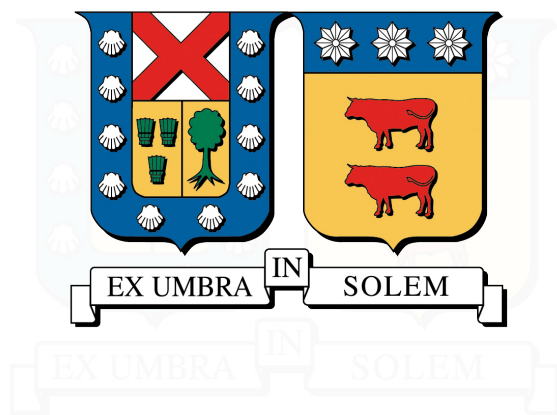


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO - CHILE



**ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y DISPONIBILIDAD PARA MODOS DE FALLA
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA**

CÉSAR VALDIVIA MARTÍNEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. DAVID GODOY R.
PROFESOR CORREFERENTE : SR. GONZALO AMÉSTICA H.

DICIEMBRE 2018





Dedicatoria

A mi Dios

Por su bondad y amor hacia mi, me cuidó en cada viaje y me dio fuerzas para esos días de estudio intenso. Por proveer para mí, bendición en momentos difíciles.

A mi familia

Por apoyarme en todo momento. Por sus oraciones, que sin duda me ayudaron en este desafío estudiantil que me impuse.

A mi Francesca

Por su apoyo incondicional y por respetar mis noches, días y fines de semana de estudios. Por su amor y paciencia.

”Mas yo en tu misericordia he confiado; Mi corazón se alegrará en tu salvación.” (Salmos 13:5)

RESUMEN EJECUTIVO

El panorama energético del país requiere soluciones decididas a corto, mediano y largo plazo ya que el crecimiento económico del país ha hecho aumentar la demanda de energía a un ritmo bastante mayor que la oferta real.

La política Energética de Estado, Energía 2050, menciona el desafío que la indisponibilidad de suministro eléctrico promedio, sin considerar fuerza mayor, no supera a una hora/ año en cualquier localidad del país. Esto presiona el mayor despliegue de recursos, agilizando tiempos de repuesta, mejorar la eficiencia y eficacia en las operaciones. La gestión del mantenimiento debe poner su foco en disminuir la indisponibilidad del servicio.

Esta gestión se realiza comúnmente a través de métodos tradicionales de priorización que usualmente son mono-criterio. Sin embargo, estos métodos no permiten un análisis integral de las variables involucradas, que influyen directamente en la disponibilidad del equipo.

Dar soporte al uso de un método alternativo que interrelaciona las variables de frecuencia y tiempo fuera de servicio (TFS), llamado diagrama dispersión logarítmicos o Diagrama Jack-Knife (JKD). La aplicación del método en periodos específicos, permite observar la fortaleza del método frente a los métodos tradicionales, por otra parte, el análisis se hace mas contundente con la posibilidad de analizar la gestión en cada modos de falla, a través de los periodos sucesivos.

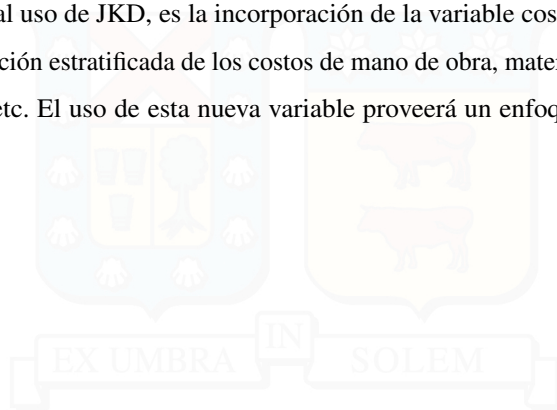
En las gráficas de JKD, se observan fácilmente fallas crónicas relacionadas a la confiabilidad, fallas agudas relacionadas a la mantenibilidad y crónicas-agudas que influyen de manera directa en la disponibilidad. Se logra evaluar la gestión del área de mantenimiento a través de los periodos, además, el análisis se fortalece involucrando conceptos de gestión del conocimiento y "Know How". Pudiendo realizar los diferentes enfoque mostrados.

Los resultados muestran oportunidades de mejora competitiva, a las cuales se puede acceder mediante su uso, evitando así fallas que en métodos tradicionales son sobre estimadas en severidad o subestimadas. El método apropiado consigue recalificar y redirigir la planificación estratégica en la disponibilidad del equipo.

Se exponen deficiencias de uno de los métodos tradicionales mas ampliamente utilizados. En su contraparte el JKD deja explícito lo conveniente de su uso, permitiendo obtener listas de priorización con mayor información y tendientes a minimizar la función objetivo. La versatilidad expuesta, logra informar a los diferentes niveles jerárquicos las criticidades de falla, con la debida rápidas y facilidad, necesarias en la industria. Logrando conjugar conceptos claves como la mejora continua, la gestión del conocimiento, core business, etc.

La ayuda proporcionada por el JKD es la generación de información, que contribuye a la toma de decisión estratégica para la empresa. JKD, permitirá gestionar de forma guiada, rápida y con el seguimiento oportuno, los pasos a seguir en la planeación en el área de mantenimiento. Siendo un aliado en la ejecución del Ciclo (PDCA), permiten a las empresas una mejora integral de la competitividad.

Un factor a evaluar posterior al uso de JKD, es la incorporación de la variable costo medio de falla. Será indispensable contar con información estratificada de los costos de mano de obra, materia prima, pérdida de valor por corte en el suministro, etc. El uso de esta nueva variable proveerá un enfoque económico al análisis de criticidad de falla.



Índice de Contenidos

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
2. OBJETIVOS Y ALCANCES	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos	3
2.3. Alcances	4
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1. Relevancia del Sistema de Mantenimiento	5
3.2. Costo Ciclo de Vida o Life Cycle Cost (LCC)	6
3.3. Ciclo de Mejora Continua de la Calidad – PHVA	7
3.4. Gestión del Conocimiento	8
3.5. Tipos de Mantenimiento	9
3.6. TPM, RCM y PMO	12
3.6.1. TPM y RCM	12
3.6.2. La Optimización del Mantenimiento Planeado (PMO)	13
3.7. Criticidad en el contexto de la Ingeniería	13
3.8. Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad	15
3.9. Indicadores MTTR o TPS y MBTF	16
3.10. Diagrama de Pareto y Diagrama Jack Knife	16
3.10.1. Diagrama de Pareto	16
3.10.2. Diagrama Jack Knife (JKD)	18
3.11. Seguridad y Calidad de Suministro	25
3.12. Marco Regulador	27
4. ANÁLISIS CRITICIDAD MODO DE FALLA	33
4.1. Parte 1: Análisis Comparativo	34
4.2. Parte 2: Análisis Tendencia y priorización Global con JKD	40
5. CONCLUSIÓN	45
Bibliografía	47
A. ANEXOS	51
A.1. Análisis Comparativo Histograma Pareto vs JKD	51
A.2. Análisis Tendencia de Zonas a través de los Periodos	57
A.3. Figuras Modos de Falla - Zonas por Periodo	59
A.4. Figuras Modos de Falla - Periodo	60



Índice de Tablas

3.1. Límites expresados en horas para el Tiempo de Interrupciones de Suministro Clientes Finales (TIC) exigibles durante los años 2018 a 2019. Fuente: (CNE, 2017)	30
3.2. Límites para la Frecuencia de Interrupciones de Suministro Clientes Finales (FIC) exigibles durante los años 2018 a 2019. Fuente: (CNE, 2017)	30
3.3. Límites expresados en horas para el Tiempo de Interrupciones de Suministro Clientes Finales (TIC) exigibles desde el año 2020 en adelante. Fuente: (CNE, 2017)	30
3.4. Límites para la Frecuencia de Interrupciones de Suministro Clientes Finales (FIC) exigibles desde el año 2020 en adelante. Fuente: (CNE, 2017)	30
4.1. Nomenclatura Zonas Fuente: Elaboración Propia	34
4.2. Nomenclatura código de Fallas Fuente: Elaboración Propia	34
4.3. Información FIC y TIC para Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Marga Marga periodo 2016. Fuente: Elaboración Propia	35
4.4. Información FIC y TIC para Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Costa periodo 2017. Fuente: Elaboración Propia	36
4.5. Información FIC y TIC para Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Quillota periodo 2017 Fuente: Elaboración Propia	37
4.6. FIC y TIC para análisis criticidad de las fallas que componen la falla Mantenimiento (Cod.9) Fuente: Elaboración Propia	39
4.7. FIC y TIC para análisis criticidad de las fallas que componen la falla Árboles (Cod.4) Fuente: Elaboración Propia	40



Índice de Figuras

3.1. Modelo de flujo entrada y salida de la empresa Fuente: (Visser, 1998)	5
3.2. Costos por mantenimiento en el ciclo de vida Fuente: (Tempest, 1976)	7
3.3. PHVA: Procedimiento lógico y por etapas para la mejora continua Fuente: (Autores, 2016)	8
3.4. costos de mantenimiento con relación al tiempo Fuente: (Tavares, 1999)	11
3.5. Evolución en la estandarización de RCM Fuente: (Zavala Gaibor, 2017)	13
3.6. histograma Pareto de tiempo de inactividad eléctrica de pala no planificada Fuente: (Knights, 2004)	17
3.7. Dispersión en plano $x - y$ con Tiempos de reparación vs numero de fallas Fuente: (Knights, 2001)	19
3.8. Diagrama de Dispersión Logarítmico Fuente: (Knights, 2001)	20
3.9. Límites Umbrales en diagrama Jack knife Fuente: Adaptación (Knights, 2001)	21
3.10. Modos de falla que impactan la Confiabilidad Fuente: Adaptación (Knights, 2001)	22
3.11. Modos de falla que impactan la Disponibilidad Fuente: Adaptación (Knights, 2001)	23
3.12. Modos de falla que impactan la Mantenibilidad Fuente: Adaptación (Knights, 2001)	23
3.13. Diagrama Jack Knife, cuando costo oportunidad de la producción es alto Fuente: Adaptación (Knights, 2001)	24
3.14. Diagrama Jack Knife, cuando costo de la producción es alto Fuente: Adaptación (Knights, 2001)	24
4.1. Diagrama Flujo de Caso Práctico en Análisis modos de fallas Fuente: Elaboración Propia	33
4.2. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Marga Marga periodo 2016 Fuente: Elaboración Propia	35
4.3. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Costa periodo 2017 Fuente: Elaboración Propia	36
4.4. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Quillota periodo 2017 Fuente: Elaboración Propia	37
4.5. Análisis criticidad de las fallas que componen la falla Mantenimiento (Cod.9), con método JKD Fuente: Elaboración Propia	38
4.6. Análisis criticidad de las fallas que componen la falla Árboles (Cod.4), con método JKD Fuente: Elaboración Propia	39
4.7. Tendencia modos de falla Zona Costa, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD Fuente: Elaboración Propia	41
4.8. Tendencia modos de falla Zona Los Andes, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD Fuente: Elaboración Propia	41
4.9. Diagrama Jack Knife global periodo 2017 Fuente: Elaboración Propia	42
4.10. Diagrama Jack Knife global Periodos Agrupados Fuente: Elaboración Propia	43
4.11. Clusters modos de falla entre Zonas periodo 2016, mediante JKD Fuente: Elaboración Propia	44
A.1. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Costa periodo 2016 Fuente: Elaboración Propia	51
A.2. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Los Andes periodo 2016 Fuente: Elaboración Propia	51
A.3. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Quillota periodo 2016 Fuente: Elaboración Propia	52
A.4. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona San Antonio periodo 2016 Fuente: Elaboración Propia	52
A.5. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Valparaíso periodo 2016 Fuente: Elaboración Propia	52

A.6. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Los Andes periodo 2017 Fuente: Elaboración Propia	53
A.7. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Marga Marga periodo 2017 Fuente: Elaboración Propia	53
A.8. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona San Antonio periodo 2017 Fuente: Elaboración Propia	53
A.9. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Valparaíso periodo 2017 Fuente: Elaboración Propia	54
A.10. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Costa periodo 2018 Fuente: Elaboración Propia	54
A.11. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Los Andes periodo 2018 Fuente: Elaboración Propia	54
A.12. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Marga Marga periodo 2018 Fuente: Elaboración Propia	55
A.13. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Quillota periodo 2018 Fuente: Elaboración Propia	55
A.14. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona San Antonio periodo 2018 Fuente: Elaboración Propia	55
A.15. Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Valparaíso periodo 2018 Fuente: Elaboración Propia	56
A.16. Tendencia modos de falla Zona Marga Marga, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD Fuente: Elaboración Propia	57
A.17. Tendencia modos de falla Zona Quillota, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD Fuente: Elaboración Propia	57
A.18. Tendencia modos de falla Zona Valparaíso, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD Fuente: Elaboración Propia	58
A.19. Tendencia modos de falla Zona San Antonio, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD Fuente: Elaboración Propia	58
A.20. Comparación de criticidad de modos de falla entre Zonas periodo 2017, mediante JKD Fuente: Elaboración Propia	59
A.21. Comparación de criticidad de modos de falla entre Zonas periodo 2018, mediante JKD Fuente: Elaboración Propia	59
A.22. Diagrama Jack Knife global periodo 2016 Fuente: Elaboración Propia	60
A.23. Diagrama Jack Knife global periodo 2018 Fuente: Elaboración Propia	60

1 | PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Cerca del 70 % del consumo energético de Chile corresponde a combustibles fósiles como gas natural, carbón, petróleo y sus derivados. Actualmente, el índice de reserva ecológica de Chile es levemente superior a la unidad, lo que refleja la crítica situación del país en materia de sostenibilidad energética. (Pastén, 2012)

La industria Energética, en particular el sistema de Distribución Eléctrica se encuentre fuertemente regulado por su condición de monopolio natural, en la regulación de precios, entrega del servicio y como las sanciones por la discontinuidad en el suministro.

Las crisis de abastecimiento en servicios regulados no son desconocidas para la mayoría de las economías en el mundo. Ello obedece en gran medida a la rigidez de precios que existe cuando ellos se determinan institucionalmente, lo que a su vez tiene el potencial de ocasionar severos desajustes e ineficiencias. (Chumacero et al., 2000)

Estas regulaciones lleva a la búsqueda de la minimización de las tiempos fuera de servicio, que provocan la reducción de sanciones por ineficiencias. Es específico para el área de mantenimiento, esto se traduce en una gestión del mantenimiento eficaz y eficiente.

La gestión del mantenimiento se vuelve un área estratégica vital, dada la creciente demanda de disponibilidad sostenida de las máquinas que depende principalmente de la frecuencia y el tiempo de inactividad. (Seecharan et al., 2018)

La "NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DE SERVICIO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN", A contar de noviembre de 2017, fija nuevos estándares que buscan reducir los tiempos de interrupción de suministro, en línea con lo establecido en "Energía 2050 Política Energética de Chile".

Cuando la energía se obtiene y utiliza de manera óptima, se genera un círculo virtuoso que incide directamente en el crecimiento económico; ofrece oportunidades para el cuidado del medio ambiente y favorece el desarrollo de las personas, permitiendo así a la sociedad avanzar hacia un desarrollo equitativo y sustentable. (de Energía, 2016)

Las empresas Chilenas utilizan métodos monovariante, como lo es el histograma de Pareto, para

realizar análisis, ya sea para minimizar o maximizar la función objetivo. Funciones que es altamente probable que sea multivariable, siendo este hecho un error a considerar.

En particular, esto ocurre en algunas compañías del sector de distribución eléctrica a nivel nacional. Donde se espera minimizar las interrupciones del servicio, utilizando métodos que no involucran las variables TIC(sera leída como Tiempo del modo i en la zona c) y FIC(sera leída como Frecuencia del modo i en la zona c), variables claves de la función objetivo. Con estas variables se forma el KPI indisponibilidad.

El análisis robusto debe ser complementado con una mirada estratégica en la toma de decisión, esto debe suceder involucrando los distintos niveles jerárquicos.

La implementación de técnicas adecuadas en la criticidad de fallas, permiten generar trazabilidad de la gestión, mejora continua, eficiencia y eficacia.

Ahora es lógico realizar las siguientes preguntas:

- ¿Que método aplicar al momento de evaluar un modo de falla?
- ¿Como priorizar las fallas que contribuyan a disminuir la indisponibilidad del suministro?
- ¿Existen diferencias que involucren reales oportunidades de eficiencia en el uso de recursos?
- ¿Es posible observar efectividad de las acciones desarrolladas en los planes de mantenimiento?
- ¿El nuevo método multivariado entrega información complementaria, como por ejemplo para el análisis causa-raíz?

2 | OBJETIVOS Y ALCANCES

2.1. Objetivo General

Analizar la criticidad de modo de falla y la disponibilidad del suministro, mediante un estudio multicriterio de las distintas variables involucradas llamado método de análisis Jack-Knife, para observar sus fortalezas frente a los métodos tradicionales, y la versatilidad de su aplicación a través de periodos sucesivos, en la gestión del mantenimiento en empresa de distribución eléctrica nacional.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar métodos de criticidad aplicados indicando su ámbito de aplicación, para establecer idoneidad del método Jack-Knife.
- Valorar la disponibilidad servicio, por medio del indicador de indisponibilidad que se calcula en JKD, con el objetivo de fortalecer mejora continua de los procesos y así evitar sanciones regulatorias.
- Realizar una comparativa entre Diagrama de Pareto y Diagrama Jack Knife, para observar las diferencias en la criticidad de modos de falla.
- Visualizar el desempeño de la mejora continua en la gestión de mantenimiento, con la ayuda de gráficas de periodos sucesivos de los modos de falla.
- Analizar la criticidad de modo de falla y disponibilidad, a fin de dar sustento en el uso de JKD en el establecimiento de las prioridades de mantenimiento en sistemas de distribución eléctrica.
- Reconocer la multiplicidad de enfoques que provee método, por medio de la visualización de gráficas creadas para profundizar en información, para la toma de decisión estratégica.

2.3. Alcances

- El presente documento se desarrolla desde la perspectiva del mantenedor, ya que el principal objeto de análisis es la identificación de criticidad de falla, con el fin de orientar eficientemente los recursos, aumentar la disponibilidad y evitar sanciones regulatorias.
- La base de datos proviene de una empresa de distribución eléctrica nacional. Su identificación no se realiza a cabalidad, por petición explícita de la empresa involucrada.
- El análisis comparativo toma periodos de seis primeros meses de los años 2016, 2017, 2018. Cuya información es real y facilitada por Empresa de transmisión y distribuidora de energía eléctrica.
- Los datos obtenidos son históricos, con cierto grado de análisis con métodos tradicionales. Con resúmenes de información y visualización gráfica, a través de la variable frecuencia de falla. Se aplican filtro en baja tensión eléctrica y se toman los mismos criterios generales informados en los datos con el fin de obtener resultados consecuentes con las necesidades actuales.
- Los resultados entre análisis sufren cambios, en la medida que se tomen criterios distintos para la creación de umbrales.

3 | MARCO TEÓRICO

3.1. Relevancia del Sistema de Mantenimiento

Las empresas del sector de la fabricación y la construcción dependen en gran medida de su maquinaria y equipo para obtener una ventaja competitiva. El mantenimiento, en su sentido amplio, es la función que más se ocupa de ese aspecto del negocio. Por lo tanto, es esencial contar con un plan de mantenimiento a largo plazo que tenga en cuenta la visión, misión, los objetivos de la organización y los cambios en la tecnología (Al-Turki, 2011). La literatura de gestión estratégica ha atraído en cierta medida la atención de los investigadores en el área de mantenimiento, expresada en artículos que estudian el papel del mantenimiento en toda la organización (Visser, 1998). Introdujo una visión de sistema del mantenimiento puesto en perspectiva con respecto a la empresa como se muestra (ver Figura 3.1). El mantenimiento es puesto en el corazón de la empresa y, por lo tanto, debe tener su propio plan estratégico que señale los propósitos y metas generales para toda la organización. Las estrategias para las operaciones de mantenimiento deben seleccionarse cuidadosamente para ser eficiente y eficaz en alcanzar los objetivos. (Al-Turki, 2011)

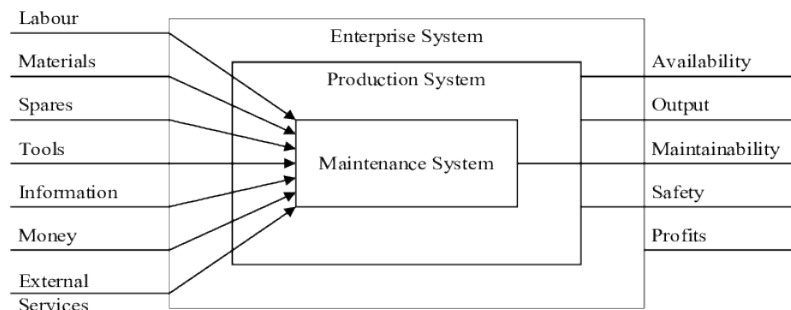


Figura 3.1: Modelo de flujo entrada y salida de la empresa

Fuente: (Visser, 1998)

En las últimas décadas, la gestión de la calidad ha sido reconocida como una ventaja para la competitividad y la rentabilidad a largo plazo. La gestión de la calidad total (TQM), considerada por muchos como un enfoque holístico, busca convertir la cultura y la estructura de la organización en un compromiso total con

la calidad. Sin embargo, la rentabilidad y la competitividad a largo plazo, mediante la gestión de la calidad, no pueden lograrse sin un rendimiento sostenido del equipo. (Hansson et al., 2003)

El rendimiento sostenido se ve afectado por la calidad de mantenimiento que se les realiza a los equipos, en directa relación con el ciclo de vida.

