

# UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



## ESTUDIO DE FACTIBILIDAD EN LA IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD APLICADO A EQUIPOS MÉDICOS CRÍTICOS

**Constanza Alicia MENDOZA RÍOS**

*Profesor Patrocinante: Dr. Enrique López Parra (DIE)*

*Profesor Co-Patrocinante: Dr. Gabriel Barrientos Ríos (DIM)*

Concepción, Octubre de 2014

# Tabla de Contenidos

RESUMEN.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	VII
ABREVIACIONES.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	X
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZACIÓN.....	1
1.1.1. <i>Objetivos Generales</i> .....	1
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	1
1.1.3. <i>Alcances y Limitaciones</i> .....	2
1.2. MANTENIMIENTO EN HOSPITALES .....	2
1.2.1. <i>Priorización del equipamiento médico</i> .....	3
1.2.2. <i>Mantenimiento equipos médicos críticos en hospitales</i> .....	3
1.3. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	6
<b>CAPÍTULO 2. MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD.....</b>	<b>8</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	8
2.2. METODOLOGÍA DEL RCM.....	9
2.2.1. <i>Preguntas de RCM</i> .....	9
2.2.2. <i>Bases teóricas del análisis de falla del RCM</i> .....	13
2.3. MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE EQUIPOS MÉDICOS CRÍTICOS .....	13
2.3.1. <i>Criterio de Fennigkoh y Smith</i> .....	13
2.4. JERARQUIZACIÓN DE FALLAS .....	13
2.4.1. <i>Análisis de Pareto</i> .....	14
2.4.2. <i>Criterio de Jackknife</i> .....	14
2.5. IDENTIFICACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA .....	15
2.5.1. <i>Distribución estadística exponencial</i> .....	16
2.5.2. <i>Distribución estadística de Weibull</i> .....	17
2.6. FRECUENCIA DE LAS MANTENCIONES.....	19
2.6.1. <i>Modelo 1: Frecuencia de mantenencias en el contexto hospitalario</i> .....	19
2.6.2. <i>Modelo 2: Frecuencia de mantenencias con mantenimiento preventivo mínimo</i> .....	20
2.6.3. <i>Modelo 3: Frecuencia de mantenencias con una tasa de fallas de Weibull</i> .....	21
2.7. ACREDITACIÓN .....	23
2.8. SOLUCIÓN PROPUESTA .....	24
2.9. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	26
<b>CAPÍTULO 3. APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>

3.1.	INTRODUCCIÓN .....	27
3.2.	LEVANTAMIENTO DE DATOS .....	27
3.3.	APLICACIÓN DE LAS PREGUNTAS DEL RCM.....	28
3.3.1.	¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo? .....	28
3.3.2.	¿De qué manera (se) falla en satisfacer dichas funciones? .....	32
3.3.3.	¿Cuál es la causa de cada falla? .....	33
3.3.4.	¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?.....	33
3.3.5.	¿En qué sentido es importante cada falla?.....	35
3.3.6.	¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla? .....	35
3.4.	CRITERIO DE JACKKNIFE .....	39
3.4.1.	Aplicación 1: Ventilador mecánico.....	39
3.4.2.	Aplicación 2: Máquina de anestesia.....	40
3.5.	DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA .....	42
3.5.1.	Aplicación 1: Ventilador mecánico.....	43
3.5.2.	Aplicación 2: Máquina de anestesia.....	45
3.6.	DETERMINACIÓN DE LA PERIODICIDAD DE LAS MANTENCIONES .....	47
3.6.1.	MTRR y MTI .....	47
3.6.2.	Costos .....	49
3.6.3.	Constante “k” .....	50
3.6.4.	Frecuencia de mantenencias.....	51
3.7.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	53
	<b>CAPITULO 4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>58</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA .....</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>64</b>
	<b>A. HOJA DE TRABAJO DE VENTILADOR MECÁNICO .....</b>	<b>64</b>
	<b>B. HOJA DE TRABAJO DE MÁQUINA DE ANESTESIA .....</b>	<b>65</b>
	<b>C. TEORÍA DE CONFIABILIDAD .....</b>	<b>66</b>
C.1.	Confiabilidad .....	66
C.2.	Definición de desconfiabilidad.....	66
C.3.	Función de densidad de fallas.....	67
C.4.	Definición de tasa de falla .....	68
C.5.	Disponibilidad e Indisponibilidad.....	69
	<b>D. TABLAS DEL CRITERIO DE FENNIGKOH Y SMITH [15].....</b>	<b>71</b>
	<b>E. LEVANTAMIENTO DE DATOS MÁQUINAS DE ANESTESIA PENLON.....</b>	<b>73</b>
	<b>F. LEVANTAMIENTO DE DATOS VENTILADORES MECÁNICOS VIASYS.....</b>	<b>74</b>
	<b>G. CICLO OPERACIÓN – REPARACIÓN PARA LOS VENTILADORES MECÁNICOS.....</b>	<b>77</b>

<b>H. CICLO OPERACIÓN – REPARACIÓN PARA LAS MÁQUINAS DE ANESTESIA.....</b>	<b>80</b>
<b>I. TFS DE LAS MÁQUINAS DE ANESTESIA .....</b>	<b>81</b>
<b>J. TFS DE LOS VENTILADORES MECÁNICOS .....</b>	<b>82</b>
<b>K. FMECA DE LOS VENTILADORES MECÁNICOS.....</b>	<b>84</b>
<b>L. FMECA DE LAS MÁQUINAS DE ANESTESIA .....</b>	<b>86</b>
<b>M. DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE“K” .....</b>	<b>88</b>

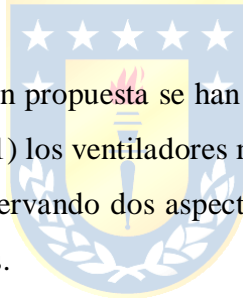


## Resumen

El equipamiento médico crítico es el soporte vital de las personas que carecen de autonomía fisiológica. Dentro de los centros de salud, su alta disponibilidad es fundamental. Una de las medidas para lograrlo son las mantenciones preventivas realizadas por empresas externas, cuya periodicidad se establece en acuerdo entre ambas partes. El ámbito legal y de acreditación hospitalaria, exige solo la existencia de protocolos o la evidencia de la realización del mantenimiento preventivo, pero no detalla cómo y con qué frecuencia se debe ejecutar. Existiendo así, un vacío en este ámbito.

En consecuencia, la motivación teórica de este estudio es: a) contribuir a cómo aplicar la teoría de confiabilidad al mantenimiento preventivo hospitalario, b) proponer un procedimiento de frecuencia óptima de mantenimiento, c) aportar al marco legal y la acreditación de equipos hospitalarios y d) otorgar mayor grado de objetividad al mantenimiento hospitalario.

No obstante la generalidad de la solución propuesta se han escogido, dentro de los equipos médicos críticos de terreno, dos casos ejemplos: 1) los ventiladores mecánicos y 2) las máquinas de anestesia. Estos equipos fueron seleccionados observando dos aspectos: a) su composición electromecánica y b) exhibir una fuente abundante de datos.



En consecuencia con lo anterior, para estos equipos a través del FMECA y el criterio de Jackknife, se evidencia que las fallas son provocadas principalmente por fallas en la operación del equipo. Como resultado, este trabajo concluye sobre: i) la necesidad de capacitar al personal y ii) planificar un stock o prever la compra de ciertos componentes de los equipos considerados i.e., sensores de flujo y de oxígeno. Todo lo previo, evitaría los costos asociados a la ocurrencia de grandes indisponibilidades.

La frecuencia de mantenimiento preventivo recomendada para el ventilador mecánico y la máquina de anestesia son 2,5 y 2 meses, respectivamente. En ambos casos, estas frecuencias son superiores a las actuales. Esto último, involucraría una mayor cantidad de recursos económicos.

Finalmente, dadas las condiciones actuales del mantenimiento preventivo intrahospitalario, un mantenimiento continuo, que vaya midiendo el impacto de la confiabilidad en el equipamiento médico crítico, se proyecta como una meta de largo plazo.





*A mi madre, abuelita Alicia y Abuelito Renato.*

## Agradecimientos

Al Dr. Gabriel Barrientos Ríos, académico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción por introducirme al tema de la ingeniería de mantenimiento. Reconozco así mismo, su apoyo y buena predisposición al momento de responder a mis dudas.

Al Dr. Enrique López Parra, por guiarme durante el desarrollo de esta memoria. Le ruego que acepte mi reconocimiento por la confianza, e interés que me otorgó y el haber compartido sus conocimientos de ingeniería de confiabilidad. Además, agradezco sus consejos y su sabia conversación que fueron, siempre, un aporte a mi formación profesional.

Al Dr. Esteban Pino Quiroga, por su apoyo durante toda mi carrera universitaria y formarme en las distintas áreas de la Ingeniería Biomédica.

A mi familia, en especial a mi madre y abuelitos por su incondicionalidad y sus palabras de aliento.

A Andrés por apoyarme, estos últimos 3 años, con sus consejos, amor y alegrías.

A Ricardo Hernández, un gran amigo y compañero de carrera, a Pía Gutiérrez y Armin Aravena, amigos de toda la vida, siempre estuvieron presentes.

A todo el personal del HGGB, que estuvo dispuesto a ser un aporte para esta memoria de título. Don Leandro, Don René, Doña Gilda y Doña Angie. En especial a Don Ricardo, por el interés mostrado en el tema propuesto. A Don Carlos, Don Flavio y Don Patricio, por sus consejos y gran predisposición a prestar su ayuda en lo que fuera necesario.

A Dios por darme la fuerza y las condiciones para poder continuar estudios superiores.

*“Les temps sont durs pour les rêveurs”*

*Amélie*



## Abreviaciones

RRFF	:	Recursos Físicos
H.H	:	Hospital Las Higueras
HGGB	:	Hospital Guillermo Grant Benavente
OMS	:	Organización mundial de la salud
CMMS	:	Sistemas Computacionales de Gestión del Mantenimiento
S.D.		Subdirección
C.R.		Centro de responsabilidad
E.M.C	:	Equipamiento médico crítico
FMECA		failure mode, effects and criticality analysis
TTR		“Time to repair” (Tiempo para reparar)
TTF	:	“Time to failure” (Tiempo para la falla)
MTTR	:	Tiempo fuera de servicio por reparación
MTTF	:	Tiempo medio para fallar
MTBF	:	“Mean time between failure” (Tiempo medio entre fallas)
TFS	:	Tiempo fuera de servicio
TBF	:	Tiempo de buen funcionamiento
A	:	“Availability”(disponibilidad)
$\lambda$	:	Tasa de falla
U	:	“Unavailability” (Indisponibilidad)
F	:	Falla
RCM		“Reliability Centered Maintenance” (Mantenimiento basado en Confiabilidad)
ACR	:	Análisis Causa Raíz
AMFE	:	Análisis de modos de falla y sus efectos
AHP		“Analytic Hierarchy Process” (Proceso Analítico Jerárquico)
UMNDS	:	“Universal Medical Device Nomenclature System”
M.P	:	Mantenimiento preventivo
M.C	:	Mantenimiento correctivo
ut		Unidad de tiempo

## Indice de Tablas

Tabla 1.1. Programación de las mantenciones preventivas .....	4
Tabla 2.1. Hoja de FMECA.....	12
Tabla 2.2. Hoja de decisión de RCM.....	12
Tabla 2.3. Tabla resumen de las propiedades de la distribución exponencial. ....	16
Tabla 2.4. Tabla resumen de las propiedades de la distribución Weibull .....	17
Tabla 3.1. Funciones principales de equipos médicos en estudio.....	29
Tabla 3.2. Resumen de FMECA para los ventiladores AVEA .....	36
Tabla 3.3. Resumen de FMECA para las máquina de anestesia <i>Integra PS2</i> .....	38
Tabla 3.4. Tabla de datos para criterio de Jackknife para ventilador mecánico .....	40
Tabla 3.5. Tabla de datos para criterio de Jackknife para máquina de anestesia .....	41
Tabla 3.6. MTTF para el sensor de flujo de la máquina de anestesia .....	41
Tabla 3.7. Parámetros Weibull para el ventilador mecánico.....	43
Tabla 3.8. Parámetros Weibull para máquina de anestesia .....	45
Tabla 3.9. TTR para cada tipo de falla .....	48
Tabla 3.10. MTTR y MTTI para cada tipo de equipamiento .....	48
Tabla 3.11. Costos de falla para equipos de estudio .....	49
Tabla 3.12. Costo de mano de obra “ <b>cmo</b> ” para mantenimiento. ....	50
Tabla 3.13. “ <b>cmo, i</b> ” y “ <b>cmo, r</b> ” para cada tipo de equipo .....	50
Tabla 3.14. Costo de repuestos “ <b>crep</b> ” para mantenimiento .....	50
Tabla 3.15. “ <b>crep, i</b> ” y “ <b>crep, r</b> ” por componente .....	50
Tabla 3.16. Valores de “ <b>k</b> ” para cada tipo de equipo.....	51
Tabla 3.17. Resumen de los datos obtenidos previamente. ....	52
Tabla 3.18. Resumen de los costos .....	52
Tabla 3.19. Frecuencia de mantenciones para cada equipamiento médico .....	52

## Indice de Figuras

Figura 1.1. Organigrama General de la Unidad de Equipos Médicos Clínicos .....	5
Figura 1.2. Flujograma de Mantenición Preventiva del Equipamiento Médico Crítico (E.M.C) de uso clínico HGGB <sup>[4]</sup> .....	5
Figura 1.3. Organigrama de la Unidad de Recursos Físicos del Hospital Las Higueras. ....	6
Figura 2.1. Curva P-F .....	11
Figura 2.2. Análisis de Pareto [17] .....	14
Figura 2.3. Criterio de Jackknife.....	15
Figura 2.4. Diagrama de TFS y TTR [18] .....	15
Figura 2.5. Curva de la bañera [22]. ....	17
Figura 2.6. Representación de los ciclos [24] .....	20
Figura 2.7. Macroalgoritmo del modelo de gestión para equipos médicos críticos .....	25
Figura 3.1. Hoja de vida equipos médicos críticos .....	27
Figura 3.2. Circuito interno de un ventilador mecánico .....	30
Figura 3.3. Circuito interno de una máquina de anestesia [33].....	31
Figura 3.4. Vaporizador genérico de una máquina de anestesia .....	32
Figura 3.5. Circuito paciente en la máquina de anestesia [36].....	32
Figura 3.6. Fase inspiratoria y espiratoria en el circuito paciente.....	32
Figura 3.7. Costos de repuestos de las máquinas de anestesia .....	33
Figura 3.8. Costo de repuestos de los ventiladores mecánicos. ....	34
Figura 3.9. Historial de costos de los sensores de oxígeno para los ventiladores mecánicos .....	34
Figura 3.10. Historial de costos para las baterías de los ventiladores mecánicos .....	35
Figura 3.11. Criterio de Jackknife para ventilador mecánico.....	40
Figura 3.12. Criterio de Jackknife para máquina de anestesia .....	42
Figura 3.13. Distribución Weibull para ventilador mecánico .....	43
Figura 3.14. Tasa de falla descrita para ventilador mecánico .....	43
Figura 3.15. Curva de confiabilidad para el ventilador mecánico. ....	44
Figura 3.16. Curva de mantenibilidad para el ventilador mecánico. ....	44
Figura 3.17. Función de densidad de probabilidad para ventilador mecánico.....	44
Figura 3.18. Distribución Weibull para máquina de anestesia.....	45
Figura 3.19. Tasa de falla descrita para máquina de anestesia.....	45

