del equipo?	Sí	Se evidencia en: Servicio y Mantenimiento - Gestión de Orden de Trabajo - Informe de Fallo / Solic. Servicio (IFS).
e. En los datos de la avería, ¿ se incluyen al menos los datos referentes a fecha, modo, y clase de severidad?	Sí	Se evidencia en: Servicio y Mantenimiento - Gestión de Orden de Trabajo - Informe de Fallo / Solic. Servicio (IFS).
f. ¿ Se incluyen observaciones sobre las averías que puedan resultar útiles para un posterior análisis de los datos?	Sí	Se evidencia en: Servicio y Mantenimiento - Gestión de Orden de Trabajo - Informe de Fallo / Solic. Servicio (IFS).
g. En la identificación del mantenimiento, ¿ se incluyen al menos los datos referentes a registro de mantenimiento, ubicación del equipo, registro de la avería?	Sí	Se evidencia en: Servicio y Mantenimiento - Gestión de Orden de Trabajo - Informe de Fallo / Solic. Servicio (IFS).
h. En los datos del mantenimiento, ¿ se incluyen al menos los datos referentes a fecha, categoría, actividad, impacto del mantenimiento en el funcionamiento, subunidad, parte(s) mantenible(s) a la(s) que se realizó el mantenimiento?	Parcial	En las actividades, no se utilizan actividades codificadas y establecidas anteriormente. No se especifica la(s) parte(s) mantenible(s) a la(s) que se realizó el mantenimiento
i. En los recursos de mantenimiento , ¿se incluyen al menos los datos referentes a horas - hombre por disciplina, total de horas - hombre de mantenimiento?	Parcial	Los datos de horas - hombre no son confiables en su totalidad.
j. En el tiempo de mantenimiento, ¿se incluyen al menos los datos de tiempo de mantenimiento activo y tiempo de inactividad?	Parcial	No se especifican tiempos de inactividad del equipo.
k. ¿ Se incluyen observaciones sobre el mantenimiento que puedan resultar útiles para un posterior análisis de datos?	Sí	Se evidencia en: Servicio y Mantenimiento, Gestión de Orden de Trabajo, Reporte, Reportar orden de trabajo (IFS).

3.2.1 LÍMITES Y JERARQUÍAS DE LOS EQUIPOS

Para la definición de los límites se debe considerar que se lo realiza para cada clase de equipo; de manera que se especifique los datos de confiabilidad y mantenimiento que se deben recopilar.

La metodología debe considerar los siguientes puntos:

- Se realiza una lista de todos los sistemas que tienen interrelación con el trabajo del sistema analizado.
- Se utiliza una codificación para identificar a los sistemas de la lista anterior.
- Se realiza una matriz de relaciones entre sistemas.
- Se identifican las principales partes del sistema (partes macro).
- Se estructura todo el sistema con sus partes en forma de diagrama de bloques.
- Se dibujan las interrelaciones.
- Se definen de forma textual los límites.
- Se siguen los mismos pasos para cualquier división de parte o sistema de menor nivel.

De la aplicación al sistema de regulación de velocidad se tiene, el siguiente listado de todos los sistemas con su codificación se presenta en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Codificación

Sistema	Codificación
Turbina	TRB
Abatimiento de agua	ABA
Válvula esférica	MIV
Enfriamiento	ENF
Generador	GEN
Centros de carga	CDC
IPB	IPB
Regulador de velocidad	REG
Excitación	EXC
Unidad de Control Local	LCU
Monitoreo en Línea	MIL
Protecciones	PRO
Sección de Transformación	TRF
GIS	GIS

La matriz de interrelaciones se muestra en la Figura 3.5; misma que representa las relaciones que existen entre el sistema de regulación de velocidad con los demás

sistemas auxiliares; de los cuales su codificación, corresponde a la presentada en la Tabla 3.14.

	TRB	ABA	MIV	ENF	GEN	CDC	IPB	REG	EXC	LCU	MIL	PRO	TRF	GIS
TRB														
ABA														
MIV														
ENF														
GEN														
CDC														
IPB														
REG														
EXC														
LCU														
MIL														
PRO														
TRF														
GIS														

Figura 3.5. Matriz de interrelaciones

El diagrama de límites con sus interrelaciones, sus partes y límites se presenta en la Figura 3.6:

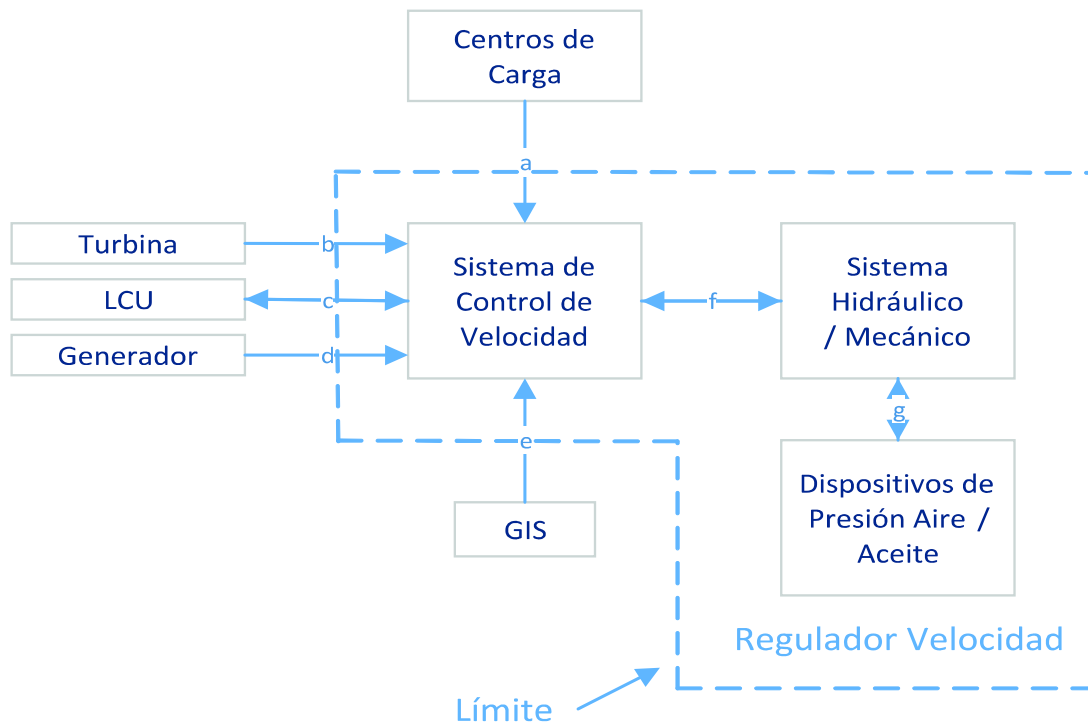


Figura 3.6. Diagrama de interrelaciones

3.2.2 ESTRUCTURA DE LA INFORMACIÓN

La categorización debe responder al objetivo de la recolección de datos que se ha planteado; en este caso en particular, para recopilar datos de confiabilidad y mantenimiento. Es importante mencionar que, para el caso de la Corporación Eléctrica del Ecuador, los niveles de taxonomía superiores a clase del equipo se encuentran definidos para estandarizar en base a cada Unidad de Negocio y Central de Generación. La metodología debe considerar los siguientes puntos:

- Identificar la clase de unidad del equipo en base a la funcionalidad y estructura lógica.
- Identificar las unidades de equipo, se podría ayudar del diagrama de límites.
- Identificar las subunidades, para lo cual se debe ahondar en las partes que conforman cada unidad.
- Las partes mantenibles debe ser las que conforman cada sub unidad y que son susceptibles de mantenimiento.

Se debe tomar siempre en cuenta que la jerarquía establecida (expuesta en las Figuras 3.7 a 3.9) debe permitir la comparación.

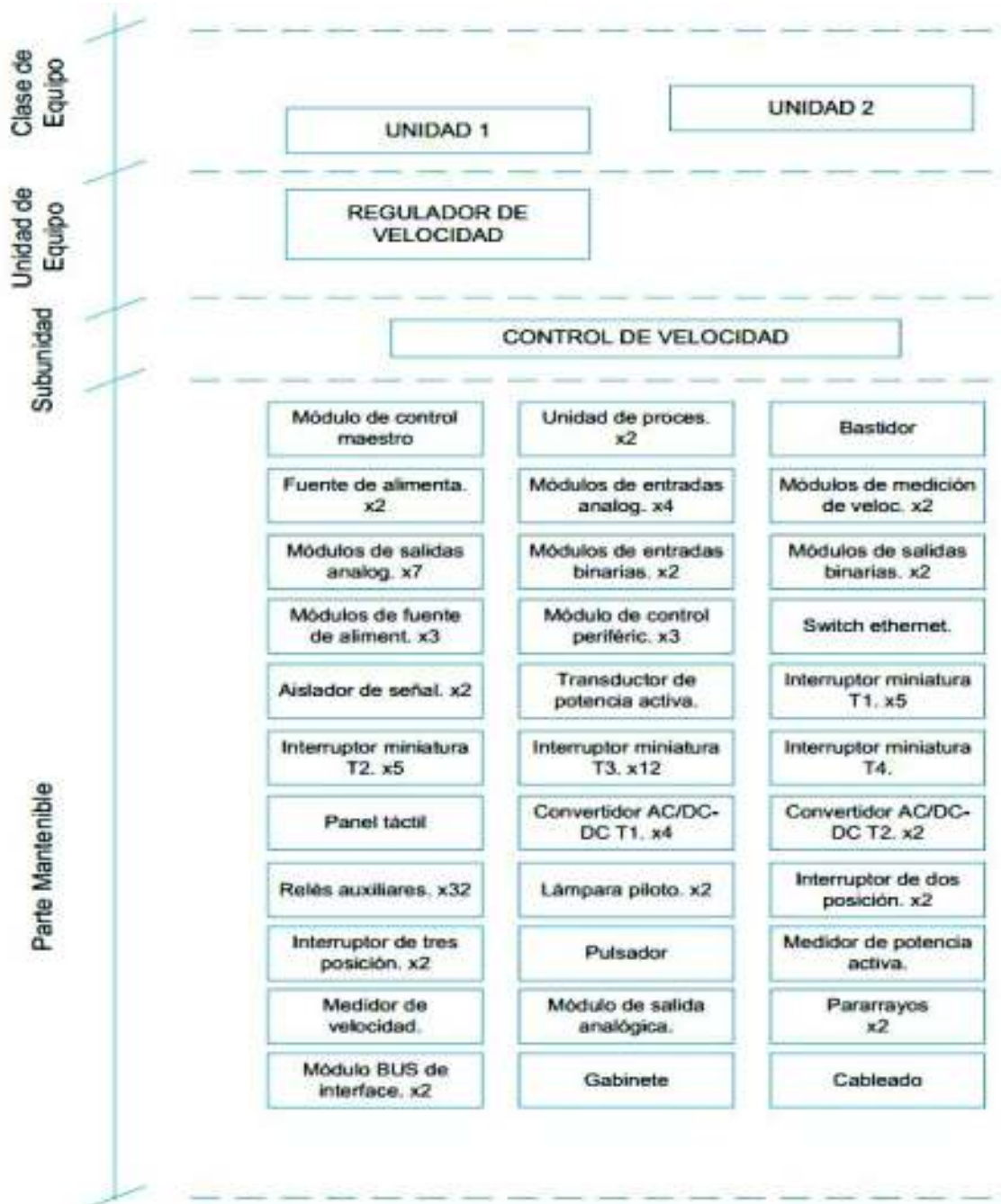


Figura 3.7. Jerarquía del sistema de regulación de velocidad (Parte I)

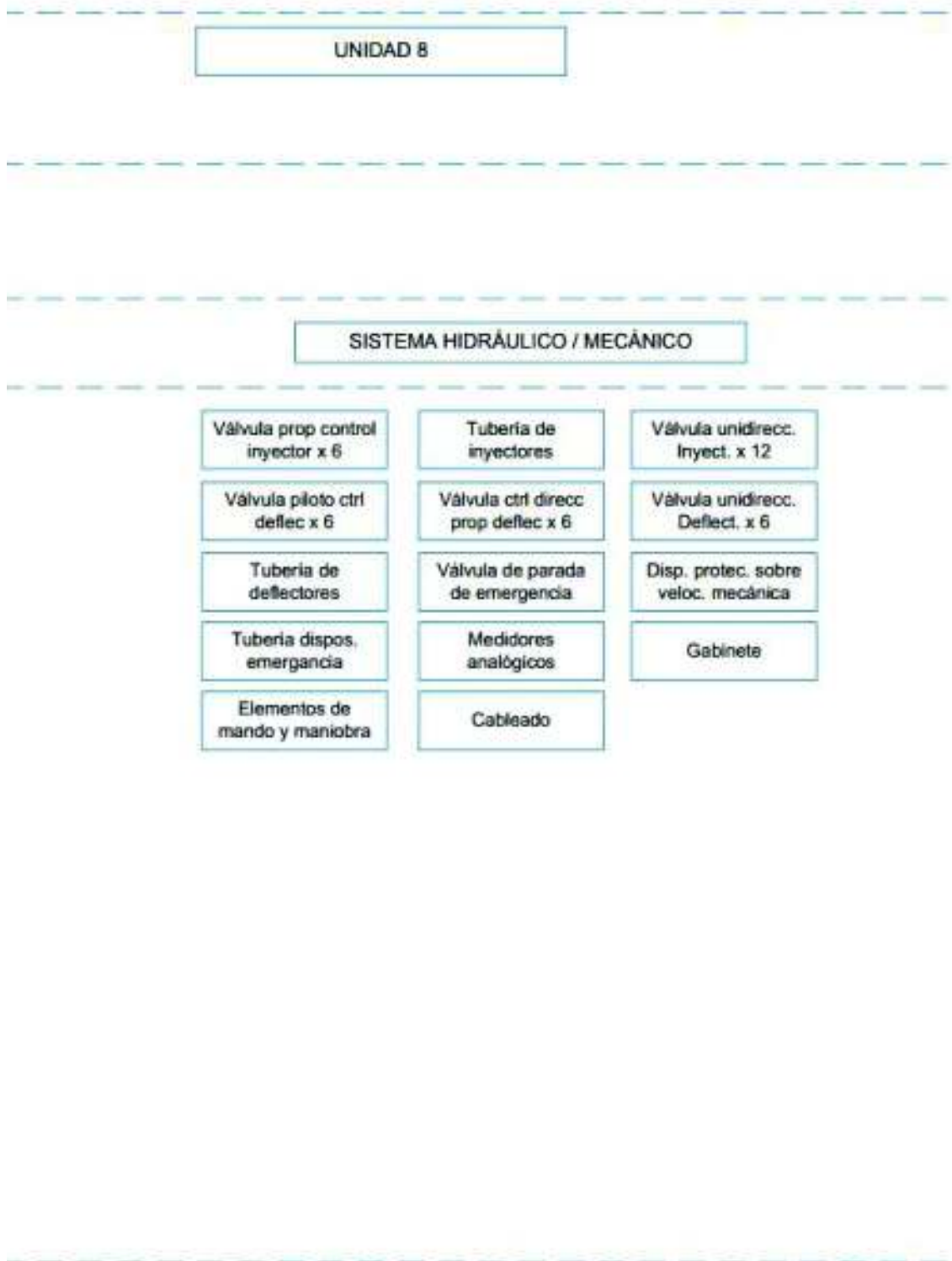


Figura 3.8. Jerarquía del sistema de regulación de velocidad (Parte II)