3.2. Costo Ciclo de Vida o Life Cycle Cost (LCC)

El concepto de ciclo de vida de un servicio o producto se puede aplicar a un sistema, un proceso o una parte de un activo físico y darle el seguimiento técnico y económico que requiera dentro de la sostenibilidad del negocio. Por eso es importante señalar que la competitividad y sostenibilidad de un negocio depende en gran medida del desempeño y el costo del ciclo de vida de sus activos físicos, lo que implica tener una armonía de disponibilidad y confiabilidad de sus inmuebles, así como los sistemas tecnológicos básicos y especializados con eficiencia, preservando el medio ambiente y la seguridad. (Rodríguez, 2010) LCC tiene que ver con la operación de activos físicos al costo mínimo. En consecuencia, la estimación de los costos de operación y mantenimiento es esencial para minimizar el total de LCC del activo. Los costos operativos de un activo incluirían mano de obra directa, materiales directos, gastos directos, mano de obra indirecta, materiales indirectos y costos de establecimiento. La estimación de estos costos se basa en la experiencia real y prevista del desempeño de activos similares. (Bitros, 1976) Los costos de mantenimiento incluyen mano de obra directa, materiales, combustible, equipos y servicios adquiridos. Los costos de mantenimiento normalmente se pueden dividir en clasificaciones más pequeñas, tales como:

- Mantenimiento regular planificado;
- Mantenimiento no planificado (respondiendo a fallas);
- Mantenimiento intermitente (para reparaciones mayores de vida).

Una política de mantenimiento preventivo regular y planificada reduce los costos de tiempo de inactividad, pero los recursos se utilizan en forma de gastos de mantenimiento. El enfoque 'correr hasta que se rompa', por otro lado, reduce los gastos de mantenimiento, pero aumenta la pérdida por tiempo de inactividad. Esta relación inversa se ilustra Figura 3.2). Es esencial que se mantenga una política de mantenimiento regular y planificado para aquellos equipos que incurren en altos costos de inactividad, mientras que los equipos que incurren en costos de inactividad bajos, pueden ser atendidos o reemplazados a medida que se desgastan. El factor clave es encontrar un nivel óptimo de servicio de mantenimiento, para ser consistente con el objetivo de la organización de alcanzar el costo total mínimo. (Woodward, 1997)

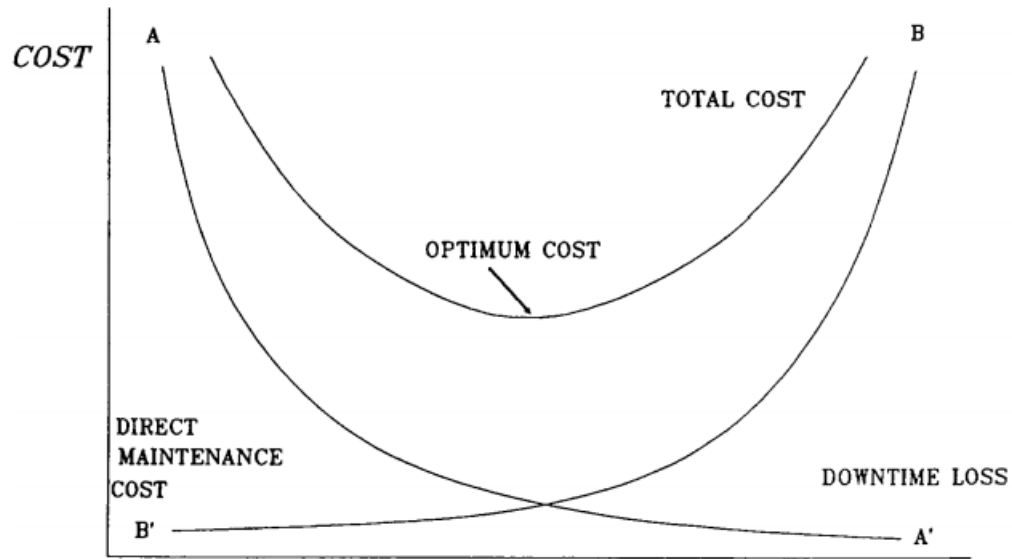


Figura 3.2: Costos por mantenimiento en el ciclo de vida

Fuente: (Tempest, 1976)

La implementación de técnicas organizativas de mantenimiento tienen carencias en cuanto a la operativa en la transmisión del conocimiento, con respecto a las instalaciones auxiliares a la producción o el servicio a desarrollar, en lo referente al mantenimiento operativo en explotación, en el que intervienen diferentes equipos, elementos e instalaciones interceptadas, con diferente confiabilidad operativa, y con un alto grado de información tácita debido al personal que debe operar y mantener dichas instalaciones. (Cárcel Carrasco, 2014)

El impacto que provocan las carencias pueden ser enfrentadas con planes de mantenimientos adecuados, es decir, utilizando los tipos de mantenimiento que satisfagan una necesidad o circunstancia determinada.

3.3. Ciclo de Mejora Continua de la Calidad – PHVA

A partir del año 1950, y en repetidas oportunidades durante las dos décadas siguientes, Deming empleó el Ciclo PHVA como introducción a todas y cada una de las capacitaciones que brindó a la alta dirección de las empresas japonesas. De allí hasta la fecha, este ciclo (que fue desarrollado por Shewhart), ha recorrido el mundo como símbolo indiscutido de la Mejora Continua. Las Normas NTP-ISO 9000:2001 basan en el Ciclo PHVA su esquema de la Mejora Continua del Sistema de Gestión de la Calidad. En la Figura 3.3 se podrá apreciar el Ciclo Deming. Se admite, estadísticamente, que en las organizaciones sin "Gestión de mejora Continua," el volumen de la ineficiencia puede estar entre un 15 y 25 % de sus ventas. Las que, si la hacen, oscila entre 4 y 6 %. Un rápido cálculo nos hará descubrir la magnitud de la respectiva "Mina

de Oroz el efecto que tiene sobre los resultados y la competitividad. La mayoría de los fallos o ineficiencias que configuran el despilfarro son desconocidos, considerados como normales, ignorados y con frecuencia ocultos. Actitudes que impiden buscar soluciones y evitar su repetición.(García et al., 2003)

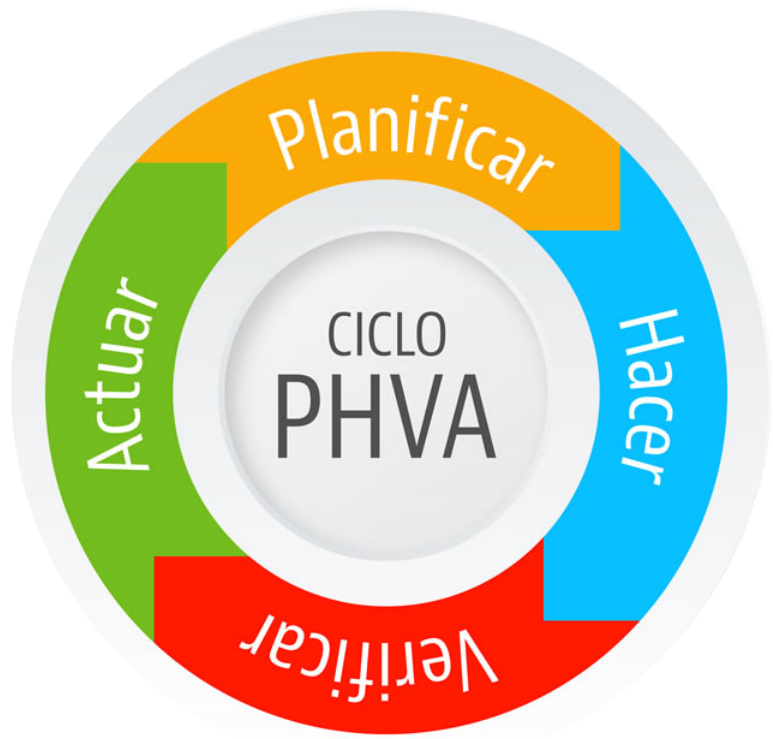


Figura 3.3: PHVA: Procedimiento lógico y por etapas para la mejora continua

Fuente: (Autores, 2016)

La literatura ha estudiado la gestión de la calidad(Deming) y la gestión del conocimiento de manera separada. Sin embargo, es indudable que existen efectos sobre los resultados organizativos y las relaciones entre ambos conceptos.

3.4. Gestión del Conocimiento

A partir del análisis de la literatura se han delimitado tres conceptos que estudian diferentes aspectos de la gestión del conocimiento: aprendizaje organizativo (Crossan et al., 1999), conocimiento organizativo (Nonaka y Takeuchi, 1995) y organización de aprendizaje (Senge, 1992).(Aja Quiroga, 2002)

Conocimiento organizativo, la literatura lo define como conjunto de habilidades, justificación de creencias, recogida, almacenamiento y, distribución del conocimiento. De ello se desprende que el conocimiento organizativo es el proceso dinámico de transferencia y almacenamiento de conocimiento en la organización.(Aja Quiroga, 2002)

Aprendizaje organizativo, se entiende como el proceso dinámico de recabar datos, convertirlos en información y esta a su vez en conocimiento, a través de los distintos niveles de aprendizaje. Esto lo denominamos creación de conocimiento.(Aja Quiroga, 2002)

Organización de aprendizaje, se define como la empresa capaz de aplicar y usar el conocimiento, explotar y explorar sus recursos, adaptarse y cambiar el entorno y, aprender y desarrollar su aprendizaje para así, transformarlo en nuevo conocimiento.(Aja Quiroga, 2002)

Estos tres conceptos, ayudan a entender las dimensiones de la gestión del conocimiento. De este modo, la gestión del conocimiento es el proceso dinámico de creación, almacenamiento, transferencia y, aplicación y uso del conocimiento con el fin de mejorar los resultados en una organización.(Aja Quiroga, 2002)

El tipo de mantenimiento que se seleccionara, dependerá de conceptos claves como Ciclo de vida, mejoramiento continuo, gestión del conocimiento, etc.

3.5. Tipos de Mantenimiento

Se puede identificar varios tipos de mantenimiento, los cuales poseen características propias que difieren en función de: el momento en el que se realiza, el objetivo particular para el cual son puestos en marcha, que tan oportunos, prácticos y adecuados son para solventar una determinada necesidad o circunstancia, los recursos que utilizan y las estrategias a las que recurren. (Chávez Guevara y Villarroel Guerrero, 2012) Actualmente se reconoce las siguientes:

- **Mantenimiento preventivo:** El mantenimiento preventivo, es una estrategia en la que se programan periódicamente las intervenciones de máquinas, con el fin de inspeccionar, reparar y/o reemplazar componentes. También intenta anticipar o prever las fallas para evitar daños y paros imprevistos. Las intervenciones se realizan aun cuando la máquina está operando satisfactoriamente. Programa el mantenimiento basándose en estimaciones de vida útil o tiempo entre fallas esperadas.(Chávez Guevara y Villarroel Guerrero, 2012)

Existe mantenimiento preventivo de los tipos:

- *Mantenimiento Preventivo a Tiempo Fijo:* En éste tipo de mantenimiento las acciones de inspección y operación, son planificadas conjuntamente con el área de producción en fechas predefinidas con anterioridad y para su ejecución es necesario tener a punto todos los requisitos necesarios como: recursos humanos, repuestos, documentación, herramientas, etc. Las organizaciones que trabajan bajo este régimen poseen equipos redundantes o de emergencia para los procesos críticos, con el fin de evitar posibles fallas imprevistas.(Chávez Guevara y Villarroel Guerrero, 2012)

- *Mantenimiento Preventivo a Tiempo Variable:* Este mantenimiento defiere básicamente del anterior en la planificación de los paros, ya que estos se los realiza en diferentes periodos de tiempo durante el año, de acuerdo a la disponibilidad particular de cada equipo de realizar paros de duración corta como fines de semana o feriados.(Chávez Guevara y Villarroel Guerrero, 2012)

Sus principales características a continuación:

- Tiene costos escalonados con saltos de poca envergadura debido a las intervenciones periódicas planificadas, con algún salto importante en los mantenimientos mayores derivados fundamentalmente del reemplazo de partes de elevado costo.
 - Este mantenimiento se sustenta en un análisis previo de información técnica, características, inspecciones, experiencia y a factores que afectan la operación y servicio de los equipos.
 - Las operaciones de mantenimiento preventivo se llevan a cabo a intervalos regulares de tiempo, determinados por el número de horas, días, ciclos de operación.(Chávez Guevara y Villarroel Guerrero, 2012)
- **Mantenimiento predictivo:** También conocido como “Mantenimiento Basado en Condiciones CBM”, monitorea y detecta parámetros operativos de los sistemas, máquinas y equipos. Realiza un seguimiento del desgaste de los mismos para determinar o predecir el punto exacto de cambio o reparación. Busca determinar el punto óptimo para la ejecución del mantenimiento preventivo en un equipo, es decir, el punto a partir del cual la probabilidad que el equipo falle y asuma valores indeseables y programa el mantenimiento basado en el pronóstico de ocurrencia de fallas o vida remanente.(Pico Espín, 2016)
- Sus principales características son:
- Aprovecha la experiencia del operador para dar cuenta de un buen o mal desempeño de la máquina aplicando el criterio subjetivo, aunque es necesario resaltar que ésta información puede estar errada.
 - Es más efectivo cuando el modo de falla es detectado por monitoreo de las condiciones de operación.
 - Se lleva a cabo en forma cronológica y no implica poner fuera de operación los equipos.(Chávez Guevara y Villarroel Guerrero, 2012)
- **Mantenimiento Correctivo:** Mantenimiento correctivo o también llamado “Mantenimiento Reactivo”, consiste en dejar a los equipos que operen sin ningún control del estado de los mismos, hasta que se produzca una falla en su funcionamiento en la mayoría de las ocasiones hasta que llegan a detenerse.(Chávez Guevara y Villarroel Guerrero, 2012)

Este tipo de mantenimiento es el más usual en nuestro medio, y se le pueden atribuir razones tales como:

- Falta de apoyo de la alta gerencia a la gestión del mantenimiento.
- Desconocimiento de los beneficios inherentes al mantenimiento organizado.
- Falta de justificación económica para los recursos que utiliza el mantenimiento.

Este tipo de mantenimiento tiene variantes de mantenimiento correctivo planificado o un mantenimiento correctivo no planificado.

En el aspecto de costos, el mantenimiento correctivo a lo largo del tiempo, se presenta con la configuración de una curva ascendente, debido a la reducción de la vida útil de los equipos y la consecuente depreciación del activo, pérdida de producción o calidad de los servicios, aumento de adquisición de repuestos, aumento del "stock" de materia prima improductiva, pago de horas extras del personal de ejecución del mantenimiento, ociosidad de mano de obra operativa, pérdida de mercado y aumento de riesgos de accidentes, ver Figura 3.4. (Tavares, 1999)

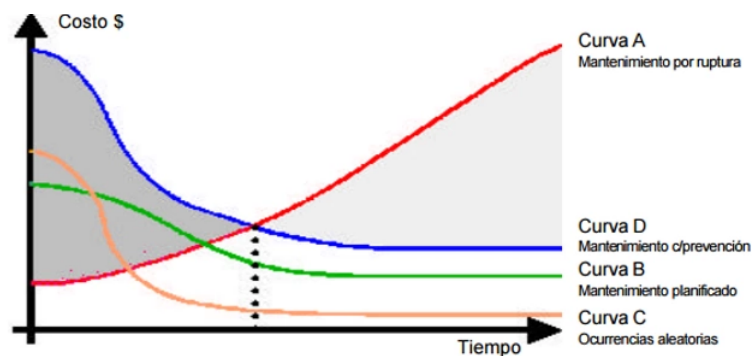


Figura 3.4: costos de mantenimiento con relación al tiempo

Fuente: (Tavares, 1999)

La implantación de la planificación y control, buscando la prevención o predicción de la falla, presenta una configuración de costos invertida, con tasa negativa anual del orden de 20 % y tendencia a valores estables, que pueden representar en el computo total, un ahorro de 300 a 500 %, siendo más de la mitad de este ahorro debido a la facturación cesante, considerando el Costo Total de una parada de equipo, como la suma del Costo del Mantenimiento, que incluye los costos de mano de obra, repuestos, materiales, combustibles y lubricantes, y el Costo de Indisponibilidad que incluye el costo de Pérdida de Producción (horas no trabajadas), debido a: mala calidad del trabajo; falta de equipos; costo por emergencias; costos extras para reorganizar la producción; costo por repuestos de emergencia; penalidades comerciales e imagen de la empresa. Experiencias de evaluación del Costo de Indisponibilidad muestran que este representa más de la mitad del Costo Total de la parada. (Tavares, 1999)

Surge el desarrollo de metodologías de mantenimiento que procuran ser guía en la búsqueda de

eficiencia en el uso de los recursos, se desarrollan lo que se conoce como el mantenimiento productivo total (TPM), el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), la Optimización del Mantenimiento Planeado (PMO), entre otros.

3.6. TPM, RCM y PMO

3.6.1. TPM y RCM

TPM se desarrolló para el sector manufacturero, mientras que RCM se desarrolló originalmente en la industria aeronáutica; Ambos son ahora ampliamente utilizados en diversos sectores industriales ([Hansson et al., 2003](#)). TPM se enfoca en la integración de operadores en el trabajo de mantenimiento y en la mejora continua y sistemática para maximizar la efectividad general del equipo. El objetivo principal son procesos robustos, es decir, procesos libres de interrupción (([Davis, 1997](#)); ([Nakajima, 1988, 1989](#))). Sin embargo, si bien es adecuado para activos simples, TPM no funciona para activos físicos complicados. ([Hansson et al., 2003](#)) RCM está más orientado hacia la tecnología y ofrece una base sólida o la evaluación de los requisitos de mantenimiento en este contexto ([Geraghty, 1996](#)). RCM se puede describir como un enfoque sistemático para identificar tareas de mantenimiento eficaz y eficiente, mediante análisis de función y riesgo. ([Hansson et al., 2003](#)) Es por esto que, el enfoque de este documento estará bajo el contexto de RCM, que básicamente combina varias técnicas conocidas de gestión de riesgos y herramientas, como el modo de falla y el análisis de efectos y los árboles de decisión, en un enfoque sistemático, para apoyar decisiones de mantenimiento efectivas y eficientes. ([Backlund y Akersten, 2003](#)) Según ([Smith, 1993](#)), RCM se puede describir completamente por los cuatro puntos siguientes: (1) conserva funciones; (2) identifica los modos de falla que pueden anular las funciones; (3) prioriza la necesidad de la función (a través de los modos de falla); y (4) selecciona solo tareas de mantenimiento preventivo aplicables y efectivas.

El diseño del plan de mantenimiento a cambiando en nuestros días con el fin de incorporar criterios de riesgo y confiabilidad, de manera que además de asegurar un impacto de las acciones de mantenimiento en el rendimiento de los activos, se tenga un impacto en la seguridad al disminuir, evaluar, controlar y administrar el riesgo. Motivo de esto, se ha empleado un análisis de riesgo, aplicando la metodología de análisis de modos de falla, efectos y criticidad. Específicamente en la etapa de la planeación, etapa considerada como crítica. ([Aguilar-Otero et al., 2010](#))

La metodología se desarrolló con referencia a las Normas SAE JA1011 y JA1012

- SAE-JA1011 y SAE-JA1012

A lo largo del tiempo han existido propuestas en la etapa de análisis de la metodología de aplicación del RCM se ha modificado, tratando de disminuir el esfuerzo necesario para llevarlo a cabo. Cabe mencionar

que la aplicación parcial del método podría llevar a resultados incompletos. Para asegurar que la metodología se utilice de manera apropiada, la industria automotriz desarrollo los estándares SAE-JA1011, 1999 y SAE-JA1012, 2002.

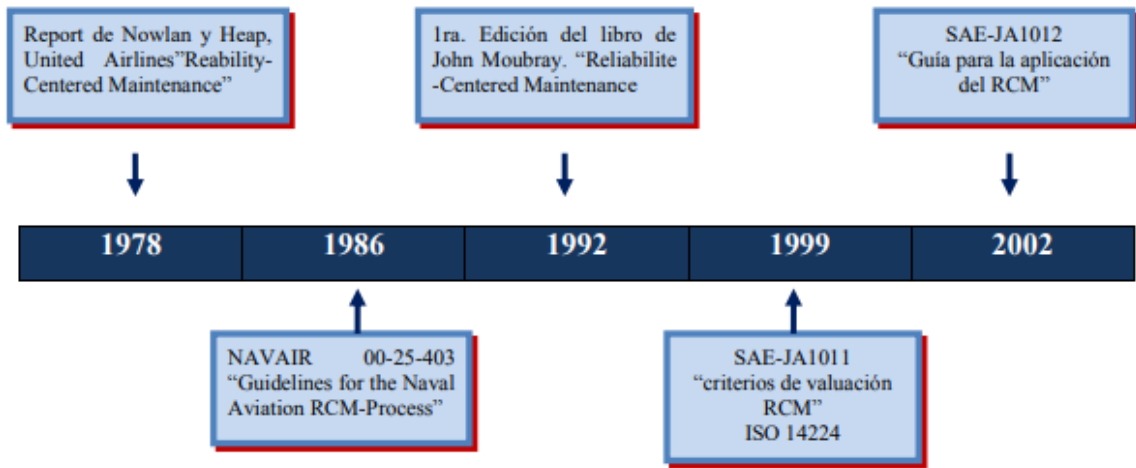


Figura 3.5: Evolución en la estandarización de RCM

Fuente: (Zavala Gaibor, 2017)

3.6.2. La Optimización del Mantenimiento Planeado (PMO)

Es una metodología diseñada para revisar los requerimientos de mantenimiento, el historial de las fallas y la información técnica de todos los activos en operación. La PMO facilita el diseño de un marco de trabajo racional, rentable, seguro y eficiente, cuando un sistema de Mantenimiento Preventivo se encuentra consolidado y la planta se tiene bajo control. La fuerza fundamental de la PMO se basa en que las acciones de mantenimiento tienen valor agregado, y que el sistema genera mejoras en muchos aspectos de la gestión de activos de la empresa, aparte del Análisis de Confiabilidad. (Tituaña y Edward, 2014)

La tónica de estas metodologías es la obtención de una correcta criticidad de los modos de falla, factor clave para capitalizar los recursos disponibles de manera efectiva.