Figura 3.20. Curva de confiabilidad para la máquina de anestesia..... 46

Figura 3.21. Curva de mantenibilidad para la máquina de anestesia..... 46

Figura 3.22. Función de densidad de probabilidad para máquina de anestesia ..... 46

Figura 3.23. Confiabilidad de la solución propuesta para el ventilador mecánico ..... 52

Figura 3.24. Confiabilidad de la solución propuesta para la máquina de anestesia..... 53



# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1. Contextualización

En el sector productivo, tanto industrial como hospitalario, el recurso humano y de equipamiento son factores de alto impacto, haciéndose imprescindible, su alta disponibilidad. Esto se logra con el mantenimiento cuyo principal objetivo es “asegurar que todo activo físico continúe desempeñando las funciones deseadas” [1]. En caso particular de los hospitales, las mantenciones preventivas, están a cargo de los departamentos de recursos físicos y son ejecutadas por los técnicos especializados en equipos médicos. La frecuencia de estas acciones, es determinada por las especificaciones de los fabricantes, experiencia de ingenieros, sugerencias de empresas externas, como los proveedores de equipamiento que poseen la certificación- entre otras variables-. De esta forma, es una decisión que puede presentar conflicto de interés, ya que son los mismos actores que proveen y, a su vez, sugieren la periodicidad de dichos mantenimientos preventivos. De aquí deriva la motivación de este estudio, i.e., en lo principal clasificar, jerarquizar y determinar las frecuencias de las mantenciones, otorgándole así una metodología al hospital, que le entregue autonomía en sus decisiones. Los lugares de aplicación son: Hospital Las Higueras (H.H) y Hospital Regional Guillermo Grant Benavente (HGGB). Al interiorizarse sobre la modalidad de funcionamiento de los prestadores, quedó al descubierto, que el H.H posee un deficiente manejo de la secuencia de hechos, es decir, desde la detección de una falla hasta que se encuentra en óptimas condiciones, con su respectivo informe técnico. Es por ello, que actualmente el departamento de Recursos Físicos del H.H, centra sus esfuerzos en realizar una hoja de vida de todo el equipamiento médico crítico, con todas las mantenciones realizadas hasta el momento, basándose en la información disponible de las ordenes de trabajo, facturas emitidas, entre otros. Por otra parte, en el HGGB existe la información histórica de fallas, con sus respectivos informes técnicos desde el año 2009.

### 1.1.1. Objetivos Generales

- ✓ Estudiar la factibilidad de la aplicación del concepto de mantenimiento basado en confiabilidad en un hospital, con el propósito de establecer una metodología objetiva que determine la periodicidad de las mantenciones del equipamiento médico crítico.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- ✓ Proponer una estrategia de mantención preventiva a los equipos y sistemas.

- ✓ Estudiar las acciones que conlleva el levantamiento de datos.
- ✓ Evaluar, preliminarmente, la estrategia de mantención basada en dos ejemplos.

### **1.1.3. Alcances y Limitaciones**

Esta memoria busca establecer una estrategia técnico-económica adecuada de mantenimiento. Pretende establecer los lineamientos necesarios para extender su aplicación a todo tipo de equipos médicos, considerando los recursos económicos de largo plazo de un recinto hospitalario.

Hoy en día, se avizora que la principal limitación para la propuesta de este trabajo sería tanto, la disponibilidad del personal, la de recursos físicos del hospital y la burocracia del sistema, para: a) prestar atención a los objetivos definidos y b) facilitar la información que se maneje. Otros inconvenientes que se evidencian son, contar con poco personal especializado dentro de la organización.

## **1.2. Mantenimiento en hospitales**

En el mantenimiento a nivel hospitalario, para poder llevar a cabo una planificación del programa, existen tres factores, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) [2]: inventario, metodología y recursos (financieros, materiales y humanos). Los recursos materiales, incluyen lugar de trabajo, Sistemas Computacionales de Gestión del Mantenimiento (CMMS) y herramientas y equipos de medición adecuados. Estos últimos pueden ser analizadores, insumos, repuestos en lugares accesibles, manuales de uso, etc. Los primeros ayudan a dar una certeza de las lecturas y seguridad, tanto de los pacientes como del personal. Esta referencia subraya que los aspectos a considerar al momento de cambiar la frecuencia de las inspecciones son:

- Normativa
- Frecuencia de uso
- Entorno
- Fiabilidad del dispositivo
- Grado de desgaste del equipo con el uso normal
- El número y especialización de los técnicos

En [3], se desarrolló un metodología donde se definieron procesos como, a) archivo y base de datos, que tiene asociado tareas como, inventario de activos, historia de las intervenciones y acciones, proveedores y documentos, b) soporte tecnológico, sus procedimientos son, verificación del servicio externo, estado actual del equipamiento, mantenimientos correctivos y preventivos, seguridad

eléctrica y calibración, c) gestión de productos y procesos tecnológicos, aquí se evalúan los reportes de las fallas, la renovación tecnológica y los equipos de respaldo que puedan existir.

### 1.2.1. Priorización del equipamiento médico

En los hospitales existen diferentes tipos de equipamiento médico, donde sus clasificaciones son las siguientes según [3],

- Equipos de laboratorio: centrifugas, equipos de refrigeración, analizadores, entre otros.
- Soporte de vida y terapéutico: ventiladores, instrumentos quirúrgicos motorizados, dispositivos con láser, máquinas de anestesia, entre otros.
- Imágenes y terapia de irradiación: máquinas de rayos x, aceleradores lineales, dispositivos de ultrasonido, entre otros.
- Equipamiento utilizado en Transporte y la ambientación de salas: camillas, sillas de ruedas, lámparas de exploración, entre otros.
- Equipamiento utilizado en el diagnóstico del paciente: monitores fisiológicos y endoscopios, entre otros.
- Misceláneo del equipamiento médico: Se clasifica al equipamiento que no se incluye en ninguna de las 5 clasificaciones anteriores, como esterilizadores, entre otros.

Dentro de esta clasificación, los equipos de soporte de vida y terapéutico, se definen como equipos médicos críticos y, por consiguiente, le otorga prioridad en el mantenimiento, específicamente a las máquinas de anestesia, monitorización hemodinámica, desfibriladores, ventiladores fijos y de transporte, monitores de diálisis, incubadoras, ambulancia de emergencia.

### 1.2.2. Mantenimiento equipos médicos críticos en hospitales

El equipamiento médico crítico, es incluido en convenios de mantenimiento preventivo, desembolsando así, altos costos para poder aumentar su disponibilidad. Por otra parte, cuando presenta falla, los hospitales tienen metodologías para estar preparados al momento de enfrentarlas. Es por ello que, a continuación se realizará un análisis de su estructura y metodología de mantención utilizada en los dos hospitales que serán los casos de estudio, con el fin de interiorizarse de su funcionamiento:

#### 1.2.2.1. Análisis de la estructura y metodología de mantención en HGGB

El área de “Equipos Médicos Clínicos”, ver Figura 1.1, lo primero que realiza al detectar una falla, es clasificar el equipamiento según su criticidad. Cuando son críticos, su reparación se puede acoger

a) bajo garantía, b) alertar a la empresa que arrienda al hospital o c) hacer valer el convenio de mantenimientos. Esto último también es válido, para los no críticos. Otras alternativas son: licitar su reparación o en su defecto, reparar en el mismo hospital.

Las acciones preventivas, su procedimiento, control y ejecución, se establecen en un programa de mantenimiento [4], el cual es conocido por todo el departamento y por las empresas que tienen convenio, siendo éstas, las que finalmente lo ejecutan. En este, se detalla la secuencia de acciones que se llevan a cabo, en un mantenimiento preventivo, ver Figura 1.2. Además, otros aspectos relevantes, se describen a continuación:

- El mantenimiento preventivo debe basarse en las especificaciones del fabricante. Las fechas serán programadas junto con el Supervisor de los trabajos del hospital, a lo mostrado en la Tabla 1.1. En ésta se asume como el mes número 1 a enero.

Tabla 1.1. Programación de las mantenencias preventivas

Equipos	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Incubadoras	1°Periodo						2°Periodo					
Máquinas Anestesia	Periodo			1° Periodo			2°Periodo			3°		
Monitor desfibrilador	1°Periodo						2°Periodo					
Monitor multiparámetros	3°Periodo			1° Periodo			2° Periodo					
Ventiladores Fijos y Transporte	1°Periodo			2° Periodo			3° Periodo					

- Los dos documentos aplicables cuando se realizan trabajos preventivos son a) hoja de trabajo solicitada a la empresa -ver Anexos A y B-, b) protocolo de mantención preventiva. Este último establece explícitamente b<sub>1</sub>) describir los trabajos de inspección y mantenimiento que determine el correcto funcionamiento del equipamiento, y b<sub>2</sub>) su frecuencia.
- Los repuestos que se utilicen durante la mantención preventiva, se cubren con recursos del hospital y se adquieren a través del mercado público, en base a licitaciones.

Los principales compromisos, que deben cumplir las empresas de servicio al realizar la mantención preventiva, son [5]: a) Incluir los trabajos de convenio, limpieza, mano de obra, ajuste, diagnóstico de fallas, lubricación, ajuste e insumos básicos, b) prestar servicio especial de emergencia, en caso



de falla, con un tiempo de respuesta de 24 horas y c) Si no hay respuesta del servicio técnico en un plazo de 10 días, se debe enviar al hospital un equipo de reemplazo, con similares características.

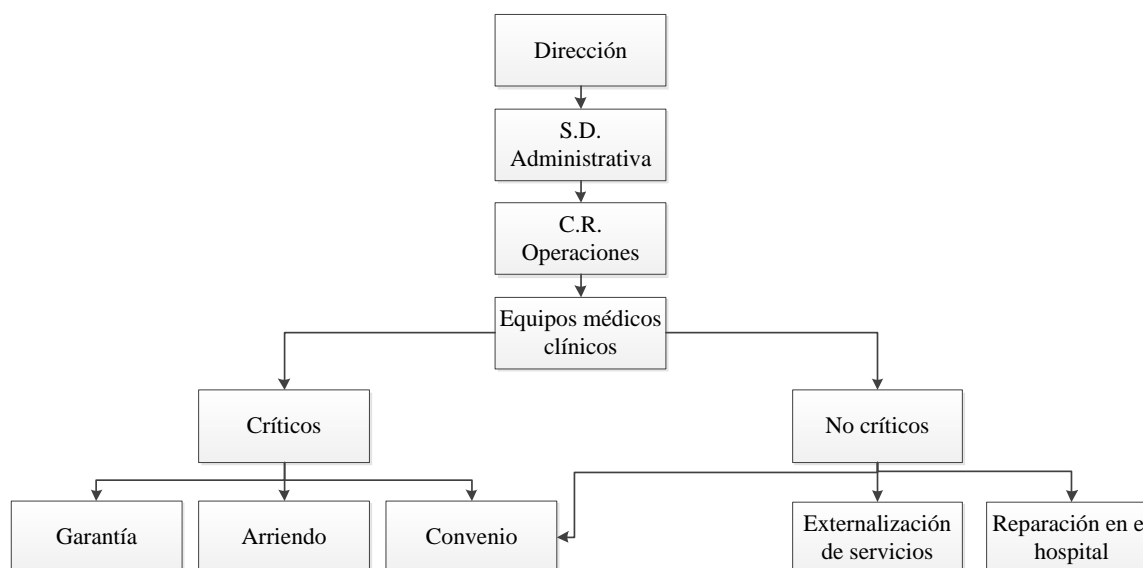


Figura 1.1. Organigrama General de la Unidad de Equipos Médicos Clínicos

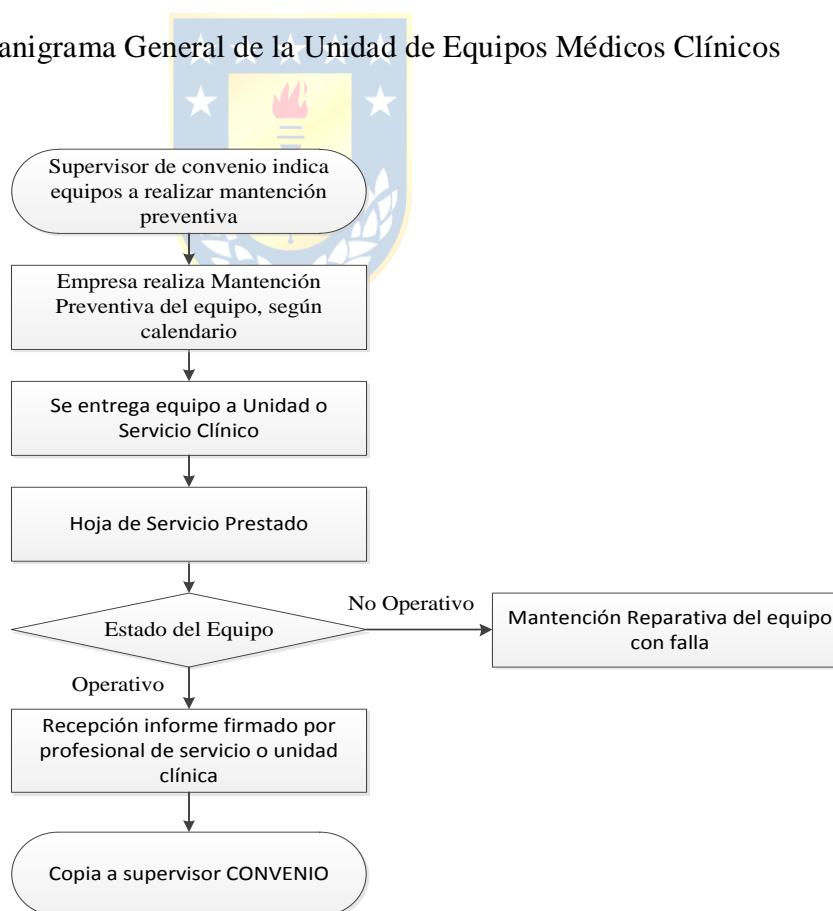


Figura 1.2. Flujograma de Mantenimiento Preventiva del Equipamiento Médico Crítico (E.M.C) de uso clínico HGGB [4].

### 1.2.2.2. Análisis de la estructura y metodología de mantenimiento en Hospital Las Higueras

Cuando un equipo presenta una falla, en la Unidad de Equipos Médicos, ver Figura 1.3, se revisa su documentación, para conocer si se encuentra en convenio de mantenimiento o no. En este último caso, se envía a taller de mantenimiento para que sea evaluado por un técnico electrónico, donde finalmente se determina si existen a su disposición los recursos para la reparación o se envía a una empresa externa. En esta situación, se redacta una hoja de salida. Luego, al regresar el equipo reparado, con su informe técnico, se procede a pagar el servicio, ya sea con los recursos económicos del hospital o con su garantía. Finalmente se entrega al servicio médico de origen, donde se alertó de su desperfecto.