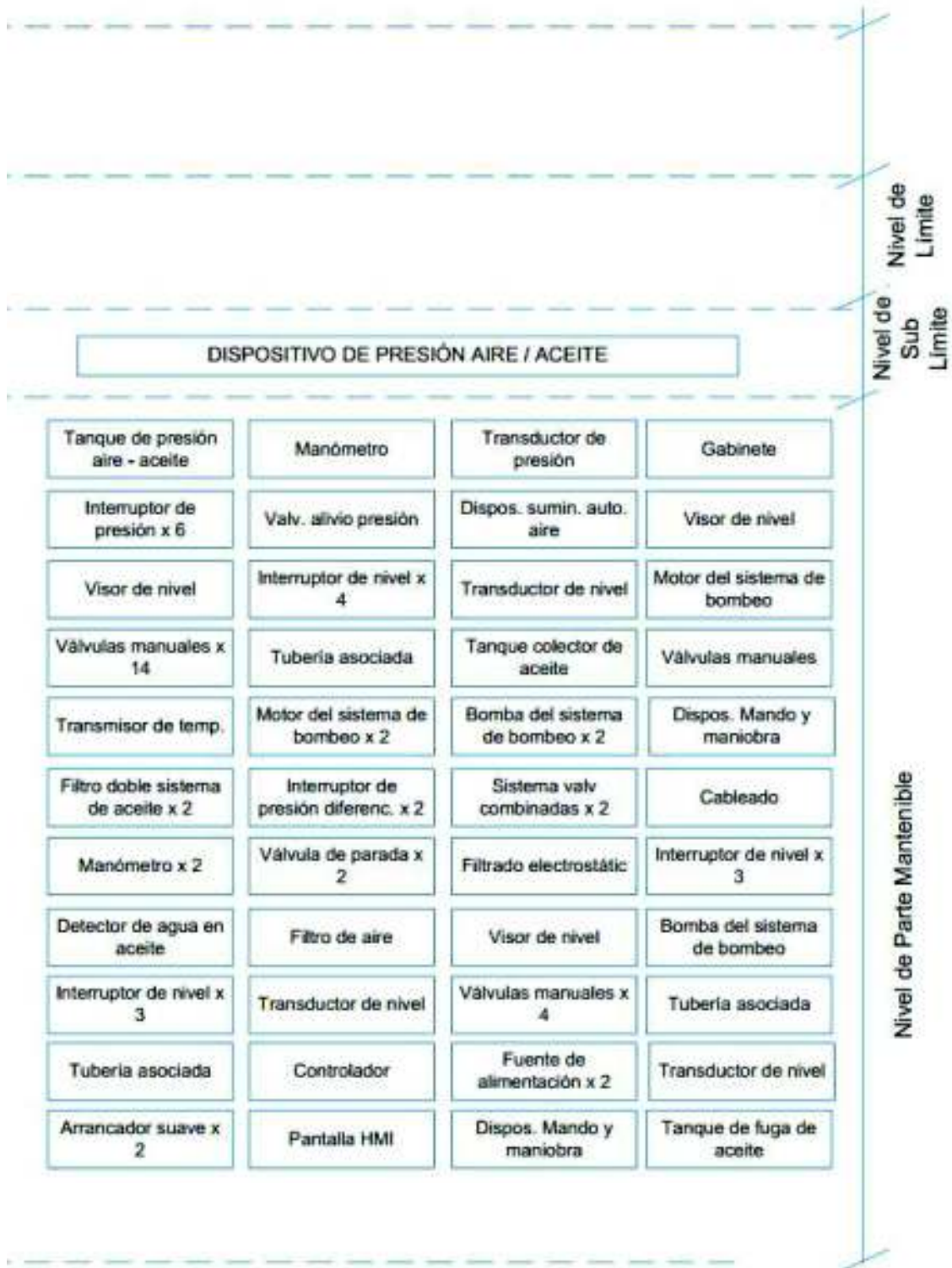


Figura 3.9. Jerarquía del sistema de regulación de velocidad (Parte III)

La estructura consta de:

- **Unidad de equipo:** Regulador de Velocidad.
 - **Subunidad 1:** control de velocidad.
 - **Partes mantenibles:** módulo de control maestro, unidad de procesamiento, bastidor, fuente de alimentación, módulos de entradas analógicas, módulos de medición de velocidad, módulos de salidas analógicas, módulos de entradas binarias, módulos de salidas binarias, módulos de fuente de alimentación, módulo de control periférico, “switch ethernet”, aislador de señal, transductor de potencia activa, interruptor miniatura T1, interruptor miniatura T2, interruptor miniatura T3, interruptor miniatura T4, panel táctil, convertidor AC/DC-DC T1, convertidor AC/DC-DC T2, relés auxiliares, lámpara piloto, interruptor de dos posiciones, interruptor de tres posiciones, pulsador, medidor de potencia activa, medidor de velocidad, módulo de salida analógica, pararrayos, módulo BUS de interface, gabinete, cableado.
 - **Subunidad 2:** sistema hidráulico / mecánico.
 - **Partes mantenibles:** válvula proporcional control inyectores, tubería de inyectores, válvula unidireccional inyectores, válvula piloto control deflectores, válvula control direccional, proporcional deflectores, válvula unidireccional deflectores, tubería de deflectores, válvula de parada de emergencia, dispositivo protección sobre velocidad mecánica, tubería dispositivo emergencia, medidores analógicos, gabinete, elementos de mando y maniobra, cableado.
 - **Subunidad 3:** dispositivo de presión de aire / aceite.
 - **Partes mantenibles:** tanque de presión aire - aceite, manómetro, transductor de presión, interruptor de presión, válvula alivio presión, dispositivo suministro automático aire, visor de nivel, interruptor de nivel,

transductor de nivel, válvulas manuales, tubería asociada, tanque colector de aceite, transmisor de temperatura, motor del sistema de bombeo, bomba del sistema de bombeo, filtro doble sistema de aceite, interruptor de presión diferencial, sistema válvulas combinadas, válvula de parada, filtrado electrostático, detector de agua en aceite, filtro de aire, visor de nivel, interruptor de nivel, transductor de nivel, válvulas manuales, tubería asociada, controlador, fuente de alimentación, arrancador suave, pantalla HMI, elementos de mando y maniobra, gabinete, cableado, tanque de fuga de aceite, visor de nivel, interruptor de nivel, transductor de nivel, motor del sistema de bombeo, bomba del sistema de bombeo, manómetro, válvulas manuales, tubería asociada, elementos de mando y maniobra, gabinete, cableado.

3.2.3 INFORMACIÓN DE EQUIPOS, AVERÍAS Y MANTENIMIENTO

Para la información de equipos, averías y mantenimiento, se debe hacer uso de al menos los atributos mínimos recomendados en la norma. Es importante utilizar una codificación coherente según se requiera y sea posible.

3.2.3.1. Información de equipos

La información de equipos se lo realiza al nivel de unidad de equipo la metodología que considera los siguientes puntos:

- Preparar el formulario de ingreso de datos para Información del Equipo, considerando al menos los atributos mínimos recomendados en la norma (sección 7.1 – Tabla 1).
- Registrar en el formulario la ubicación del equipo con el número de identificación correspondiente.
- Registrar en el formulario los datos de clasificación del equipo, para lo cual se debe identificar la clase, el tipo y la aplicación. La norma referencia el anexo A,

sin embargo, para equipos de Centrales de Generación Hidroeléctrica se debe encontrar datos equivalentes y coherentes.

- Registrar en el formulario los datos de instalación del equipo; para lo cual se debe identificar el código o nombre de la instalación, la categoría de la instalación y de la operación.
- Registrar en el formulario los datos del fabricante; para lo cual se debe tener el nombre del fabricante y la codificación que éste dio a su equipo.
- Registrar en el formulario los datos de característica de diseño y que son provistos en los documentos del equipo dados por el fabricante.
- Registrar en el formulario los datos de operación del equipo, para lo cual se debe considerar al menos el período de monitoreo.

Para el ejemplo de aplicación, fueron utilizados los datos del Regulador de Velocidad de la Unidad de Generación 1 de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, los cuales se exponen a continuación en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Información del Regulador de Velocidad de la Unidad de Generación 1

Categoría	Datos	Descripción
Identificación	Ubicación del equipo	CH-CCS-PGEE01-U1-RGVL1
	Clasificación	Regulador de velocidad
		Digital PID
		Regulación de velocidad de Turbina
	Datos de instalación	Casa de máquinas
		Unidad de generación
Control a distancia		
Diseño	Datos del fabricante	Harbin Electric Machinery Company Ltda.
		TC1703XL+CJWT-6/6-6.3
	Características del diseño	Frecuencia nominal: 60Hz
		Presión Nominal: 6,3 Mpa
		Posicionamiento del Servo: Electrónico - Hidráulico
		Fuente de alimentación: 125 VDC
Aplicación	Operación	Funcionamiento
		Monitoreo cada 4 000 horas

3.2.3.2. Información de averías

La estandarización de la información de las fallas es de vital importancia para combinar de la mejor manera diferentes fuentes de datos dentro de la misma planta, como puede ser personal de operación, mantenimiento, etc. La siguiente metodología fue aplicada:

- Preparar el formulario de ingreso de datos para Información de Averías, considerando al menos los atributos mínimos recomendados en la norma (sección 7,2 – Tabla 2).
- Registrar en el formulario la identificación de la avería, para lo cual se debe identificar un código único de avería y el número de identificación del equipo.
- Registrar en el formulario la información de datos de la avería, para lo cual se debe identificar al menos: la fecha, el modo, el impacto en el funcionamiento y la clase de severidad.

Para el ejemplo de aplicación, fueron considerados los datos de una de las fallas comunes del Regulador de Velocidad de la Unidad de Generación 1 de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, y se puede observar en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Información de las averías

Categoría	Datos	Descripción
Identificación	Registro de averías	CH-CCS-PGEE01-U1-RGVL1
	Registro de averías	CH-CCS-PGEE01-U1-RGVL1
Datos de la avería	Fecha de la avería	02 de enero de 2018
	Modo de la avería	FOD (Falsa Operación del Deflector)
	Impacto de la avería	Parcial
	Clase de severidad	Emergente

3.2.3.3. Información de mantenimiento

Es importante recordar que el mantenimiento se realiza en base a una planificación periódica o por una acción correctiva. Para informar sobre las acciones realizadas

en el mantenimiento se utiliza un reporte común que debe contener al menos la información sugerida en la norma ISO 14224. Para ello se utilizó la siguiente metodología:

- Preparar el formulario de ingreso de datos para Información de Mantenimiento, considerando al menos los atributos mínimos recomendados en la norma (sección 7,3 – Tabla 3).
- Registrar en el formulario la identificación del mantenimiento, para lo cual se debe considerar el registro, la ubicación del equipo y el registro de la avería.
- Registrar en el formulario los datos del mantenimiento, para lo cual se debe considerar la fecha y la categoría.
- Registrar en el formulario los tiempos de mantenimiento, para lo cual se debe considerar el tiempo de mantenimiento activo y el tiempo de inactividad.

Para el ejemplo de aplicación, fueron utilizados los datos de mantenimiento producto de una de las fallas comunes del regulador de velocidad de la unidad de generación 1 de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, y se puede observar en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17. Información de mantenimiento

Categoría	Datos	Descripción
Identificación	Registro de mantenimiento	PSL (Pérdida de señal)
	Ubicación del equipo	CH-CCS-PGEE01-U1-RGVL1
	Registro de la avería	CPS (Corrección de pérdida de señal)
Datos de mantenimiento	Fecha del mantenimiento	05 de enero de 2018
	Categoría de mantenimiento	MCR (Mantenimiento correctivo)
Tiempo de mantenimiento	Tiempo del mantenimiento activo	2 h
	Tiempo de inactividad	4 h

3.3 APLICACIÓN DE LA NORMA SAE JA1012

En la estimación de la confiabilidad se realizó un análisis de criticidad para los elementos mantenibles del sistema que mayores fallas ha presentado en la Central

Coca Codo Sinclair durante un año de análisis. De los resultados se obtiene que la válvula piloto de control de deflectores es el elemento con mayores inconvenientes.

La norma SAE JA1102 define las políticas de manejo de fallas bajo la suposición que el activo al que se aplicará dichas políticas ha sido definido; por lo que, para el caso de estudio, en base a los resultados del apartado 3,2 y para la ejemplificación de la metodología se utilizará la válvula piloto de control de deflectores.

3.3.1 CONTEXTO OPERACIONAL

Para plantear el contexto operacional se debe entender perfectamente el proceso y el funcionamiento del activo, debido a que es el punto de partida para posteriormente realizar análisis funcionales y tratamiento de las fallas.

Para el desarrollo del contexto operacional, reunió un grupo formado en la Central (operación, mantenimiento eléctrico, mantenimiento electrónico y mantenimiento mecánico); con el fin de aportar con información de cada área y plantear correctamente la intención de diseño del equipo o sistema.

La metodología utilizada fue:

- Estructurar el contexto operacional del equipo, siguiendo los campos recomendados para definir correctamente al activo.
 - Descripción global en donde se incluyó una descripción general del activo.
 - Cómo se utilizará, corresponde a la descripción de forma general como será utilizado.
 - Dónde se utilizará, indica de forma general donde será empleado.
 - Criterios de desempeño (opcionales para el caso de estudio).
 - Producción. – indica la producción esperada.
 - Rendimiento. – indicar el rendimiento esperado.
 - Seguridad. – indicar la seguridad a ser considerada.

- Integridad ambiental. – indicar aspectos ambientales importantes
- Aspectos específicos (estos aspectos deben ser considerados).
 - Tipo de proceso. – indicar si el proceso es continuo o intermitente.
 - Estándares de calidad. – indicar los estándares con los cuales se cumple el requerimiento de los clientes.
 - Estándares ambientales. – indicar algún tipo de estándar ambiental que deba cumplir el activo (si es que lo hubiere).
 - Estándares de seguridad. – indicar algún tipo de estándar de seguridad que deba cumplir el activo (si es que lo hubiere).
 - Lugar de operaciones. – indicar el lugar donde el activo operará.
 - Intensidad de operaciones. – indicar la forma de operación del activo (24 horas, 7 días de forma continua; bajo demanda, en horas pico, etc).
 - Redundancia. – indicar si el activo es parte de un sistema redundante.
 - Trabajo – durante – operación. – indicar el tiempo que el activo podría operar sin tener ninguna afectación en desempeño (si los hubiere).
 - Repuestos. – indicar los repuestos con los que cuenta el activo.
 - Demanda del mercado / suministro de materia prima. – indicar temas de demanda de mercado que podrían afectar a la funcionalidad por falta de materia prima (no aplica para el caso de estudio).
- Finalmente se debe consolidar toda la información que se considera necesaria o importante dependiendo el activo y redactar un párrafo del contexto operacional; considerando lo mismo para cada una de sus partes si estuviera conformado por subsistemas.

No olvidar que para establecer correctamente el contexto operacional se debe reunir el grupo multidisciplinario que conoce cada parte del activo o sistemas; además de contar con toda la información del fabricante, en la cual se incluyan manuales, diagramas de procesos, etc.

La aplicación de esta metodología al sistema de regulación de velocidad, corresponde únicamente al modo de operación potencia.

El sistema de regulación de velocidad es el encargado de controlar y regular la potencia activa (por medio de la velocidad de la turbina) en cada una de las unidades de generación de la Central Coca Codo Sinclair; controlando la apertura y cierre de inyectores, además de otras funciones complementarias. Se encuentra distribuido en el piso de generadores (gabinete de control por microcomputadora), piso de barras (partes de los subsistemas hidráulico – mecánico y sistema de presión aire - aceite), piso de turbina (parte del subsistema hidráulico – mecánico) y piso de válvula esférica (parte del subsistema hidráulico mecánico).

El sistema de control de velocidad se alimenta de energía AC desde el centro de carga de AC con 127VAC ($\pm 15\%$) y desde el centro de carga de DC con 125VDC (+10/-20 %). Para el proceso general de regulación de potencia en el modo específico, se reciben señales de operación y comandos de accionamiento y valores de consigna de la turbina desde la Unidad de Control Local (LCU), el estado de dichas señales se evalúa con la comunicación entre el regulador de velocidad y la LCU. Durante el funcionamiento normal de la turbina, el regulador de velocidad recibe señales de potencia activa desde el generador y el estado del GCB (debe estar sincronizado a la red); en base al valor de potencia actual y al valor de consigna que fue enviado desde la LCU, realiza cálculos y actúa enviando señales de control de 4 a 20 mA para las válvulas proporcionales de apertura y/o cierre de inyectores, las cuales se encuentran alojadas en el gabinete del subsistema hidráulico – mecánico; a la vez recibe señales de 4 a 20 mA que representan la posición actual de los inyectores, dichas señales provienen del mismo gabinete. En la Figura 3.10 se muestra de forma general el lazo de control del regulador de velocidad.