3.7. Criticidad en el contexto de la Ingeniería

Los problemas de decisión en ingeniería pueden clasificarse como problemas de evaluación o diseño. Cuando se enfrenta a un problema de evaluación, el tomador de decisiones analiza un conjunto de alternativas predefinidas discretamente. El paso de evaluación se puede realizar utilizando enfoques de función de valor agregado y/o enfoques de clasificación externa (Pascual et al., 2009).

Se han desarrollado técnicas que se ajustan de mejor forma a procesos específicos, se mencionan a continuación las más aceptadas en la industria.

- **Metodología de los Puntos:** Las estructuras de criticidad que provee la llamada “metodología de los puntos” tiene su origen en el movimiento de mejora de la confiabilidad de los procesos productivos que se inició en la industria petrolera del Mar del Norte en la década del 90 [manual de criticidad de PDVSA - CIED] y hoy es ampliamente utilizada en la industria petrolera; por supuesto, con múltiples adecuaciones y modificaciones. La base fundamental de este enfoque es el establecimiento de un sistema de puntos para valorar la criticidad; y de una matriz cuyos rangos de frecuencia y consecuencia se expresan en “puntos” (Almaguer et al., 2013). Esta metodología es del tipo cualitativa, por lo tanto, requiere que su estimación sea asesorada por la opinión de expertos.
- **Método de Criticidad de Ciliberti:** El enfoque propuesto por Ciliberti propone un sistema que combina dos (2) matrices de criticidad; una construida desde la óptica de seguridad de los procesos y otra construida desde el impacto en producción. Ambas matrices se integran en una matriz de criticidad global, para obtener la criticidad total del equipo bajo análisis (Almaguer et al., 2013). Ampliamente utilizada en la ingeniería de Confiabilidad.
- **Análisis de Criticidad Basada en API 581:** Esta metodología especial de análisis de criticidad se basa en la Matriz de Riesgo de la Norma API 581 (Etapa I: Análisis Cualitativo de Riesgo) y solo aplica para aquellos sistemas-equipos sometidos a mecanismos de deterioro como corrosión.
- **Análisis de Criticidad para Propósitos de Mantenimiento según NORSOK STANDARD Z-008 Rev. 2, Nov. 2001:** El propósito del estándar NORSOK Z-008 es mucho más amplio que el de las metodologías de criticidad previamente expuestas, ya que no solo permite establecer las criticidades de los componentes de un sistema de producción, sino que dentro de la misma norma incluye un procedimiento para la optimización de programas de mantenimiento para facilidades nuevas y en servicio, ubicadas en tierra y costa afuera, considerando los riesgos relacionados con personal, ambiente, pérdida de producción y costos económicos directos (todos los costos aparte de los costos de la pérdida de producción). El objetivo principal de la norma NORSOK es establecer las bases para el diseño y optimización de los programas de mantenimiento para plantas de petróleo y gas nuevos y en servicio, basados en la criticidad de sus componentes. El estándar NORSOK Z-008 aplica para Equipos Mecánicos (estáticos y rotativos), Instrumentos y Equipos Eléctricos. Están excluidos del alcance de esta Norma las Estructuras de Carga Rodante, Estructuras flotantes, Raisers y gasoductos/oleoductos. (Almaguer et al., 2013)

Otras técnicas generales de criticidad se presentan a continuación:

- **Método de criticidad que utiliza la teoría de la utilidad de múltiples atributos.** Este método fue desarrollado en el Departamento de Ingeniería Nuclear del MIT (Karydas y Gifun, 2006), y fue adaptado para mediante su criticidad se lograra priorizar proyectos de mantenimiento en infraestructura. Este método tiene una campo de acción de nicho.

- Proceso de jerarquía analítica (siglas en ingles AHP) (Bevilacqua y Braglia, 2000), con objeto de seleccionar el mejor plan de mantenimiento.

Para Gass y Rapcsák (2004), AHP descompone un problema complejo en jerarquías, donde cada nivel es descompuesto en elementos específicos. El objetivo principal se coloca en el primer nivel, los criterios, sub-criterios y alternativas de decisión se listan en los niveles descendientes de la jerarquía. AHP analiza los factores que intervienen en el proceso de decisiones sin requerir que estos se encuentren en una escala común, convirtiéndola en una de las técnicas de decisión más empleada para resolver problemas socioeconómicos; ya que incorpora factores sociales, culturales y otras consideraciones no económicas en el proceso de toma de decisiones.

Estas técnicas, como se menciona han sido usadas anteriormente, y presentan algunos inconvenientes. Como es el caso Karydas y Gifun (2006) se invirtieron varios meses en talleres de aprendizaje en equipos multidisciplinarios, cada proyecto tiene muchas entradas no intuitivas que se requieren. Por otro lado, para el caso Bevilacqua y Braglia (2000), el número de alternativas a analizar es exponencial ya que se jerarquizan todas las estrategias de mantenimiento, puede surgir un problema de reversión de rango en el método AHP. Otros autores ponen su foco en cantidad de variables de análisis acotadas, es el caso de Cooke et al. (2003) desarrollar una herramienta de clasificación que utiliza datos de fallas y juicios estructurados para clasificar y mejorar las bases de las decisiones relacionadas con la inspección y el reemplazo de tuberías subterráneas. (Pascual et al., 2009)

Existen decenas de conceptos y técnicas de mantenimiento, decidir cuáles son útiles en consideración a las necesidades específicas de la empresa para dirigir el camino a un mantenimiento de clase mundial, se vuelve de vital importancia entonces, internalizar los conceptos de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, MTTR o TFS, MTBF son un punto de partida propicio.

3.8. Confiabilidad , Mantenibilidad y Disponibilidad

La *Confiabilidad* operacional se define como una serie de procesos de mejoramiento continuo, que incorporan en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, técnicas de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial.(Durán, 2000)

La *mantenibilidad* se puede definir como la expectativa que se tiene, de que un equipo o sistema pueda ser colocado en condiciones de operación dentro de un periodo de tiempo establecido, cuando la acción de mantenimiento es ejecutada de acuerdo con procedimientos prescritos. En términos probabilísticas, Francois Monchy (Francois, 1989), define la mantenibilidad como “la probabilidad de reestablecer las condiciones específicas de funcionamiento de un sistema, en límites de tiempo deseados, cuando el mantenimiento es

realizado en las condiciones y medios predefinidos”. O simplemente “la probabilidad de que un equipo que presenta una falla sea reparado en un determinado tiempo t.”(Grajales et al., 2006)

Si bien la confiabilidad nos entrega la probabilidad de que un equipo falle en un tiempo determinado, y la mantenibilidad nos otorga la probabilidad de que un equipo vuelva al funcionamiento después de una falla, es de vital importancia poseer la disponibilidad de los equipos, indicador más usado para evaluar el comportamiento de los equipos, tanto también como para una planta o configuración general de equipos (móviles o fijos).(Díaz Valenzuela, 2016)

3.9. Indicadores MTTR o TPS y MBTF

MTBF - Mean time between failures (Tiempo promedio entre fallas): Expresa la probabilidad o tiempo de falla de un elemento o activo, para algunos es una medida que indica la confiabilidad. Es calculado como el tiempo total de funcionamiento dividido el número total de fallas en un periodo dado. Existen muchas equivocaciones en su interpretación, son confundidos con la vida útil de los elementos y realmente es una vida promedio.(Pérez, 2003)

MTTR - Mean time to repair (Tiempo promedio para reparar) o TPS (Tiempo fuera de servicio): Medida que indica el tiempo promedio de cada reparación. Algunos autores lo asocian a la mantenibilidad. Se calcula como el tiempo de fallas por mantenimiento dividido por el número total de fallas en un periodo dado. (Pérez, 2003)

Estos indicadores son calculables a través de los tiempos de detención y la cantidad de averías mediante la ley de Weibull. En disponibilidad esperada son deseados altos MTBTF en el tiempo, en cambio el MTTR es requerido a la baja en el tiempo. (Díaz Valenzuela, 2016)

Actualmente existen métodos más intuitivos que involucran conceptos de confiabilidad operacional, mantenibilidad y disponibilidad, que son parte de indicadores claves de rendimiento(KPI).

3.10. Diagrama de Pareto y Diagrama Jack Knife

3.10.1. Diagrama de Pareto

El nombre de Pareto fue dado por el Dr. Joseph Juran en honor del economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923) quien realizó un estudio sobre la distribución de la riqueza, en el cual descubrió que la minoría de la población poseía la mayor parte de la riqueza y la mayoría de la población poseía la menor parte de la riqueza. Con esto estableció la llamada "Ley de Pareto"según la cual la desigualdad económica es inevitable en cualquier sociedad. El Dr. Juran aplicó este concepto a la calidad, obteniéndose lo que hoy

se conoce como la regla 80/20. Según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, podemos decir que el 20 % de las causas resuelven el 80 % del problema y el 80 % de las causas solo resuelven el 20 % del problema. (Sales, 2009) Por lo tanto, el Análisis de Pareto es una comparación cuantitativa y ordenada de elementos o factores según su contribución a un determinado efecto. El objetivo de esta comparación es clasificar dichos elementos o factores en dos categorías: Los elementos muy importantes en su contribución y los elementos pocos importantes en ella. Es utilizado comúnmente para determinar ranking de fallas de equipos o componentes, respecto a su costo o bien tiempos de indisponibilidad o inactividad (en las áreas del mantenimiento) ver histograma Figura 3.6.

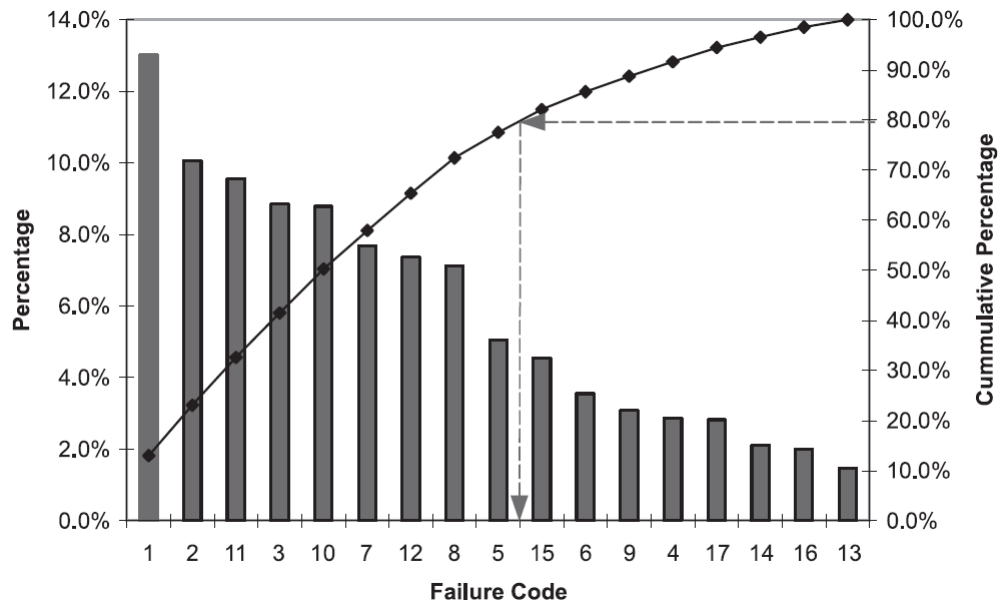


Figura 3.6: histograma Pareto de tiempo de inactividad eléctrica de pala no planificada

Fuente: (Knights, 2004)

■ Desventajas de Histograma de Pareto

Los histogramas de Pareto, que tradicionalmente se usan para priorizar códigos de falla, consideran solo un criterio de tiempo de inactividad, típicamente MTTR, y no pueden analizar los dos criterios simultáneamente.

Según Knights (2004), se mencionan las siguientes deficiencias en los histogramas de Pareto..

1. Como el histograma de Pareto generalmente se basa en el tiempo de inactividad (o costo) solo, no puede determinar qué factor (es) predominan en el tiempo de inactividad o los costos asociados con códigos de falla particulares.
2. Los histogramas de Pareto para códigos de falla clasificados según el costo de reparación, el tiempo de inactividad del equipo, la frecuencia de falla y el MTTR generarán cuatro listas distintas de prioridades de códigos de falla. Sería útil un medio gráfico para visualizar simultáneamente los problemas de

disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad del equipo en función de los códigos de falla del equipo.

3. El análisis de Pareto del tiempo de inactividad del equipo puede no identificar eventos individuales con altos tiempos de inactividad asociados o fallos frecuentes que consumen relativamente poco tiempo de inactividad y causan frecuentes perturbaciones operativas.
4. Cuando hay muchos datos para analizar, se utilizan comúnmente estratificación de datos o técnicas de descomposición jerárquica. Hay dos problemas potenciales con el uso de los análisis de Pareto estratificados:
 - i) debido a que los gráficos de Pareto jerárquicos solo se preparan para los contribuyentes significativos del tiempo de inactividad del sistema, las fallas asociadas con componentes menos significativos o fallas funcionales no se exploran;
 - ii) el mismo modo de falla puede aparecer en varios de los histogramas de Pareto de nivel inferior.

3.10.2. Diagrama Jack Knife (JKD)

Es un método para analizar el tiempo de inactividad (*Downtime*) o indisponibilidad de equipos o sistemas usando diagramas de dispersión. El uso del JKD se inició cuando Knights (2001)(Knights, 2001) y Knights (2004)(Knights, 2004) lo aplicaron para priorizar los datos de tiempo de inactividad no planificado para fallas eléctricas en una flota de 13 palas de cable en una mina de cobre a cielo abierto en el norte de Chile. En un estudio más reciente, Jardine y Tsang (2013)(Jardine y Tsang, 2005) utilizan el JKD para priorizar el tiempo de inactividad de 695 componentes menores para una flota de 14 activos móviles en una mina subterránea. Por su parte, Pascual y otros (2009)(Pascual et al., 2009) extienden la técnica JKD de considerar tres indicadores clave de rendimiento, confiabilidad, mantenibilidad y no disponibilidad, para incluir efectos económicos explícitos (Seecharan et al., 2018).

El tiempo de inactividad de un sistema, durante un período de tiempo determinado t , debido a un código de intervención j es indicado como $Downtime_j$, es el producto del número de veces, n_j , que este código ocurre y el tiempo medio de reparación, $MTTR_j$, del sistema, expresado como:

$$Downtime_i = n_i * MTTR_i \quad (3.1)$$

o

$$Cost_i = n_i * MRC_i \quad (3.2)$$

Donde $Cost_i$ y $Downtime_i$ son el costo y el tiempo de inactividad asociados con el código de falla i y n_i , MRC_i y $MTTR_i$ representa el número de fracasos, el coste medio de reparación y la media de tiempo de inactividad, respectivamente.

Si todos los códigos se muestran en un diagrama n vs $MTTR$, es posible discriminar esos códigos que son causantes los principales tiempos muertos; También es posible evaluar si los tiempos de inactividad están relacionados con una Alta frecuencia de estar fuera de servicio. Una desventaja de usar la ecuación Ecuación 3.1 es que las curvas de tiempo de inactividad constante, conocido como iso-curvas de tiempo de inactividad (Pascual et al., 2009), (Knights, 2001), (Knights, 2004).

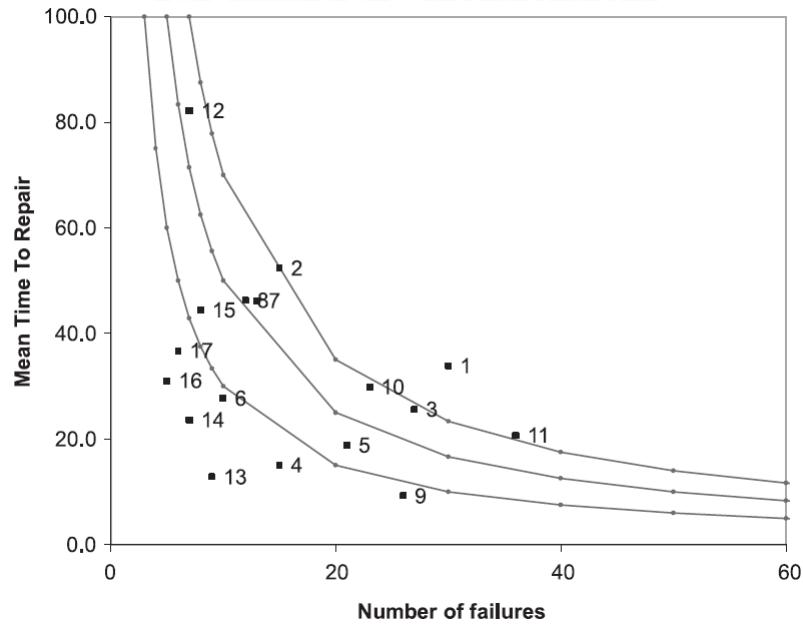


Figura 3.7: Dispersión en plano $x - y$ con Tiempos de reparación vs numero de fallas

Fuente: (Knights, 2001)

Una desventaja de la Figura 3.7 es que las curvas de tiempo de inactividad constante son hipérbolas y pueden ser difíciles de trazar. Una solución para esto es tomar el logaritmo de las ecuaciones Ecuación 3.1 y Ecuación 3.2. Así:

$$\log(Downtime_i) = \log n_i + \log(MTTR_i) \quad (3.3)$$

y

$$\log(Cost_i) = \log n_i + \log(MRC_i) \quad (3.4)$$

donde $\log$ se refiere al $\log_{10}$. Se prepara una gráfica $x-y$ de $\log(n_i)$ contra $\log(MDT_i)$, las curvas de tiempo de inactividad constante aparecen ahora como líneas rectas con un gradiente negativo uniforme (consulte la Figura 3.8). Los diagramas de dispersión logarítmicos simplifican la identificación de las fallas que contribuyen más al tiempo total o al costo del equipo, al tiempo que permiten la visualización de la influencia de la frecuencia de falla y el tiempo de inactividad medio.

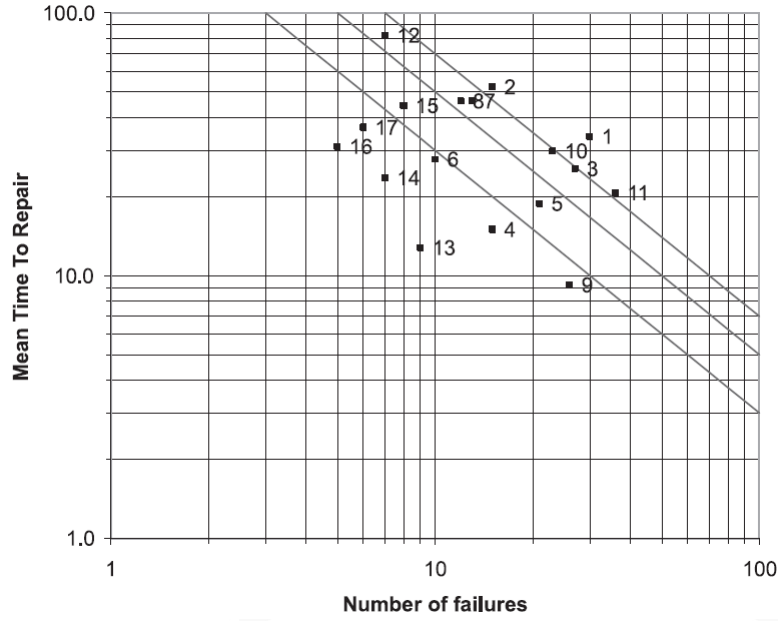


Figura 3.8: Diagrama de Dispersión Logarítmico

Fuente: (Knights, 2001)

$$C = \sum_i Cost_i \quad (3.5)$$

$$D = \sum_i Downtime_i \quad (3.6)$$

El numero total de fallas es:

$$N = \sum_i n_i \quad (3.7)$$

Si Q es el número de códigos de falla distintos utilizados para clasificar los datos de reparación, el límite de umbral en la horizontal para fallas, se puede definir como:

$$Limit\ MRC = \frac{C}{N} \quad (3.8)$$

$$Limit\ MTTR = \frac{D}{N} \quad (3.9)$$

y el límite de umbral en el vertical para las fallas, se puede determinar como:

$$Limit\ n = \frac{N}{Q} \quad (3.10)$$

Los límites umbrales construidos se representan en la Figura 3.9, dichos límites generan los siguientes cuatro cuadrantes: Fallas Agudas, fallas crónicas, fallas agudas y crónicas y un ultimo cuadrante sin clasificación.