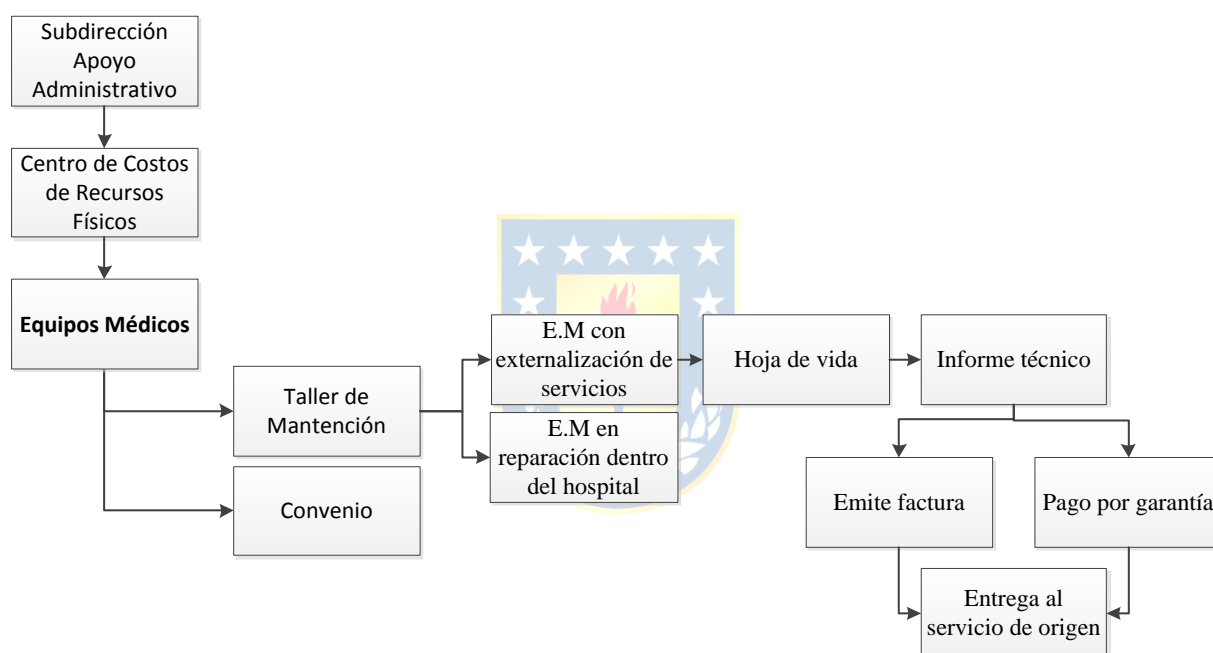


Figura 1.3. Organigrama de la Unidad de Recursos Físicos del Hospital Las Higueras.

## 1.3. Conclusiones del capítulo

Para establecer una metodología que determine la frecuencia de mantenimientos, es necesario tener una fuente abundante de datos históricos, sobre las reparaciones, que abarcan sus fechas, informes técnicos de diagnóstico, costos de convenios y actividades correctivas, entre otros. Debido a esto, es necesario investigar sobre el modo de funcionamiento de ambos hospitales, junto con la documentación que poseen. Bajo este contexto, el HGGB posee los datos requeridos para el desarrollo del presente estudio. Por otra parte, tanto a nivel industrial como hospitalario no se tienen

los recursos suficientes para poder realizar acciones a todos los equipos, es por ello que deben seleccionarse los más críticos.

El gran enemigo de la implementación de cualquier metodología, es la falta de compromiso de los ingenieros, mantenedores y usuarios. Cuestiones aún más difíciles en el contexto hospitalario, donde la prioridad no es el equipamiento, sino el bienestar y la vida de las personas.



## Capítulo 2. Mantenimiento basado en confiabilidad

---

### 2.1. Introducción

El mantenimiento está cambiando los paradigmas considerablemente, surgiendo así nuevas metodologías, como “Reliability Centered Maintenance” (RCM). Este tipo de mantenimiento según Moubray [6] es “un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que los usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual”. El RCM se encuentra expresamente reconocido en las normativas publicadas por “the engineering society for advancing mobility land sea air and space” (SAE), las cuales son: “Criterios de Evaluación del Proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad” (SAE JA 1011) y “Una Guía para el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad” (SAE JA 1012) [7]. Sus principales objetivos son: a) obtener una mayor seguridad e integridad ambiental, b) mejor funcionamiento operacional (cantidad, calidad del producto y servicio al cliente) y c) mayor eficiencia del mantenimiento. Por consiguiente, es un modelo de gestión que ayuda a organizar al mantenimiento a nivel industrial. Complementariamente a éste, con el objetivo de ir evaluando la eficiencia de su implementación, se utilizan los *índices de confiabilidad*, ver Anexo C. Además estos, ayudan a determinar la frecuencia de las mantenciones para cualquier tipo de equipamiento.

Entre las aplicaciones del RCM se cuenta con el modelo de gestión [8]. Éste analiza primero la situación actual de los equipos a través de los indicadores de confiabilidad (MTTR, MTTF, entre otros), luego determina la criticidad de los equipos en base a la frecuencia y sus consecuencias (ya sea, en la producción, en los costos de mantenimiento, en el impacto al medio ambiente), y para darle prioridad a las tareas más críticas de mantenimiento, se utiliza el método de Jackknife. En el diseño del plan de mantenimiento, se propone determinar las funciones del equipamiento y modos de falla- las etapas reconocidas en el RCM -, ya que, en relación a las consecuencias que puedan traer, se asignará la tarea preventiva. En [9] realizan un proceso similar, una recopilación del historial de fallas de los equipos, determinando MTTR y MTTF, para luego elegir los equipos críticos utilizando el diagrama de Pareto y de Jackknife. Luego, al momento de evaluar los modos de falla, se utiliza el Diagrama de Ishikawa y Análisis Causa Raíz.

## 2.2. Metodología del RCM

A continuación se especificarán, las dos etapas del RCM, a) las siete preguntas, que son utilizadas para organizar la información de las fallas y estar preparado para cualquier eventualidad y b) la teoría del proceso de análisis de fallas, donde los índices de confiabilidad son la base de su desarrollo.

### 2.2.1. Preguntas de RCM

Para desarrollarla, tiene dos simples etapas: metodología y aplicación. La primera busca contestar las siguientes siete preguntas [6].

#### 1. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo?

La función de un activo puede quedar definida, en función de dos palabras: *“un verbo, un objeto o un estándar de funcionamiento deseado por el usuario”*. Además, es necesario que su funcionamiento sea aceptable por el usuario, más bien, debe variar lo mínimo dentro de su confiabilidad inherente o capacidad inicial.

Las funciones pueden ser a) primarias, siendo la principal razón de la motivación de su adquisición y b) secundarias las cuales se refieren a la integridad estructural, medioambiental, seguridad, apariencia, confort, entre otras. Un factor que afecta directamente a estas, es el contexto operacional, es decir, donde el activo se desempeña diariamente. Éste se debe tener en consideración antes de poner en marcha a cualquier equipo.

#### 2. ¿De qué manera (se) falla en satisfacer dichas funciones?

Una falla funcional es la *“incapacidad de cualquier activo de realizar su función”*.

Para lograr discernir entre una falla funcional y el cumplimiento satisfactorio de la función, es preciso plantear un “estándar de funcionamiento”. Este deberá ser consensuado a través de la opinión del usuario, el mantenedor y cualquier persona que pueda aportar algo relevante.

#### 3. ¿Cuál es la causa de cada falla?

Las preguntas 3 y 4, pertenecen al proceso denominado AMFE -análisis modal fallo y efecto-, mediante el cual se especifica para cada función, sus potenciales fallas, los modos en que ocurren y los efectos para la organización.

La pregunta de esta sección, se enfoca a las causas de las fallas funcionales. A este análisis se le denomina “modo de falla”. Su descripción se compone de a) un sustantivo, i.e. el componente

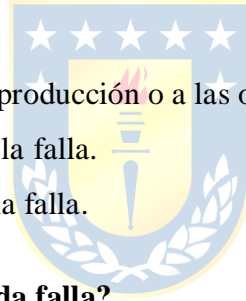
del equipo que se ve afectado y b) de un verbo. Por ejemplo, motor quemado. La importancia de la determinación de éste, radica en disponerlo en el departamento de mantención, previo a la ocurrencia de la falla. En consecuencia, se podrán manejar sus efectos secundarios, planificando gracias a esto, las acciones de mantenimiento a seguir, es por ello, que generalmente se utiliza ACR, así como también el diagrama de Ishikawa.

#### **4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?**

Al hacer una descripción de los eventos que acontecen cuando está presente un modo de falla, se pretende responder a la pregunta ¿qué ocurre? bajo este escenario. A diferencia de lo anterior, las consecuencias están correlacionadas con las funciones secundarias. Estas últimas responden a la pregunta ¿qué importancia tiene?

La descripción de los efectos de la falla debe componerse de:

- La evidencia que se ha producido la falla, comúnmente manifestada por los operadores.
- Las maneras en que la falla supone una amenaza para la seguridad o para el medio ambiente.
- Las maneras en que afecta a la producción o a las operaciones.
- Los daños físicos causados por la falla.
- Qué debe hacerse para reparar la falla.



#### **5. ¿En qué sentido es importante cada falla?**

Las preguntas 5, 6 y 7, describen los sucesos que acontecen a cada modo de falla específico.

La magnitud de los efectos que produce una falla, dentro de una organización, definen las consecuencias de ella, es decir, qué tan importante es. Luego, se busca una estrategia proactiva que sea *técnicamente factible*, donde se preguntará si la reducción de las consecuencias es real. Si la respuesta es afirmativa, es una tarea que “*merece la pena*”, justificando los costos directos e indirectos.

Las consecuencias de una falla son de cuatro tipos [7]:

- Consecuencias ocultas, son aquellas fallas que no presentan síntomas evidentes, pero que pueden gatillar fallas catastróficas.
- Consecuencias ambientales y para la seguridad, las primeras se relacionan mayoritariamente a la transgresión de normativas, mientras que las segundas, implican exponer a las personas a peligros, como accidentes, o incluso a la muerte.

- Consecuencias operacionales, son aquellas que involucran pérdidas económicas a las empresas.
- Consecuencias no operacionales, son aquellas relacionadas con las fallas que sólo incurren en gastos de reparación.

## 6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?

Para poder prevenir las fallas existen dos tipos de mantenimiento proactivo, a) el mantenimiento preventivo y b) el predictivo. El primero abarca dos tipos:

- Tareas de reacondicionamiento cíclico: Son las acciones para volver a la condición inicial del activo.
- Tareas de sustitución cíclica: Cuando un componente cumple su vida útil y es necesario su reemplazo.

Ambas tareas no consideran el estado actual del componente. Por otra parte, el mantenimiento predictivo se realiza la tarea “a condición”, representada en la Figura 2.1 [10], donde el primer punto es cuando comienza la falla, la cual muchas veces no es percibida por los operadores. Después en el punto “P” comienzan a manifestarse síntomas de que algo no anda bien. Constituye el inicio para tomar acciones que eviten una falla funcional (punto “F”):

- Una tarea “a condición” es técnicamente factible si es posible definir una condición clara de falla potencial.
- se cumple que el tiempo utilizado para hacer las mantenciones, debe ser lógicamente menor al intervalo P-F, ver Figura 2.1.
- el intervalo P-F es lo suficientemente grande para tomar las acciones correctivas.



Figura 2.1. Curva P-F

**7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?**

Si no es posible encontrar una tarea proactiva adecuada, se utilizan las acciones “a falta de”, siendo estas direccionadas por las consecuencias de fallas. Si se cumple lo anterior se lleva a cabo una acción “a falta de”, que es el rediseño.

De las preguntas solicitadas anteriormente, se completa la Tabla 2.1 [11], que permite un análisis de los productos y procesos, mejorando su calidad y reduce los costos de operación [12].Luego de finalizar el análisis “failure mode, effects and criticality analysis” (FMECA), se utiliza la Hoja de decisión - Tabla 2.2 [11]-, donde finalmente se determina la frecuencia de la mantención.

Tabla 2.1. Hoja de FMECA

HOJA DE FMEA		PLANTA ESTACION LOS MANGOS YAGUARÁ				CONSECUENCIAS				OBSERVACIONES					
		SISTEMA COMPRESIÓN DE GAS LIFT				SEGURIDAD		S							
FACILITADOR		FUNCION comprimir el gas proveniente de los pozos productores, para luego inyectarlo				AMBIENTE		A							
VERIFICADO POR		SUBSISTEMA MOTOCOMPRESOR DE GAS LIFT				OPERACIONAL		O							
FECHA		FUNCION comprimir el gas lift				NO OPERACIONAL		N							
EQUIPO Y FUNCIONALIDAD						MODOS DE FALLA		CAUSAS DE FALLA		EFECTOS DE FALLA					
NOMBRE DEL EQUIPO		cod	FUNCION		cod	FALLA FUNCIONAL	COMPONENTES INVOLUCRADOS		COD	DESCRIPCION	COD	DESCRIPCION	DESCRIPCION	DETECCION DE LA FALLA	CONSECUENCIA DE FALLA

Tabla 2.2. Hoja de decisión de RCM

Equipo										Equipo de trabajo:					Fecha de realización								
Componente										Abroado por					Fecha de aprobación								
Ref. Información		Evaluación Consecuencias			Decisión			Tareas "a falta de"				Tareas Propuestas			Frec. Inicial	A realizar por...							
F	FF	MF	H	S	E	O	H1	H2	H3	S1	S2	S3	O1	O2	O3	N1	N2	N3	H4	H5	S4		

Donde,

- F, FF y MF : Identifican el modo de falla
- H, S, E, O y N : Describen las consecuencias de cada modo de falla
- H1/ S1/ O1/ N1 : Registra si se pudo encontrar una *tarea a condición* apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo
- H2/ S2/ O2/ N2 : Registra si se pudo encontrar una *tarea de reacondicionamiento programado* apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo
- H3/ S3/ O3/ N3 : Registra si se pudo encontrar una *tarea de sustitución cíclica* apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo
- H4, H5 o S4 : Se registrará si se seleccionó una tarea “a falta de”



### 2.2.2. Bases teóricas del análisis de falla del RCM

Lo primero que se realiza, es el levantamiento de datos, en base al historial de fallas de los equipos críticos. De estos, no todos a lo largo de su historia han presentado gran cantidad de fallas, ya que, como se especificó anteriormente, esto es necesario para poder determinar los índices de confiabilidad, como el “mean time between failure” (MTBF), “main time to repair” (MTTR), “main time to failure” (MTTF), especificados en el Anexo C.5. Entonces, estos a nivel industrial, se están continuamente actualizando, para poder evaluar la efectividad de la implementación del plan de organización presentado anteriormente, en base a las siete preguntas. Pero además, gracias a éstas es posible establecer una serie de pasos, que ayuden a determinar la periodicidad de las mantenciones, bajo el contexto hospitalario. Estos serán evaluados a continuación.

## 2.3. Método para la determinación de equipos médicos críticos

Como se planteó, en el capítulo anterior, es necesario tener criterios para elegir los equipos más críticos, siendo los más utilizados, el método AHP [13], análisis de Pareto [14] y criterio planteado por la OMS, llamado Fennigkoh y Smith, además es el usado en los casos de estudio.