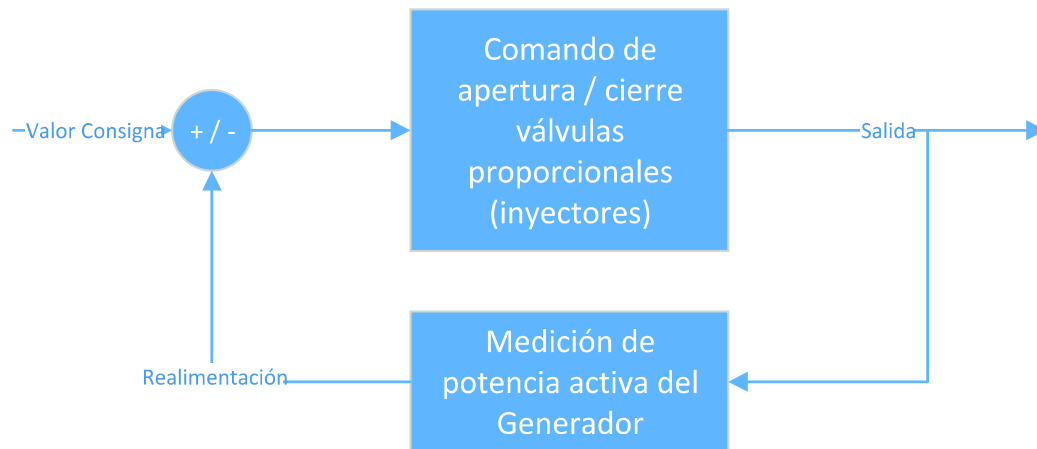


Figura 3.10. Lazo de control – Subsistema hidráulico mecánico (SINOHYDRO, 2016)

Mientras se da el proceso de regulación, se realiza funciones complementarias como la de supervisión de voltaje de control de válvulas proporcionales de inyectores y deflectores con 24 VDC.

En el modo de operación analizado, el sub sistema hidráulico mecánico, el cual se puede observar en la Figura 3.11, provee de aceite hidráulico a una presión de 6,3 MPa a las válvulas proporcionales para la apertura y cierre de inyectores. El aceite hidráulico a presión se encuentra en un tanque pulmón conformado de 1/3 partes de aceite y 2/3 partes de aire. A una presión menor o igual a 6,1 MPa y con nivel alto o alto alto de aceite, la presión es compensada con aire por medio del accionamiento del dispositivo de suministro de aire. A una presión menor o igual a 5,7 MPa y con nivel de aceite bajo, arrancará una de las bombas de suministro de aceite desde el tanque sumidero. A una presión menor o igual a 5,4 MPa, arrancarán las dos bombas de suministro de aceite desde el tanque sumidero. A una presión menor o igual a 5,0 MPa se alertará al sistema de control de velocidad. A una presión mayor o igual a 6,45 MPa se enviará una señal de alarma de alta presión. A una presión mayor o igual a 6,55 MPa las válvulas combinadas aliviarán la presión. A una presión mayor o igual a 7 MPa actuará la válvula de alivio de presión del tanque pulmón. El nivel del tanque sumidero se controla de forma visual y en las pantallas de operador, pero su compensación es de forma manual; acá llega el aceite que es recolectado en el tanque de fugas de aceite. El tanque recolector

de fugas de aceite recoge todo el aceite hidráulico producto del accionamiento de inyectores y deflectores; su nivel se controla de forma visual y en las pantallas del operador, cuando el nivel se encuentra en estado alto, de forma automática o manual, se puede encender la bomba para transportar dicho aceite de regreso al tanque sumidero.

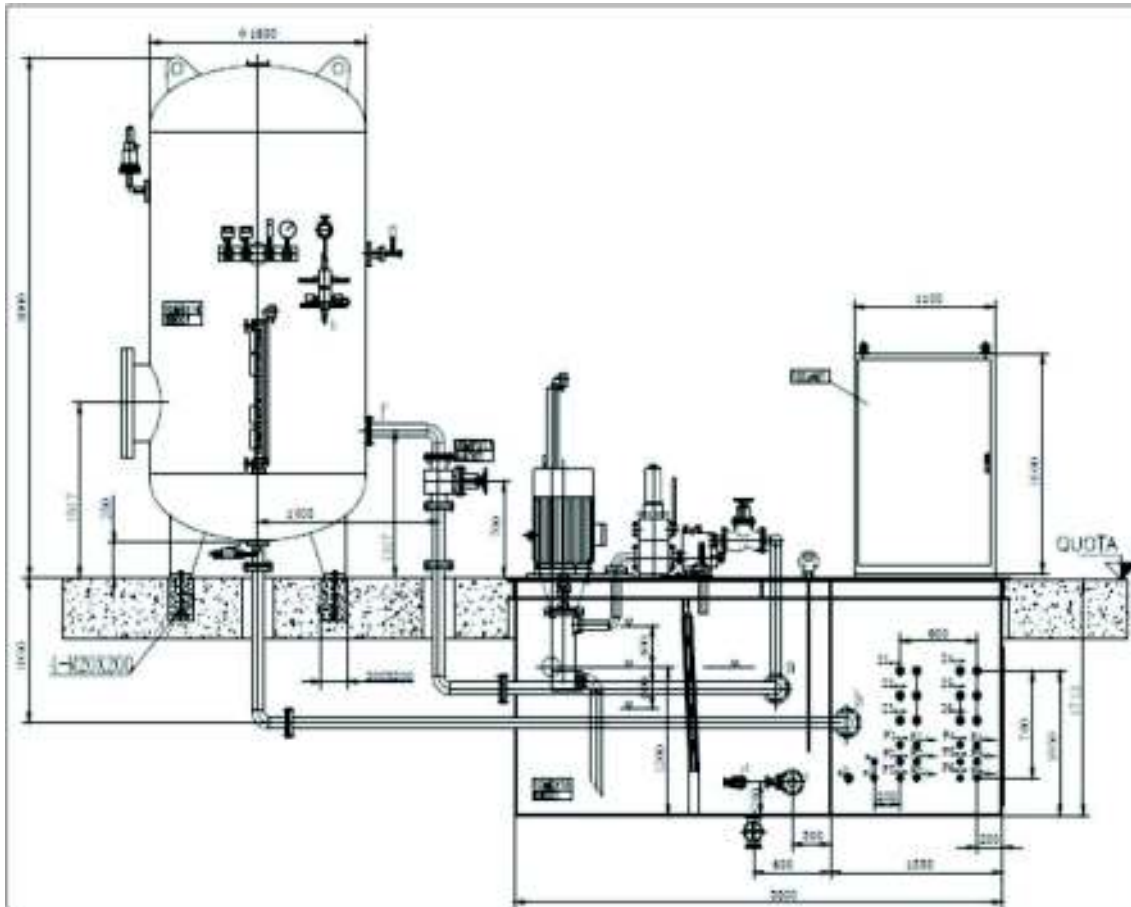


Figura 3.11. Plano de diseño – Subsistema hidráulico mecánico (SINOHYDRO, 2016)

En el modo de operación analizado, el subsistema de presión aire, el cual se observa en la Figura 3.12, utiliza dos compresores de aire recíprocante de tres etapas redundantes entre sí; para mantener aire comprimido a una presión nominal de 7 MPa en un volumen útil de 0,3 m³. A una presión igual o menor a 6,5 MPa arrancará el compresor que se encuentre configurado como principal. A una presión igual o menor a 6,2 MPa arrancará el compresor de reserva y entre los dos equipos llevarán la presión hasta los 7 MPa.

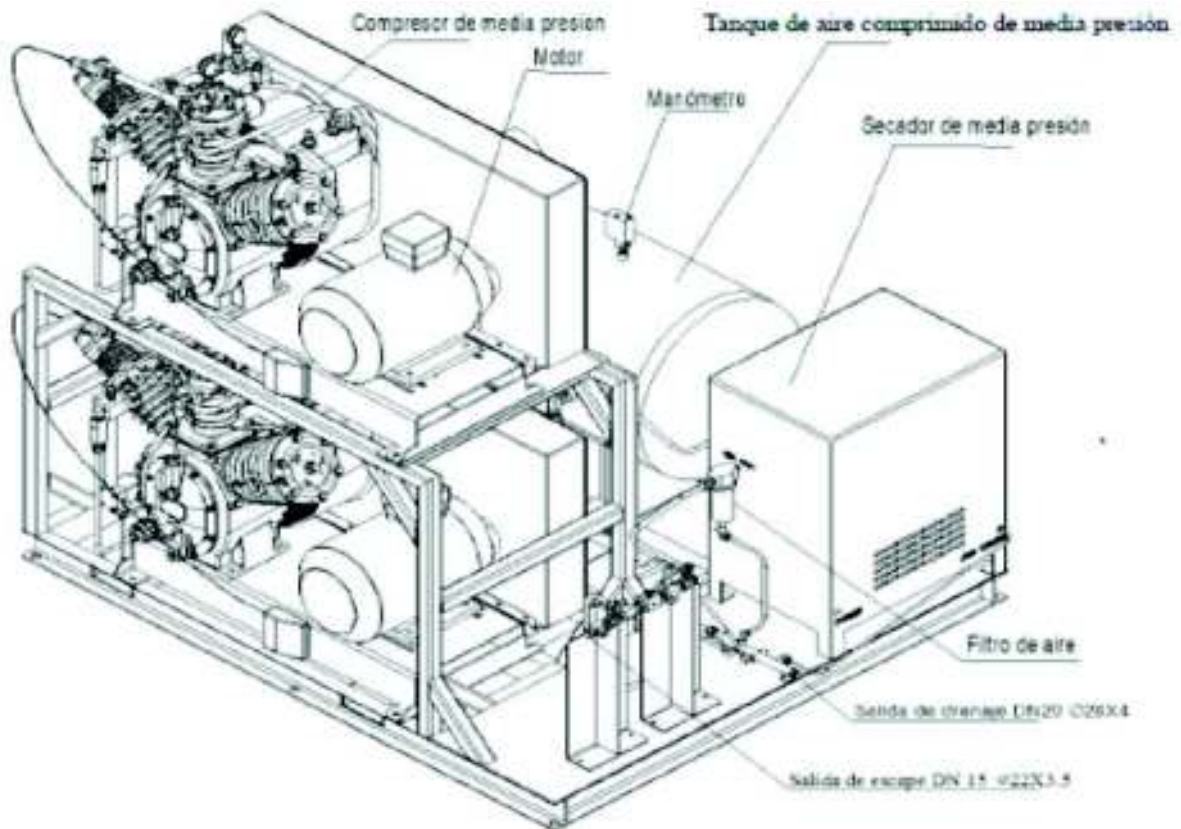


Figura 3.12. Subsistema de presión de aire
(SINOHYDRO, 2012)

3.3.2 ANÁLISIS FUNCIONAL

El objetivo principal de la filosofía de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad es mantener las funciones tanto primarias como secundarias que son importantes para el usuario final de dicho equipo; por lo que es necesario conocer perfectamente sus funciones tanto primarias como secundarias. Para ello se utilizó la siguiente metodología:

- En base al contexto operacional, encontrar la función principal por la cual el usuario adquirió el activo o sistema. Realizar lo mismo para uno de los subsistemas o partes que conforman el sistema o activo.
- En base al mismo contexto operacional, encontrar la o las funciones secundarias que normalmente son adicionales y que complementan a las funciones

principales. Para las funciones secundarias se deben considerar los siguientes aspectos.

- Integridad ambiental. – incluir funciones relacionadas con cumplimiento de normas o regulaciones.
- Seguridad. – mencionar funciones que especifiquen aspectos de seguridad para el usuario.
- Integridad estructural. – mencionar funciones adicionales que permitan en conjunto conformar al activo o sistema.
- Control. – incluir funciones adicionales complementarias de control alrededor de la función principal.
- Contención. – incluir funciones alrededor de funciones primarias de almacenamiento.
- Confort. – incluir funciones que mejoran la operación del activo o sistema por parte del usuario.
- Apariencia. – mencionar aspectos de apariencia que se deriven de los principales como podrían ser protección, por ejemplo.
- Protección. – incluir las funciones adicionales referidas a todo lo que es advertencia para el usuario sobre cualquier tipo de anomalía o problema del activo o sistema.
- Economía / eficiencia. – incluir funciones de consumos, desgaste, etc.
- Funciones superfluas. – incluir funciones adicionales que no están siendo usadas por el usuario debido a sobre dimensionamiento o mejoras realizadas.
- Funciones “confiables”. – describir funciones que demuestren confiabilidad de determinado activo o parte y que respondan a una meta alcanzada por el fabricante para el usuario.

Es importante mencionar que la norma recomienda describir a las funciones con un verbo, un objeto y un estándar de desempeño. La siguiente aplicación se refiere únicamente al modo de operación potencia y para cada una de las partes principales de los subsistemas de regulación de velocidad.

- Subsistema de Control de Velocidad.
 - Función principal: Regular la velocidad de rotación de la turbina, de acuerdo al valor de consigna de potencia activa.
 - Funciones secundarias: enviar señales de control a las válvulas proporcionales de inyectores, entre 4 - 20 mA, recibir datos operativos y de control desde la LCU, según estado de comunicación, recibir señal de potencia activa desde el generador, entre 0 - 182 MW, recibir señal de estado del GCB, entre 0 - 1, recibir señales de realimentación de posición de inyectores, entre 4 - 20 mA, supervisar su voltaje de alimentación de AC, en 127 VAC ($\pm 15\%$), supervisar su voltaje de alimentación de DC, en 125 VDC (+10/-20%), supervisar el voltaje de control de válvulas proporcionales de inyectores y deflectores, en 24 VDC.

- Subsistema hidráulico - mecánico.
 - Función principal: Proveer de aceite hidráulico al sistema de regulación de velocidad, a una presión de 6,3 MPa.
 - Funciones secundarias: Accionar el dispositivo de suministro de aire al tanque pulmón, para una presión menor o igual a 6,1 MPa y con niveles de aceite alto o alto alto, arrancar la bomba de aceite del tanque sumidero configurada como principal, a una presión menor o igual a 5,7 MPa y con niveles de aceite bajo, arrancar la bomba de aceite configurada como principal y la bomba de aceite configurada como de respaldo del tanque sumidero, a una presión menor o igual a 5,4 MPa, alertar al subsistema de control de velocidad sobre el estado de baja presión, a una presión menor o igual a 5 MPa, alertar al sub sistema de control de velocidad sobre el estado de alta presión, a una presión mayor o igual a 6,45 MPa, liberar la sobre presión del sistema por medio de válvulas combinadas, a una presión mayor o igual a 6,55 MPa, aliviar la sobre presión del sistema por medio de válvulas de sobre presión, a una presión mayor o igual a 7 MPa, monitorear los niveles del tanque pulmón aire - aceite, entre 450 y 645 mm, monitorear los niveles del tanque recolector de aceite, entre 450 y

645 mm, accionar la bomba del tanque recolector de aceite, a un nivel alto de 645 mm, apagar la bomba del tanque recolector de aceite, a un nivel bajo de 450 mm, contener el aceite hidráulico a presión dentro del tanque pulmón, contener el aceite hidráulico dentro del tanque sumidero, contener el aceite hidráulico de fugas dentro del tanque recolector.

- Subsistema de presión de aire.
 - Función principal: Proveer de aceite seco al subsistema mecánico hidráulico del sistema de regulación de velocidad, a una presión de 7 MPa.
 - Funciones secundarias: Arrancar el compresor que se encuentre configurado como principal, a una presión menor o igual a 6,5 MPa, arrancar el compresor que se encuentre configurado como principal y el compresor que se encuentre configurado como de respaldo, a una presión menor o igual a 6,2 MPa, apagar el compresor configurado como principal y el compresor configurado como respaldo, a una presión mayor o igual a 7 MPa.