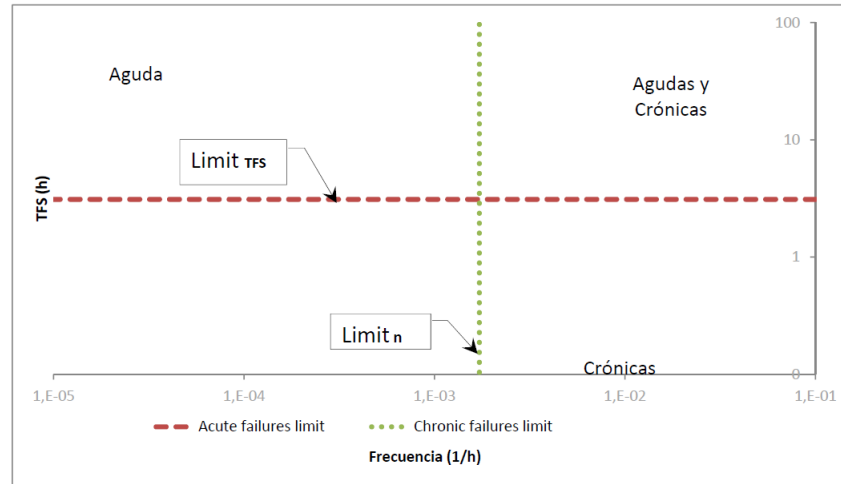


Figura 3.9: Límites Umbrales en diagrama Jack knife

Fuente: Adaptación (Knights, 2001)

El límite divisorio representado como líneas rectas con un gradiente negativo uniforme en la Figura 3.8, es una línea de costo constante o tiempo de inactividad, definido por el producto de los dos límites que se muestran en las ecuaciones Ecuación 3.8 o Ecuación 3.9 y Ecuación 3.10 según el parámetro de interés. La expresión para esta línea es:

$$Cost = \frac{C}{Q} \quad \text{donde} \quad 0 < Cost \leq \frac{C}{Q} \quad (3.11)$$

$$Downtime = \frac{D}{Q} \quad \text{donde} \quad 0 < Downtime \leq \frac{D}{N} \quad (3.12)$$

■ Criticidad de modos de falla mediante JKD

Una vez identificados los límites de umbral, los diagramas Jack Knife proporcionan un medio fácil para identificar problemas de confiabilidad, disponibilidad y mantenimiento. En rigor, la confiabilidad es una probabilidad de supervivencia y una función del tiempo. Una práctica común de la industria es utilizar el tiempo medio entre fallas (MTBF) como medida de confiabilidad.

El MTBF se define como;

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo de Operación}}{N} \quad (3.13)$$

La disponibilidad, la confiabilidad y la capacidad de mantenimiento están interrelacionadas por la aproximación;

$$\text{Disponibilidad} \approx \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.14)$$

La relación muestra que la disponibilidad puede mejorarse aumentando el MTBF, disminuyendo el MTTR o una combinación de ambos. Volviendo al diagrama de JKD, las fallas crónicas son las que más contribuyen al número de fallas observadas, N. Estas son las fallas que más afectan la confiabilidad Figura 3.10. Encontrar soluciones a las causas de raíz de estas fallas aumentará la MTBF.

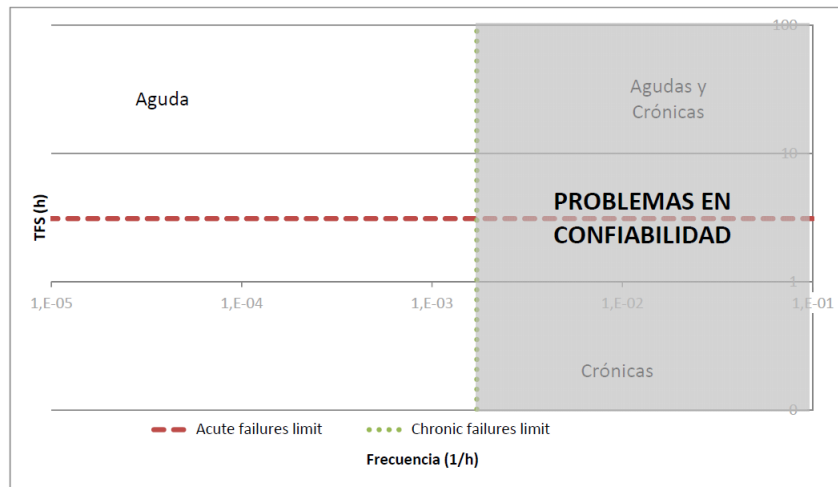


Figura 3.10: Modos de falla que impactan la Confiabilidad

Fuente: Adaptación (Knights, 2001)

De manera similar, la Figura 3.11 muestra las fallas que más afectan la disponibilidad. Encontrar soluciones a las causas fundamentales de estos fallos aumentará en gran medida la disponibilidad. Se confirma al observar el código de falla 9, claramente es un código que se relaciona con problemas de confiabilidad; resolver este problema aumentaría el MTBF y podría esperarse que también aumentara la disponibilidad. De hecho, con referencia a la Ecuación 3.14, el efecto de un aumento de MTBF se ve negado en gran medida por el aumento de MTTR y se puede esperar una ganancia de disponibilidad relativamente pequeña al eliminar las fallas. (Knights, 2004)

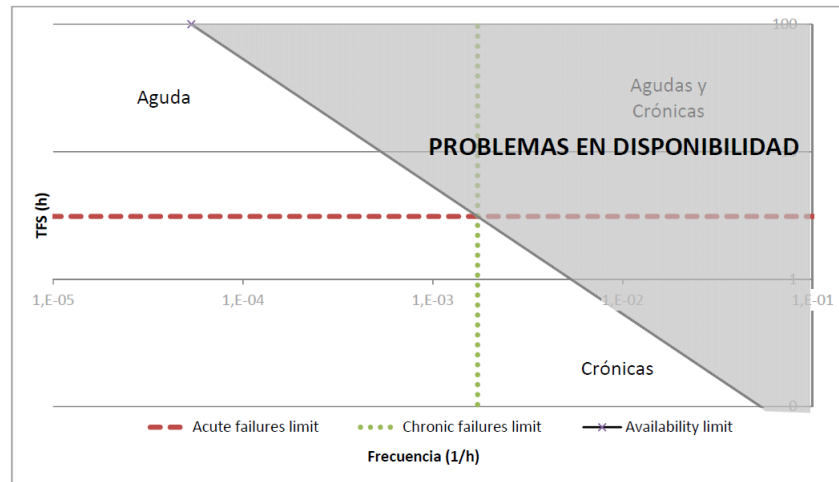


Figura 3.11: Modos de falla que impactan la Disponibilidad

Fuente: Adaptación (Knights, 2001)

La Figura 3.12 muestra las fallas agudas que más afectan la capacidad de mantenimiento.

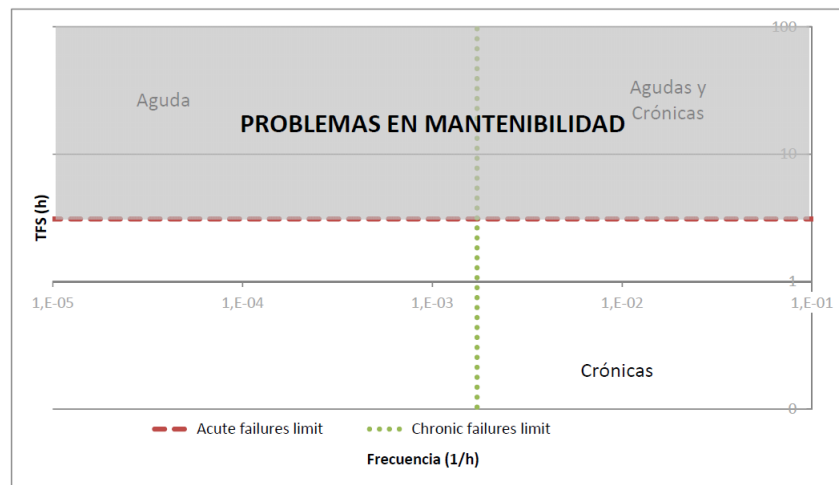


Figura 3.12: Modos de falla que impactan la Mantenibilidad

Fuente: Adaptación (Knights, 2001)

En algunas industrias, las consecuencias económicas del tiempo de inactividad de la planta o el equipo para equipos críticos superan con creces los costos de reparación y mantenimiento. Por ejemplo, la industria minera está sujeta a precios de productos básicos altamente cíclicos. Con los precios del cobre actualmente en niveles máximos de cinco años, el costo de oportunidad de la producción perdida será significativamente mayor. Superar el costo directo de reparación y mantenimiento. En tales circunstancias, es deseable priorizar la producción, por lo tanto, la disponibilidad y confiabilidad del equipo sobre los costos de reparación.

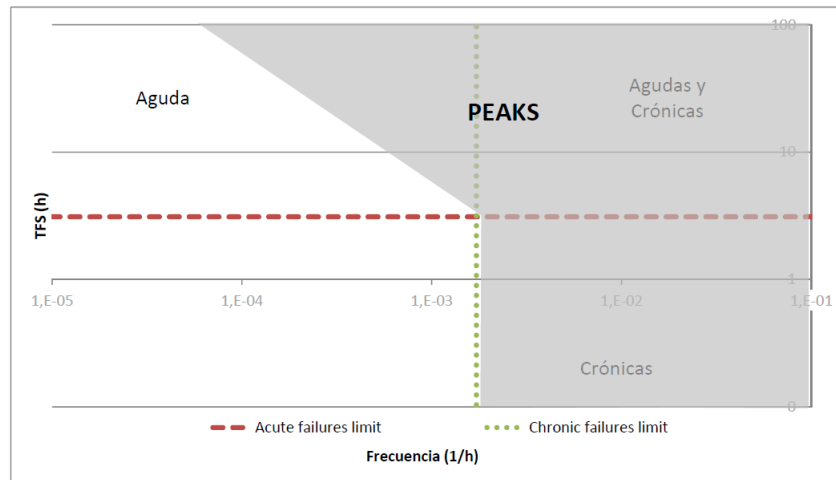


Figura 3.13: Diagrama Jack Knife, cuando costo oportunidad de la producción es alto

Fuente: Adaptación (Knights, 2001)

La Figura 3.13 corresponde a un escenario en el que el costo de oportunidad de la producción perdida supera con creces los costos de reparación y mantenimiento. Sin embargo, cuando los precios del cobre caen, el costo de producción se vuelve más significativo. Por lo tanto, en los precios de los productos básicos, controlar y reducir los costos de mantenimiento y reparación será tan importante como mantener la disponibilidad y confiabilidad del equipo.

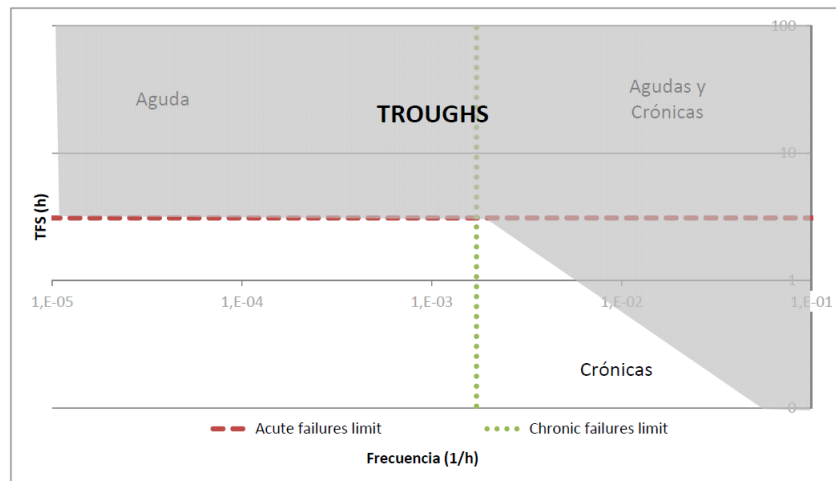


Figura 3.14: Diagrama Jack Knife, cuando costo de la producción es alto

Fuente: Adaptación (Knights, 2001)

La Figura 3.14 corresponde al escenario de una compresión de precios de productos básicos que causa preocupación en los costos de producción.

■ Ventajas del método JKD

Entre las ventajas que se observan en la implementación del método JKD en el área de mantenimiento,

destacan los siguientes aspectos:

- Su capacidad de realizar un análisis multi-variable, ya que, en la misma gráfica se exponen variables como tiempo de inactividad (indisponibilidad), frecuencia de falla, tiempo medio de reparación (MTTR) o Costo medio Reparación (RCM).
- Permite clasificar los códigos de falla e identificar su relación con problemas de confiabilidad, disponibilidad y mantenimiento. Su clasificación se considera, por ejemplo de la siguiente forma: Baja Criticidad < Crónicos B < Crónicos A < Agudas < Agudas y Crónicos
- Logra identificar ciertas fallas de carácter crónico, que no necesariamente poseen un elevado tiempo Downtime, pero que por su elevada frecuencia ocasionan costos indirectos debido a pérdidas operacionales y que afectan la Disponibilidad equipo.
- Facilita establecer tendencias entre distintos periodos de evaluación.
- Con la lista de códigos de falla priorizada, se pueden formular hipótesis sobre la posible causa (o causas) de cada problema. Las reparaciones crónicas a menudo se asocian con problemas de diseño, prácticas inapropiadas del operador o un control de calidad deficiente en procesos ascendentes. Cuando se trata de analizar modos de fallas del tipo agudas se relacionan a problemas de mantenibilidad, instalación de componentes de mala calidad, procedimientos de ejecución en plan de mantenimiento inadecuado, frecuencia insuficiente, planificación de mantenimiento deficiente. Así una fusión de ambas tipos de fallas impactan fuertemente la disponibilidad.

La criticidad de modos de falla en mantenimiento donde se realiza el presente análisis es el sector de sistemas de distribución de energía eléctrica, compuesto por compañías que compran electricidad a empresas generadoras, para venderla a consumidores finales.

3.11. Seguridad y Calidad de Suministro

La crisis energética que preocupa a Chile no es un hecho aislado, sino sólo un reflejo del difícil desafío que enfrenta el sector energético mundial que implica la obtención de suficiente energía a precios razonables, sin afectar el crecimiento económico global. Esta tarea no es fácil, si se cumple la predicción de que la demanda mundial por combustibles aumentaría en más de un 60 % de aquí al año 2030. El panorama energético del país requiere soluciones decididas a corto, mediano y largo plazo ya que el crecimiento económico del país ha hecho aumentar la demanda de energía a un ritmo bastante mayor que la oferta real. (Autores, 2006)

Si bien el país tiene buenos índices de acceso como medida absoluta, aún existen desafíos en cuanto a

equiparar al acceso para toda la población de Chile. También existen brechas relacionadas con la continuidad y seguridad del suministro. El índice SAIDI (por sus siglas en inglés, System Average Interruption Duration Index), que da cuenta de las horas promedio que un cliente ha estado sin suministro eléctrico, muestra que existen regiones del país en donde la interrupción del servicio en el año 2014 superó las 25 horas.(de Energía, 2016)

En 11 de las 15 regiones, los usuarios estuvieron sin electricidad durante más de 15 horas en 2014, lo que ciertamente evidencia que la continuidad no es la mayor virtud de la red eléctrica nacional. Como contraste, en países europeos, el índice SAIDI no supera las 8,5 horas anuales, y es menor a 1 hora en países como Dinamarca, Alemania y Suiza.(de Energía, 2016)

En vista de los datos expuestos, el proveer de mayor acceso energético a la población debe tener en cuenta no sólo aquellas familias que no tienen una conexión eléctrica o un suministro de combustibles, sino que también los casos en donde la calidad, continuidad y seguridad del servicio esté comprometida. De esta manera, esta Política propone hacerse cargo del acceso continuo, seguro y sostenible, dado el reconocimiento de que la energía es un motor esencial para el desarrollo de las personas, familias, comunidades y para el crecimiento del país.(de Energía, 2016)

A principios de la década del 2000, países con niveles de desarrollo similares a los de Chile, como, por ejemplo, Portugal, tenían cerca de 9 horas de corte promedio de suministro eléctrico. En la última medición disponible del 2012, Portugal había alcanzado un promedio de 1,5 hs de indisponibilidad. Por otra parte, Polonia tiene hoy en día más de 4 horas de indisponibilidad al año.(de Energía, 2016)

Chile, a medida de avance hacia el desarrollo, debe adoptar la meta de alcanzar a países como los mencionados. Dadas las condiciones geográficas, las dificultades de acceso, el hecho de ser un país sísmico y con alta probabilidad de eventos de fuerza mayor, es necesario considerar que las horas de indisponibilidad de suministro deben apuntar a reducirse en los casos de razón interna y externa. (de Energía, 2016)

La indisponibilidad de suministro eléctrico promedio, sin considerar fuerza mayor, no supera a una hora/año en cualquier localidad del país. 100 % de la población con acceso continuo y de calidad a los servicios energéticos. (de Energía, 2016)

Esto se logra regulando tiempos y frecuencias en las interrupciones del suministro, estas deberán ser actualizadas constantemente, contemplando las sanciones correspondientes.

3.12. Marco Regulador

A continuación se ponen a disposición extractos de Decreto supremo N°327, Ley General de Servicios Eléctricos, en lo referente a interrupciones de suministro.

Artículo 245° y 246° DS N°327/97)

Durante cualquier período de doce meses, las interrupciones de suministro de duración superior a tres minutos, incluidas las interrupciones programadas, no deberán exceder los valores que se indican a continuación:

- a) En puntos de conexión a usuarios finales en baja tensión: 22 interrupciones, que no excedan, en conjunto, de 20 horas;
- b) En todo punto de conexión a usuarios finales en tensiones iguales a media tensión: 14 interrupciones, que no excedan, en conjunto, de 10 horas;
- c) En puntos de conexión a concesionarios de servicio público de distribución, la indisponibilidad aceptable en horas anuales será igual a la indisponibilidad aceptable de generación más la indisponibilidad aceptable de transmisión.

La indisponibilidad aceptable de generación, será establecida por la Comisión con motivo del programa de obras a que se refiere el artículo 272 del reglamento.

La indisponibilidad aceptable de transmisión será la establecida por la Comisión para efectos del cálculo de factores de penalización, según se señala en el artículo 281 del reglamento.

Artículo 230° del DS N°327/97

Las empresas concesionarias de servicio público de distribución deben llevar un índice representativo de la continuidad de servicio entregado a sus usuarios, medido en los términos y conforme a los procedimientos, plazos y medios de entrega de la información, que la SEC especifique, oyendo previamente a las empresas. Este índice incluye, al menos, los siguientes parámetros, para cada período de doce meses, a noviembre de cada año:

- a) Frecuencia media de interrupción y su desviación estándar;
- b) Duración media de la interrupción y su desviación estándar; y
- c) Tiempo total de interrupción.

Artículo 323° del DS N°327/97

Las infracciones e incumplimientos de las normas legales, reglamentarias y técnicas en materia de electricidad, como asimismo de las instrucciones y órdenes que imparta la Superintendencia, serán castigados

con alguna de las sanciones establecidas en el reglamento de sanciones, sin perjuicio de otras contempladas en el ordenamiento jurídico.

Entre otras, serán sancionadas las siguientes infracciones e incumplimientos:

- a) La no comunicación a la Superintendencia, de la puesta en servicio de instalaciones eléctricas, dentro de los plazos establecidos en la ley y el reglamento.
- b) El incumplimiento de las disposiciones legales, reglamentarias y normas técnicas sobre seguridad que se encontraren vigentes en el momento de entrar en servicio, en instalaciones eléctricas de cualquier naturaleza, incluso las de uso privado.
- c) La puesta en servicio de instalaciones eléctricas cuyos planos o ejecución no hubiesen sido realizados por instaladores en posesión de la respectiva licencia o por profesionales debidamente autorizados.
- d) La comercialización de productos eléctricos sin el respectivo certificado de aprobación debiendo contar con éste, o usando indebidamente el distintivo o certificado de aprobación o placa de características.
- e) *El incumplimiento de los estándares de calidad de servicio y suministro, establecidos por disposiciones legales, reglamentarias y normas técnicas, para las actividades de generación, transmisión y distribución.*
- f) La aplicación o cobro de tarifas mayores a las máximas fijadas o determinadas en conformidad a la ley y el reglamento.
- g) La mantención en servicio de instrumentos y equipos de medición cuyas indicaciones o registros alteren las mediciones, en porcentajes que excedan las tolerancias permitidas.
- h) La no entrega de información requerida por la Superintendencia en los plazos que ella señale, o la entrega de información falsa; la no comparecencia y declaración de testigos o exhibición de libros, tarifas, contratos y demás documentos que dicho organismo requiera, conforme a sus atribuciones.
- i) El incumplimiento de la extensión de servicio en las zonas de concesión dentro del plazo fijado por la Superintendencia.

En primer lugar, existe un mercado de energía y potencia a firme, en el que la Comisión Nacional de Energía (CNE) determina precios que garantizan un suministro de energía de acuerdo a los contratos, con un margen de seguridad determinado. Las empresas obtienen ingresos por sus ventas de energía y potencia, por lo que a precios adecuados de la potencia habrá incentivos para tenerla. En segundo lugar, la ley también contempla el pago de compensaciones a los consumidores en el caso de que con la disponibilidad planificada no fuera posible, como sistema, satisfacer la demanda. Estas compensaciones las deben realizar las generadoras deficitarias, es decir, aquellas que no tienen la capacidad de cumplir con sus contratos y a precios que son sustancialmente mayores a los costos típicos de generación. En este sentido, en el caso de una crisis de abastecimiento, existen precios que inducen a los generadores deficitarios a generar, ya sea ellos mismos o a comprar energía, a generadores superávit o nuevos, de modo de no tener que pagar (compensar)

a precios que largamente exceden el costo típico de producción. A continuación se extractos de la norma técnica de calidad de servicio para Sistemas de Distribución, dispuesto por CNE, que están directamente relacionados con la regulación sobre interrupciones de suministro a clientes finales (indisponibilidad).