### 2.3.1. Criterio de Fennigkoh y Smith

La OMS, en una de sus publicaciones [15], plantea un criterio para poder estipular la criticidad del mantenimiento llamado *Fennigkoh y Smith*. Éste factor se determina en base a la sumatoria de las puntuaciones que el método asigna a diferentes variables de clasificación. Estas puntuaciones, según las particularidades del equipo, se detallan en las Tablas D.1, D.2, D.3, D.4 y D.5, del Anexo D. Al resultado se le conoce como “número de gestión de equipo (GE)”. Este queda establecido por la ecuación 2.1.

$$GE = \text{Función del equipo (F)} + \text{Riesgo durante el uso (R)} + \text{Requisitos de mantenimiento (M)} + \text{Antecedentes de problemas del equipo (P)} \quad (2.1)$$

## 2.4. Jerarquización de fallas

Las empresas distribuyen su presupuesto en diferentes requerimientos. Entre estos destacan: insumos de producción, sueldo de los empleadores, innovación de procesos y publicidad. Es por ello que necesitan un criterio de priorización de las tareas de mantenimiento. Los dos más utilizados son el análisis de Pareto y Jackknife.

### 2.4.1. Análisis de Pareto

Este análisis se basa en el principio del 80/20, establecida por el economista Wilfredo Pareto [16]. El cual investigó que el 80 % de la población recibía el 20 % de los ingresos monetarios. Esto se puede extrapolar al mantenimiento, a través de la primicia de que el 20 % de las fallas provocan el 80 % de los gastos en mantenimiento correctivo. Un ejemplo de Pareto se presenta la Figura 2.2.

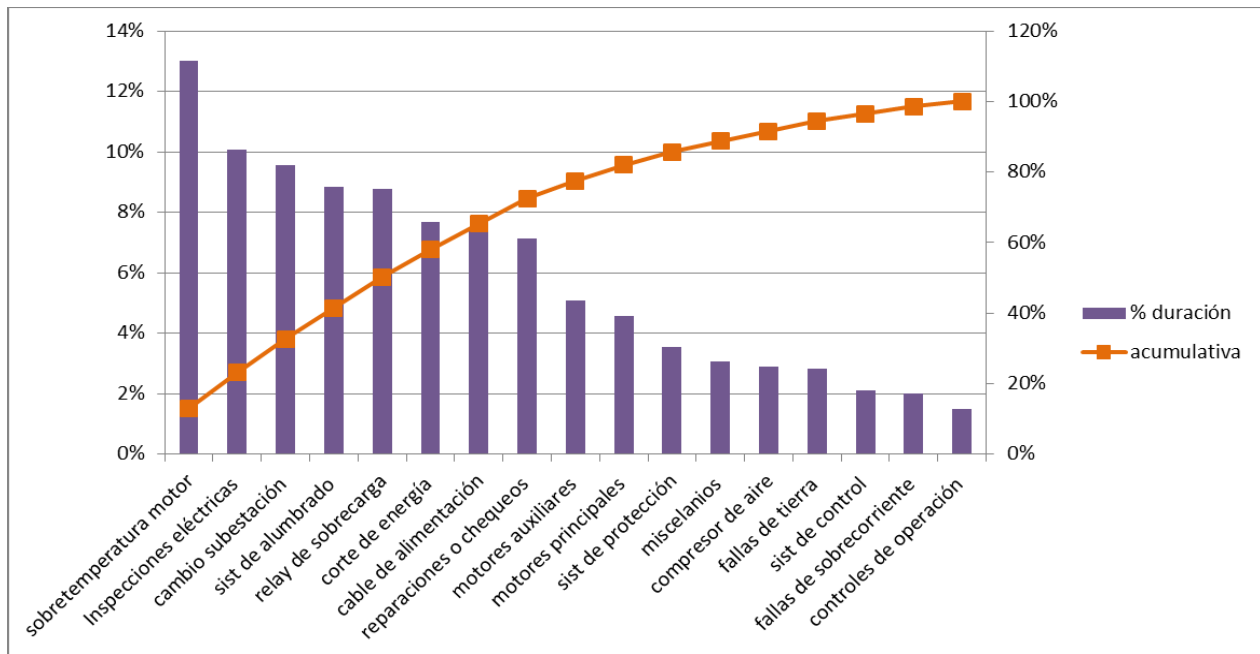


Figura 2.2. Análisis de Pareto [17]

### 2.4.2. Criterio de Jackknife

Corrientemente este criterio se expresa en un gráfico de escala logarítmica que contiene los datos históricos de las fallas de componentes y equipos. En el eje horizontal se representan las frecuencias de ocurrencia de fallas y en eje vertical, se detallan el correspondiente tiempo fuera de servicio (TFS) para cada una de ellas. En este gráfico se generan cuatro cuadrantes con el objetivo de poder clasificar el tipo de falla. Las rectas que delimitan las zonas son dos a) una que intersecta el eje horizontal, siendo el promedio de las frecuencias de falla, llamada *confiabilidad*, y b) una recta horizontal denominada *mantenibilidad*, siendo aquellas la frecuencia media de falla y la indisponibilidad promedio del conjunto de datos, respectivamente, ver Figura 2.3 [17]. Las fallas que se encuentran bajo control, no tienen gran prioridad de mantenimiento debido a su baja frecuencia, y pequeño TFS. Por otra parte, las fallas agudas tienen baja frecuencia y su TFS es alto. Alternativamente, las fallas crónicas exhiben TFS bajo con frecuencia de falla alta. Por último, las

fallas agudas y crónicas, son aquellas que se le otorga la más alta prioridad en comparación a todas las anteriores, ya que, tanto la frecuencia como el tiempo de reparación son altos.

Es importante hacer nota la diferencia entre TFS y el tiempo para reparar (TTR), ver Figura 2.4. El primero, es el tiempo que transcurre desde la detención del equipo hasta que vuelve a estar operativo, incluyendo indisponibilidades por: logística como la adquisición de algún repuesto, tiempo de preparación para la reparación que incluye recopilación de los antecedentes de la falla, herramientas, etc. Por otra parte el TTR está contenido en el TFS, constando de tiempo de diagnóstico y tiempo de corrección de falla. Éste último es cuando el técnico tiene a su disposición todos elementos para la reparación, siendo en el caso hospitalario mucho menor al logístico.

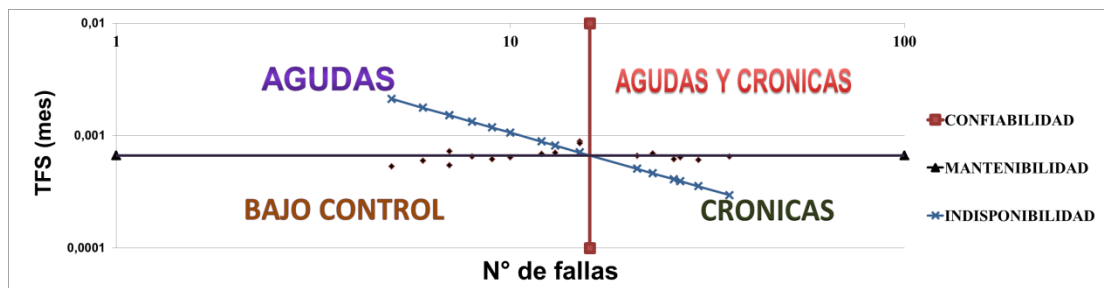


Figura 2.3. Criterio de Jackknife

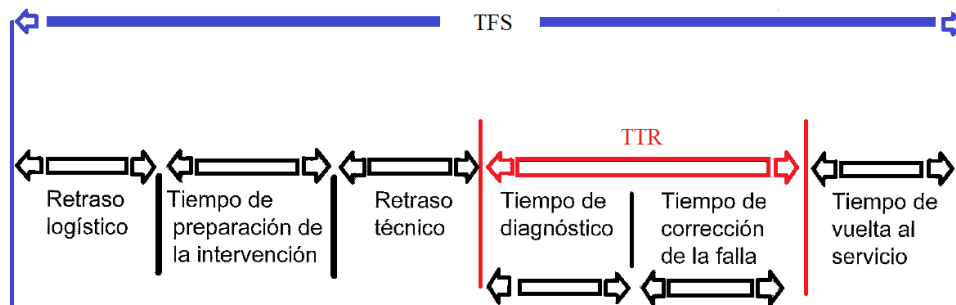


Figura 2.4. Diagrama de TFS y TTR [18]

## 2.5. Identificación de la distribución estadística

Los equipos son descritos de mejor forma, a través de dos distribuciones: a) exponencial, en el caso de los electrotécnicos. Estos tienen una larga vida útil, llegando a ser algunas veces de 30, 40 años, y b) Weibull para el caso de los equipos mecánicos.

### 2.5.1. Distribución estadística exponencial

En la Tabla 2.3 [19] se resumen las propiedades de la distribución exponencial. Esto se profundiza en el Anexo C.

Tabla 2.3. Tabla resumen de las propiedades de la distribución exponencial.

Distribución	$-\infty \leq t \leq \infty$	$f(t)$	$\lambda(t)$	$R(t)$	$\mu$
Exponencial	$0 \leq t \leq \infty$	$\lambda e^{-(\lambda t)}$	$\lambda$	$e^{-(\lambda * t)}$	$\frac{1}{\lambda}$

Donde,

$f(t)$  : Función de densidad de probabilidad

$\lambda(t)$  : Tasa de falla

$R(t)$  : Confiabilidad

$\mu$  : Valor medio

Cabe destacar, que cuando la distribución es tipo exponencial, realizar mantenencias preventivas no tiene efecto sobre la confiabilidad. Esto se justifica en la ecuación 2.2, que se basa en la primicia [20], descrita a continuación,

$$R_p(t, T, n) = R(T)^n * R(t - nT) \text{ para } nT \leq t \leq (n + 1)T, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

De esta,

$t$  : Tiempo como variable continua

$T$  : Tiempo en que se interviene preventivamente

$n$  : Número de mantenimientos preventivos que lleva en  $t$

Del Anexo C, ecuación C.9, se sabe,

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Por otra parte, en base a la ecuación 2.2, la confiabilidad del mantenimiento preventivo es,

$$R_p(t, T) \begin{cases} 0 \leq t \leq T \rightarrow e^{-\lambda t} \\ T \leq t \leq 2T \rightarrow R(T) * R(t - T) \leftrightarrow (e^{-\lambda T})^n * e^{-\lambda(t-nT)} \end{cases} \quad (2.2)$$

Desarrollando de  $T \leq t \leq 2T$ ,

$$R_p(t, T) = e^{-\lambda nT} * e^{-\lambda(t-nT)}$$

$$R_p(t, T) = e^{-\lambda nT} * e^{-\lambda t} * e^{\lambda nT}$$

$$R_p(t, T) = e^{-\lambda t}$$

Por lo tanto, es recomendable simplemente una verificación, o una inspección por parte del usuario, si está cumpliendo sus funciones principales, por ejemplo, medición de parámetros con analizadores.

### 2.5.2. Distribución estadística de Weibull

La distribución de Weibull fue descrita en 1951 por Walodi Weibull [21]. Ésta es utilizada para modelar la distribución de los tiempos entre fallas o tiempos para la falla, los cuales permiten estimar con cierto grado de certeza la disponibilidad e indisponibilidad de un componente, equipo o sistema, y en consecuencia, se pueden trazar los próximos lineamientos a seguir en la mantención. Sus propiedades, en relación a la teoría de confiabilidad, se encuentran en la Tabla 2.4 [19].

Tabla 2.4. Tabla resumen de las propiedades de la distribución Weibull

Distribución	$-\infty \leq t \leq \infty$	$f(t)$	$\lambda(t)$	$R(t)$	MTBF
Weibull	$\gamma \leq t \leq \infty$ $0 < \beta$ $0 < \alpha$	$\lambda \beta (\lambda t)^{\beta-1} * e^{-(\lambda t)^\beta}$	$\lambda \beta (\lambda t)^{\beta-1}$	$e^{-(\lambda t)^\beta}$	$\gamma + \alpha \Gamma\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)$

Donde los parámetros definidos son [22],

**Beta ( $\beta$ )** : “Parámetro de forma”, indica la distribución de la probabilidad y el comportamiento la tasa de falla. En la Figura 2.5 El periodo de desgaste, queda representado por un gran valor de beta (i.e.,  $\beta > 1$ ), siendo visualizado como una exponencial creciente. Por otra parte el periodo de arranque queda simbolizado por una exponencial decreciente, con  $\beta < 1$ . Cuando  $\beta = 1$ , se constata una tasa de azar constante.

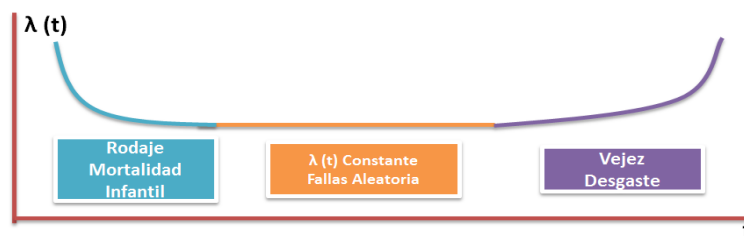


Figura 2.5. Curva de la bañera [22].

- Gama ( $\gamma$ ) : “Constante de localización”, define el punto de partida u origen de la distribución.
- Alfa ( $\alpha$ ) : “Parámetro de escala”, también es llamado *característica de vida*, representa el tiempo que demora en producirse el 63,3% de las fallas (asumiendo  $\gamma = 0$ ).

Para poder estimar estos parámetros, se utiliza un método llamado de Allen Plait [20] en el cual se grafican los tiempos para la falla o entre fallas, y se identifica una ecuación característica de la recta de estos datos, de la forma:  $Y = Ax + B$ . Cada una de sus variables -tanto independientes como dependientes-, se identifica con la ecuación 2.3 obtenida a partir de la definición de desconfiabilidad Anexo C.2.

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \beta \ln t - \beta \ln \alpha \quad (2.3)$$

Donde,

$$Y : \ln \left[ \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] \right]$$

$$X : \ln(t)$$

$$A : \beta$$

$$B : \beta \ln \alpha$$



En función de la cantidad de datos,  $F(t)$  puede determinarse como:

- a) Para una muestra de datos de fallas menores a 10,

$$F(i) = \frac{(i - 0.3)}{(n + 0.4)} \quad (2.4)$$

- b) Si  $10 \leq$  número de datos de fallas  $\leq 20$ ,

$$F(i) = \frac{i}{(n + 1)} \quad (2.5)$$

- c) Para una muestra de datos superiores a 20,

$$F(i) = \frac{i}{n} \quad (2.6)$$

Donde,

$i$  : Índice de la observación ( $t_i < t_{i+1}$ )

$n$  : Número total de datos

## 2.6. Frecuencia de las mantenciones

En esta sección se detallan los modelos, que involucran índices de confiabilidad para determinar la frecuencia de las mantenciones para el equipamiento y en algunos casos incluso, minimizando los costos. Actualmente, no existe un estudio acabado de esto en el ámbito hospitalario, sólo el presentado en 2.6.1. Pero en el área mecánica existe bibliografía, que puede ser una base para el área biomédica, ver 2.6.2 y 2.6.3. Esto depende de la disponibilidad de datos involucrados y de la hibridez presentada en este tipo de equipos.