El análisis funcional se realizó como sistemas y con el enfoque de trabajo en el modo operativo potencia.

3.3.3 IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLA

Es importante que en el proceso MCC, se identifique perfectamente de que maneras puede fallar al cumplir sus funciones los activos o sistemas; por lo que es necesario determinar las fallas funcionales y sus modos de fallo.

Una vez identificadas las fallas funciones, el proceso MCC debe ser capaz de identificar qué causa cada falla funcional. Para el presente trabajo se consideran las funciones descritas anteriormente en el modo de operación potencia del regulador de velocidad. La metodología aplicada corresponde a:

- En base a las funciones principales, se describen las fallas funcionales del tipo total. Estas fallas son relativamente fáciles de identificar porque afecta a la funcionalidad total del activo o sistema.
- En base a las funciones secundarias descritas en el apartado anterior, describir las fallas funcionales del tipo parcial que afectan en el desempeño del sistema o activo. Ayudarse para el efecto, de una tabla. Para cumplir con el punto, se debe tener un conocimiento profundo y a detalle del funcionamiento del bien o sistema; por lo que es necesario que se reúna el grupo de profesionales formado para realizar los análisis.
- Una vez identificadas las fallas funcionales, para cada una de las mismas describir las causas que ocasionan cada una de las fallas funcionales. Ayudarse para el efecto, de una tabla. Para cumplir con el punto, se debe tener un conocimiento profundo y a detalle del funcionamiento del bien o sistema; por lo que es necesario que se reúna el grupo de profesionales formado para realizar los análisis. Para los modos de falla, considerar como base las siguientes:
 - Deterioro (desgaste o rotura)
 - Defectos de diseño
 - Errores humanos (operación incorrecta, ensamble incorrecto, daño externo)

Para la aplicación de la metodología al sistema de regulación de velocidad solo se analizará al sub sistema de control del regulador de velocidad; entendiéndose que la metodología es aplicable al resto de partes, ya que realizar dicho análisis es extenso y su aplicación a cada una de las partes no es objeto del presente trabajo.

La Tabla 3.18 ilustra la aplicación de la metodología para la identificación de los modos de falla del sub sistema de control del regulador de velocidad.

Tabla 3.18. Matriz de modos de fallo

Función	Falla Funcional	Modo de Falla
1. Regular la velocidad de rotación de la turbina, de acuerdo al valor de consigna de potencia activa	A. No envía señales de control a las válvulas proporcionales de inyectores, entre 4 - 20 mA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rotura del módulo de salida analógica 2. Rotura del terminal de cableado 3. Mal ajuste o aislamiento de la bornera 4. Desgaste del bus de alimentación del módulo de salida analógica 5. Desgaste de cableado
	B. No recibe datos operativos y control desde la LCU	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rotura del módulo de comunicaciones 2. Estado de falla del módulo de salida de la LCU 3. Mal ajuste o aislamiento de la bornera 4. Rotura del terminal de cableado 5. Desgaste de cableado
	C. No recibe señal de potencia desde el generador, entre 0 - 182 MW	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rotura del transductor 2. Rotura del módulo de entrada 3. Mal ajuste o aislamiento de la bornera 4. Rotura del terminal del cableado 5. Desgaste del cableado 6. Desgaste de transformadores de medición
	D. No recibe señal de estado del GCB, entre 0 - 1	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desgaste en terminales del relé de paso 2. Mal ajuste o aislamiento de la bornera 3. Rotura de la base del relé de paso 4. Rotura del terminal del cableado 5. Rotura del módulo de entrada digital 6. Desgaste del cableado
	E. No recibe señales de realimentación de posición de inyectores, entre 4 - 20 mA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desgaste del sensor de posición del inyector 2. Rotura del módulo de entrada analógica 3. Mal ajuste o aislamiento de la bornera 4. Rotura del terminal del cableado 5. Desgaste del cableado
	F. No supervisa su voltaje de alimentación de AC, en 127 VAC ($\pm 15\%$)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rotura del módulo de entrada digital 2. Desgaste de los contactos de los interruptores 3. Mal ajuste o aislamiento de la bornera 4. Rotura del terminal del cableado 5. Desgaste del cableado
	G. No supervisa su voltaje de alimentación de DC, en 125 VDC (+10/ - 20%)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rotura del módulo de entrada digital 2. Desgaste de los contactos de los interruptores 3. Mal ajuste o aislamiento de la bornera 4. Rotura del terminal del cableado 5. Desgaste del cableado
	H. No supervisa su voltaje de control de válvulas proporcionales de inyectores y deflectores, en 24 VDC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rotura del módulo de entrada digital 2. Desgaste de los contactos de los interruptores 3. Mal ajuste o aislamiento de la bornera 4. Rotura del terminal del cableado 5. Desgaste del cableado

3.3.4 EFECTOS Y CONSECUENCIA DE LA FALLA

Por medio del análisis de efecto de la falla se sabe qué pasará con el activo o sistema cuando ocurren las fallas funcionales; es decir es una forma en que se manifiesta la falla. Para establecer el efecto de la falla, se debe considerar lo que ocurrirá si no se realiza ninguna acción para prevenir dicha ocurrencia. Para las consecuencias de las fallas se analiza el impacto provocado en cada uno de los clientes del activo o sistema por consecuencia propiamente dicha de la falla.

La metodología empleada utilizó los siguientes pasos:

- En base a los modos de falla establecidos en el punto anterior, utilizando como herramienta una tabla, indicar los efectos de cada una de las fallas; para lo cual considerar lo siguiente:
 - ¿ Qué evidencia existe? – Indicar por medio de evidencias anteriores si la falla presenta: alarmas, ruidos, humo, fuego, escapes de algo, etc.
 - Amenazas a la seguridad y al ambiente. – Indicar si existen amenazas de fuego o explosión, escape de químicos, electrocución, accidentes, exposición a bordes afilados o maquinaria en movimiento, etc.
 - Efecto en la producción o en las operaciones. – En esta parte es importante considerar lo siguiente:
 - Tiempo fuera de servicio que estará el sistema o activo debido al modo de falla.
 - Velocidad de operación afectada, debido al modo de falla.
 - Calidad afectada, producto del modo de falla.
 - Otros sistemas que podrían verse afectados por el modo de falla.
 - Costos de operación globales si el modo de falla ocasionare costos adicionales.
 - Daño secundario. – Indicar si el modo de falla causaría daños significativos a otros sistemas o activos.

- Acción correctiva requerida. – Incluir una descripción breve de que se debe hacer para corregir el modo de falla.

Las fuentes de información requerida para los efectos de falla son principalmente los históricos de fallas y la experiencia de los miembros del equipo que analiza fallas.

- En base a los efectos de falla identificados para cada modo de falla y significativamente en base a los efectos de falla, evaluar las consecuencias de cada modo de falla bajo las siguientes consideraciones:
 - Consecuencias de fallas evidentes y ocultas. – Identificar las fallas evidentes y ocultas en base a los siguientes criterios:
 - Fallas evidentes de las Funciones Protectoras. – analizar las posibilidades ante un modo de falla evidente para el grupo de operación de una función protectora de una función protegida; en cuyo caso, el tratamiento será detener la función protegida hasta rehabilitar la función protectora y evitar fallas múltiples.
 - Funciones Protectoras cuya Falla no es Evidente. – analizar las posibilidades ante un modo de falla no evidente para el grupo de operación de una función protectora de una función protegida; en cuyo caso podría suceder que, la función protectora se encuentra en estado de falla sin mostrar evidencias y ante la falla de la función protegida, se tendrá fallas múltiples de la función protegida y de la función protectora.
 - Consecuencias en la seguridad, ambiente, operacionales y no operacionales. – Realizar una categorización adecuada de las consecuencias de los modos de falla y de las fallas múltiples bajo los siguientes criterios.
 - Consecuencias en la seguridad. – Identificar si un modo de falla tiene consecuencias “intolerables” que pudieran afectar a un ser humano.
 - Consecuencias ambientales. – Identificar si un modo de falla tiene consecuencias “intolerables” que pudieran violar cualquier norma o regulación ambiental.

- Consecuencias operacionales. – Identificar como un modo de falla tiene consecuencias que afectan a las operaciones bajo los siguientes criterios:
 - ◇ Afectación al rendimiento o a la producción total. – Indicar si la consecuencia del modo de falla provoca afectación a la producción.
 - ◇ Afectación a la calidad del producto. – Indicar si la consecuencia del modo de falla provoca afectación a la calidad del producto.
 - ◇ Afectación al servicio al consumidor. – Indicar si la consecuencia del modo de falla provoca afectación al servicio al consumidor que pudiesen provocar incluso afectación financiera por multas.
 - ◇ Afectación a los costos operacionales. – Indicar si la consecuencia del modo de falla provoca afectación a los costos operacionales o de reparación. Considerar adicionalmente los aspectos: cuánto cuesta la falla cada vez que ocurre y cuán frecuente se da la falla.
- Consecuencias no operacionales. – Considerar consecuencias de modos de falla o fallas múltiples que no afecten a la seguridad, el ambiente o la capacidad operacional; pero que impliquen costos asociados a las mismas.
- MCC y las regulaciones / legislaciones de seguridad. – Considerar en este apartado, que, si algunas de las actividades realizadas responden a auditorias o políticas especiales de manejo de determinado activo o sistema, se debe continuar con las mismas.
- Una vez identificadas las consecuencias de los modos de falla, seleccionar las políticas de manejo de las fallas en base a los siguientes criterios:
 - Relación entre longevidad y falla. – Identificar que existen tres casos para los cuales, la probabilidad condicional de ocurrencia del modo de falla: aumenta con el tiempo, se mantiene y reduce en el tiempo. Relacionarlos con el desgaste directo del activo o sistema.
 - Técnicamente factible y vale la pena Hacerlo. – Considerar que toda tarea programada debe contribuir a evitar, reducir o minimizar las consecuencias de los modos de falla de forma que sea técnicamente viable y justifique sus costos.

- Efectividad de Costo. – Considerar que, si una política de manejo de modos de falla es técnicamente viable y vale la pena hacerla, se debe buscar la mejor opción que efectivice el costo de aplicación.
- Selección de la Políticas de Manejo de Fallas. – Realizar la selección considerando que no se está realizando ninguna tarea a fin de prevenir o evitar los modos de falla.
- Con la decisión de la política de manejo de las fallas, realizar el análisis del manejo de las consecuencias de falla, bajo los siguientes criterios:
 - Modos de Falla Evidente con Consecuencias en el Ambiente o en la Seguridad.
 - ¿ Qué puede pasar si ocurre el modo de falla?
 - ¿Cuál es la probabilidad de que ocurra el modo de falla?
 - ¿ Es tolerable el riesgo?
 - ¿ Quiénes deben evaluar el riesgo?
 - Manejos de fallas y seguridad
 - Modos de Falla Oculta con Consecuencias en la Seguridad y en el Ambiente.
 - Modos de Falla Evidente con Consecuencias Económicas.
- Con el manejo de las consecuencias de falla, realizar un análisis de tareas programadas que apuntalen a la política establecida bajo los siguientes criterios:
 - Tareas Basadas en Condición.
 - Fallas potenciales y la curva P-F.
 - El intervalo P-F.
 - El intervalo neto P-F.
 - La relación entre el intervalo P-F y la longevidad: intervalos P-F y fallas aleatorias e intervalos P.F y modos de falla relacionados con la longevidad.
 - Consistencia del intervalo P-F.
 - Categorías de técnicas basadas en condición.

- Tareas de restauración programada y de desincorporación programada.
- Tareas de Detección de Fallas.
 - Fallas múltiples y detección de fallas.
 - Aspectos técnicos de la detección de fallas.
 - Revisar la función protectora en su Totalidad.
 - No alterar.
 - Debe ser físicamente posible realizar la revisión de la función.
 - Minimice el riesgo mientras realiza la tarea.
 - La frecuencia debe ser práctica.
 - Intervalos de tareas de detección de fallas.
 - Intervalos de detección de fallas, disponibilidad y confiabilidad.
 - Excluyendo el tiempo de la tarea y el tiempo de la reparación.
 - Cálculo del IDF utilizando solo la disponibilidad y confiabilidad.
 - Métodos rigurosos para el cálculo del IDF.
 - La viabilidad de los intervalos en tareas de detección de fallas.
- Combinación de Tareas.

Para la aplicación, se utilizará los modos de falla de la falla funcional A, debido a que este apartado tiene por objetivo la demostración de la metodología, y con la aplicación propuesta se cumple a cabalidad dicho objetivo y no es parte del presente trabajo realizar una aplicación global de la metodología. La Tabla 3.19 muestra los resultados de la aplicación de la metodología AMEF.

Tabla 3.19. uencias de los modos de falla

Modo de falla	Efecto de la falla	Consecuencia de la falla
A.1. Rotura del módulo de salida analógica	Las válvulas proporcionales para apertura y cierre de inyectores pierden totalmente el control. Afectación al sub sistema hidráulico mecánico. Para corregir se debe reemplazar el módulo.	Pérdida de la capacidad de control de apertura y cierre de los inyectores por medio de las válvulas proporcionales (regulación de potencia activa). No se hace evidente el modo de falla hasta que la función protectora (error entre valor de consigna y valor real), entre en acción. Si la función protectora estuviese en modo de falla, actuaría la función protectora de parada de emergencia. Afectación total a la producción de la unidad de generación debido a que se produciría una salida de generación de la misma hasta solucionar el problema. Afectación directa sobre los índices de disponibilidad y confiabilidad que provocan penalidades económicas por parte de los organismos de control.
A.2. Rotura del terminal del cableado	Las válvulas proporcionales para apertura y cierre de inyectores pierden totalmente el control. Afectación al sub sistema hidráulico mecánico. Para corregir se debe reemplazar el terminal.	Pérdida de la capacidad de control de apertura y cierre de los inyectores por medio de las válvulas proporcionales (regulación de potencia activa). No se hace evidente el modo de falla hasta que la función protectora (error entre valor de consigna y valor real), entre en acción. Si la función protectora estuviese en modo de falla, actuaría la función protectora de parada de emergencia. Afectación total a la producción de la unidad de generación debido a que se produciría una salida de generación de la misma hasta solucionar el problema. Afectación directa sobre los índices de disponibilidad y confiabilidad que provocan penalidades económicas por parte de los organismos de control.
A.3. Mal ajuste o aislamiento de la bornera	Las señales de control para las válvulas proporcionales de apertura y cierre de inyectores son intermitentes. Afectación al sub sistema hidráulico mecánico. Para corregir se debe re ajustar las conexiones.	Pérdida de la capacidad de control de apertura y cierre de los inyectores por medio de las válvulas proporcionales (regulación de potencia activa). No se hace evidente el modo de falla hasta que la función protectora (error entre valor de consigna y valor real), entre en acción. Si la función protectora estuviese en modo de falla, actuaría la función protectora de parada de emergencia. Afectación total a la producción de la unidad de generación debido a que se produciría una salida de generación de la misma hasta solucionar el problema. Afectación directa sobre los índices de disponibilidad y confiabilidad que provocan penalidades económicas por parte de los organismos de control.

Tabla 3.20. Matriz de consecuencias de los modos de falla (Continuación)

Modo de falla	Efecto de la falla	Consecuencia de la falla
A.4. Desgaste del bus de alimentación del módulo de salida analógica	Las válvulas proporcionales para apertura y cierre de inyectores pierden totalmente el control. Afectación al sub sistema hidráulico mecánico. Para corregir se debe realizar limpieza y ajuste del bus.	Pérdida de la capacidad de control de apertura y cierre de los inyectores por medio de las válvulas proporcionales (regulación de potencia activa). No se hace evidente el modo de falla hasta que la función protectora (error entre valor de consigna y valor real), entre en acción. Si la función protectora estuviese en modo de falla, actuaría la función protectora de parada de emergencia. Afectación total a la producción de la unidad de generación debido a que se produciría una salida de generación de la misma hasta solucionar el problema. Afectación directa sobre los índices de disponibilidad y confiabilidad que provocan penalidades económicas por parte de los organismos de control.
A.5. Desgaste del cableado	Las señales de control para las válvulas proporcionales de apertura y cierre de inyectores son intermitentes. Afectación al sub sistema hidráulico mecánico. Para corregir se debe reparar o reemplazar el cableado afectado	Pérdida de la capacidad de control de apertura y cierre de los inyectores por medio de las válvulas proporcionales (regulación de potencia activa). No se hace evidente el modo de falla hasta que la función protectora (error entre valor de consigna y valor real), entre en acción. Si la función protectora estuviese en modo de falla, actuaría la función protectora de parada de emergencia. Afectación total a la producción de la unidad de generación debido a que se produciría una salida de generación de la misma hasta solucionar el problema. Afectación directa sobre los índices de disponibilidad y confiabilidad que provocan penalidades económicas por parte de los organismos de control.