Título 4-1 INTERRUPCIONES DE SUMINISTRO

Artículo 4-1 Interrupciones de Suministro a Clientes Finales Para caracterizar las Interrupciones de Suministro que afecten a Clientes conectados en Sistemas de Distribución en Estado Normal, se definen los siguientes indicadores:

Frecuencia de Interrupciones a Clientes (FIC):

$$FIC_c = \sum_i Int_{i,c} \quad (3.15)$$

Tiempo de Interrupciones a Clientes (TIC):

$$TIC_c = \sum_i Int_{i,c} * t_{i,c} \quad (3.16)$$

Donde:

- $Int_{i,c}$: Corresponde a la interrupción i , que haya afectado al Cliente c .
- $t_{i,c}$: Corresponde al tiempo durante el cual el Cliente c se mantuvo sin suministro eléctrico producto de la interrupción i , en [hrs].

Para la aplicación de las expresiones anteriores se deben considerar todas las Interrupciones de Suministro generadas por fallas o desconexiones en las instalaciones de la Empresa Distribuidora y que hayan sido mayores a 3 minutos, incluyendo aquellas que afecten individualmente a un Cliente. Se deberán considerar también las Desconexiones Programadas de acuerdo a lo establecido en el Título 4-2, en particular, lo dispuesto en su Artículo 4-6. Por el contrario, se deben excluir aquellas interrupciones solicitadas por el Usuario, aquellas que hayan sido calificadas por la Superintendencia como eventos de Fuerza Mayor o Caso Fortuito y aquellas asociadas a un Estado Anormal o a un Estado Anormal Agravado del par Comuna-Empresa respectivo, de conformidad con lo establecido en la presente Norma Técnica. En aplicación de lo señalado en el inciso anterior, los indicadores TIC y FIC, para cualquier Cliente, no deberán exceder los límites siguientes durante cualquier periodo de doce meses consecutivos:

Tensión de la red	Densidad de la Red			
	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Baja Tensión (BT)	13	14	18	22
Media Tensión (MT)	8	10	14	20

Tabla 3.1: Límites expresados en horas para el Tiempo de Interrupciones de Suministro Clientes Finales (TIC) exigibles durante los años 2018 a 2019.

Fuente: (CNE, 2017)

Tensión de la red	Densidad de la Red			
	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Baja Tensión (BT)	12	14	18	22
Media Tensión (MT)	8	9	10	14

Tabla 3.2: Límites para la Frecuencia de Interrupciones de Suministro Clientes Finales (FIC) exigibles durante los años 2018 a 2019. Fuente: (CNE, 2017)

Tensión de la red	Densidad de la Red			
	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Baja Tensión (BT)	9	10	14	18
Media Tensión (MT)	5	6	10	14

Tabla 3.3: Límites expresados en horas para el Tiempo de Interrupciones de Suministro Clientes Finales (TIC) exigibles desde el año 2020 en adelante. Fuente: (CNE, 2017)

Tensión de la red	Densidad de la Red			
	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Baja Tensión (BT)	8	10	14	18
Media Tensión (MT)	6	7	8	12

Tabla 3.4: Límites para la Frecuencia de Interrupciones de Suministro Clientes Finales (FIC) exigibles desde el año 2020 en adelante. Fuente: (CNE, 2017)

Artículo 4-4 Registro de Interrupciones de Suministro

Las Empresas Distribuidoras deberán elaborar un registro con la información de las Interrupciones de Suministro generadas por fallas en sus redes y que hayan afectado a sus Clientes, debiendo mantener, por cada Cliente, un registro actualizado con al menos la siguiente información:

1. Frecuencia y duración de las Interrupciones de Suministro: Para cada Cliente y/o Usuario se deberá calcular la frecuencia y la duración de las interrupciones de suministro para los últimos doce meses consecutivos, informando separadamente aquellas interrupciones que hayan ocurrido estando el Sistema de Distribución en Estado Normal y en Estado Anormal. ([CNE, 2017](#))





4 | ANÁLISIS CRITICIDAD MODO DE FALLA

El análisis de criticidad de modo de falla se desarrollara a través de la implementación de método tradicional, mono-criterio y otro método multi-criterio, los resultados se derivan de los datos obtenidos en la Empresa de Energía. A continuación en la Figura 4.1 se observa la estructura que se usara para el desarrollo del caso práctico.

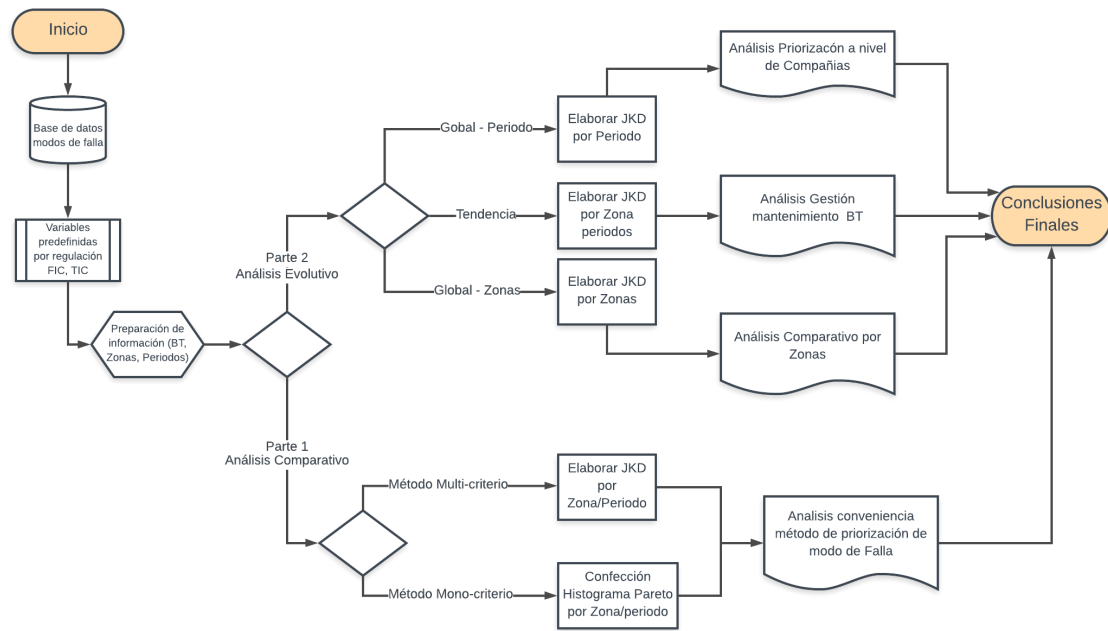


Figura 4.1: Diagrama Flujo de Caso Práctico en Análisis modos de fallas

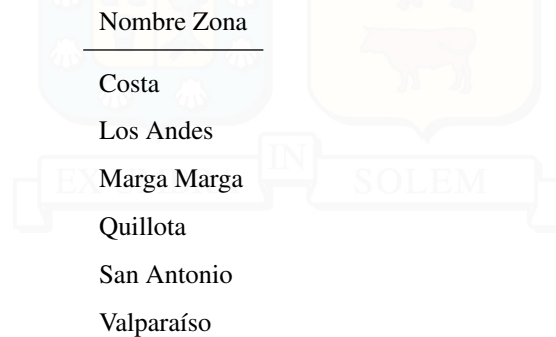
Fuente: Elaboración Propia

El análisis se divide en dos partes. La primera es un análisis comparativo entre histograma de Pareto como método tradicional de amplia utilización en diferentes industrias a nivel nacional y el métodos diagrama de jack knife (JKD), con características multi-criterio. En la segunda parte se busca exponer las cualidades del

método JKD, mostrando su versatilidad de enfoques de análisis, variados enfoques globales y de tendencias en los modos de falla.

Es importante destacar que los análisis de lista de prioridades se realiza orientado hacia a la minimización de la función objetivo (FO). Que en esta industria es la indisponibilidad. No obstante, esto no menoscaba la afectación que provocan las fallas tipo crónicas o agudas es si.

Se utilizará la siguiente nomenclatura para identificar modos de falla, ver tabla Tabla 4.2, creada en esta ocasión para optimizar espacio en la gráfica.



Nombre Zona
Costa
Los Andes
Marga Marga
Quillota
San Antonio
Valparaíso

Tabla 4.1: Nomenclatura Zonas

Fuente: Elaboración Propia

Nombre Falla	Cod. Falla	Nombre Falla	Cod. Falla
Accidentes	1	Mantenimiento	9
Actos vandálicos	2	Operación de la red	10
Animales	3	Otros no clasificados	11
Árboles	4	Por Vehículos	12
Condiciones Atmosféricas	5	Sobrecarga	13
Construcción y equipos	6	Incendio no debido a fallas	14
Eventos Catastrófico	7	Instalaciones de clientes	15
Juegos personas	8	Externas	16

Tabla 4.2: Nomenclatura código de Fallas

Fuente: Elaboración Propia

4.1. Parte 1: Análisis Comparativo

El análisis comparativo se basa en la observancia paralela entre histograma de Pareto y método Diagrama Jack Knife, en cada figura se dará realce a las diferencias observadas, se seleccionaron a priori las gráficas mas influyentes. No obstante, en Apéndice A se encuentra la totalidad figuras.

La información entregada incorpora la nomenclatura según “Norma técnica de calidad de servicio para sistema de distribución”, en Ecuación 3.15 y Ecuación 3.16.

■ Comparativa Zona Marga Marga Periodo 2016

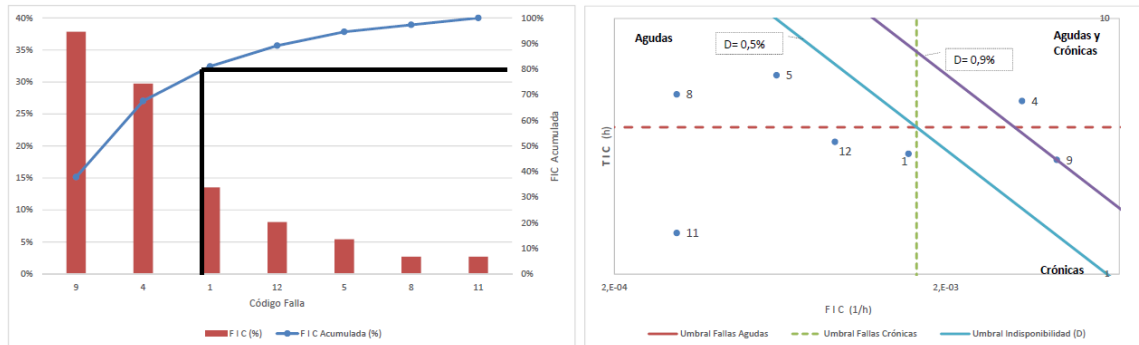


Figura 4.2: Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Marga Marga periodo 2016

Fuente: Elaboración Propia

Cod. Falla	Nombre Falla	Histograma		Jack Knife				
		FIC (1/semestre)	TIC total (h/semestre)	FIC (%)	FIC Acumulada (%)	FIC (1/h)	TIC (h)	D
9	Mantenimiento	14	39,2	38 %	38 %	3,2E-03	2,8	0,91 %
4	Árboles	11	52,3	30 %	68 %	2,5E-03	4,8	1,21 %
1	Accidentes	5	14,8	14 %	81 %	1,2E-03	3,0	0,34 %
12	Por Vehículos	3	9,9	8 %	89 %	6,9E-04	3,3	0,23 %
5	Condiciones Atmosféricas	2	12,0	5 %	95 %	4,6E-04	6,0	0,28 %
8	Juegos personas	1	5,1	3 %	97 %	2,3E-04	5,1	0,12 %
11	Otros no clasificados	1	1,5	3 %	100 %	2,3E-04	1,5	0,03 %

Tabla 4.3: Información FIC y TIC para Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Marga Marga periodo 2016.

Fuente: Elaboración Propia

Se observa en el histograma a la izquierda de la Figura 4.2, los códigos de falla 9, 4 y 1 como orden de relevancia crítica. Según “Ley de Pareto” estos son responsables del 80 % de los modos de falla de la empresa. Si comparamos la lista de criticidad con el método JKD a la derecha de la figura, vemos un orden de priorización distinta, ya que los códigos críticos son el numero 4 y 9, siendo el 4 mas critico que el código 9, dejando en condición de código no critico al numero 1, en el periodo en análisis. Sin embargo, la industria se regula a través del indicador de disponibilidad (KPI disponibilidad), es posible ver que el método tradicional es muy limitado, no pudiendo articular el KPI debido a que, este indicador se construye con las variables frecuencia de falla (FIC) y tiempo fuera de servicio (TIC).

En el JKD mostrado se deja visible la recta color morado con pendiente negativa que representa el modo de falla con mayor frecuencia, cualquier modo de falla por encima de esta recta impacta

negativamente con mayor cuantía la disponibilidad. Pudiéndose corroborar en la Tabla 4.3 columna "D" la indisponibilidad.

■ Comparativa Zona Costa periodo 2017

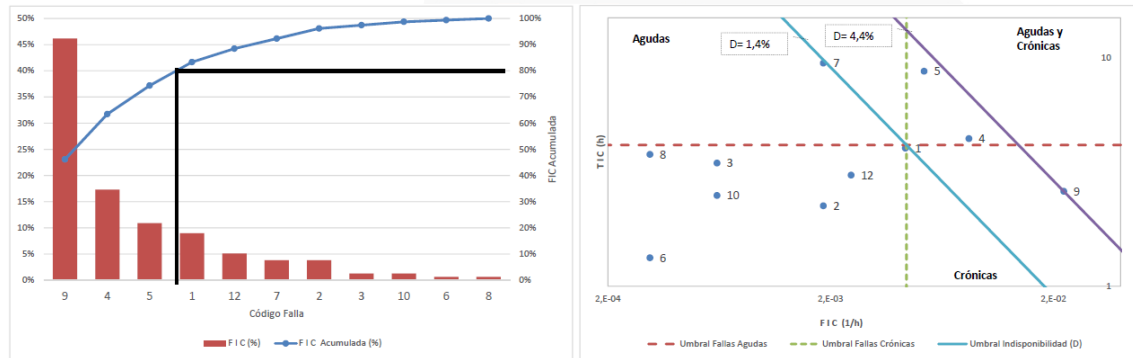


Figura 4.3: Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Costa periodo 2017

Fuente: Elaboración Propia

Cod. Falla	Nombre Falla	Histograma				Jack Knife		
		FIC (1/semestre)	TIC total (h/semestre)	FIC (%)	FIC Acumulada (%)	FIC (1/h)	TIC (h)	D
9	Mantenimiento	72	187,8	46 %	46 %	1,7E-02	2,6	4,35 %
4	Árboles	27	119,8	17 %	63 %	6,3E-03	4,4	2,77 %
5	Condiciones Atmosféricas	17	148,8	11 %	74 %	3,9E-03	8,8	3,45 %
1	Accidentes	14	56,4	9 %	83 %	3,2E-03	4,0	1,31 %
12	Por Vehículos	8	24,6	5 %	88 %	1,9E-03	3,1	0,57 %
7	Eventos Catastrófico	6	57,0	4 %	92 %	1,4E-03	9,5	1,32 %
2	Actos vandálicos	6	13,5	4 %	96 %	1,4E-03	2,3	0,31 %
3	Animales	2	6,9	1 %	97 %	4,6E-04	3,5	0,16 %
10	Operación de la red	2	5,0	1 %	99 %	4,6E-04	2,5	0,12 %
6	Construcción y equipos	1	1,3	1 %	99 %	2,3E-04	1,3	0,03 %
8	Juegos personas	1	3,8	1 %	100 %	2,3E-04	3,8	0,09 %

Tabla 4.4: Información FIC y TIC para Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Costa periodo 2017.

Fuente: Elaboración Propia

Al realizar la comparación del histograma vs JKD en la Figura 4.3, los resultados son semejantes en cuanto a la lista final de priorización. Sin embargo, en JKD se observa en el umbral de disponibilidad se encuentran los códigos de falla 1 y 7. También observar la Tabla 4.4 donde código 1 tiene un $D=1,31\%$ y código 7 tiene un $D=1,32\%$, esto los hace estar a ambos dentro de las variables a tener en cuenta al momento de diseñar planes de mantención. No obstante, este código 7 es desestimado por el histograma de Pareto, llevándolo a la sexta posición donde se encuentran los códigos que son

consecuencia de las fallas principales.

Para la toma de decisión de inversión de recursos de ser necesario al momento de examinar la causa raíz de cada falla, se tendrán que exponer variables como por ejemplo económicas que se involucran en la mitigación de la falla, debido por la minimización de cuales quiera de estas fallas generan igual incremento de disponibilidad.

■ Comparativa Zona Quillota Periodo 2017

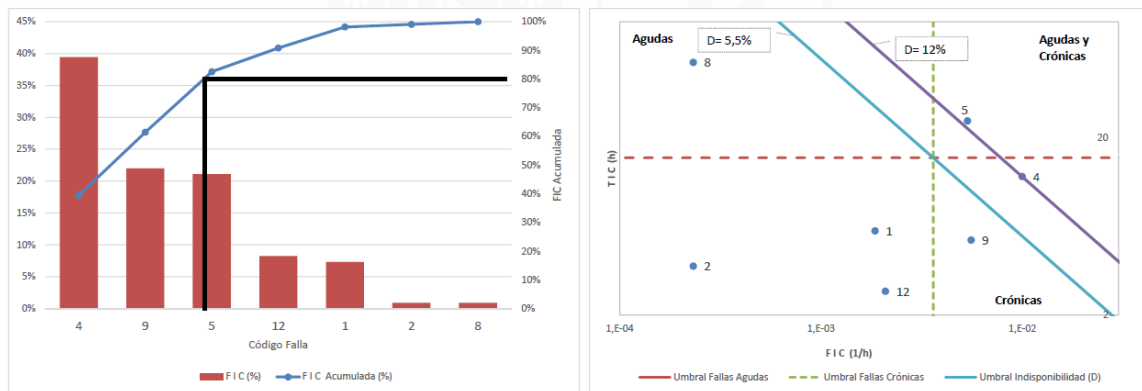


Figura 4.4: Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Quillota periodo 2017

Fuente: Elaboración Propia

Cod. Falla	Nombre Falla	Histograma				Jack Knife		
		FIC (1/semestre)	TIC total (h/semestre)	FIC (%)	FIC Acumulada (%)	FIC (1/h)	TIC (h)	D
4	Árboles	43	518,6	39 %	39 %	1,0E-02	12,1	12,01 %
9	Mantenimiento	24	126,8	22 %	61 %	5,6E-03	5,3	2,93 %
5	Condiciones Atmosféricas	23	571,3	21 %	83 %	5,3E-03	24,8	13,23 %
12	Por Vehículos	9	24,5	8 %	91 %	2,1E-03	2,7	0,57 %
1	Accidentes	8	47,7	7 %	98 %	1,9E-03	6,0	1,10 %
2	Actos vandálicos	1	3,8	1 %	99 %	2,3E-04	3,8	0,09 %
8	Juegos personas	1	53,1	1 %	100 %	2,3E-04	53,1	1,23 %

Tabla 4.5: Información FIC y TIC para Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Quillota periodo 2017

Fuente: Elaboración Propia

Como muestra la Figura 4.4 a la izquierda el histograma, muestra los códigos 4, 9, 5, siendo el código 4 de mayor criticidad. Sin embargo, la priorización con método Jack Knife es diferente, debido a que los modos de falla críticos son 5, 4, siendo el código 5 de mayor relevancia y dejando al código 9 fuera de la lista de prioridades, según nuestra FO. Esta diferencia entre ambos métodos, es relevante debido a que una deficiente criticidad de modos de falla, trae como consecuencia una destinación de recursos

errada. Siendo la priorización mas robusta para la toma de decisión la señalada por JKD. Esto supone al área de mantenimiento un cambios en la planificación.

”Una vez que se ha identificado una lista de códigos de falla priorizada, se pueden formular hipótesis sobre la posible causa (o causas) de cada problema. El personal experimentado de mantenimiento y operación es indispensable para este proceso, ya que se requiere familiaridad con la máquina, el entorno operativo y con el mantenimiento y las prácticas operativas”(Knights, 2001). Un ejemplo de esto es el código de falla 9, por su localización en las figuras es del tipo crónica, y su causa tiene raíces en confiabilidad, esta es la dirección que debe tomar la investigación causa raíz de la falla.

En la Figuras mostradas los modos de fallas recurrentes fueron los códigos 9,4,5. El aditamento de la variable tiempo fuera de servicio, incorpora una dimensión que logra robustecer la lista de códigos de falla priorizada, en base al KPI disponibilidad de importancia en la industria y extiende la información sobre origen de falla en mantenibilidad o confiabilidad.

- Criticidad de Falla de la Falla: Un análisis mas acabado se da cuando se realiza la estratificación de un modo de falla critico, permitiendo evaluar la criticidad de los modos de falla que lo componen, y así direccionar los recursos eficazmente.

A continuación se realiza la estratificación de los códigos 9, 4. El código 5 no tiene divisibilidad, por tanto no se expone.