### 2.6.1. Modelo 1: Frecuencia de mantenciones en el contexto hospitalario

Este modelo [23] minimiza el tiempo de inactividad total de equipos para obtener el número óptimo de inspecciones. El tiempo de inactividad total del equipo viene dado por,

$$ETD = n * T_{pi} + c * T_{pb} * n^{-1} \quad (2.7)$$

Donde,

- ETD : Tiempo de inactividad del equipamiento médico  
 n : Número de inspecciones por equipo por unidad de tiempo  
 c : Constante para el equipo específico en estudio  
 $T_{pb}$  : Tiempo de inactividad por falla por parte del equipo en cuestión  
 $T_{pi}$  : Tiempo de inactividad por inspección por parte del equipo en cuestión

Al extremizar con respecto de “n”, y se obtiene,

$$0 = T_{pi} + c * T_{pb} * n^{-2} \quad (2.8)$$

Al reordenar la ecuación,

$$n^* = \left[ \frac{c * T_{pb}}{T_{pi}} \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

Donde,

- $n^*$  : Número óptimo de inspecciones por equipo por unidad de tiempo

### 2.6.2. Modelo 2: Frecuencia de mantenimientos con mantenimiento preventivo mínimo.

El mantenimiento preventivo mínimo se caracteriza porque muy pocos de los componentes del sistema, son renovados en cada intervención [20]. Además se considera que el equipo queda como nuevo tras cada mantenimiento correctivo. Esto es característico de los equipos electro-técnicos, ya que, se hace reemplazo de componentes, no la reparación de estos. Su expresión matemática, es la ecuación 2.11, cuyo principio determina que [24],

$$C_{g,p} = \frac{C_{ciclo\ 1} * Prob_{ciclo\ 1} + C_{ciclo\ 2} * Prob_{ciclo\ 2}}{Tiempo_{ciclo\ 1} * Prob_{ciclo\ 1} + Tiempo_{ciclo\ 2} * Prob_{ciclo\ 2}}$$

El ciclo 1, representa el tiempo que es ocupado para realizar una mantención preventiva, mientras que el ciclo 2, es para una mantención por la ocurrencia de una falla, ver Figura 2.6.

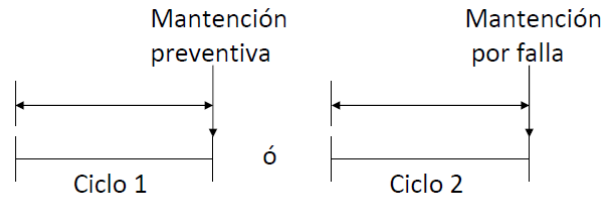


Figura 2.6. Representación de los ciclos [24]

El  $Tiempo_{ciclo\ 1}$ , es la periodicidad de las mantenciones preventivas o  $T_s$ . El  $Tiempo_{ciclo\ 2}$ , representa el tiempo medio en que ocurre una falla aleatoria, ver ecuación 2.10. Este se basa en el área de función de densidad de probabilidad, que va desde 0 a  $T_s$ , donde ocurre el mantenimiento preventivo.

$$M(T_s) = \int_0^{T_s} \frac{t * f(t) dt}{1 - R(T_s)} \quad (2.10)$$

Por lo tanto [20],

$$C_{g,p}(T_s | t_o) = \frac{C_{g,p} * R_{t_o}(T_s) + C_{g,c} * [1 - R_{t_o}(T_s)]}{T_s * R_{t_o}(T_s) + \left[ \int_0^{T_s} \frac{t * f(t) dt}{1 - R_{t_o}(T_s)} \right] * [1 - R_{t_o}(T_s)]} \quad (2.11)$$

Integrando por partes, se obtiene que,

$$\int_0^{T_s} R_{t_o}(t) dt = T_s * R_{t_o}(T_s) + \int_0^{T_s} t * f(t) dt \quad (2.12)$$



Por lo tanto [20],

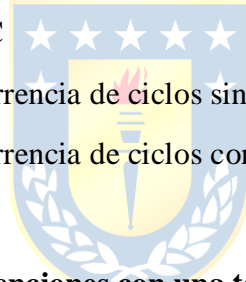
$$C_{g,p}(T_s|t_o) = \frac{C_{g,p} * R_{t_o}(T_s) + C_{g,c} * [1 - R_{t_o}(T_s)]}{\int_0^{T_s} R_{t_o}(t) dt} \quad (2.13)$$

Donde la confiabilidad condicional, se define como la probabilidad de que el sistema sobreviva  $t_o$  ut más, dado que no ha fallado hasta el momento  $T_s$  desde su estado “como nuevo”.

$$R_{t_o}(T_s) = \frac{R(t_o + T_s)}{R(T_s)} \quad (2.14)$$

Donde,

- $T_s$  : Periodicidad de M.P
- $t_o$  : Tiempo desde su último M.C
- $R_{t_o}$  : Probabilidad que el sistema no presente fallas
- $C_{g,p}$  : Costo global de M.P
- $C_{g,c}$  : Costo global de M.C
- $R_{t_o}(T_s)$  : Probabilidad de ocurrencia de ciclos sin falla
- $1 - R_{t_o}(T_s)$  : Probabilidad de ocurrencia de ciclos con falla



### 2.6.3. Modelo 3: Frecuencia de mantenimientos con una tasa de fallas de Weibull

El costo global de mantenimiento por unidad de tiempo puede escribirse como [20],

$$c_g(f) = c_f * \lambda * MTTR + c_f * f * MTTI + c_r * \lambda * MTTR + c_i * f * MTTI \quad (2.15)$$

Donde,

- $c_f$  : Costo de falla asociado a la indisponibilidad del equipo.
- $\lambda$  : Número de fallas por unidad de tiempo.
- $MTTI$  : Tiempo medio para inspeccionar.
- $f$  : Número de inspecciones por unidad de tiempo.
- $c_r$  : Costo de reparación por unidad de tiempo.
- $c_i$  : Costo de inspección por unidad de tiempo.
- $MTTR$  : Tiempo medio para reparar.

Por otra parte, los fundamentos del mantenimiento asegura que mientras más inspecciones se realicen el número de fallas disminuirá (random outages). Esto último se expresa a través de la siguiente relación,

$$\lambda(f) = \frac{k}{f} \quad (2.16)$$

En la cual,

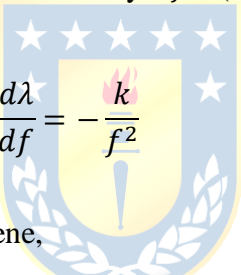
$k$  : Constante de regresión

En consecuencia con lo anterior, la condición de costo global mínimo de mantenimiento es:

$$\frac{d\lambda}{df} = -\frac{MTTI}{MTTR} \left( \frac{c_f + c_i}{c_f + c_r} \right) \quad (2.17)$$

Téngase presente que en la ecuación 2.16, “ $k$ ” (parámetro) es una consecuencia del proceso de identificación de la relación histórica entre “ $\lambda$ ” y “ $f$ ” (data), para el componente bajo análisis.

Consecuentemente,



$$\frac{d\lambda}{df} = -\frac{k}{f^2} \quad (2.18)$$

Finalmente al igualar 2.17 y 2.18 se obtiene,

$$f^* = \sqrt{k * \frac{MTTR}{MTTI} * \left( \frac{c_f + c_r}{c_f + c_i} \right)} \quad (2.19)$$

### **Una reflexión adicional**

En relación a las ideas que siguen, téngase presente que la distribución exponencial, es aplicable sólo para la vida útil o periodo de operación normal del componente. Sin embargo, frecuentemente se usan parcial o totalmente sus propiedades en problemas de evaluación de la confiabilidad y mantención de sistemas, sin verificar que la tasa de falla es constante o independiente del tiempo. Existen generalmente al menos 3 justificaciones para esto: 1) las técnicas analíticas particularmente para grandes sistemas, son muy complejas a menos que se hagan simplificaciones. Un ejemplo importante de la hipótesis anterior, se deja en evidencia cuando la tasa de falla de una distribución Weibull es estimada a través del inverso del valor esperado del tiempo para la falla.

$$\lambda(\alpha) = \frac{1}{\alpha \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})} \quad (2.17)$$

Donde:

- $\beta$  : Parámetro de forma  
 $\alpha$  : Parámetro de escala de Weibull  
 $\Gamma$  : Función gamma

En segundo lugar, la data usada en los ejercicios de evaluación es generalmente muy limitada e insuficiente para verificar la correcta distribución subyacente y finalmente, se argumenta que no es realista usar una técnica más complicada que aquella que la data justifica. No obstante lo previo, existen más argumentos que refuerzan las hipótesis anteriores.

Así entonces, reconociendo el carácter de “ $\alpha$ ” en el modelo Weibull, se puede escribir

$$\alpha = k_2 * f \quad (2.18)$$

En esta última expresión,

- $k_2$  : Constante de proporcionalidad directa

Al sustituir la ecuación 2.17 en la 2.18, resulta

$$\lambda(f) = \frac{1}{k_2 * f * \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})} \quad (2.20)$$

Esta última expresión puede ser explotada en la condición de óptimo mantenimiento.

## 2.7. Acreditación

El equipamiento médico, es regulado en el ámbito legal, ya sea para entrar en un país, funcionar y finalmente dejarlo a disposición al término de su vida útil. Una de estas regulaciones es el Decreto Supremo 825/98. En su Art. 21, clasifica en clases al equipamiento y se detalla cuál es la documentación y regulación, para su posterior funcionamiento en el país. En su Art. 28 especifica, si el equipo viene defectuoso desde su fabricación y produce daño al paciente, sea o no con producto de muerte, se debe comunicar al Instituto de Salud Pública [25]. Este tema se detalla, en una “guía técnica sistema de tecnovigilancia de dispositivos médicos en Chile”, aprobada por la Resolución

Exenta N° 2622 [26], donde se explica que los eventos deben ser informados al sistema de tecnovigilancia, para tomar acciones preventivas. Allí se hace alusión, a que se recomienda seguir las especificaciones del fabricante, en el mantenimiento, de forma general. Según lo detallado previamente, ninguna de estas normativas especifica que se debe hacer en relación a la periodicidad. Como el equipamiento médico se utiliza en las dependencias de los prestadores de salud, también debe regirse por la autorización sanitaria, que otorga el Secretario Regional Ministerial de Salud. Ésta se basa en los estatutos del código sanitario (Ley N° 19.497) [27]. Actualmente, un modo de otorgar calidad y seguridad al paciente, se encuentra en la acreditación. En ésta se alude a la seguridad del equipamiento médico en el ámbito [28], donde en su pauta de cotejo [29], sección EQ-1.2 y EQ-2.1, apunta al mantenimiento preventivo. En el primero, se reclama un documento para hacer un seguimiento de la vida útil del equipamiento relevante para la seguridad del paciente, que incluye máquinas de anestesia y ventiladores fijos y de transporte, entre otros. Mientras que el segundo, se solicitan tres cosas: i) un profesional responsable a nivel institucional de mantenimiento preventivo, ii) un documento que describa el programa de mantenimiento preventivo y iii) dejar constancia de la realización de mantenimiento preventivo según el programa. Tampoco se especifica, por quién o por qué se debe regir el hospital o la clínica para poder determinar la frecuencia de las mantenciones. Por lo tanto, según lo confirmado por el personal del hospital, se llega a un acuerdo con la empresa externa encargada de realizar las tareas de mantenimiento, para establecen las fechas que estos se llevarán a cabo.

## **2.8. Solución propuesta**

La estrategia propuesta consta de dos fases, ver Figura 2.7:

### Auditoría:

- i) Se recopila la información relativa a las fallas, de los informes técnicos, solicitudes de reparación por parte del usuario y entrevistas con técnicos mantenedores del equipamiento, con el fin de conocer en detalle el estado actual de la gestión del mantenimiento de los equipos médicos críticos.
- ii) Para poder organizar la información anterior, se llevan a cabo dos tipos de análisis:
  - 1) Cualitativo, que contesta las siete preguntas del RCM, resumidas en un FMECA
  - 2) Cuantitativo, el cual en base a técnicas probabilísticas logra determinar los índices de confiabilidad (TTR, TTF, U, entre otros) y criterio de Jackknife, que permite jerarquizar las fallas.

a) Mejoramiento y Optimización:

- i) Teniendo en consideración los resultados previos, es posible sugerir mejoras para la gestión y consecuentemente los TFS de los equipos.
- ii) Estas mejoras hacen llamado a un problema de optimización. Para lo previo, es necesario proponer un modelo apropiado teniendo en consideración lo expuesto en la sección 2.6 del presente capítulo.
- iii) En esta memoria de título se considera la minimización de los costos de mantenimiento y falla y la calidad de atención al paciente.
- iv) El problema así planteado puede resolverse, básicamente, de dos maneras. Una de ellas es entenderlo como un problema de optimización multi-objetivo. La otra es incorporar los criterios técnicos de calidad como restricciones en función de la norma.
- v) En este trabajo se propone una solución que retroalimenta los criterios técnicos de calidad.