3.3.4.1. Manejo de las Consecuencias de los Modos de Falla

Para el manejo de las consecuencias de los modos de falla en base a las recomendaciones de la norma SAE JA1012, analizar y considerar los escenarios descritos en la siguiente metodología.

- Modo de falla evidente con consecuencias en el ambiente y la seguridad.
 - Evaluar el riesgo que existe ante la ocurrencia del modo de falla y que pudiera afectar al ambiente o a la seguridad en base a las siguientes preguntas.

- ¿Qué puede suceder? – Considerar las consecuencias de la ocurrencia del modo de falla.
 - ¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia? – Cuantificar la probabilidad de que suceda el modo de falla en base a criterios de personas que conocen perfectamente el activo o sistema.
 - ¿El riesgo es tolerable? – Con los datos anteriores, calcular una medida del grado de riesgo y en base a criterios de personas que entienden el mecanismo de falla y de personas con entendimiento de la tolerabilidad, ya que pudieran considerarse víctimas (operadores o personal de mantenimiento) o a quienes alcancen las consecuencias (responsables de áreas, gerencias, etc).
 - Considerar que, si el riesgo es intolerable, todos los esfuerzos deben encaminarse a reducir la probabilidad de ocurrencia del modo de falla sin considerar el costo que esto demande.
- Modo de falla oculta con consecuencias en el ambiente y la seguridad.
- Buscar la probabilidad tolerable de que ocurra el modo de falla (falla múltiple), en base a los siguientes pasos:
 - Calcular el riesgo con la metodología presentada en el punto anterior.
 - Evaluar el riesgo y buscar la probabilidad tolerable.
 - Buscar la probabilidad de falla de la función protegida que normalmente es conocida.
 - Calcular la indisponibilidad permitida de la función protectora dividiendo la probabilidad tolerable de una falla múltiple, para la probabilidad de falla de la función protegida. Aplicar los siguientes criterios para evaluar la máxima indisponibilidad de la protección permitida.
 - Considerar la probabilidad tolerable para una falla múltiple.
 - Considerar la probabilidad de que la protección falle en el período considerado para la indisponibilidad.
 - Determinar la indisponibilidad resultante y que cumpla con la probabilidad tolerable para una falla múltiple.

- Modo de falla evidente con consecuencias económicas. – Considerar que el costo de la política de manejo del modo de falla sea menor que el costo total del modo de falla, considerando un mismo período de comparación.
- Modo de falla oculto con consecuencias económicas. – Considerar que el costo de la política de manejo del modo de falla sea menor que el costo total del modo de falla, considerando un mismo período de comparación.

3.3.4.2. Políticas de Tareas Programadas

Para las políticas de los manejos de modos de falla, en base a las recomendaciones de la norma SAE JA1012, considerar los puntos descritos en la siguiente metodología:

- Tareas basadas en condición. – Considerar los siguientes criterios:
 - La falla potencial debe ser muy bien definida.
 - Se debe tener identificado el período para la falla.
 - El intervalo considerado para la tarea debe ser menor que el período para la falla.
 - Debe ser posible ejecutar la tarea antes del período identificado.
 - La diferencia de tiempo entre el período y la tarea debe ser lo suficientemente largo para poder tomar acciones para evitar la falla.
- Tareas de restauración programada y de desincorporación programada.
 - Para tareas de restauración programada considerar los siguientes criterios:
 - Longevidad demostrada a la cual aumenta la probabilidad condicional del modo de falla del activo o sistema.
 - Proporción grande de ocurrencias del modo de falla después de la longevidad demostrada, para reducir la probabilidad de ocurrencia del modo de falla de forma temprana y que sea tolerable para el usuario.

- La tarea debe restaurar la condición de resistencia a fallar a niveles tolerables por parte del usuario.
- Para tareas de desincorporación programada considerar los siguientes criterios:
 - Longevidad demostrada a la cual aumenta la probabilidad condicional del modo de falla del activo o sistema.
 - Proporción grande de ocurrencias del modo de falla después de la longevidad demostrada, para reducir la probabilidad de ocurrencia del modo de falla de forma temprana y que sea tolerable para el usuario.
- Tareas de detección de fallas. – No aplicar en modos de falla evidentes y considerar los siguientes criterios.
 - La base de tiempo considerada para la tarea debe reducir la probabilidad de ocurrencia del modo de falla de la función protectora a un valor tolerable por el usuario.
 - La tarea debe confirmar que todos los componentes de relacionados con el modo de falla analizado sean funcionales.
 - La tarea debe considerar cualquier probabilidad de que el modo de falla oculto se produzca en el intervalo analizado.
 - La tarea debe ser físicamente realizable en el intervalo definido.
- Combinación de tareas.– Cuidar que la combinación de tareas reduzca la probabilidad de ocurrencia del modo de falla a un nivel tolerable; considerando que se cumplan los criterios recomendados para cada una de ellas.

3.3.4.3. Políticas de Manejo de Fallas - Cambio de Especificaciones y Operar Hasta Fallar

Para las políticas de los manejos de modos de falla cuando las tareas no estén disponibles, en base a las recomendaciones de la norma SAE JA1012, considerar los puntos descritos en la metodología:

- Cambio de especificaciones. – Considerar los siguientes criterios:
 - Cuando el modo de falla es oculto y las consecuencias del mismo afectan a la seguridad y al ambiente.
 - Cuando el modo de falla es evidente y las consecuencias del mismo afectan a la seguridad y al ambiente.
 - Cuando el modo de falla es oculto y las consecuencias del mismo no afectan a la seguridad y al ambiente, considerar el costo efectivo en opinión del usuario del activo.
 - Cuando el modo de falla es evidente y las consecuencias del mismo no afectan a la seguridad y al ambiente, considerar el costo efectivo en opinión del usuario del activo.
- Operar hasta Fallar. – Considerar los siguientes criterios:
 - Cuando el modo de falla es oculto y no existe una tarea apropiada, la falla múltiple no debe afectar a la seguridad ni al ambiente.
 - Cuando el modo de falla es evidente y no existe una tarea apropiada, el modo de falla no debe afectar a la seguridad ni al ambiente.

3.3.4.4. Selección de la Política de Manejo de Fallas

Para la selección de las políticas de los manejos de modos de falla, en base a las recomendaciones de la norma SAE JA1012, se aplicó los siguientes puntos descritos en la metodología:

- Aproximación Rigurosa. – Considerar las siguientes fases:
 - Separar los modos de falla evidentes de los modos de falla ocultos.
 - Para los modos de falla evidentes.
 - Establecer la probabilidad real que el modo de falla pudiera afectar a la seguridad una persona.

- Establecer la probabilidad tolerable que el modo de falla pudiera afectar a la seguridad de una persona.
- Establecer la probabilidad real que el modo de falla pudiera afectar al medio ambiente.
- Establecer la probabilidad tolerable que el modo de falla pudiera afectar al medio ambiente.
- Establecer las consecuencias operacionales y no operacionales del modo de falla.
- Para modos de falla que puedan afectar a la seguridad y al ambiente y que su probabilidad es mayor que la tolerable, las políticas de manejo de falla ayudarán a reducir la probabilidad de ocurrencia a un nivel tolerable.
- Identificar las políticas de manejo de falla que sean menos costosas que la ocurrencia del modo de falla.
- Seleccionar la política que se ajuste mejor según costo – beneficio.
- Para los modos de falla ocultos
 - Establecer la probabilidad real que la falla múltiple pudiera afectar a la seguridad una persona.
 - Establecer la probabilidad tolerable que la falla múltiple pudiera afectar a la seguridad de una persona.
 - Establecer la probabilidad real que la falla múltiple pudiera afectar al medio ambiente.
 - Establecer la probabilidad tolerable que la falla múltiple pudiera afectar al medio ambiente.
 - Establecer las consecuencias operacionales y no operacionales del modo de falla y la falla múltiple.
 - Para la falla múltiple que puedan afectar a la seguridad y al ambiente y que su probabilidad es mayor que la tolerable, las políticas de manejo de falla ayudarán a reducir la probabilidad de ocurrencia a un nivel tolerable.
 - Identificar las políticas de manejo de falla que sean menos costosas que la ocurrencia del modo de falla.

- Seleccionar la política que se ajuste mejor según costo – beneficio.
- Aproximación del Diagrama de Decisión. – Realizar el diagrama de decisión en base a todos los criterios revisados a lo largo de la sección 3.5.4; así como bajo la suposición que las consecuencias a la seguridad y al ambiente están ajustadas con las económicas; así como también bajo la suposición que algunas políticas tienen mejores prestaciones costo – beneficio que otras. Considerar los siguientes aspectos.
 - Jerarquía de las consecuencias. – Considerar que, si una política satisface el criterio de asegurar la seguridad y el ambiente, también lo hará para las consecuencias económicas.
 - Jerarquía de políticas. – Considerar las siguientes jerarquías
 - Para modos de falla evidentes en los que pudiera afectarse la seguridad o el ambiente, seguir el siguiente orden:
 1. Tareas basadas en condición.
 2. Tareas de desincorporación / restauración programada.
 3. Combinación de tareas.
 4. Cambio de especificaciones.
 - Para modos de falla evidentes en los que no pudiera afectarse la seguridad o el ambiente, seguir el siguiente orden:
 1. Tareas basadas en condición.
 2. Tareas de desincorporación / restauración programada.
 3. Mantenimiento no programado.
 4. Cambio de especificaciones.
 - Para modos de falla ocultos en los que pudiera afectarse la seguridad o el ambiente, seguir el siguiente orden:
 1. Tareas basadas en condición.
 2. Tareas de desincorporación / restauración programada.
 3. Detección de fallas.
 4. Mantenimiento no programado.

5. Cambio de especificaciones.
- Para modos de falla ocultos en los que no pudiera afectarse la seguridad o el ambiente, seguir el siguiente orden:
 1. Tareas basadas en condición.
 2. Tareas de desincorporación / restauración programada.
 3. Detección de fallas.
 4. Mantenimiento no programado.
 5. Cambio de especificaciones.

Para la aplicación en el sistema de regulación de velocidad, se utilizó al AMEF A4 debido a que, según los datos operativos, es el que presenta mayor probabilidad de ocurrencia y a causa de que todos tienen las mismas consecuencias, su riesgo es mayor. Para la selección de la política de manejo de fallas, se utiliza el algoritmo de decisión de la Figura 3.13.

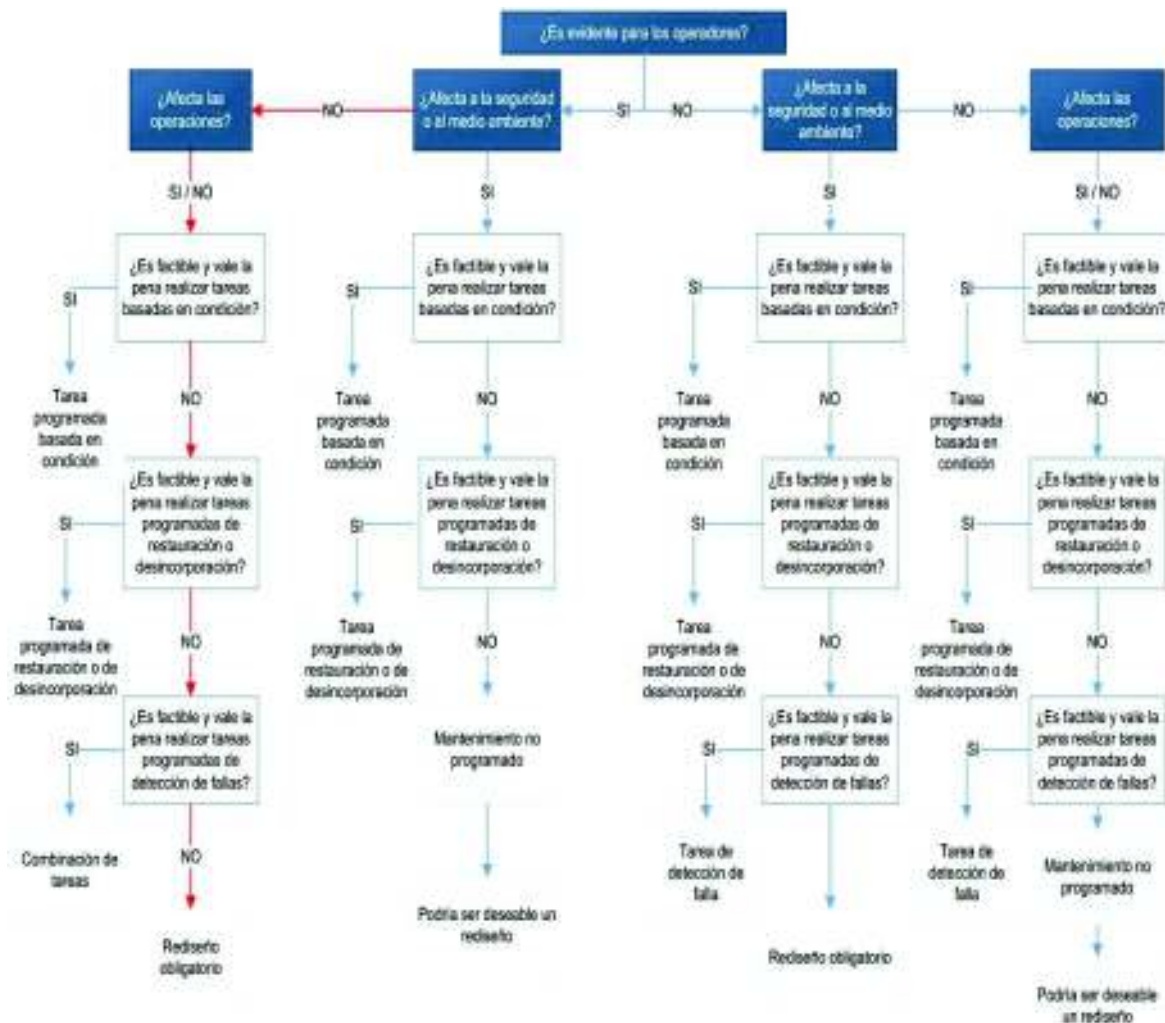


Figura 3.13. Desgaste de bus de alimentación del módulo de salida analógica

Como se observa en la línea roja, al seguir el diagrama de decisión recomendado por la norma se tiene las siguientes consideraciones en base a los criterios expuestos en el punto de efectos y consecuencia de la falla:

- El modo de falla A4, es evidente para los operadores, se manifiesta por una alarma de pérdidas de señal en el sistema de control del Regulador de Velocidad.
- No es factible realizar una tarea basada en condición debido a que el período de falla es aleatorio.
- No es factible realizar tareas de restauración o desincorporación debido a que no se tiene el dato establecido de longevidad.

- No es factible realizar tareas de detección de fallas porque no es aplicable a modos de falla evidentes.
- Del algoritmo de decisión, se obtiene que es necesario un rediseño obligatorio del bus de alimentación para módulos de salidas analógicas.