- Estratificación Falla Mantenimiento (Cod.9)

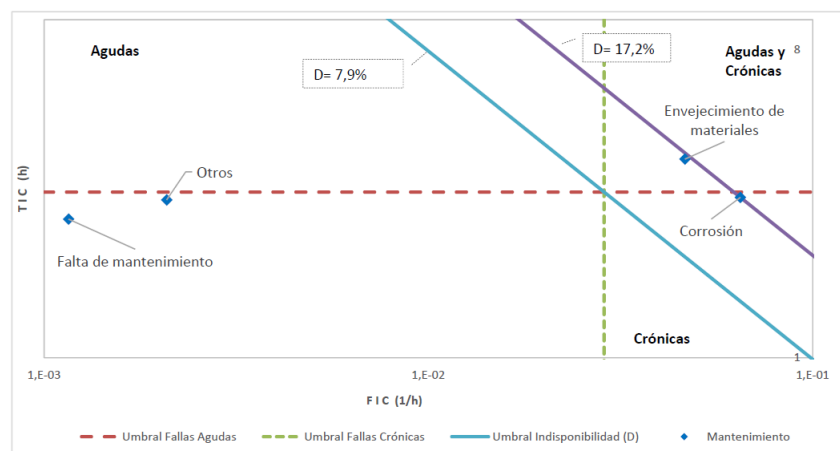


Figura 4.5: Análisis criticidad de las fallas que componen la falla Mantenimiento (Cod.9), con método JKD

Fuente: Elaboración Propia

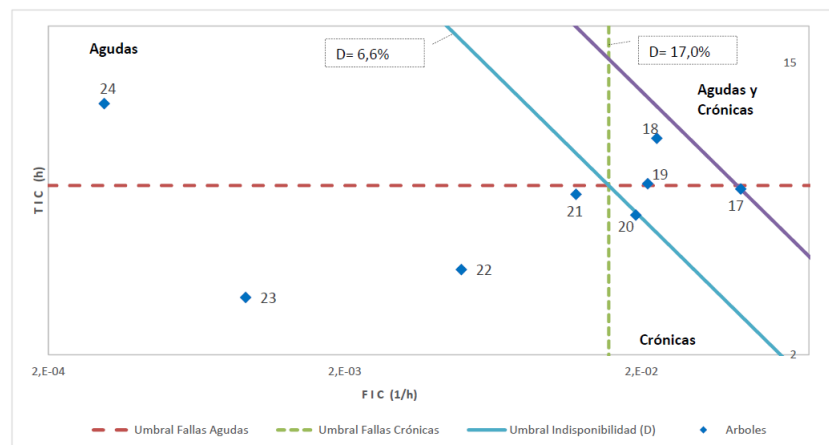
Nombre Falla	F I C (1/semestre)	T I C total (h/semestre)	F I C (%)	F I C Acumulada (%)
Corrosión	280	742,2	57 %	57 %
Envejecimiento de materiales	201	709,4	41 %	97 %
Falta de mantenimiento	5	11,3	1 %	98 %
Otros	9	23,4	2 %	100 %

Tabla 4.6: FIC y TIC para análisis criticidad de las fallas que componen la falla Mantenimiento (Cod.9)

Fuente: Elaboración Propia

Es interesante observar que los modos de falla que componen el código 9, corresponden a fallas relacionadas con la confiabilidad y la mantenibilidad en conjunto, esto lleva a pensar que a pesar de tener una clasificación "Falta de mantenimiento" como la menor en criticidad existen problemas en los procedimientos que se realizan en dichas mantenciones. Igualmente se debe investigar por ejemplo la calidad de los materiales utilizados, entre otros factores. Sería conveniente de contar con la información sobre que componen generan la falla corrosión y el envejecimiento, para realizar un JKD.

- Estratificación Falla Árboles (Cod.4)

**Figura 4.6:** Análisis criticidad de las fallas que componen la falla Árboles (Cod.4), con método JKD

Fuente: Elaboración Propia

Cod. Falla	Nombre Falla	Histograma				Jack Knife		
		FIC (1/semestre)	TIC total (h/semestre)	FIC (%)	FIC Acumulada (%)	FIC (1/h)	TIC (h)	D
17	Municipalidad no efectúa poda propia o no la permite	140	774,7	35 %	35 %	3,2E-02	5,5	17,93 %
18	Caída de árbol	73	602,6	18 %	53 %	1,7E-02	8,3	13,95 %
19	Caída de gancho o rama	68	392,5	17 %	70 %	1,6E-02	5,8	9,09 %
20	Cliente efectúa poda propia indebida	62	279,6	15 %	85 %	1,4E-02	4,5	6,47 %
21	Cliente no efectúa poda propia o no la permite	39	207,0	10 %	95 %	9,0E-03	5,3	4,79 %
22	Municipalidad efectúa poda propia indebida	16	46,9	4 %	99 %	3,7E-03	2,9	1,09 %
23	Daño directo en la red por ejecución de podas	3	7,1	1 %	100 %	6,9E-04	2,4	0,16 %
24	Daño por faena ajena a la concesionaria	1	10,9	0 %	100 %	2,3E-04	10,9	0,25 %

Tabla 4.7: FIC y TIC para análisis criticidad de las fallas que componen la falla Árboles (Cod.4)

Fuente: Elaboración Propia

Para la Tabla 4.7 se definen nuevos códigos de falla con el objetivo que no exista confusión con las anteriores tablas.

Se identifica la lista de códigos de falla priorizada mediante Figura 4.6, los códigos priorizados son: 17, 18, 19. Es decir, la investigación de causa raíz que provoca la falla "Árboles" debe centrarse tanto en la confiabilidad como en la mantenibilidad.

4.2. Parte 2: Análisis Tendencia y priorización Global con JKD

- Análisis Tendencia por Zona: Al observar el método en periodos sucesivos, es posible evaluar las acciones ejecutadas por el área de mantenimiento, teniendo la posibilidad de argumentar si las medidas tomadas al final del periodo anterior han contribuido efectivamente en el aumento de la disponibilidad,

La Figura 4.7 se construye graficando los modos de falla diferenciando cada uno de los periodos. Además se añade fechas que guían los movimiento del modo de falla entre cada periodo posterior, esto para realizar el análisis con facilidad y rápidas. A continuación se seleccionan algunas zonas a modo de ejemplo.

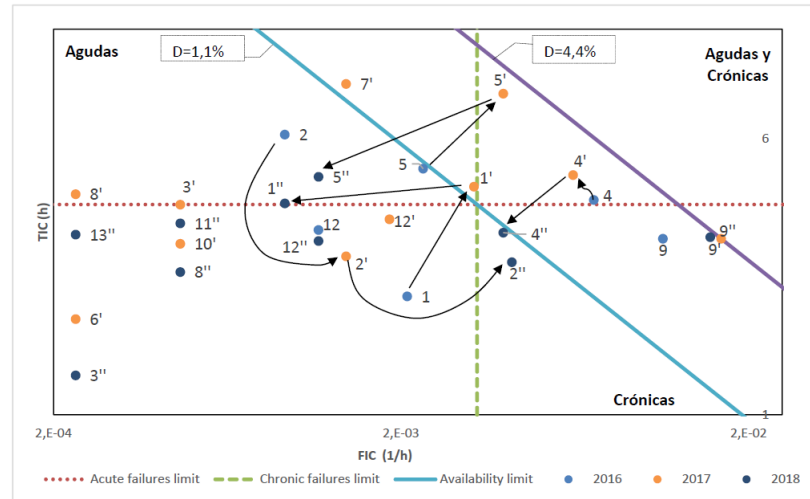


Figura 4.7: Tendencia modos de falla Zona Costa, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.7, se observan que el código 4 (Árboles) en la transición entre los periodos 2017 a 2018 las acciones tomadas para mitigar esta falla, consiguen los resultados esperados ya que se logra el aumento en la disponibilidad. El código 9 no se visualiza intervenciones que realmente hayan creado un beneficio efectivo. Se destacan además las acciones tomadas en el código 2, inicialmente eso un modo de falla Agudo en periodo 2016, luego con las acciones tomadas pasa a ser una falla bajo control en el periodo 2017 y finalmente se comporta como una falla crónica, se debe considerar que esta código tiene por nombre "Actos Vandálicos" por lo tanto tiene un carácter fortuito que el personal experto de mantención debe tener presente.

Por ultimo el tratamiento que se esta realizando en la falla 1 y 5 para el periodo 2018, han tenido grandes beneficios con respecto a la disponibilidad.

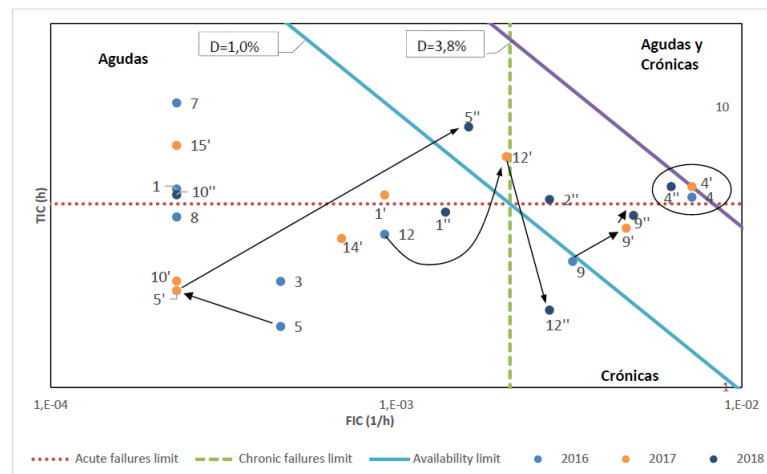


Figura 4.8: Tendencia modos de falla Zona Los Andes, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.8, se destaca la trayectoria que muestra la falla código 9 (mantenimiento), de continuo se ha incrementado la criticidad, si bien entre los periodos 2017 y 2018 la tendencia se merma notablemente, las acciones no logran una reducción en su criticidad. Este modo de falla en esta zona, tiene un compartamiento que evidencia problemas en la confiabilidad, como se vio en la Figura 4.5 las fallas críticas que componen el código 9, es decir para corrosión y el envejecimiento de materiales para esta zona, tiene una mayor influencia la componente problemas en la confiabilidad.

Por otra parte, las gestiones tendientes a reducir la criticidad del código de falla 4 han sido insuficientes, esto a la luz de los periodos evaluados.

Al examinar el código 5 (condiciones atmosféricas), ha tenido un desplazamiento importante entre los periodos 2017 a 2018, hay que poner especial atención debido a que se deben implantar medidas preventivas, tendientes a minimizar los efectos por evento. Por tanto, es de importancia contar con estadísticas claras de las causas que componen la clasificación de la falla.

- **Análisis Global por periodo:** En la Figura 4.9, los modos de falla no estarán individualizados por zonas, es decir los modos de falla están mostrados a nivel de organización para cada periodo. El objetivo es observar de manera global la criticidad de la compañía, con el fin impulsar inversiones de mediano.

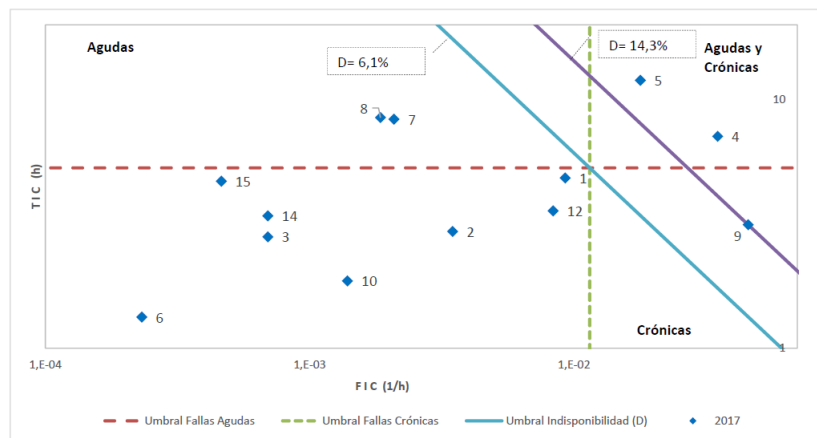


Figura 4.9: Diagrama Jack Knife global periodo 2017

Fuente: Elaboración Propia

Con la Figura 4.9, se logra visualizar globalmente la lista de criticidad de falla, que en niveles jerárquicos superiores pueden observar donde deben dirigir los recursos de forma eficiente para obtener los mejores retornos de inversión. Notar que la lista se compone por los códigos de falla 4,5 y 9, cuyo orden de criticidad sería distinto de usar un método tradicional mono-criterio.

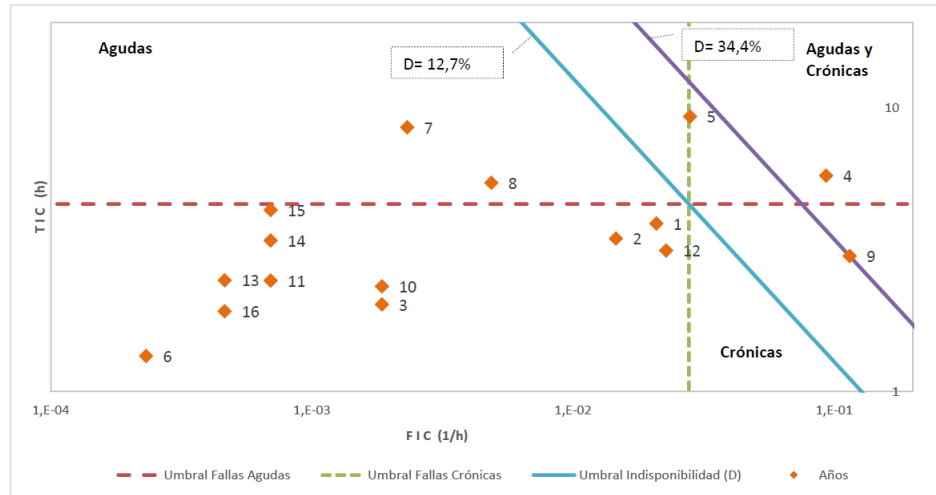


Figura 4.10: Diagrama Jack Knife global Periodos Agrupados

Fuente: Elaboración Propia

La posibilidad de realizar una análisis conjunto entre la Figura 4.9 y Figura 4.10 adquiere relevancia, debido a que es posible extraer claves de gestión sobre los modos de falla, es así como en un periodo en particular contrastado con el periodo global, expone por ejemplo los códigos de falla 4,5,9 no han sufrido modificación en la criticidad prácticamente. Por lo tanto, evaluar las medidas, ya que, se podría presumir ineficacia en lo priorizado o las acciones por parte del área encargada no han causado los resultados esperados.

Mediante un análisis estratificado, es posible determinar si la problemática preponderante es del ámbito de la confiabilidad o de la mantenibilidad. Es mas se pueden evidenciar fallar crónicas, que debido a que se producen con tanta frecuencia que en realidad se convierten en el costo de hacer negocios. Las empresas llegan a tener gran experiencia en trabajar en estos eventos que en realidad se convierten en parte del trabajo del día a día.

El mismo análisis anterior se puede realizar en miras de tomar decisiones a largo plazo, la Figura 4.10 se compone de los tres periodos a la vez, confirmando la lista anterior.

- **Análisis por Clusters:** La Figura 4.11 es construida incluyendo todas las zonas diferenciadas, una gráfica por periodo. El objetivo es formar clusters para cada falla, luego analizar buenas practicas que estarían haciendo la diferencia entre clusters, pesquisar alguna oportunidad y replicar entre zonas. Buscar que el *Know how* sea compartido entre zonas.

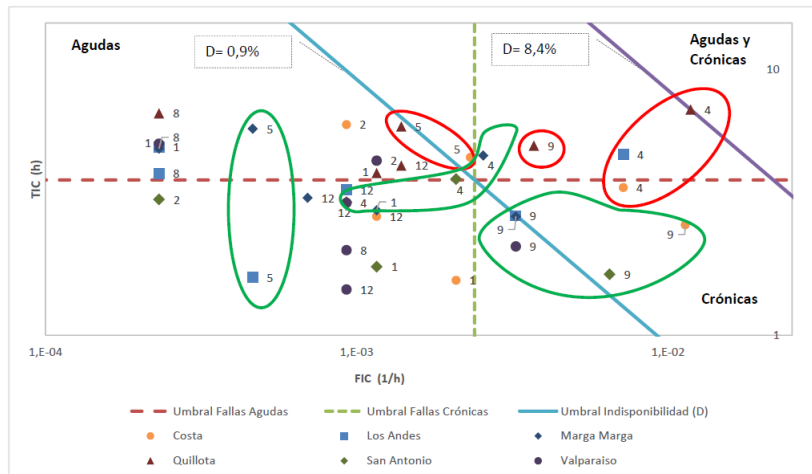


Figura 4.11: Clusters modos de falla entre Zonas periodo 2016, mediante JKD

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4.11 se observan clusters para los modos de falla que son parte de la lista de priorización. Los clusters se diferencian con colores (rojo y verde). Si se analiza el código 9, de color verde muestra fallas que afecta la confiabilidad, falla de carácter crónico. Sin embargo el cluster rojo es muy particular, ya que, la falla combina problemas de mantenibilidad y confiabilidad. Se debe extraer buenas practicas del cluster verde y ser replicadas en la zona Quillota.

Otro objeto de análisis son los códigos 4 y 5, las recomendaciones son similares a la anteriores. Pero se destaca que en los tres códigos mencionados la zona Marga Marga cuenta con practicas que debieran ser revisadas y replicadas de ser posible. Por otra parte, la zona Quillota se encuentra en los cluster que presentan mas dificultades.

5 | CONCLUSIÓN

En los distintos métodos de criticidad, cada cual, con distintas utilidades y cada uno con su complejidad de implementación. Muchos de estos no responden a los requerimientos de rapidez, facilidad de análisis, seguimiento. Necesidades indispensables, debido a, los cambios vertiginosos de los mercados. Y los métodos que tienen la característica de rapidez y facilidad de análisis, se diferencian notablemente.

En la parte 1 de este documento concluye fehacientemente la idoneidad del método JKD, por sobre el método diagrama de Pareto. Se observó, diferencias claves, que contribuyen a la eficiencia y eficacia en la destinación de recursos. Además, de las características mencionadas, el método seleccionado debe interactuar con las variables por las cuales la industria es regulada. Con el método JKD, se puede concentrar el análisis a través del KPI indisponibilidad.

Este método, dentro de sus cualidades, esta la de ser personalizable, ya se utilizó en la creación de los umbrales los promedios, pero en estos se pueden utilizar las medianas, e incluso como organización pueden fijar valores metas por criterios expertos o en base benchmarking con empresas de nivel mundial. Considerar especialmente el caso del umbral de indisponibilidad debe exigir una gestión igual o menor que el marco regulador. Si bien los resultados de los análisis cambiaran, el procedimiento debe tomarse a mediano y largo plazo para ser comparable.

En los casos examinados, comparativamente las listas de modos de falla críticos fueron priorizadas de forma distinta, inclusive hubo códigos que en métodos tradicional tenían un carácter crítico, en la aplicación del método multi-criterio se consideran como no-críticos. El método permite una mayor precisión en la lista de prioridades, lo que permite una gestión más eficiente de los recursos tendientes a la disminución en los tiempos de interrupción del suministro.

Una vez identificada la criticidad de modos de falla, se procede al análisis de estratos inferiores de la falla. Esto se puede realizar teniendo un esquema organizativo de la información óptimo de las fallas. En este análisis se observan códigos de falla que no permiten la estratificación de subconjuntos de falla, es el caso de la falla "Condiciones Atmosféricas". Por otro lado, existen estratos un poco confusos, como en la descomposición de la falla mantenimiento, se encuentra una estrato llamado "Falta de Mantenimiento", esta puede generar que la empresa confíe en los planes de mantenimiento y se despreocupe por los procedimientos

de cada plan.

Se expuso de manera importante la versatilidad del método JKD, en cuanto a los diferentes modos de visualización, que permiten realizar un análisis distinto en cada enfoque. Es así como una presentación muestra de manera clara la tendencia de un modo de falla en periodos consecutivos, evidenciando la efectividad de las medidas tomadas. Otro de los enfoques ayuda en el panorama global de la organización, permitiendo a los niveles jerárquicos superiores comprender la destinación de recursos a la falla.

Un enfoque relevante, es el que permite la posibilidad de compartir experiencias mediante la utilización de clusters en el análisis para cada código, esto evoca el compartir el “Know how” de cada cluster. Se hace uso, a través, de la gestión del conocimiento, generando una mirada holística en la organización.

Finalmente se observa que todos los enfoques mostrados, generan información que contribuye a la toma de decisión estratégica para la empresa. JKD, permitirá gestionar de forma guiada, rápida y con el seguimiento oportuno, los pasos a seguir en la planeación en el área de mantenimiento.

Evitando el desatino de los recursos, en gestiones en las cuales no se obtiene la mayor rentabilidad (disponibilidad). En este caso la mejora continua de la calidad, planteada por Edwards Deming, ciclo (PDCA), permiten a las empresas una mejora integral de la competitividad y este método por las características mostradas es adecuado para este fin.