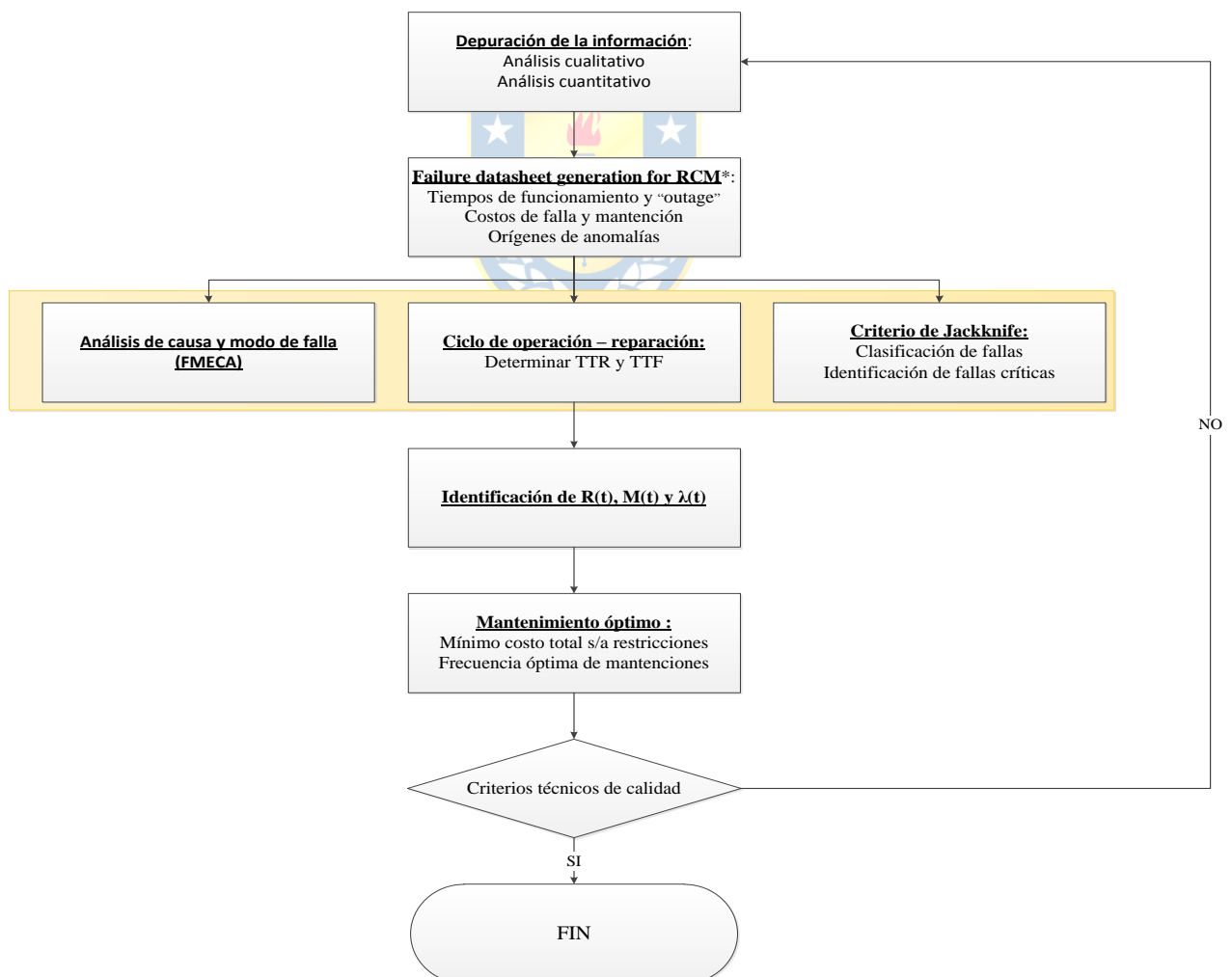


Figura 2.7. Macroalgoritmo del modelo de gestión para equipos médicos críticos

## 2.9. Conclusiones del capítulo

La metodología RCM requiere, tanto en el ámbito de gestión, que es la aplicación de las 7 preguntas, como en la aplicación de criterios e identificación de la distribución, una fuente rica de detalles sobre las fallas ocurridas, con informes técnicos altamente descriptivos. Complementariamente hay que considerar los objetivos institucionales, y cuáles son sus requerimientos, al momento de determinar la frecuencia de las mantenciones.

Cabe destacar que los índices de confiabilidad, son útiles al momento de evaluar el desempeño del equipamiento, pudiendo así, aplicar las técnicas necesarias, considerando su contexto operacional, su demanda, para cada tipo de equipamiento, ya que estas variables, son particulares para cada uno de ellos.



## Capítulo 3. Aplicación y análisis de resultados

### 3.1. Introducción

La metodología detallada en el capítulo anterior, profundiza en los elementos para la aplicación de la ingeniería de confiabilidad al mantenimiento, cuya inferencia probabilística emana de la base de datos históricos. En base a esto, se planteará un modelo de gestión para equipos médicos críticos, donde su fuente de información será la hoja de vida mostrada en la Figura 3.1.

A partir de los índices de confiabilidad, se puede determinar la frecuencia de las mantenciones para los activos críticos, en base a modelos estadísticos y los costos involucrados en acciones preventivas y correctivas. Su desarrollo, se encuentra en la sección 3.6 del presente capítulo. A continuación, se darán a conocer los detalles que implica un levantamiento de datos. Esto se puede separar en a) *depuración de la información* y b) *failure datasheet generation for RCM*.

FECHA	ACCIONES PREVENTIVAS/REPARATIVAS	CAMBIO REPUESTO
08.06.2011	Memorandum N° 526, Maquina de anestesia con ventilador malo, Sra. Marta Carenas M. Sup. Pabellon, solicita reparacion.	NO
10.06.2011	Equipo con ventilador con problemas, se realiza mantencion correctiva, quedando operativa la maquina de anestesia, dando respuesta a memorandum N° 526	NO
04.07.2011	Memorandum N° 615, Maquina de anestesia con Ventilador malo, Sra. Marta Carenas M. Sup. Pabellon, solicita reparacion.	NO
06.07.2011	Distribuidor electrico con problemas, switch principal funciona con cortes en posicion 0 ó 1. Sensor de flujo malo. Maquina de anestesia queda fuera de uso.	NO
28.07.2011	Se cambia par de sensores de flujo, maquina de anestesia queda fuera de uso porque distribuidor electrico esta en corte. Se cotizara.	Par sensores de flujo
28.09.2011	Mantención Preventiva segun protocolo, se adjunta reporte de mantencion. Se regresa bloque sensor de flujo, se calibra, se instala celda galvanica nueva, se elimina corte circuito en administrador de fuente electrica. <b>Maquina de anestesia queda Operativa.</b>	Celda Galvanica

Figura 3.1. Hoja de vida equipos médicos críticos

### 3.2. Levantamiento de datos

Al realizar el levantamiento de datos de forma cuantitativa, se eligen *a priori* los activos que tienen mayor cantidad de fallas, de la misma marca y modelo e igual contexto operacional. En relación a esto último, independiente de donde desempeñaran su función, por encontrarse en similares

condiciones físicas, de presión y temperatura. Finalmente, los activos seleccionados fueron los siguientes: a) máquinas de anestesia, marca: “PENLON”, modelo “INTEGRA SP2” y b) ventiladores mecánicos, marca: “VIASYS”, modelo: “AVEA”. La teoría planteada en la ecuación 2.2, específica, que a aquellos componentes “más electrónicos o eléctricos”, no es necesario realizarles tanto mantenimiento preventivo, ya que no altera su confiabilidad  $R(t)$ . Al contrario, ocurre en aquellos casos de componentes “más mecánicos”. En consecuencia con lo previo, los equipos seleccionados que presentan más fallas, son del tipo híbrido, exhibiendo una composición importante tanto mecánica como electrónica.

Los datos fueron clasificados, dependiendo del tipo de inspecciones, correctivas, preventivas o si se realizó un cambio de repuesto, es decir, toda acción que implica una detención del equipo. Todos los eventos ocurridos, como mantenimientos preventivos y correctivos, para cada una de las 5 máquinas de anestesia, se esquematizaron en el Anexo E y para los 13 ventiladores mecánicos en el Anexo F. Es importante destacar que al recopilar los datos, existían fallas que esperaban ser reparadas hasta el próximo mantenimiento preventivo, finalmente estas son consideradas solo como correctivas. Los TFS calculados son esquematizados para cada componente en los Anexos I y J. Mientras que el ciclo operación- reparación, se presentan en los Anexos G y H, respectivamente.

El análisis cualitativo dependía de cuales equipos serían seleccionados previamente por el análisis cuantitativo, ya que cada TFS, tenía un informe técnico, emitido por un profesional especializado, documento que permite responder las 7 preguntas del RCM.

### **3.3. Aplicación de las preguntas del RCM**

Al momento de recopilar la información, quedó en evidencia la inviabilidad de responder todas las preguntas - sección 2.2.1- , por el nivel de detalle de los informes técnicos. Consecuentemente, el análisis tuvo un alcance hasta la 5<sup>ta</sup> pregunta del RCM y parte de la 6<sup>ta</sup>. Detallando en ésta última las sugerencias preventivas para cada modo de falla.

#### **3.3.1. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo?**

Las principales funciones de ambos equipos seleccionados, se muestran en la Tabla 3.1. En la sección 3.3.1.1 y 3.3.1.2, se describe en detalle y genéricamente, el funcionamiento de los equipos en estudio.



Tabla 3.1. Funciones principales de equipos médicos en estudio

<b>Máquina de anestesia [30]</b>	<b>Ventilador mecánico [31]</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Administrar al paciente medidas adecuadas de oxígeno, gas anestésico y óxido nitroso, controlando así, la profundidad del efecto ocasionado</li> <li>▪ Tener completo control de la respiración.</li> <li>▪ Extraer el CO<sub>2</sub> exhalado por el paciente.</li> <li>▪ Proporcionar un ambiente de baja resistencia en la rama inhalatoria, permitiendo así, un intercambio de gases más fácil.</li> <li>▪ Monitorizar las variables fisiológicas necesarias durante una anestesia general</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suministro de ventilación pulmonar al paciente, con los parámetros definidos por un médico, adecuados para cada uno de ellos, sin deteriorar a los pulmones, ni otros sistemas del organismo.</li> <li>▪ Monitorizar las variables fisiológicas (presión arterial, flujo de inspiración-espriación, volumen tidal, nivel de CO<sub>2</sub> durante el ciclo respiratorio, entre otros) del paciente.</li> </ul>

### 3.3.1.1. Funcionamiento de un ventilador mecánico [32]

En la Figura 3.2, se representan los componentes internos de un ventilador mecánico y el sentido del oxígeno y aire medicinal. La toma de gas de este último, tiene una presión de 50 psi y se canaliza al ventilador a través de una trampa de agua y filtro grueso, con el fin de eliminar la condensación de agua y partículas del suministro de gas del hospital. Luego, antes de ingresar a la mezcladora oxígeno/aire, se encuentran los siguientes componentes: a) un sensor de presión que emite una alarma si la presión es demasiado baja, b) una válvula “check” permite que el suministro de gas, debido al flujo inverso, c) un transductor de flujo y d) un regulador, que disminuye la presión del aire medicinal, alrededor de 10 psi, condición necesaria para la operación de la mezcladora. Ésta tiene integrado un control de flujo, que genera un patrón de flujo e inspecciona la tasa de operación de la ventilación. Un sensor de flujo, controla la tasa de flujo de volumen de la alimentación de aire. El circuito del paciente consiste en una rama de inspiración y una rama de expiración conectado a una conexión en Y. El gas de respiración, que contiene la proporción deseada de aire y oxígeno, sale del ventilador a través de un filtro de bacterias y la válvula “check” en la rama de inspiración del circuito de respiración. La mezcla de gas recoge la humedad del humidificador, y la medicación, en caso de ser necesario, del nebulizador antes de entrar en los pulmones del paciente. Durante la fase de inspiración, la válvula de exhalación se cierra para permitir que el gas inspirado ingrese a los

pulmones. Durante la fase espiratoria, la válvula de control de flujo detiene el flujo de gas de alimentación, la válvula de exhalación se abre a la atmósfera haciendo que, la cavidad torácica colapse y el gas sea expulsado desde los pulmones a través de la rama de expiración. Como este gas es saturado de vapor de agua y tiene una temperatura igual a la corporal, se comienza a condensar a medida que comienza a bajar su temperatura en el circuito de respiración.

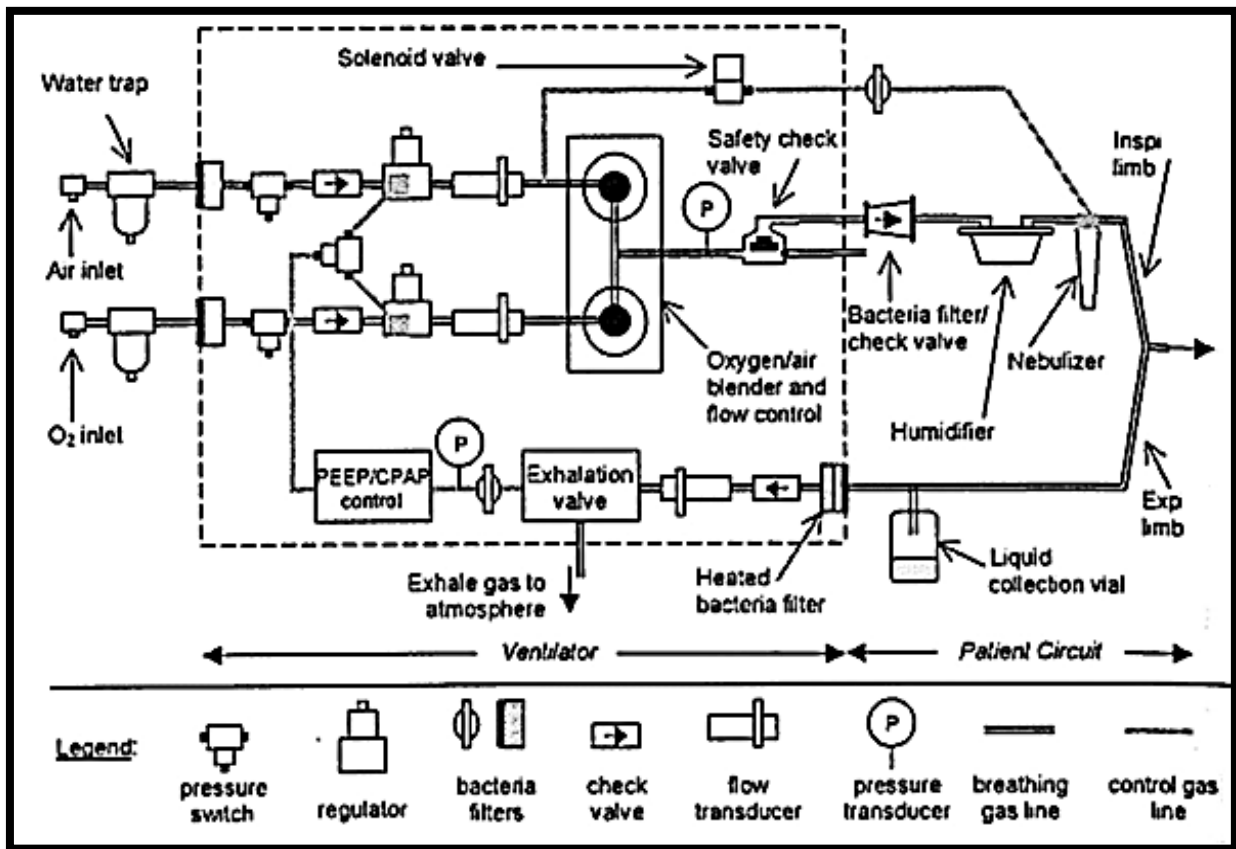


Figura 3.2. Circuito interno de un ventilador mecánico

### 3.3.1.2. Funcionamiento de una máquina de anestesia [32]

En la Figura 3.3, se representa una máquina de anestesia, cuyo abastecimiento es normalmente realizado a través de la toma de gases de la pared -presión de 50 psi-, o en caso de fallar éste, se encuentran los cilindros de respaldo, cuya presión interna es de 2000 psi, para el oxígeno ( $O_2$ ) y 1000 psi para el óxido nitroso ( $N_2O$ ). Por ende cuando se abastecen de los cilindros es necesario tener un regulador que disminuya la presión a 50 psi, condición normal de operación interna de la máquina. Cuando la presión de oxígeno disminuye a menos de 30 psi, existe un sistema de seguridad, de una válvula *shutoff*, que cierra el flujo de óxido nitroso. Posteriormente se encuentran

los flujómetros, estos miden la cantidad de gas que está circulando y a su vez, separan el circuito de media presión con el de baja presión, gracias a sus válvulas de control. Estos se comunican con los vaporizadores, que mantienen una volatilización regulada de los anestésicos, cuya proporción de flujos parciales deseable, depende de la resistencia que otorga la trayectoria dentro del dispositivo, ver Figura 3.4 [34], el producto entregado es una mezcla de gases anestésicos (FGF), en condiciones apropiadas para ingresar al paciente. Estos junto a los gases exhalados en el ciclo de respiración anterior, pasan al tubo de inspiración (circuito paciente), ver Figura 3.5 y Figura 3.6. Al momento de ser exhalados, pasan al fuelle (en modo automático), o a la bolsa de reserva (modo manual). En cualquiera de los dos casos, si existe un exceso del gas expirado, es necesario expulsarlo a la atmósfera. Este es el objetivo de la válvula APL (límite de presión ajustable), o también llamada de sobrepresión. Su presión de apertura es de 0,5 a 80  $\text{cmH}_2\text{O}$  [36]. Posteriormente pasa al canister, que contiene cal sodada, la cual absorbe el  $\text{CO}_2$  y lo convierte en sólido, con el objetivo de obligar a los gases a recircular, comenzando así un nuevo ciclo [35].