3.3.5 PROGRAMA DE VIDA

Para la evaluación del programa de vida, se deben tener presentes las siguientes consideraciones:

- La mayoría de los datos al inicio del análisis para el proceso MCC son imprecisos y los mismos serán más precisos con el transcurso del tiempo.
- La manera de uso y las expectativas de desempeño de un activo o sistema por parte del usuario, también cambiarán con el tiempo.
- Una revisión periódica es necesaria para cumplir con el objetivo del proceso MCC, el cual se fundamenta en asegurar que los activos o sistemas siguen cumpliendo las expectativas funcionales de los usuarios; además es necesaria una revisión periódica de las decisiones y de la información que sustente dichas decisiones.
- Se debe evaluar si se siguen respondiendo satisfactoriamente preguntas del proceso MCC, de lo contrario realizarse las siguientes preguntas:
 - ¿Ha cambiado el contexto operacional para que amerite actualizar la información?
 - ¿Han cambiado las expectativas operacionales para que amerite actualizar la información?
 - ¿Han cambiado los modos de falla para que amerite actualizar la información?
 - ¿Han cambiado los efectos de falla para que amerite actualizar la información?

- ¿Han cambiado las consecuencias de falla para que amerite actualizar la información?
- ¿Ha habido cambios que ameriten cambiar las políticas de manejo de fallas?
- ¿Han existido cambios en el método de desarrollo que amerite cambiar las tareas a un nivel superior?
- ¿Existe alguna evidencia que sugiera el cambio en los intervalos de las tareas?
- ¿Existe alguna evidencia que sugiera el cambio en la forma como se realiza las tareas?
- ¿El activo se ha cambiado de forma que se haya aumentado o disminuido alguna de sus funciones?

Los criterios mostrados anteriormente, son la base para mantener el proceso MCC vigente una vez implementado en determinado sistema o activo. Del proceso de selección de la política de manejo de modos de fallas, se obtuvo el camino a seguir en cuanto al tipo de tareas a implementar para enfrentar cada uno de los modos de fallas; sin embargo, las tareas específicas dependen del activo.

Para el cálculo de los intervalos de tiempo de las tareas utilizando formulaciones matemáticas y estadísticas, dichas formulaciones deben ser:

- Lógicamente robusta. – Cuidar que no sean realizadas en base a suposiciones de patrones o suposiciones de relaciones entre variables
- Disponibles para el dueño o usuario. – Se debe cumplir que:
 - El proveedor de la formulación, debe poder demostrar como llego a dicha formulación
 - El usuario debe conocer el activo o sistema para poder evaluar por sí mismo si la formulación es adecuada

En cuanto a la aplicación al sistema regulador de velocidad, en el punto anterior, se utilizó el diagrama de decisión, con el cual, se llegó a que el camino a seguir

para tratar la consecuencia del modo de falla es un rediseño obligatorio, todo esto debido a que al momento de arrancar o parar una unidad se producen vibraciones mayores a las normales que provocan que el bus de alimentación de los módulos falle en el tiempo, por lo que es necesario un rediseño para poder evitar que el bus falle nuevamente por esta causa. Se ha transferido el resultado al área de Ingeniería para su análisis y posterior aplicación.

3.4 EVALUACIÓN DEL SISTEMA IFS

3.4.1 EVALUACIÓN DEL SISTEMA FINANCIERO INDUSTRIAL

Para la evaluación del sistema IFS implementado en la Corporación Eléctrica del Ecuador, se utiliza una lista de verificación en base a las normas estudiadas previamente, específicamente a la Norma ISO 14224, la cual es la principal referencia en cuanto a la recolección de información.

Las listas de verificación expuestas en las Tablas 3.21 a 3.24 toman las categorías especificadas en la Norma ISO 14224 a cumplir por este tipo de sistemas.

Tabla 3.21. Lista de verificación: Estándares de la información

Concepto	Estado	Evidencia
¿Existe un estándar en la información registrada en el sistema IFS?	No cumple	No existe evidencia que demuestre un estándar en la información registrada, y tampoco existe una parametrización o proceso disponible que indique como se podría registrar.
¿Existe un estándar en los procesos registrados en el sistema IFS?	No cumple	No existe evidencia que demuestre un estándar en los procesos registrados, y tampoco existe una lista de registros relacionados a los procesos a los cuales se debe realizar el seguimiento y la recolección de información.

Tabla 3.22. Lista de verificación: Definición de la información

Concepto	Estado	Evidencia
¿Existe una definición del objetivo de recolección de información?	Cumple	Cumplimiento parcial. No existen todas las definiciones de objetivos del proceso de recolección, de las diferentes categorías de datos.
¿Existe una clasificación de activos con una topología adecuada?	Cumple	Cumplimiento parcial. Existen inconsistencias marcadas en la topología disponible en el sistema.
¿Están definidos los atributos y criterios de calidad que deben ser considerados el momento de recoger la información de cada activo?	Cumple	Cumplimiento parcial. Existen atributos y criterios pero no desde el punto de vista de calidad que estén definidos en el sistema IFS.
¿Existen enfoques comunes para la evaluación y registro de la condición de un activo?	Cumple	Cumplimiento parcial. No se cuenta con las suficientes categorías que clasifiquen de forma adecuada las condiciones de los activos.
¿Están definidos los métodos para categorizar las fallas y defectos de los activos?	Cumple	Cumplimiento parcial. No se cuenta con todas las metodologías para categorizar las fallas de los sistemas o activos.
¿Está definida la información taxonómica de los activos en una base de datos?	Cumple	Si se cuenta con una base de datos de los activos en el sistema IFS.
¿Se encuentran definidos los límites para cada clase de equipo?	No cumple	No existe definición de límites clara y adecuada para las clases de equipo.
¿Existe una definición uniforme de la falla y un método de clasificarlas?	Cumple	Cumplimiento parcial. No se cuenta con las suficientes categorías que clasifiquen de forma adecuada las fallas de los activos.
¿Existe un registro de definición de los puntos de verificación de la calidad de la información?	No cumple	Se cuenta con la herramienta de medidas (no implementado en su totalidad), pero no es aplicable desde el punto de vista de calidad de información.
¿El sistema permite definir criterios de priorización para la recolección de la información?	No cumple	El sistema no cuenta con una herramienta de priorización de recolección de información.
¿Existe una definición de un plan de recolección de información?	No cumple	No se encuentra evidencia de existencia de un plan de recolección de información.

Tabla 3.23. Lista de verificación: Calidad de la información

Concepto	Estado	Evidencia
¿La información es precisa y refleja a la entidad que representa?	Cumple	Cumplimiento parcial, debido a que el sistema no permite evaluar el criterio de precisión de la información recolectada.
¿La información es completa de cada activo?	Cumple	Cumplimiento parcial, no cuenta con información opcional que recomienda la norma y que se considera importante en este tipo de industrias.
¿La información es consistente a las definiciones, reglas, formatos y estándares que usa la compañía?	Cumple	El sistema fue implementado a medida para toda la corporación; por lo que los estándares fueron utilizados con la concepción del sistema.
¿La información recolectada es válida o cumple con las reglas de almacenamiento de información?	No cumple	No existe evidencia de un mecanismo de validación de la información desde el punto de vista de las reglas de almacenamiento.
¿La información refleja el estado temporal del activo y es actualizada de acuerdo a las definiciones de la empresa?	Cumple	Se refleja en los documentos adjuntos a las Órdenes de Trabajo que refieren a las consignaciones o fichas de maniobras por parte del área de Operación.
¿La información recolectada es registrada con códigos únicos para evitar duplicidad?	Cumple	Se evidencia con la codificación de los activos y con la codificación única de las Órdenes de Trabajo.
¿El sistema permite la trazabilidad de la información recolectada?	Cumple	Cumplimiento parcial. Se evidencia el cumplimiento con los estados que maneja la Orden de Trabajo. No existe evidencia de la trazabilidad en las medidas o en los registros manejados.
¿Se realiza una revisión periódica de las fuentes de datos utilizadas por el sistema IFS?	Cumple	Cumplimiento parcial. Se consideran revisiones constantes en los planes de mantenimiento; sin embargo, existen fuentes de información que no son revisadas periódicamente.
¿La información recolectada está de acuerdo al estándar de interpretación?	No cumple	No se cuenta con un estándar de interpretación.
¿El sistema permite recolectar información suficiente para dar validez estadística?	No cumple	A pesar de que el sistema cuenta con una herramienta de mediciones, no se encuentra implementada y los registros no permiten realizar estadísticas de los datos de manera sencilla.
¿El sistema permite realizar análisis costo beneficio?	No cumple	El sistema a nivel de gestión operativa y de mantenimiento no permite realizar ningún tipo de análisis costo – beneficio.

Tabla 3.24. Lista de verificación: Calidad de la información (Continuación)

Concepto	Estado	Evidencia
¿Existe una herramienta dentro del sistema que permita realizar calidad de datos?	Cumple	El sistema cuenta con la herramienta de medición pero no se encuentra implementada.
¿Se puede realizar un proceso de verificación de calidad de datos documentado?	Cumple	¿Se puede realizar un proceso de verificación de calidad de datos documentado?.

De la evaluación realizada, se demuestra que es necesaria una revisión integral del sistema IFS para alinear el mismo a cumplir con las recomendaciones dadas en las normas estudiadas en el presente trabajo; todo esto a fin de propiciar un camino de toma de datos acorde con el proceso MCC que es la base de la gestión de activos desde el punto de vista de confiabilidad.

3.5 EVALUACIÓN DEL AUMENTO DE CONFIABILIDAD Y PRODUCTIVIDAD

Hay que tomar en cuenta que la central fue inaugurada el 18 de noviembre del 2016, y hasta la fecha del análisis, ha completado 15 meses de operación, por lo tanto, nada asegura que la confiabilidad de toda la central se mantenga al 100 % a largo plazo, más aún al considerar el programa de vida de los equipos, los cuales indican que la tendencia a presentar fallos aumenta de acuerdo al número de horas en operación. Además, al tomar en cuenta que la central abastece alrededor del 30% de la demanda energética del país, esto equivale a 1 391 350 hogares ecuatorianos, por lo tanto, la confiabilidad de la Central Coca Codo Sinclair es fundamental estudiarla.

Para ello, se plantea la ecuación [3.1], con la cual se calcula el índice de confiabilidad (CELEC EP, 2013):

$$IC = \frac{(HP - HMP_{\text{Prog}}) - (HFFI + HMC_{\text{Cor,For,Emerg}})}{HP - HMP_{\text{Prog}}} \quad [3.1]$$

Donde:

HP: horas del periodo y corresponde al número de horas disponibles por período.

HMProg: horas de mantenimiento programado.

HFFI: horas fuera de servicio por fallas internas, incluyen las horas por indisponibilidad forzada por disparo y falla en el arranque.

HMCor,For,Emerg: horas fuera de servicio por mantenimiento correctivo, forzado, o emergente.

En los datos de entrada, se tiene el número de horas del periodo, si se considera el mes de febrero, este periodo tiene 28 días y cada uno de 24 horas y la planta consta de 8 unidades generadoras, por lo tanto el total de horas es 5 376 horas. Las horas programadas para el mantenimiento vienen dadas por el manual de fabricante y dependerá del número de horas en funcionamiento de cada equipo o al tiempo operativo de la máquina, sin embargo, de la Tabla 3.1, se obtuvo que el promedio de las HMProg con respecto a HP, es aproximadamente 9,30 %, para estimarla de una forma conservadora se asumió que es igual al 10 % de las horas del periodo. De la misma forma las HFFI, corresponden al 0,20 % de las HP, para este estudio se asumió la misma tasa (0,20 %), finalmente para las HMCor,For,Emerg la tasa se ubica en 0,75 %, para este trabajo se consideró la tasa en 0,80 %. Además se debe considerar la ecuación [3.2] de equilibrio:

$$\text{Horas reales de producción} = \text{HP} - \text{HMProg} - \text{HFFI} - \text{HMCor,For,Emerg} \quad [3.2]$$

La ecuación [3.3] permite identificar el valor fundamental de la productividad de la central, y la cual viene dada por:

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Horas reales de producción}}{\text{HP}} \times \text{Energía promedio} \quad [3.3]$$

Al aumentar la confiabilidad, se reducen las horas fuera de servicio por fallas internas y por mantenimiento correctivo, por lo tanto, las horas reales de producción

tenderán a ser igual al número de horas disponibles menos las horas de mantenimiento programado.

Para identificar el impacto tanto en la confiabilidad como en la productividad se han diseñado 8 escenarios de mejora, los cuales son:

1. HFFI, HMCor, For, Emerg y HMPProg se reducen en igual proporción en un 20 %.

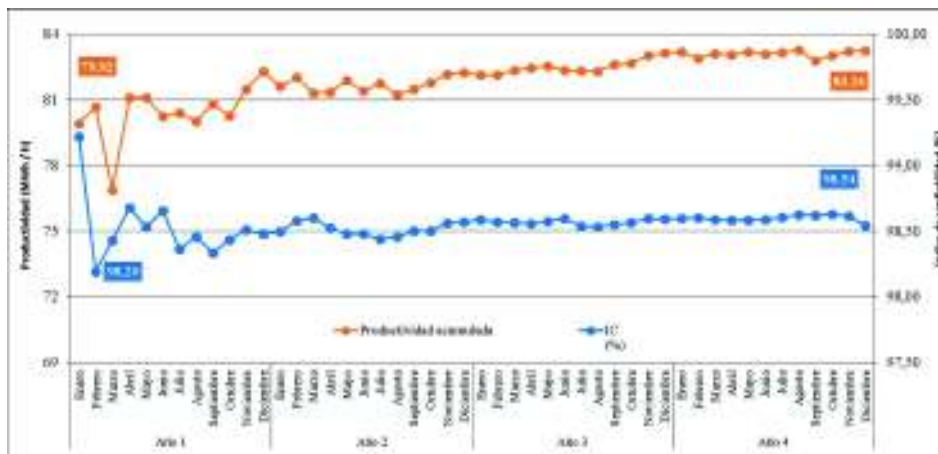


Figura 3.14. Escenario 1

En la Figura 3.14, se puede observar que la productividad acumulada estimada parte de 79,92 MWh/h, y al final del periodo evaluado, la productividad acumulada llega a 83,26 MWh/h, esto debido a la variabilidad que presenta la productividad en el inicio del período simulado, la cual termina influyendo, sin embargo la tendencia es creciente a lo largo del tiempo.

2. HFFI, HMProg se reducen en igual proporción en un 20% y HMCOr, For, Emerg se mantienen iguales.

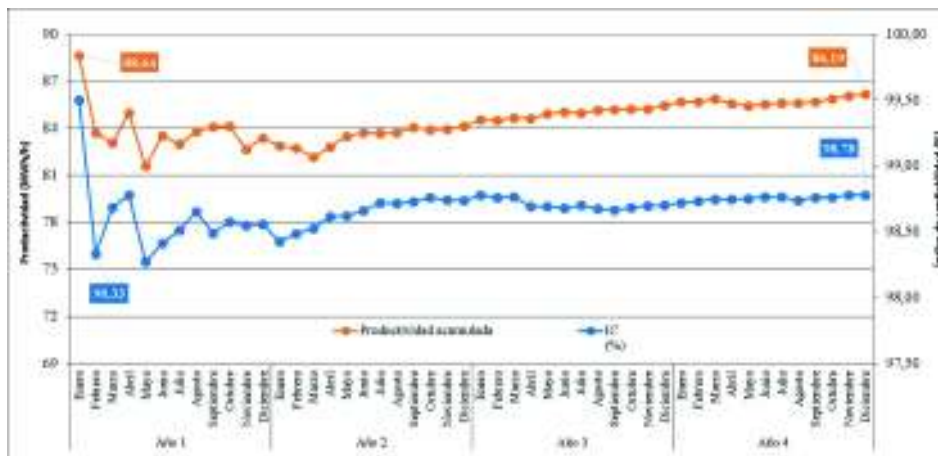


Figura 3.15. Escenario 2

En la Figura 3.15, se observa que la productividad acumulada parte de 88,64 MWh/h, inicialmente se observa una caída en la productividad acumulada debido a estas variaciones que tiene en los primeros meses de evaluación, la tendencia es creciente, y llega a estabilizarse en 86,19 MWh/h.