Bibliografía

- Aguilar-Otero, José R; Torres-Arcique, Rocío; y Magaña-Jiménez, Diana (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (amfec) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25(1). 3.6.1
- Aja Quiroga, Lourdes (2002). Gestión de información, gestión del conocimiento y gestión de la calidad en las organizaciones. *Acimed*, 10(5), 7–8. 3.4
- Al-Turki, Umar (2011). A framework for strategic planning in maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(2), 150–162. 3.1
- Almaguer, Katia Onelia Carralero; Hijuelos, Bernardo Zaragoza; González, Riolvi Acosta; y Díaz, Day-rien Corrales (2013). Sistema de confiabilidad integral de activos (scia). *Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity*. 3.7
- Autores, Varios (2006). Panorama energético de Chile. <https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/11769v2pp593.pdf>. 3.11
- Autores, Varios (2016). Phva: Procedimiento lógico y por etapas para la mejora continua. <https://safetia.co/phva-procedimiento-logico-y-por-etapas/>. (document), 3.3
- Backlund, Fredrik y Akersten, Per-Anders (2003). Rcm introduction: process and requirements management aspects. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 9(3), 250–264. 3.6.1
- Bevilacqua, Maurizio y Braglia, Marcello (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1), 71–83. 3.7
- Bitros, George C (1976). A statistical theory of expenditures in capital maintenance and repair. *Journal of Political Economy*, 84(5), 917–936. 3.2
- Cárcel Carrasco, Javier (2014). La gestión del conocimiento en la ingeniería del mantenimiento industrial: Investigación sobre la incidencia en sus actividades estratégicas. *OmniaScience Monographs*. 3.2
- Chávez Guevara, Andrés Vladimir y Villarroel Guerrero, Jorge Luis (2012). Elaboración de un programa de mantenimiento para el equipo caminero del municipio del cantón pujilí. B.S. thesis, QUITO/EPN/2012. 3.5
- Chumacero, Rómulo A; Paredes M, Ricardo; y Sánchez C, José Miguel (2000). Regulación para crisis de abastecimiento: Lecciones del racionamiento eléctrico en Chile. *Cuadernos de Economía*, (pp. 323–338). 1
- CNE (2017). Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución. (document), 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.12
- Cooke, Roger M; Jager, Eric; y Lewandowski, D (2003). Reliability model for underground gas pipelines. *Case Studies in Reliability and Maintenance*, 28(1), 432–446. 3.7
- Davis, R (1997). Making tpm a part of life. *Research Report TPM Experience*. 3.6.1

- de Energía, M (2016). Energía 2050 política energética de Chile. *Ministerio de Energía (In Spanish)*. 1, 3.11
- Díaz Valenzuela, Matías Patricio (2016). Análisis de datos en servicio de confiabilidad prestado a una planta de remoción de ripsos. 3.8, 3.9
- Durán, José Bernardo (2000). Qué es confiabilidad operacional. *Revista Club Mantenimiento*, 1(2). 3.8
- Francois, MONCHY (1989). A função manutenção. *Editora Brasileira/Editora Duran*. 3.8
- García, Manuel; Quispe, Carlos; y Ráez, Luis (2003). Mejora continua de la calidad en los procesos. *Industrial Data*, 6(1). 3.3
- Gass, Saul I y Rapcsák, Tamás (2004). Singular value decomposition in ahp. *European Journal of Operational Research*, 154(3), 573–584. 3.7
- Geraghty, Tony (1996). Rcm and tpm—complementary rather than conflicting techniques. *Metallurgia*, 63(June), 231. 3.6.1
- Grajales, Dairo H Mesa; Sánchez, Yesid Ortiz; y Pinzón, Manuel (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia et technica*, 1(30). 3.8
- Hansson, Jonas; Backlund, Fredrik; y Lycke, Liselott (2003). Managing commitment: increasing the odds for successful implementation of tpm, tpm or rcm. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 20(9), 993–1008. 3.1, 3.6.1
- Jardine, Andrew KS y Tsang, Albert HC (2005). *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*. CRC press. 3.10.2
- Karydas, DM y Gifun, JF (2006). A method for the efficient prioritization of infrastructure renewal projects. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(1), 84–99. 3.7
- Knights, Peter F (2001). Rethinking pareto analysis: maintenance applications of logarithmic scatterplots. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 7(4), 252–263. (document), 3.10.2, 3.10.2, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 4.1
- Knights, Peter F (2004). Downtime priorities, jack-knife diagrams, and the business cycle. *Maintenance Journal*, 17(2), 14–21. (document), 3.6, 3.10.1, 3.10.2, 3.10.2, 3.10.2
- Nakajima, Seiichi (1988). Introduction to tpm. productivity. 3.6.1
- Nakajima, Seiichi (1989). *TPM Development Program: Implementing Total Productive Maintenance. Preventative Maintenance Series*. Productivity press. 3.6.1
- Pascual, Rodrigo; Del Castillo, G; Louit, D; y Knights, Peter (2009). Business-oriented prioritization: A novel graphical technique. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(8), 1308–1313. 3.7, 3.10.2, 3.10.2
- Pastén, César (2012). Chile, energía y desarrollo. *Obras y proyectos*, 11, 28–39. 1
- Pérez, Carlos Mario (2003). Confiabilidad y evolución del mantenimiento. 3.9
- Pico Espín, Edith Carolina (2016). Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para la inyectora de poliuretano de la empresa calzado marcia-búfalo industrial. B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas . . . 3.5
- Rodríguez, Ángel (2010). La gestión de los activos físicos en la función mantenimiento. *Ing. Mecánica*, 13(2), 72–78. 3.2
- Sales, Matías (2009). Diagrama de pareto. *Recuperado el*, 15. 3.10.1
- Seecharan, Turuna; Labib, Ashraf; y Jardine, Andrew (2018). Maintenance strategies: Decision making grid vs jack-knife diagram. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 24(1), 61–78. 1, 3.10.2

- Smith, Anthony M (1993). *Reliability-centered maintenance*. McGraw-Hill Companies. 3.6.1
- Tavares, Lourival Augusto (1999). *Administración moderna de mantenimiento*. Novo Polo Publicacoes. (document), 3.5, 3.4, 3.5
- Tempest, PA (1976). A model of industrial maintenance control. *Production Engineer*, 55(9), 459–462. (document), 3.2
- Tituaña, Cisneros y Edward, Roberto (2014). Propuesta de mejoramiento de la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de maquinaria en el proceso de elaboración de filtros de tabacalera andina sa tanasa. B.S. thesis, Quito: EPN, 2014. 3.6.2
- Visser, JK (1998). Modelling maintenance performance: a practical approach. In *IMA conference, Edinburgh* (pp. 1–13). (document), 3.1, 3.1
- Woodward, David G (1997). Life cycle costing—theory, information acquisition and application. *International journal of project management*, 15(6), 335–344. 3.2
- Zavala Gaibor, Marcos Antonio (2017). Implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (rcm) en el grupo electrógeno fg-wilson p-300 de las granjas avícolas de la empresa procesadora nacional de alimentos zona bucay. Master's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. (document), 3.5



A | ANEXOS

A.1. Análisis Comparativo Histograma Pareto vs JKD

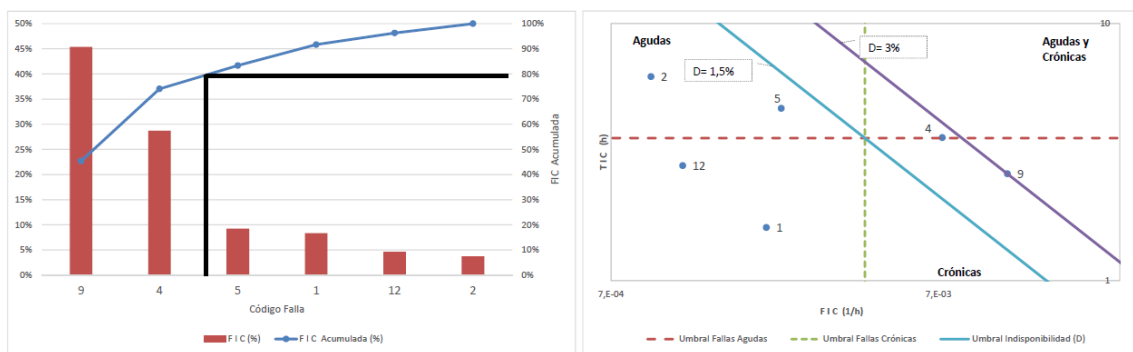


Figura A.1: Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Costa periodo 2016

Fuente: Elaboración Propia

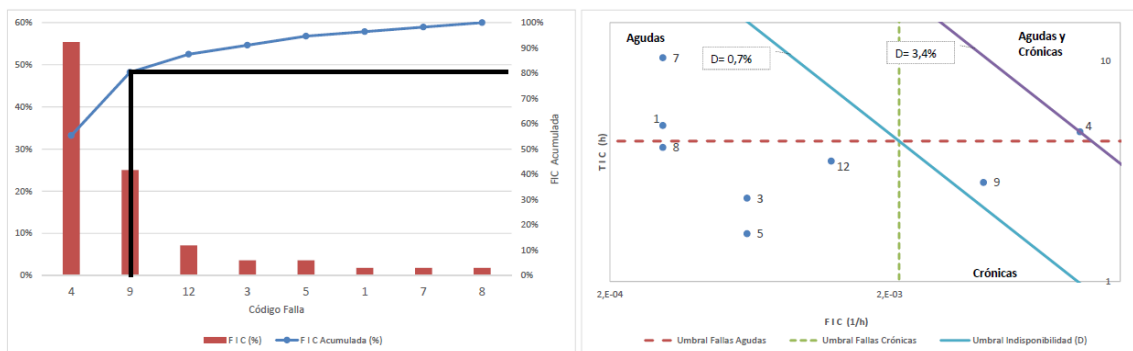
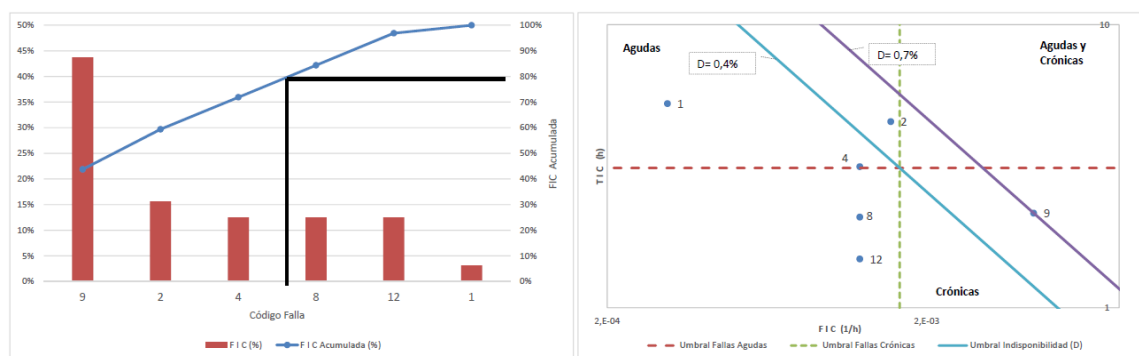
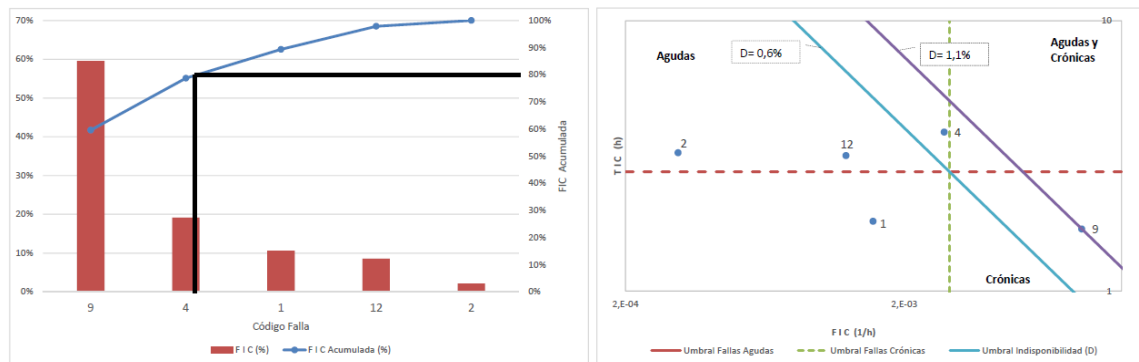
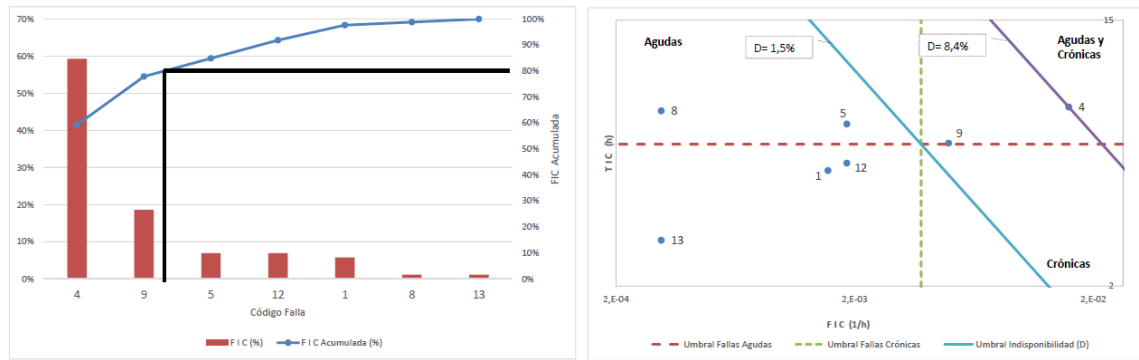
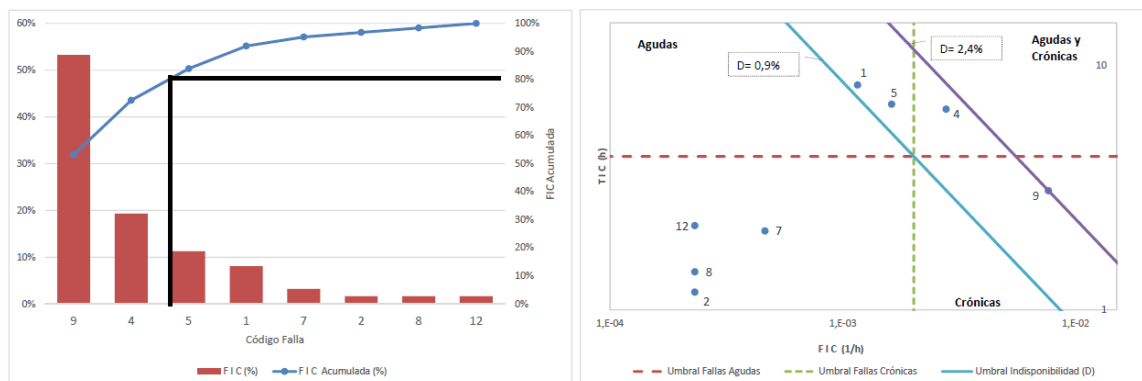
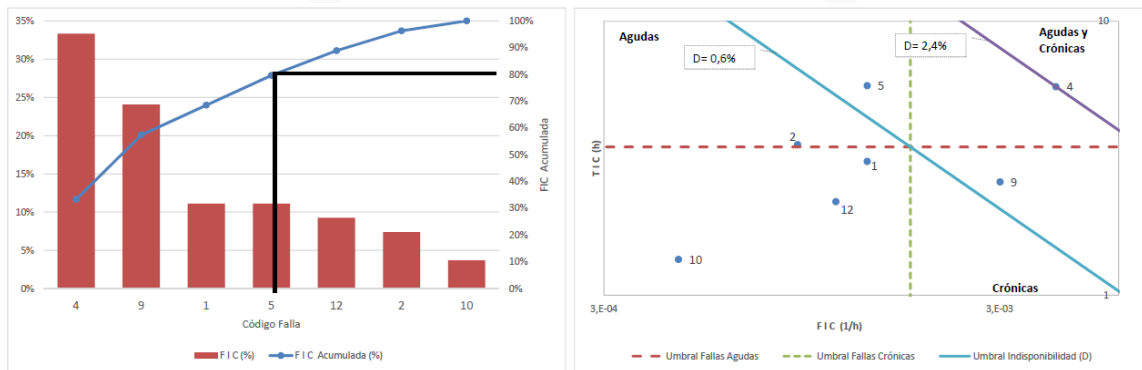
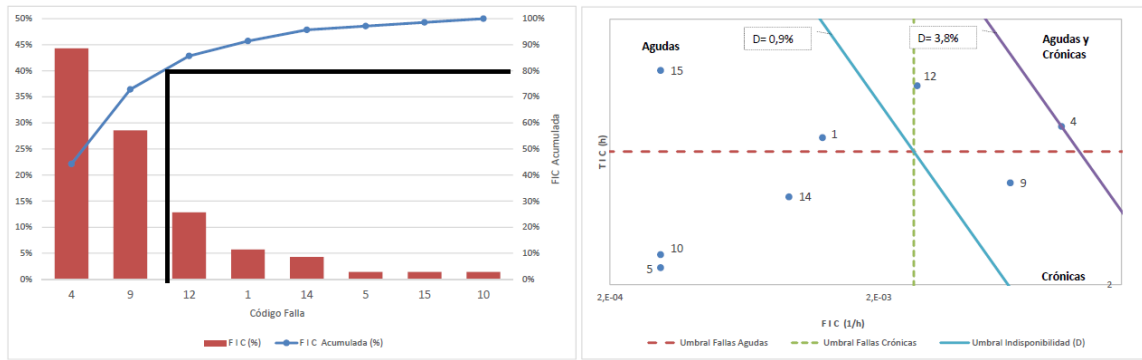


Figura A.2: Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Los Andes periodo 2016

Fuente: Elaboración Propia





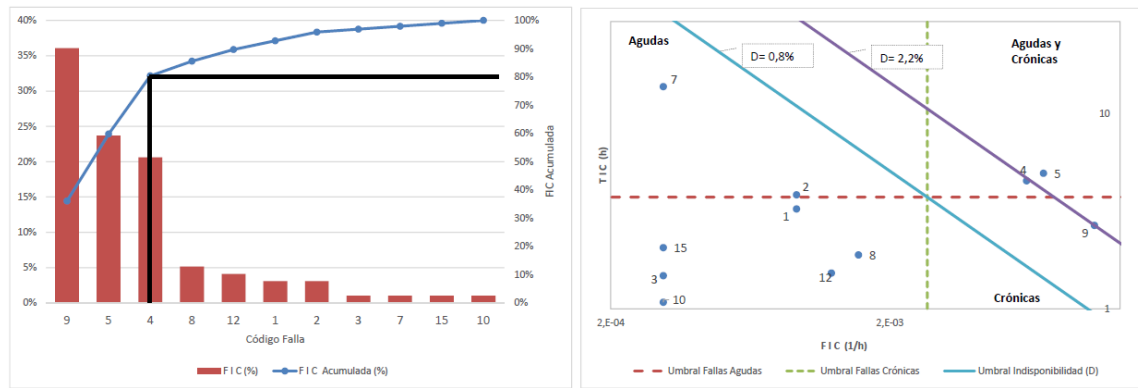


Figura A.9: Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Valparaíso periodo 2017

Fuente: Elaboración Propia

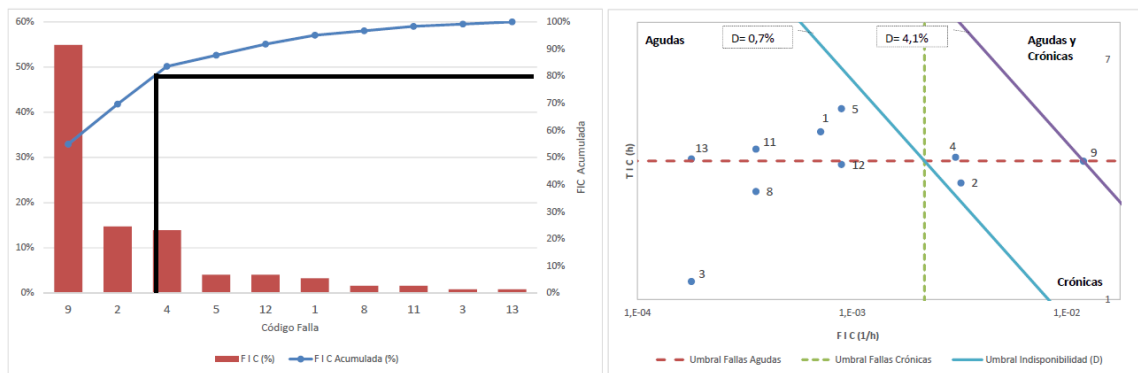


Figura A.10: Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Costa periodo 2018