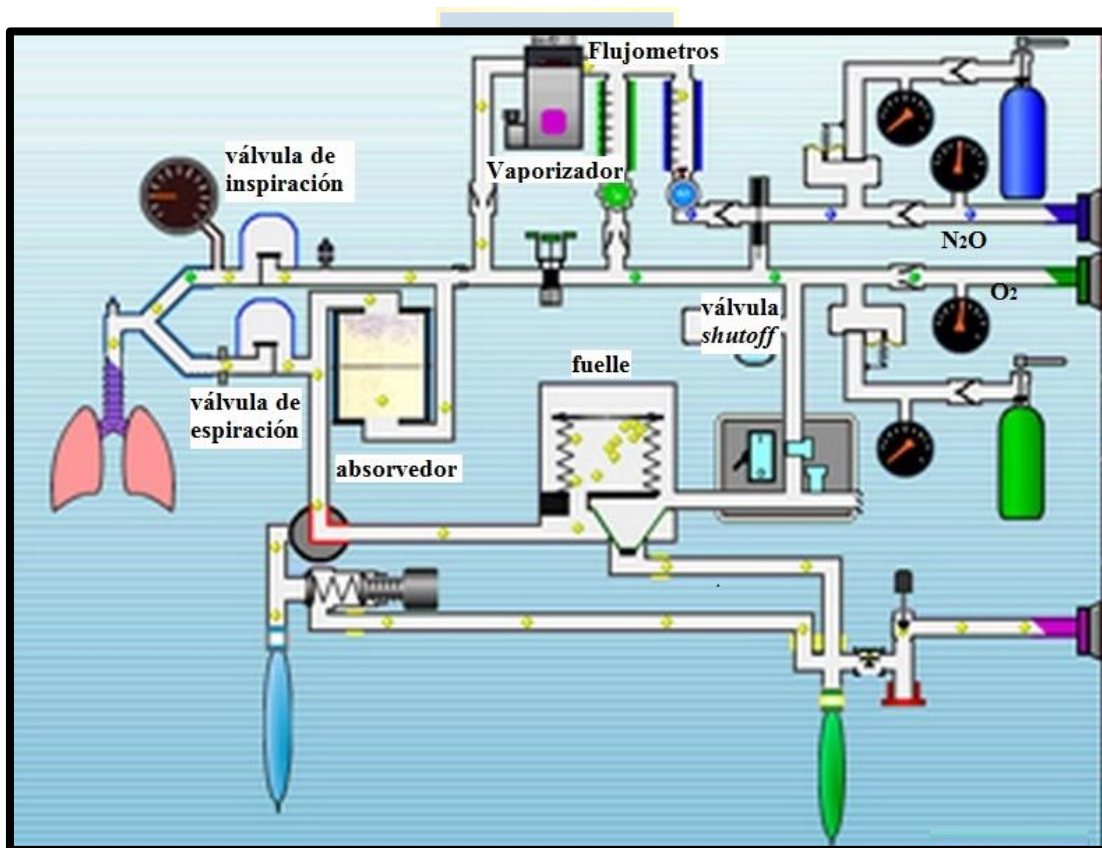


Figura 3.3. Circuito interno de una máquina de anestesia [33]

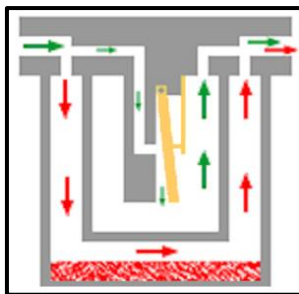


Figura 3.4. Vaporizador genérico de una máquina de anestesia

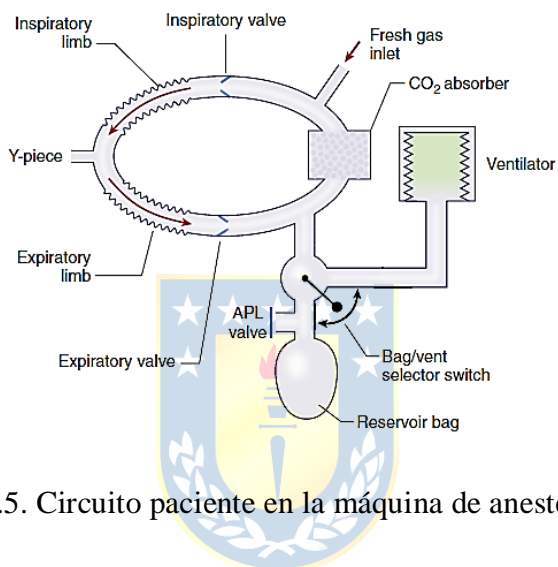


Figura 3.5. Circuito paciente en la máquina de anestesia [36]

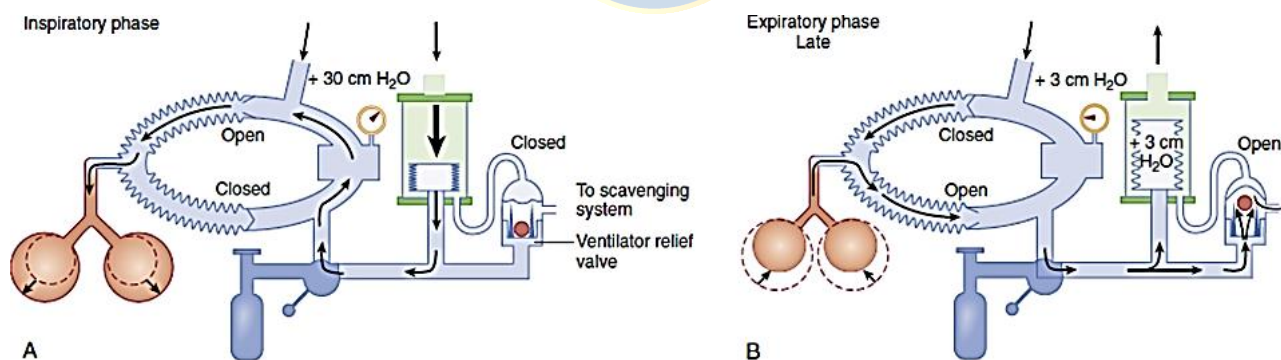


Figura 3.6. Fase inspiratoria y espiratoria en el circuito paciente

### 3.3.2. ¿De qué manera (se) falla en satisfacer dichas funciones?

El usuario al detectar el incumplimiento de cualquiera de las funciones de un equipo -Tabla 3.1- envía un *memorandum*, alertando sobre su ocurrencia al departamento de mantención. En este momento comienza el seguimiento de cada una de las fallas. Para este estudio, se registraron los *modos de falla*, en la primera columna de la Tabla 3.2 y Tabla 3.3, para cada uno de los equipos.

### 3.3.3. ¿Cuál es la causa de cada falla?

Un modo de falla puede presentar varias causas. Una causa de falla es diagnosticada por un técnico especializado, dejando en evidencia si fue ocasionada por el desperfecto de un componente del sistema, o por el descuido del usuario. Por ejemplo: “grano de cal en la válvula del canister”, “falta de carga en los cilindros”, “fuga por el al montaje del sistema”. Estas se presentan en la segunda columna de la Tabla 3.2 y Tabla 3.3, asociadas al modo de falla correspondiente.

### 3.3.4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?

Se evalúan todos los efectos que produce cada una de las fallas, (ver cuarta columna de los Anexos K y L). Para este estudio se evaluaron los días de indisponibilidad, tarea de reparación realizada por el técnico y los costos de los repuestos utilizados. Estos últimos son resumidos en a) Figura 3.7, para las máquinas de anestesia y b) Figura 3.8, Figura 3.9 y Figura 3.10, para los ventiladores mecánicos. En las dos últimas figuras, se grafica la variación de valores que han tenido los sensores de oxígeno y las baterías.

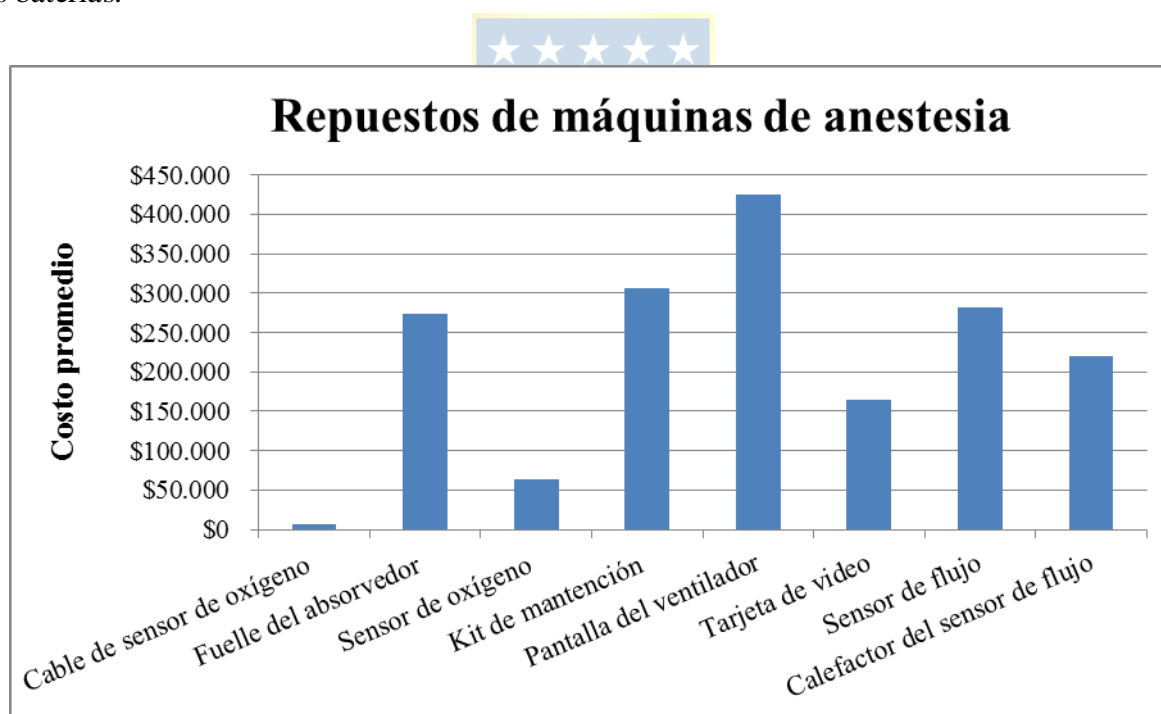


Figura 3.7. Costos de repuestos de las máquinas de anestesia

En Figura 3.7, se visualiza que el mayor desembolso, implica adquirir una pantalla del ventilador. Esta falla es aleatoria y poco frecuente, por lo que no constituye un costo fijo. En segundo lugar, se encuentra el kit de mantención, cuyo costo fijo es anual. Al igual que el caso anterior, en la Figura 3.8, los dos repuestos de mayor costo, tienen relación con la pantalla del ventilador y luego se sitúa

el kit anual. De los ventiladores mecánicos, el sensor de oxígeno es un repuesto que se adquiere periódicamente, cuyo valor ha variado en a lo largo de los años. En el último tiempo ha disminuido el desembolso del hospital en este componente. Esto se puede deber, no necesariamente a la disminución de su precio, sino a la adquisición de sensores alternativos.

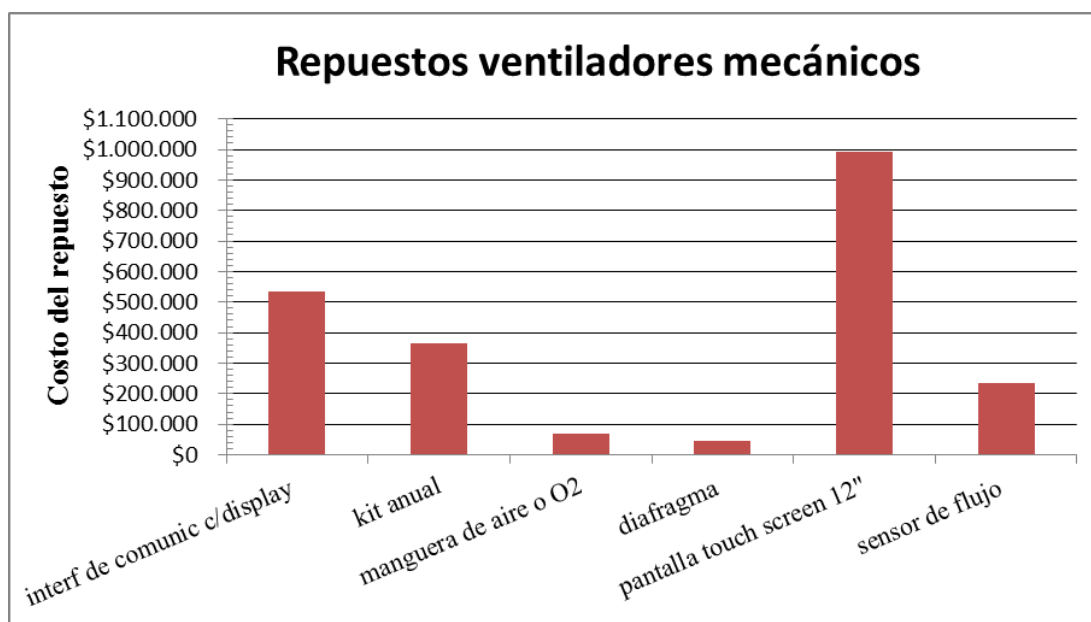


Figura 3.8. Costo de repuestos de los ventiladores mecánicos.

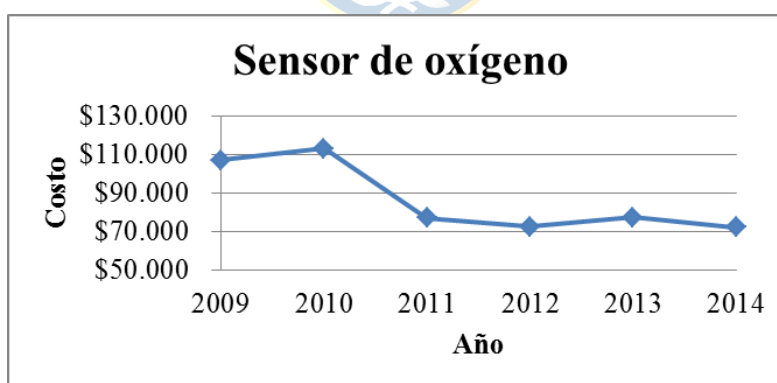


Figura 3.9. Historial de costos de los sensores de oxígeno para los ventiladores mecánicos

Las baterías son repuestos que no influyen en la indisponibilidad de los equipos, pero son necesarias en casos de emergencia, ya que otorgan aproximadamente una hora de servicio ventilatorio autónomo en caso de un corte de energía. El costo del hospital en este componente, ver Figura 3.10, fue mayor en el 2012 y ha disminuido en los últimos años, involucrando una parte importante del presupuesto en mantención.