3. HMCOr, For, Emerg, HMProg se reducen en igual proporción en un 20% y HFFI se mantiene igual.

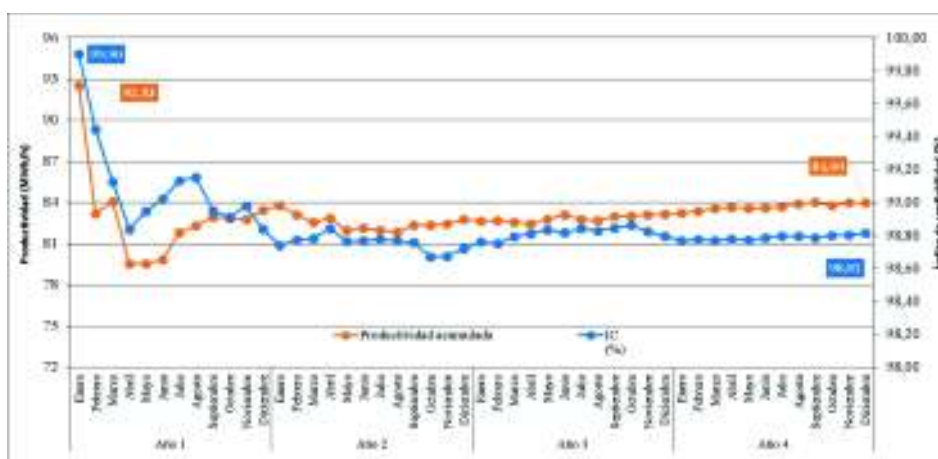


Figura 3.16. Escenario 3

En la Figura 3.16, se observa un comportamiento similar al presentado en el escenario 2, en donde la productividad acumulada parte de un valor alto de

92,53 MWh/h, para los meses que siguen esta productividad acumulada decae, al final, se recupera la productividad hasta encontrarse estable en un 84 MWh/h. Este escenario es el de mayor caída, en cuanto a la productividad acumulada.

- 4. HMProg se reduce en igual proporción en un 20 %, y , HFFI, y HMCor, For, Emerg se mantienen iguales.

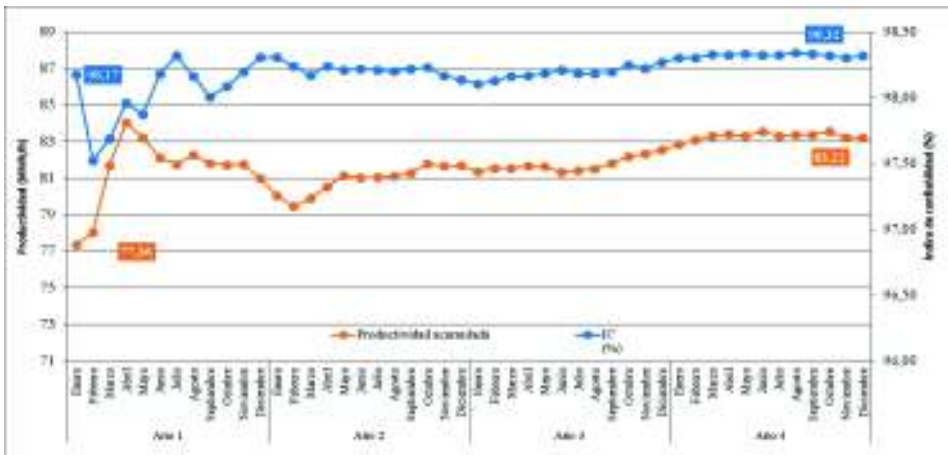


Figura 3.17. Escenario 4

En la Figura 3.17 se observa que la productividad parte de 77,36 MWh/h, y llega a ubicarse en un 83,22 MWh/h, se observa alta variabilidad en la productividad especialmente en el primer año e inicios del segundo. Los meses de más alta productividad corresponde a los finales del año 3 e inicios del año 4.

- 5. HFFI, HMCor, For, Emerg se reducen en igual proporción en un 20% y HMProg se mantiene igual.

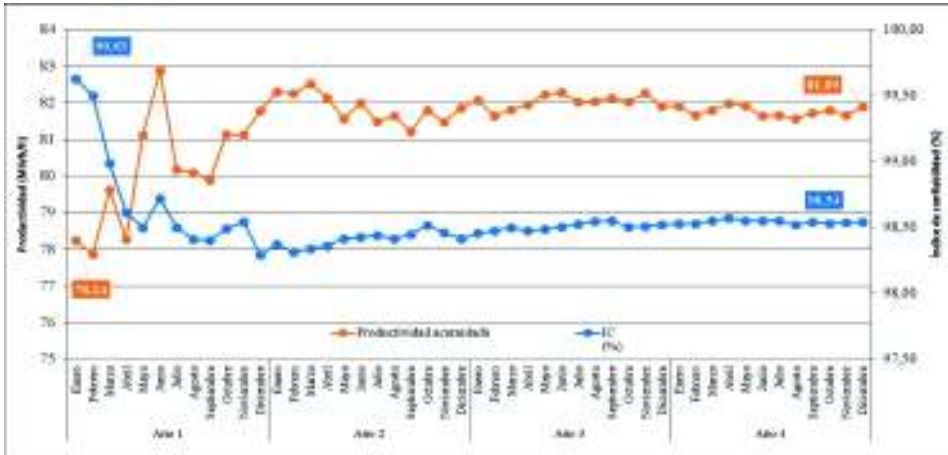


Figura 3.18. Escenario 5

En la Figura 3.18, se observa una productividad creciente, pasando de 78,24 MWh/h hasta ubicarse en un 81,89 MWh/h, el mes de julio del primer año, se observa el mayor descenso de la productividad, para los meses posteriores, la productividad se recupera y pasa a tener un valor superior a 81 MWh/h.

6. HFFI se reduce en igual proporción en un 20 %, HMCor, For, Emerg y HMProg se mantienen iguales.

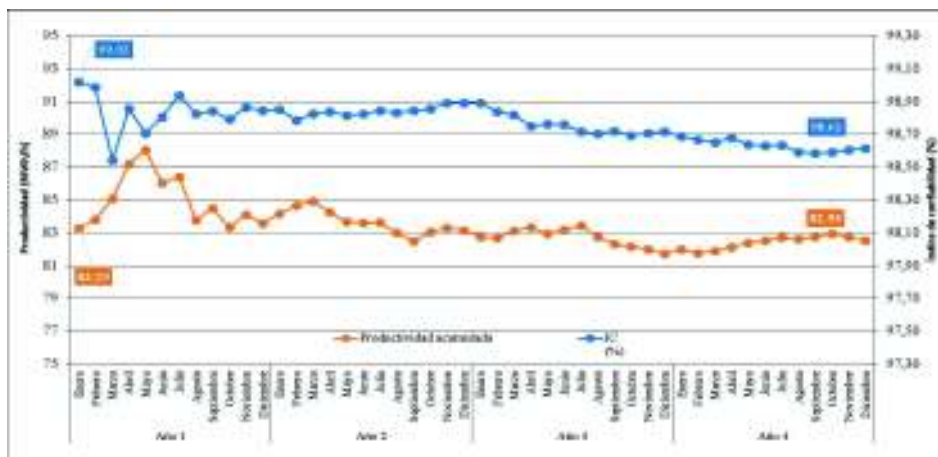


Figura 3.19. Escenario 6

En la Figura 3.19, se observa que la productividad se mantiene, existe una ligera caída en productividad acumulada. Se observa que la productividad decae a finales del año 3, y se ubica por debajo del 89 MWh/h.

7. HMCor, For, Emerg se reducen en igual proporción en un 20 % y HFFI, y HMProg se mantienen iguales.

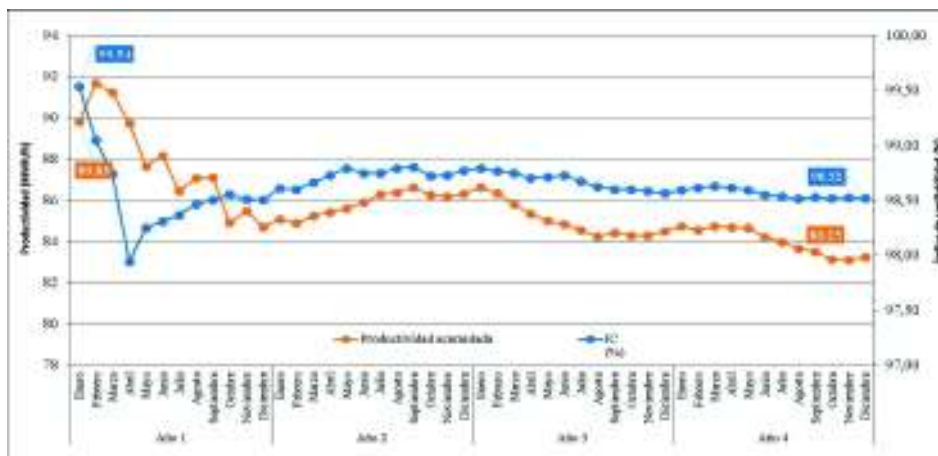


Figura 3.20. Escenario 7

En la Figura 3.20, se observa que los primeros meses, la productividad acumulada se ubica en el 89,93 MWh/h al final del periodo evaluado, la productividad acumulada está en 98,52 MWh/h, la tendencia es decreciente.

8. HFFI, HMCor, For, Emerg y HMPProg todos se mantienen igual, es decir, el escenario observado.

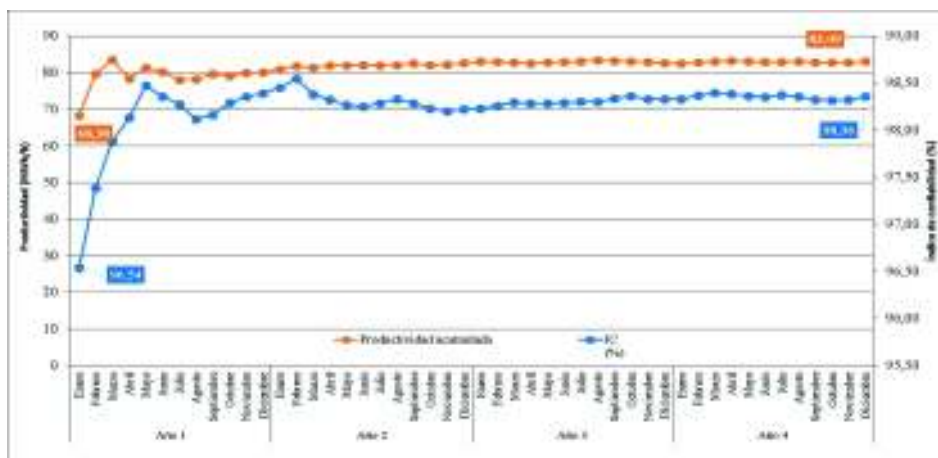


Figura 3.21. Escenario 8

En la Figura 3.21, se observa que la productividad acumulada pasa de 68,38 MWh/h, a estabilizarse en 83,09 MWh/h, de todos los escenarios, este es el de mayor incremento, debido a esto, se observa que la tendencia es creciente, en los meses iniciales, la productividad baja ligeramente; sin embargo, en los siguientes meses la mayor parte del tiempo la productividad acumulada está por sobre el 80 MWh/h.

Para identificar el comportamiento de la confiabilidad y de la productividad, se realizó una proyección de 4 años, en total 48 meses los cuales se presentan en las Figuras 3.14 a 3.21, estas representan a cada uno de los escenarios de aumento de productividad; se puede observar que el índice de confiabilidad y la productividad presentan distorsiones y variabilidad de acuerdo a la cantidad de horas por indisponibilidad, para identificar el mejor escenario para el aumento de productividad, se presenta la Figura 3.22.

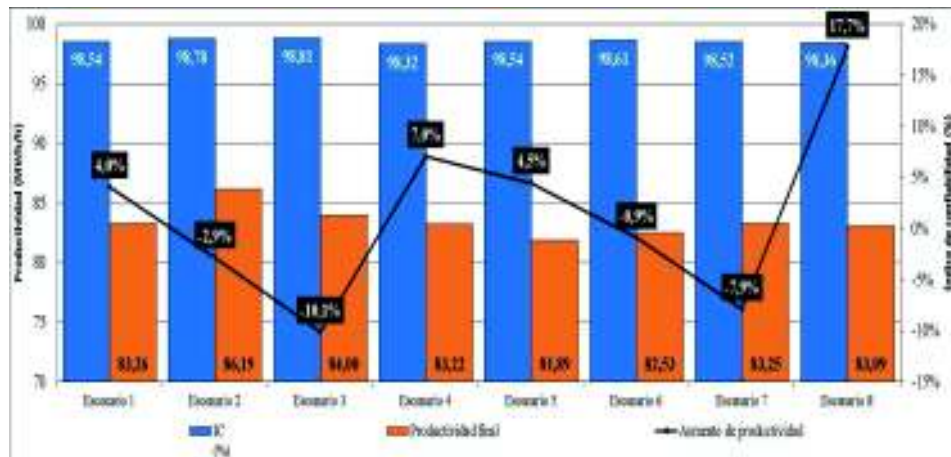


Figura 3.22. Comparativo de escenarios

El índice de confiabilidad se ubica alrededor de 98,6 %, es decir, la central operará 99 veces de acuerdo a lo programado para operación y 1 vez, la planta presentará algún tipo de inconveniente. Este comportamiento, es normal es una planta relativamente nueva. En cambio para la productividad, se puede observar que el escenario 2 (HFFI, HMProg se reducen en igual proporción en un 20% y HMCor, For, Emerg se mantienen iguales) genera la mayor productividad acumulada alcanzada, con 86,19 MWh/h (en promedio), por lo tanto, la estrategia de mejora debe considerar trabajar en la reducción de las horas fuera de servicio a fallas internas, y de las horas de mantenimiento programado, es decir, enfocarse en identificar como se reducen las horas de indisponibilidad por fallas internas, solo así la productividad se alcanzará en su máximo.

Es importante recordar, que el mantenimiento programado responda a las recomendaciones del fabricante, de la misma manera, los tiempos son relativos a aquellas actividades recomendadas; por lo que es necesario, enfocarse en las estrategias planteadas en el presente trabajo para el tratamiento de las fallas, y de esta manera reducir el tiempo de inactividad debido a fallas y aumentar la productividad de la central.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Al finalizar el presente trabajo, con la exposición de la aplicación a manera de ejemplo de la metodología planteada para recolección de datos, definición del contexto operacional, manejo del AMEF y programa de vida, se demuestra que es utilizable para una gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad, aplicando las normas ISO 14224, SAE JA1011 y SAE JA1012. Con lo cual se obtuvo que la confiabilidad estimada de la Central Coca Codo Sinclair es del 99 %; lo que deja un rango del 1 % que se podría mejorar siempre considerando el aumento en la productividad por medio de estrategias de mantenimiento adecuadas.
- Analizando los datos operativos presentados mensualmente durante un período de un año en la Central Coca Codo Sinclair, se evidencian dos motivos internos que afectan a la productividad. El primero está relacionado con los mantenimientos preventivos que se realizan a las unidades de generación y cuyos tiempos responden a la programación de actividades para cumplir con el plan proporcionado por el fabricante de cada equipo. El segundo está relacionado con la pérdida de producción debido a paradas de unidades por fallas, los valores promedian el 0,8 % de pérdida de productividad por efecto de las mismas; lo que representa un valor considerable entendiendo que la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair cubre alrededor del 30 % de la demanda de energía eléctrica total del país.
- El uso de la Norma ISO 14224, permitió crear un marco de referencia de los atributos mínimos que se deben considerar para ser recolectados por el sistema de seguimiento del área de mantenimiento de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, los cuales son: la calidad de los datos, los sistemas de fuentes de datos, los límites y jerarquías que los equipos, la estructura de almacenamiento que debe tener la empresa y la información de equipos, averías y mantenimiento.