Fuente: Elaboración Propia

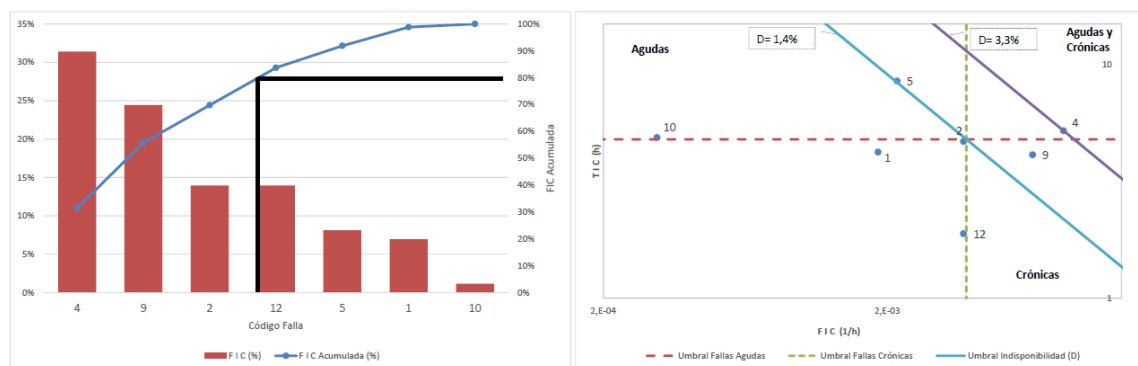
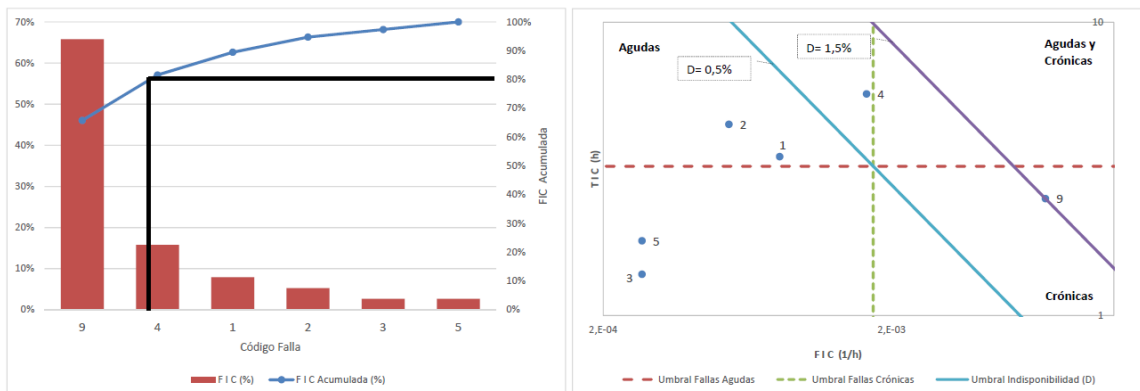
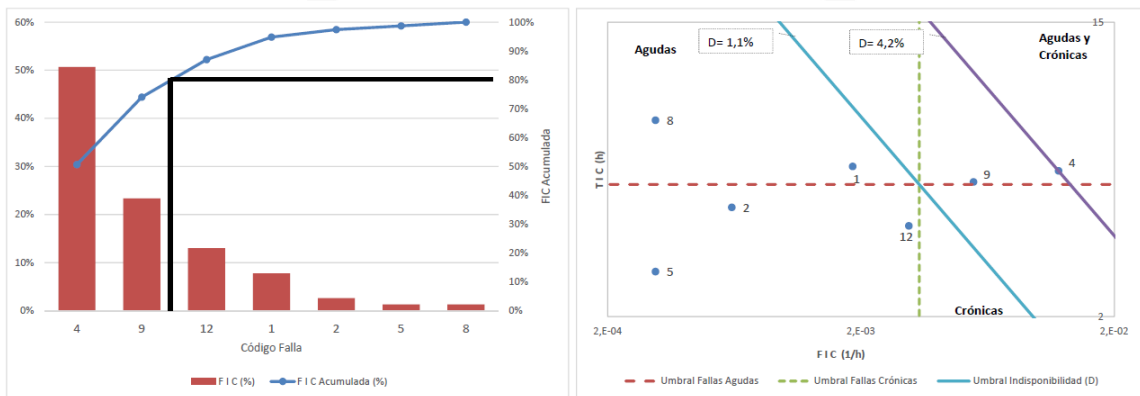
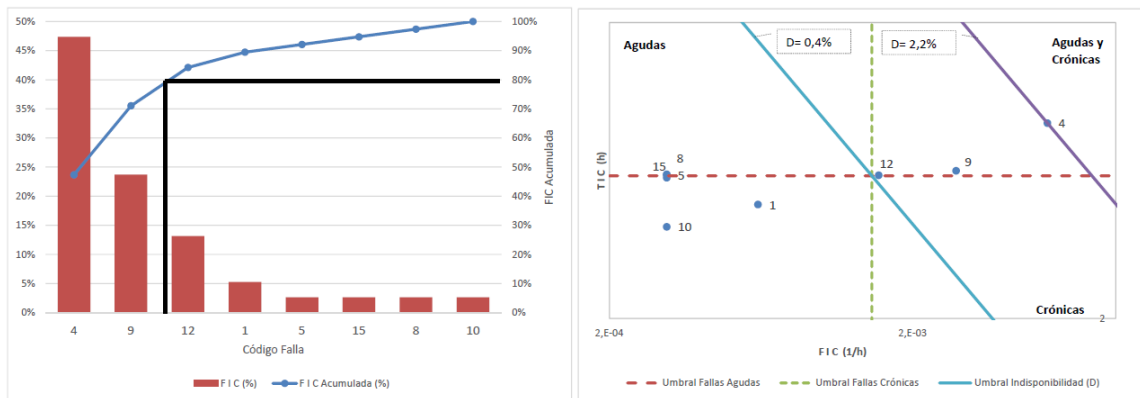


Figura A.11: Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Los Andes periodo 2018

Fuente: Elaboración Propia



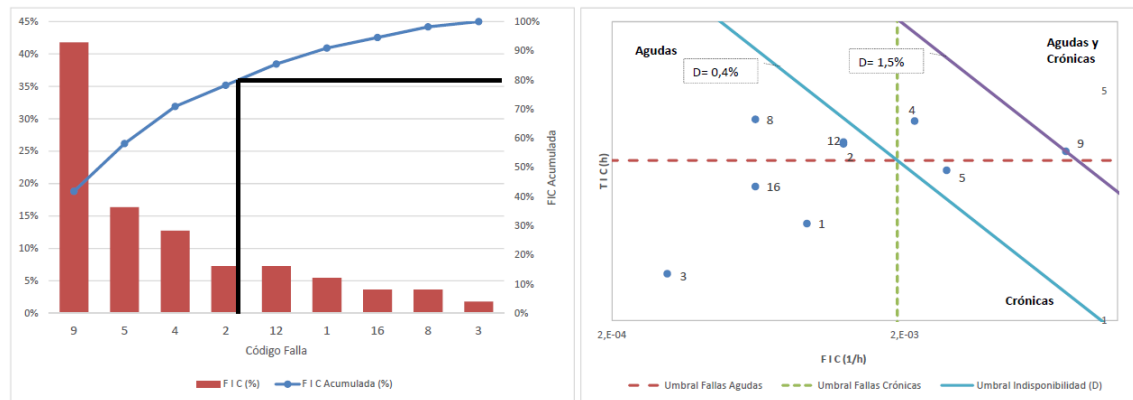


Figura A.15: Histograma de Pareto vs Diagrama Jack Knife Zona Valparaíso periodo 2018

Fuente: Elaboración Propia

A.2. Análisis Tendencia de Zonas a través de los Periodos

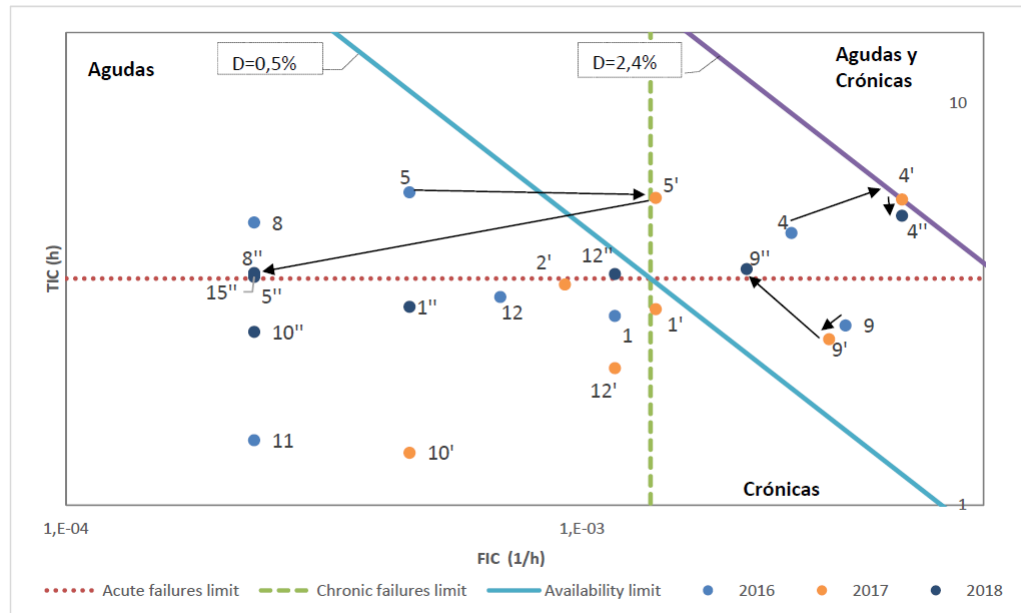


Figura A.16: Tendencia modos de falla Zona Marga Marga, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD

Fuente: Elaboración Propia

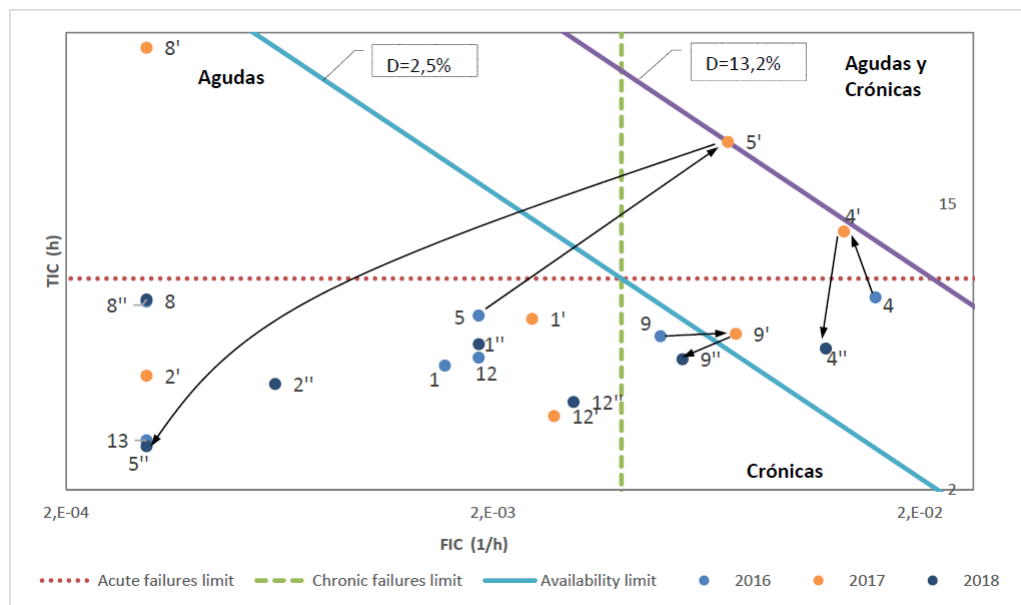


Figura A.17: Tendencia modos de falla Zona Quillota, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD

Fuente: Elaboración Propia

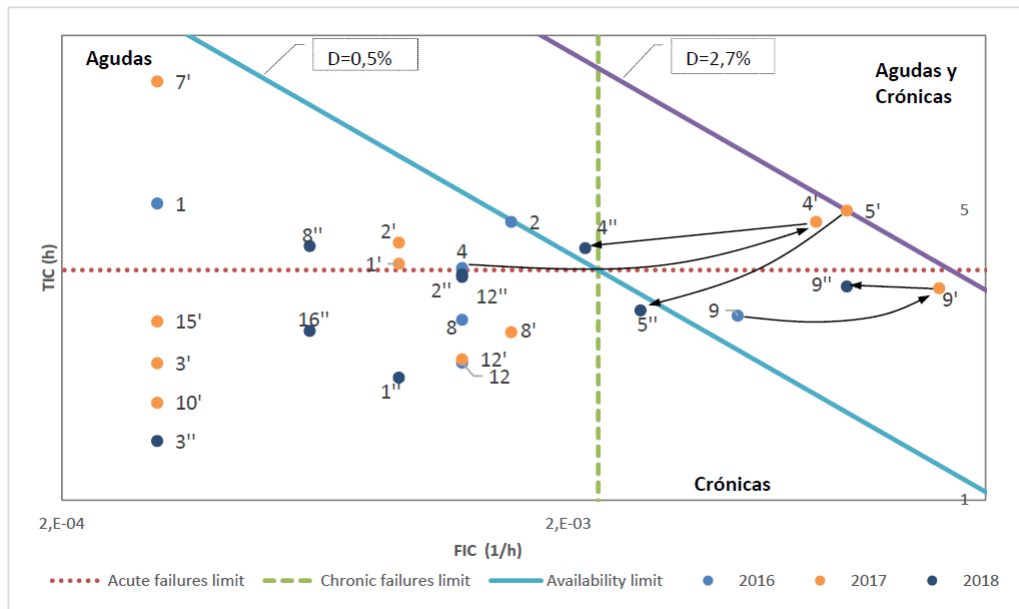


Figura A.18: Tendencia modos de falla Zona Valparaíso, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD

Fuente: Elaboración Propia

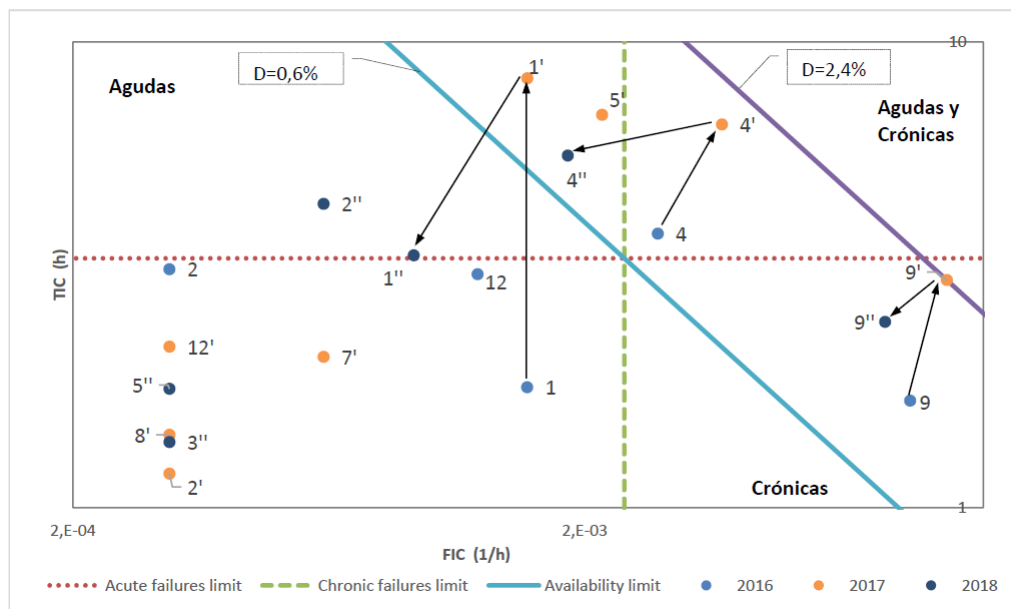


Figura A.19: Tendencia modos de falla Zona San Antonio, a través de los periodos 2016, 2017 y 2018 con JKD

Fuente: Elaboración Propia

A.3. Figuras Modos de Falla - Zonas por Periodo

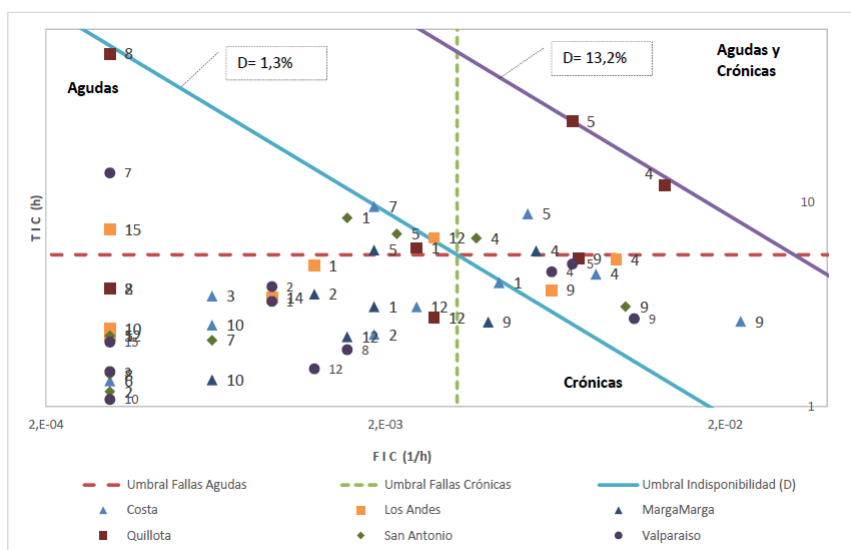


Figura A.20: Comparación de criticidad de modos de falla entre Zonas periodo 2017, mediante JKD

Fuente: Elaboración Propia

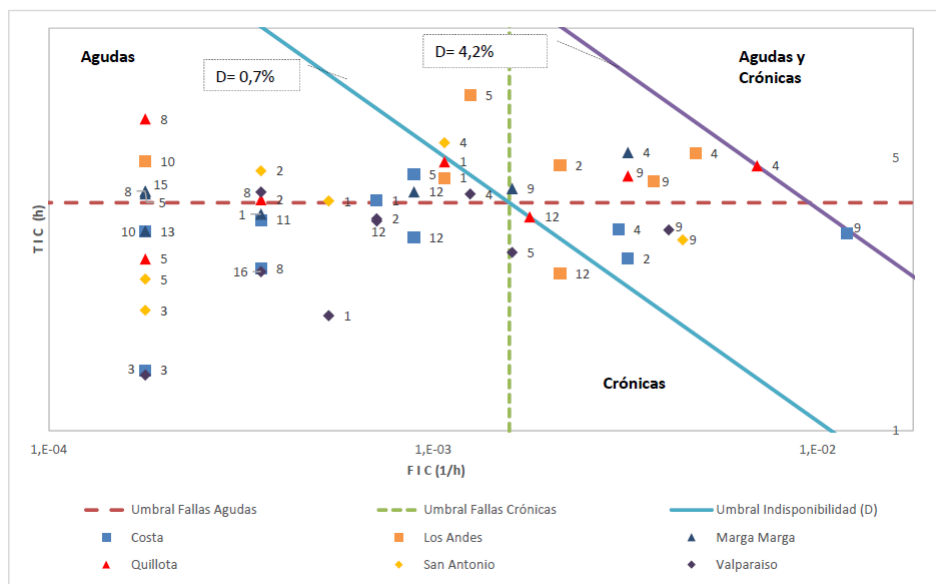


Figura A.21: Comparación de criticidad de modos de falla entre Zonas periodo 2018, mediante JKD

Fuente: Elaboración Propia

A.4. Figuras Modos de Falla - Periodo

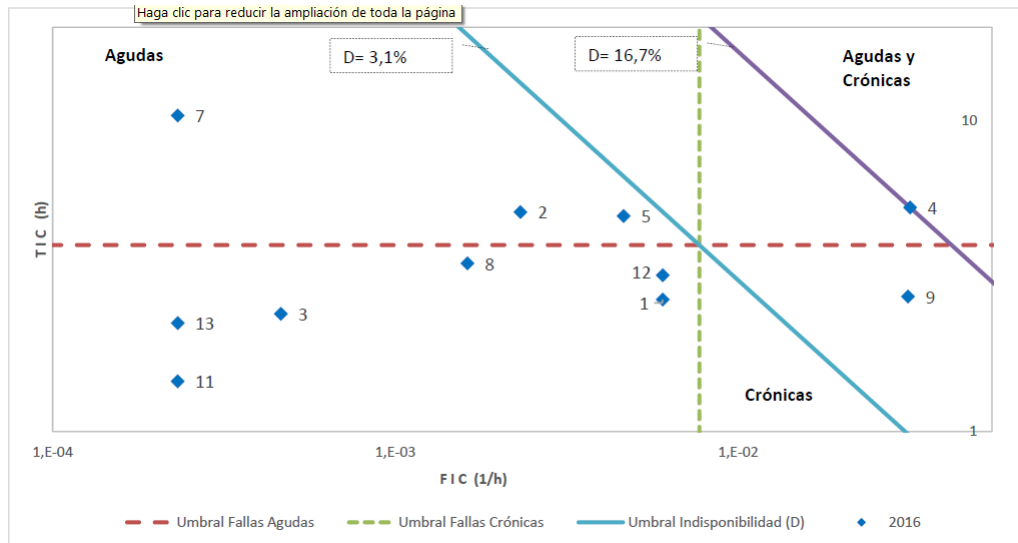


Figura A.22: Diagrama Jack Knife global periodo 2016

Fuente: Elaboración Propia

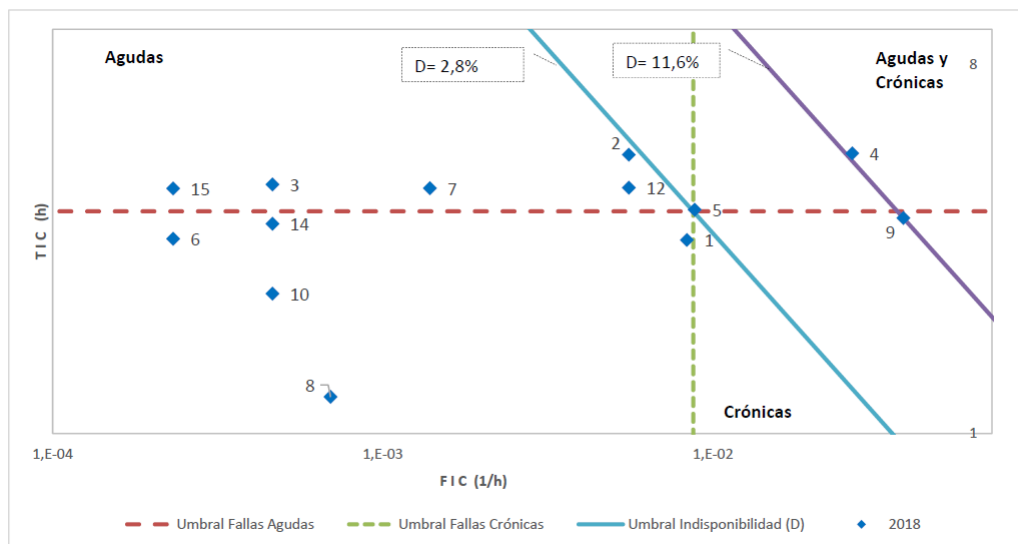


Figura A.23: Diagrama Jack Knife global periodo 2018

Fuente: Elaboración Propia