- Mediante el marco de referencia generado con la Norma ISO 14224, se pudo observar que, en cuanto a calidad de los datos, existe un cumplimiento parcial, ya que no cumple con todas las recomendaciones que establecen las normas: al momento de asegurar que la información histórica y los datos operativos se encuentren disponibles, no se han definido los objetivos de recopilación de datos, y que solamente se cuentan con informes mensuales donde se identifican los periodos operativos de los equipos, la capacitación al personal es limitada. Además, no se ha realizado investigación sobre las fuentes de los datos, tampoco existen procedimientos definidos para la recopilación, análisis y control de calidad de la información como manda la norma.
- El sistema de fuente de datos, del módulo de mantenimiento del sistema IFS, con el que trabaja la central tiene uso limitado de recursos y no garantiza el cumplimiento de los parámetros de la Norma ISO 14224: manejo de datos, no existe nivel de detalle de los datos de confiabilidad y mantenimiento, el personal no ha sido socializado en el manejo de la herramienta.
- De la evaluación del control de calidad antes de la recolección de los datos según recomendación de la norma ISO 14224, se evidencia que existe investigación parcial de las fuentes de datos a ser recolectadas que permita asegurar la disponibilidad de los mismos, todo esto a fin de que el personal de la contratista definió los datos que deben ser recolectados, pero no indicó el fin de la recolección; bajo esta misma línea, no se cuenta con procedimientos de recolección de datos dentro de un sistema de calidad; lo que no permite al personal que realiza esta tarea involucrarse como tal en el proceso de recolección.
- De acuerdo a la norma ISO 14224, se evidencia que no se hace uso de la herramienta de medición con la que cuenta el ERP, no se encontró evidencia de diagramas de límites que permitan observar sub unidades y las relaciones que existen entre ellas; lo que dificulta el entendimiento del estado operativo del activo y su clasificación en las funciones que éste realiza. La jerarquización bajo la cual están organizados los activos de la Central Coca Codo Sinclair no define

correctamente los niveles recomendados por la norma; además de que no están definidos adecuadamente los sub sistemas, clases y unidades.

- De la evaluación de estructura de la información, se concluye que la base de datos recopilados que contiene información sobre la vida de determinado activo y que es parte del sistema IFS es confusa y no permite la consulta completa, una vez cerradas las órdenes de trabajo realizadas por el personal de mantenimiento; lo que dificulta el análisis posterior de datos y sobre todo la comparación de los datos entre equipos que cumplen la misma función. En cuanto a la información de averías, se evidencia que en los datos del mantenimiento se cumple con la información mínima que recomienda la norma ISO 14224; sin embargo, no se utilizan actividades codificadas, no se especifica la(s) parte(s) de mantenimiento periódico(s) a la(s) que se realizó el mantenimiento, los datos de horas - hombre no son confiables en su totalidad y no se especifican tiempos de inactividad del equipo.
- La información de los equipos que se encuentra disponible en el módulo de mantenimiento del sistema IFS, las identificaciones de los mismos en el ERP no corresponden en su totalidad a la identificación disponible en campo. De la misma manera, la información operativa y la de características de diseño de los equipos es escasa.
- Mediante la aplicación de la metodología y las recomendaciones de la norma SAE JA 1012 para el Contexto Operacional, se demuestra que es necesario contar con un equipo multidisciplinario que permita recopilar toda la información necesaria para estructurar el contexto operacional; de la misma forma, se demuestra que para el cometido, es necesario contar con toda la información técnica disponible por parte del fabricante; así como pruebas de comisionamiento y puesta en marcha. Es necesario definir claramente el modo de operación bajo el cual se considera normal activo o sistema en análisis. Además, su desarrollo permite entender y conocer de mejor manera la operación y funcionamiento del activo o sistema; de tal forma que se conozcan las condiciones operativas en base a su diseño y requerimientos de sus clientes. Y en cuanto a la información de mantenimiento y de la metodología planteada,

se concluye que es necesario tener un registro único de mantenimiento una vez atendido el problema, ya que el sistema IFS no cuenta con una lista codificada de registros de mantenimiento.

- Del estudio de los límites y de la metodología planteada para la definición de los mismos, se demuestra que es imprescindible su definición para la recolección, recopilación y análisis de datos de confiabilidad y mantenimiento; además de facilitar la comunicación entre las diferentes áreas operativas y de mantenimiento de la Central Coca Codo Sinclair. De la evaluación realizada al sistema IFS, se demuestra que no se tiene implementado explícitamente la herramienta que indique qué datos de confiabilidad y mantenimiento deben ser recopilados para la correcta gestión de los activos.
- Del estudio de la jerarquización de los activos y de la metodología planteada para la estructuración de la misma, se demuestra que la correcta taxonomía permite que los datos de confiabilidad se relacionen en cada nivel de subdivisión con el objetivo de que sean válidos y permitan la comparación. De la evaluación realizada al sistema IFS, se evidencia que la jerarquización utilizada no cumple en su totalidad las recomendaciones de la norma; lo que dificulta el entendimiento de la estructura y la relación entre niveles taxonómicos.
- Del estudio de la información de equipos y de la metodología planteada, se verifica que se cuenta con la información básica sobre los equipos para organizarla de tal forma que se pueda recolectar un mínimo de datos que permita el intercambio de información entre el usuario y el fabricante del equipo. De la verificación en el sistema IFS, se observó que la falta de información se debe en gran medida a que la misma se encuentra en el idioma del fabricante (mandarín) y que no es posible su interpretación y uso.
- Del estudio de información de averías y de la metodología planteada, se verifica que es necesario tener una identificación y un modo de avería única; lo que permite una definición uniforme de falla para combinar los datos tomados de diferentes fuentes (mantenimiento, operaciones). Además, el sistema IFS cumplen con los principales atributos solicitados en la norma; sin embargo, las

opciones que se encuentran para registro de averías no cubren todos los casos probables a presentarse, estos registros deben relacionarse con los mecanismos de fallas (mecánicas, de material, de instrumentación, eléctricas, externas y varios). Se evidencia que en el sistema IFS no se cuenta con información de modo de la avería (función deseada no obtenida, pérdida de función específica e indicación de falla observada).

- La evaluación de los escenarios permitió identificar que el escenario 2, el cual plantea la reducción de horas por paros debido a la presencia de fallas internas y las horas de mantenimiento programado, al inicio se observa que la productividad acumulada se ubica en 88,64 MW/h, y al final de la evaluación, la productividad acumulada llega a un 86,19 MW/h; además, se observa una tendencia creciente, lo que implica que a futuro (posterior al tiempo evaluado), esta productividad acumulada seguirá creciendo. El aumento observado es del 17,7%.

4.2 RECOMENDACIONES

- Crear un procedimiento de recolección de datos tanto en el área operativa como en el área de mantenimiento, en el cual se detallen los objetivos de la toma, los datos a ser tomados y la forma de recolectarlos, también mostrar los responsables en cada parte del proceso. Además, capacitar al personal en el cumplimiento de dicho procedimiento, con el fin de asegurar la calidad en la recolección.
- Publicar en lugares que la empresa ha definido como informativos para el personal, los resultados de la recolección de datos con límites, proyecciones o metas, a fin de que cada una de las personas involucradas en él, constaten el resultado final de su trabajo y se sientan parte del proceso en forma integral y total.
- Asignar recursos humanos para la etapa de análisis de los datos recolectados; ya que se debe revisar los datos, consistencia, codificaciones; de la misma manera, se debe implementar un proceso de control de calidad a nivel documental que

asegure el cumplimiento de las necesidades y requerimientos que la gestión de mantenimiento requiere de acuerdo a los parámetros del MCC.

- Incorporar diagramas de límites que permitan realizar la recopilación, función y análisis de los datos de determinado equipo; a la vez que se recomienda revisar y reestructurar los niveles que se encuentran en la taxonomía de equipos disponible en el sistema IFS; para que los datos recolectados tengan validez y puedan compararse en el análisis MCC.
- Implementar una herramienta informática o modificación de la que actualmente funciona en el sistema IFS, de tal forma que permita consolidar una base de datos eficaz y eficiente, a la vez que permita o facilite la gestión, consulta, estadísticas y el análisis de los datos; brindando la posibilidad de realizar análisis de un activo durante toda su vida útil.
- Hacer una verificación completa y un inventario de la información disponible en el sistema IFS; de forma que se complete dicha información asegurando cumplir con los parámetros de identificación, clasificación y datos de instalación del equipo, parámetros de diseño del equipo y de la aplicación del mismo.
- Estructurar nuevamente el uso del apartado de Información Adicional mediante el uso de una estructura establecida y totalmente definida; ya que los documentos Servicio y Mantenimiento, Gestión de Orden de Trabajo, Informe de Fallo, Solicitud Servicio, contienen información inexacta y poco descriptiva sobre el fallo.
- Codificar las actividades a realizarse como parte del mantenimiento de las unidades. En lo referente a mantenimientos correctivos, es necesario referenciar correctamente el ítem de mantenimiento periódico específico una vez verificada la taxonomía de los activos ingresados en el sistema IFS. Finalmente se recomienda realizar un estudio de tiempos para las actividades realizadas.
- Bajo los resultados de la elaboración del contexto operacional según cumplimiento de la norma SAE JA 1012, se recomienda que el grupo de análisis de operación y mantenimiento establecido en la Central Coca Codo Sinclair,

realice una auditoría a la información con la que cuenta sobre los diferentes sistemas; ya que como se observó, la información no es consistente y precisa con la realidad.

- Bajo los resultados de la evaluación del sistema IFS y en base a la norma ISO 14224 (apartado 5.1), se recomienda realizar una clara descripción de los límites para la recopilación de la información de confiabilidad y mantenimiento utilizando la metodología presentada en el trabajo.
- De la evaluación realizada a la jerarquización utilizada en el sistema IFS y en base a la norma ISO 14224 (apartado 5,2), se recomienda realizar una revisión integral y re estructurar los niveles a partir del nivel de subunidad de todos los activos registrados en el sistema.
- De la información analizada para el registro de Información del Equipo, se recomienda realizar una revisión completa de la información de todos los equipos levantados para el sistema IFS, esto con el fin de solicitar al fabricante los datos faltantes o que no hayan sido posible su interpretación por el idioma de origen.
- De la información analizada para el registro de Información de Averías, se recomienda establecer una lista codificada para el registro de averías y para modo de averías en base al anexo B de la norma ISO 14224.
- De la información analizada para el registro de Información de Mantenimiento, se recomienda establecer un listado codificado para registros de mantenimiento, de forma que facilite el análisis de datos de confiabilidad de forma óptima.
- Se recomienda para futuros trabajos, abarcar la implementación del sistema de gestión basado en la confiabilidad en partes de la Central Coca Codo Sinclair que requieran atención inmediata en base a los análisis de riesgos.
- Se recomienda complementar el presente trabajo con un análisis exhaustivo de las estrategias de manejo de programas de vida para los activos; es decir, buscar una guía que sirva para la parte operativa de la implementación del sistema de gestión basado en la confiabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acuña, J. (2003). Ingeniería de confiabilidad. Costa Rica: Editorial Tecnológica de CR.
2. Arata, A. (2005). Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. aplicación de la plataforma r-mes. Santiago de Chile, Chile: RIL Editores.
3. Besterfield, D. (2009). Control de calidad. México DF, México: Pearson.
4. Carranza, J., y Romero, P. (2014). Análisis de criticidad y estudio de RCM del equipo de máxima criticidad de una planta demontadora de algodón. Recuperado de: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5311/fichero/5-+Analisis+de+criticidad.pdf>, de (Diciembre 2017).
5. CELEC EP. (2013, Junio). Instructivo para el seguimiento de la gestión técnica de operación y mantenimiento de las centrales de generación.
6. CELEC EP. (2017a). Organigrama. Recuperado de <https://www.celec.gob.ec/quienes-somos/estructura-organizacional.html> (Octubre 2017).
7. CELEC EP. (2017b). Organigrama unidad de negocio Coca Codo Sinclair. Recuperado de <https://www.celec.gob.ec/cocacodosinclair/images/organi.pdf> (Octubre 2017).
8. CELEC EP. (2017). Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair (Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair). Lago Agrio, Ecuador: CELEC EP.
9. Cintas, P., y Llabres, J. (1995). Técnicas para la gestión de la calidad. Madrid, España: Díaz de Santos.
10. Cortez, P. (2017). Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de motores WAUKESHA en la planta de generación gas-diésel de la empresa Repsol Ecuador (Tesis de Maestría). Instituto de Posgrado y Educación Continua, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

11. Escobar, L., Villa, R., y Yañez, S. (2003). Confiabilidad: Historia, Estado del arte y desafíos futuros. *DYNA*, 70(140), 5-21.
12. Fernández, F. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Madrid, España: Fundación Confemetal.
13. Fundación Proteger. (2017). *Represas en Amazonía*. Recuperado de <http://dams-info.org/es/dams/view/coca-codo-sinclair/> (Octubre 2017).
14. Garrido, S. (2011). *La contratación del mantenimiento industrial: Procesos de externalización, contratos y empresas de mantenimiento*. Madrid, España: Editorial Díaz de Santos, S.A.
15. González, F., Mera, A., y Lacoba, S. (2007). *Introducción a la gestión de la calidad*. Madrid, España: Delta.
16. Griful, E. (2004). *Fiabilidad industrial*. Catalunya, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
17. IEC. (2006). *Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (amfe)*. (IEC 60812:2006). Ginebra, Suiza: International Electrotechnical Commission.
18. ISO. (2016). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment* (ISO 14224:2016). Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization.
19. Knezevic, J. (1997). *Systems maintainability*. Gran Bretaña: Springer US.
20. Maldonado, H., y Sigüenza, L. (2012). *Propuesta de un plan de mantenimiento para maquinaria pesada de la Empresa Minera Dynasty Mining del cantón Portovelo (Tesis de Ingeniería)*. Facultad de Ingenierías, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
21. Merchán, A. (2015). *Análisis modal de fallos y efectos (AMFE), en el proceso de producción de tableros eléctricos de la empresa EC-BOX (Tesis de ingeniería)*. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del Azuay.

22. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2017). Coca Codo Sinclair. Recuperado de <http://www.energia.gob.ec/coca-codo-sinclair/> (Octubre 2017).
23. Moubray, J. (1997). Reliability-centered maintenance. New York, United States of America: Industrial Press.
24. Real Academia . (2017). Diccionario de la lengua española. Recuperado de <http://dle.rae.es/?id=Hpsj999> (Octubre 2017).
25. Romeva, C. (2002). Diseño concurrente. Catalunya, España: UPC, S.L., Edicions.
26. SAE. (1999). Criterios de evaluación para procesos de mantenimiento centrado en confiabilidad (SAE JA1011:1999). Pennsylvania, United States: Society of Automotive Engineers.
27. SAE. (2002). Una guía para la norma de mantenimiento centrado en confiabilidad (mcc) (SAE JA1012:2002). Pennsylvania, United States: Society of Automotive Engineers.
28. Salguero, M. (2010). Diseño e implementación de un sistema de mantenimiento estratégico aplicando las filosofías RCM y FMEA a las máquinas y herramientas de la empresa WEATHERFORD SOUTH AMERICA INC. Base1, Francisco de Orellana (Tesis de ingeniería). Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica del Ejército.
29. Santos, C. (2001). Mantenimiento productivo total. una visión global. Las Canarias, España: Lulu.com.
30. Sánchez, D. (2015). Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema de compresión de gas, en la central defacilidades de producción del Bloque 15, Petroamazonas, Cantón Shushufindi, Provincia de Sucumbios (Tesis de Maestría). Instituto de Posgrado y Educación Continua, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
31. Solé, A. (1991). Fiabilidad y seguridad de procesos industriales. Madrid, España: Marcombo.

32. Soto, R., Rodríguez, R., Sandoval, S., Valenzuela, R., y Lizárraga, M. (2012). Metodología para realizar análisis de mantenimiento basado en confiabilidad en centrales hidroeléctricas. Boletín IIE , 143-149.
33. Tamariz, M. (2014). Diseño del plan de mantenimiento preventivo y correctivo para los equipos móviles y fijos de la empresa de Mirasol S.A. (Tesis de Ingeniería). Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca.
34. Walls, L., Revie, M., y Bedford, T. (2016). Risk, reliability and safety: Innovating theory and practice: Proceedings of esrel 2016 (glasgow, scotland, 25-29 september 2016). London, United Kingdom: CRC Press.