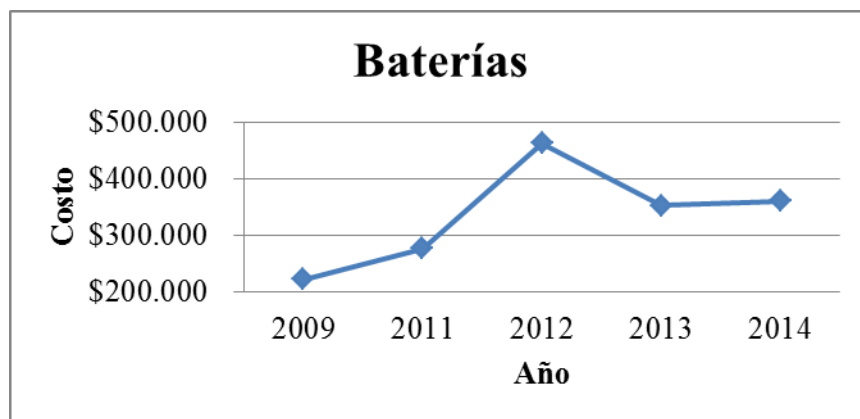


Figura 3.10. Historial de costos para las baterías de los ventiladores mecánicos

### 3.3.5. ¿En qué sentido es importante cada falla?

Esta pregunta alude a las consecuencias que puede traer una determinada falla. En este caso, éstas involucraron, en primer lugar, a la seguridad de los pacientes, ya que, cualquier fuga o malas condiciones en los dosificadores de anestésicos, dejar de ventilar a un paciente fisiológicamente dependiente, entre otros, pueden desencadenar serios daños a la salud, lo que es incalculable monetariamente. En segundo lugar, a nivel operacional causan grandes indisponibilidades y costos para el hospital, siendo esto registrado en la cuarta columna del Anexo K y Anexo L.

### 3.3.6 ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?

El mantenimiento proactivo sugerido en este estudio, alude a las tareas preventivas- ver tercera columna de la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 -, i.e., esto no apunta al mantenimiento predictivo, por no existir una aplicación efectiva de técnicas especializadas. Para ello, se requiere tener los simuladores biomédicos disponibles dentro del hospital, que permitan revelar la condición actual de cada uno de los equipos y corroborar las acciones hechas por empresas externas, comenzando por los críticos.

Las tareas preventivas, pueden ser de dos tipos:

- Tareas de reacondicionamiento cíclico: Limpieza e inspecciones por parte del usuario, idealmente semanales.
- Tareas de sustitución cíclica: Implicarían el cambio de los repuestos, específicamente para los sensores de oxígeno y flujo.

Tabla 3.2. Resumen de FMECA para los ventiladores AVEA

	FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA	TAREAS RECOMENDADAS
001	Monitorizar las variables fisiológicas del paciente	001	Pantalla touch incapaz de emitir señales	001	Uso indebido del usuario de la pantalla touch	Cuidado en la manipulación del usuario
				002	Falla en la circuitería interna de la pantalla	Chequeo de su función durante MP
002	Pantalla touch después de minutos en funcionamiento se bloquea dejando de emitir señales	001	Falla en la circuitería interna de la pantalla	001	Falla en la circuitería interna de la pantalla	Chequeo de su función durante MP
				002	Placa de video fuera de funcionamiento	Chequeo de su función durante MP
002	Suministra al paciente de ventilación pulmonar, con los parámetros definidos por un médico, adecuados para cada uno de ellos, sin deteriorar a los pulmones, ni otros sistemas del organismo.	001	Pantalla touch con falla en la iluminación	001	Falla en la circuitería interna de la pantalla	Chequeo de su función durante MP
				002	Incapaz de programar el volumen espirado por el paciente	Uso indebido del usuario
				002	Sensor de oxígeno entrega datos defectuosos	Cambio de sensor cada 8 meses
				003	Sensor de flujo entrega mediciones incorrectas	Calibración de parámetros cada 6 meses



003	Fuga en el equipo	001	Mal montaje del circuito paciente	Cuidado en la manipulación del usuario
		002	Sensor de oxígeno entrega datos defectuosos	Cambio de sensor cada 8 meses
		003	Desmontaje de válvula exhalatoria por fuerte flujo respiratorio	Evento fortuito, sin TR
004	Equipo no responde a ordenes, sin señal	001	Falla en el interface de comunicación con el display frontal	Cuidado en la manipulación del usuario
		002	Usuario no emite las ordenes correctas para el funcionamiento	Cuidado en la manipulación del usuario
005	Lecturas erróneas de FiO2	001	Sensor de oxígeno entrega mediciones incorrectas	Cambio de sensor cada 8 meses
		002	Usuario no realiza una correcta conexión ...	Cuidado en la manipulación del usuario
		003	Sensor de flujo se encuentra descalibrado	Calibración de parámetros cada 6 meses
006	Sistema neumático con desperfectos	001	Transductor de presión de entrada de oxígeno defectuoso	Chequeo de su función durante MP
007	Fuga en el circuito paciente	001	Mal montaje del "circuito Y" por parte del usuario	Cuidado en la manipulación del usuario
008	Incapacidad del equipo para reconocer presiones de trabajo	001	Ventilador de refrigeración defectuoso	Limpeza oportuna por parte del usuario
009	Falla en la malla del filtro	001	Usuario incapaz de realizar un montaje correcto	Cuidado en la manipulación del usuario

Tabla 3.3. Resumen de FMECA para las máquina de anestesia *Integra PS2*

	FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA	TAREAS RECOMENDADAS
001	Administrar al paciente medidas adecuadas de oxígeno, gas anestésico y óxido nítrico, controlando así, la profundidad del efecto ocasionado	001	Flujometro de oxígeno emite mediciones erróneas	001	Falla en la manguera interna del circuito de oxígeno	Evento fortuito, sin TR
		002	Máquina de anestesia no responde a ordenes	001	Falla en el calefactor del absorbedor	Evento fortuito, sin TR
				002	Sensor de flujo entrega mediciones erróneas	Calibración de parámetros cada 6 meses
				003	Sensor de oxígeno entrega datos defectuosos	Cambio de sensor cada 8 meses
				004	Entrada del conector de video colocada incorrectamente	Cuidado en la manipulación del usuario
		003	No se indica salida de flujo NO2	001	Válvula del flujometro externo de oxígeno defectuoso	Chequeo de su función durante MP
				002	Falta de carga en los cilindros	Revisión de la carga de los cilindros tras cada intervención quirúrgica
		004	Fuga en la máquina de anestesia	001	Falla en el montaje de diversos componentes (vaporizadores, deposito del cal )	Cuidado en la manipulación del usuario
				002	Desgaste de o ring	Cambio en el kit anual
				003	Desgaste del fuelle	Chequeo de la condición del material y su función durante MP
002	Tener completo control de la respiración.	001	Incapaz de ventilar al paciente	001	Tarjeta principal defectuosa	Chequeo de su función durante MP
				002	Sensor de flujo descalibrado	Calibración de parámetros cada 6 meses
		002	Pantalla touch no emite señal	001	Falla en la tarjeta de video	Chequeo de su función durante MP
				002	Falla en el conector trasero de pantalla	Inspección de pantalla cada 3 meses
		003	Selector de ventilación no responde a ordenes	001	Sensor de selector defectuoso	Chequeo de su función durante MP

### 3.4. Criterio de Jackknife

El criterio de Jackknife ayuda a clasificar las fallas de los equipos en relación a su criticidad, ya sean crónicas, agudas y crónicas, agudas y bajo control. Alertando así, al mantenedor, cuál es su frecuencia y cuánto tiempo se encontrará fuera de servicio el componente, si llega a ocurrir alguna de ellas.

Cabe destacar que en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5, los datos son tomados a lo largo de 4 años.

#### 3.4.1. Aplicación 1: Ventilador mecánico

Las fallas crónicas del ventilador mecánico, ver Figura 3.11, es decir, que ocurren con mayor frecuencia pero que no implican mucho tiempo fuera de servicio son: a) asociadas al usuario y b) falla en la celda de oxígeno. El primer tipo tiene diversos motivos como, mal montaje de circuito paciente, mala manipulación que termina en la rotura de alguna parte mecánica o electrónica, alerta de una falla que al momento de repararla se comprueba que nunca existió, mala interpretación de la lectura de las unidades de medida de flujo u oxígeno, entre otros. Esto se soluciona capacitando y supervisando a los usuarios en la manipulación del equipamiento, dejando a su vez en evidencia la importancia de una buena utilización del equipamiento médico. La celda de oxígeno, es la segunda falla considerada crónica. Ésta requiere constantemente ser cambiada, ya que su vida útil es de 6 a 12 meses, siendo menor en algunos casos por tratarse de un repuesto alternativo. Su TFS promedio para cada evento es de 2.4 meses, ver Tabla 3.4, equivalente en su mayoría a gestión para la compra del repuesto, ya que el TTR sólo es un cambio de repuesto, que dura 2 minutos, según lo afirmado en una entrevista con el técnico encargado de realizar las mantenciones al hospital. En consecuencia, es importante que los administrativos, ya en conocimiento de esto, realicen las tareas de órdenes de compra aproximadamente 3 meses antes de cuando le corresponda cambio de celda de oxígeno. En una primera instancia, se podrían contar 3 meses después de cuando falló por última vez, considerando que se adquiere un repuesto original. Por otra parte, las fallas agudas son aquellas que presentan menor frecuencia pero su TFS es grande, dentro de éstas se cuentan: a) pantalla LCD, b) ventilador de refrigeración, c) interface de comunicación, d) sensor de flujo y e) diafragma del sistema de exhalación. Estos son repuestos, cuyas fallas ocurren aleatoriamente. Para ello es recomendable realizar inspecciones de estos, durante los mantenimientos preventivos y cuando el presupuesto de C.R. Operaciones del HGGB lo permita, tenerlos en bodega. Finalmente, las fallas

que actualmente se encuentran bajo control son: a) válvula de seguridad y b) transductor de entrada de presión de O<sub>2</sub>.

Tabla 3.4. Tabla de datos para criterio de Jackknife para ventilador mecánico

Tipos de falla	N° de fallas (c/ 4 años)	TFS total (días c/ 4 años)	TFS total (meses c/ 4 años)	TFS (meses)	TFS meses * n° de fallas (adim)	Indisponibilidad media
Asociadas al usuario	18	237	7,8	0,4	7,8	0,57
Celda de oxígeno	15	1085	35,7	2,4	35,7	0,68
Pantalla LCD	4	784	25,8	6,4	25,8	2,55
Ventilador de refrigeración	3	450	14,8	4,9	14,8	3,40
Transductor de entrada de presión de oxígeno	2	90	3,0	1,5	3,0	5,10
Válvula exhalatoria desmontada	2	5	0,2	0,1	0,2	5,10
Diafragma del sistema de exhalación	1	98	3,2	3,2	3,2	10,19
Interface de comunicación	1	188	6,2	6,2	6,2	10,19
Válvula de seguridad	1	59	1,9	1,9	1,9	10,19
Sensor de flujo	1	104	3,4	3,4	3,4	10,19
<b>Promedio</b>	<b>4,8</b>		<b>10,2</b>	<b>3,1</b>	<b>10,2</b>	

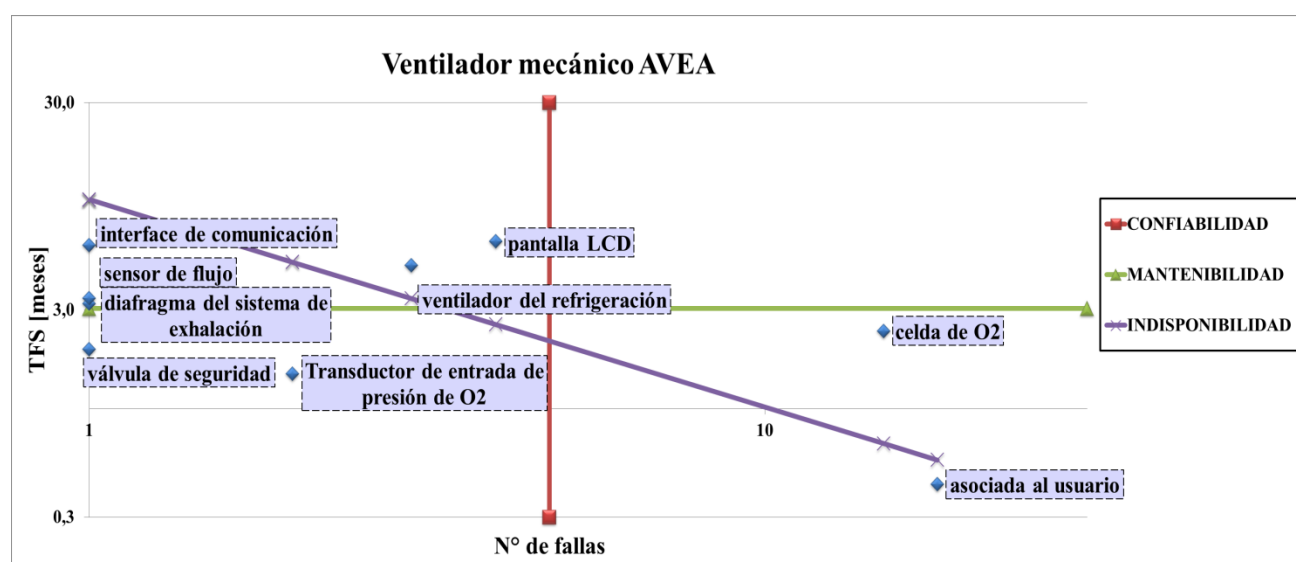


Figura 3.11. Criterio de Jackknife para ventilador mecánico

### 3.4.2. Aplicación 2: Máquina de anestesia

En la máquina de anestesia, a diferencia del caso anterior, ver Figura 3.12, existen fallas agudas y crónicas de los siguientes repuestos: a) sensor de flujo, b) celda de O<sub>2</sub>, y c) flujómetro lateral. Estos dos últimos tienen un TFS, ver Tabla 3.5, cercano a 2 meses para cada evento. La falla común de b) es el cumplimiento de su vida útil, por lo tanto, es necesario realizar las mismas acciones descritas anteriormente. Mientras que para c) las fallas mecánicas son más comunes, debido a su posición vulnerable, adosada al costado derecho de la máquina. El sensor de flujo tiene un valor menor de

TFS y sus fallas comúnmente son generadas por descalibración. Ocurriendo aproximadamente cada 9 meses, según la evaluación de sus MTTF, ver Tabla 3.6. Consecuentemente es preciso realizar calibraciones con esa periodicidad. Por otra parte, el cuadrante de “fallas crónicas”, son asociadas al usuario, escapándose a la gestión de la tarea de los planificadores de mantenimiento, haciéndose pertinente en este caso, hacer recomendaciones al usuario. La única falla aguda, involucra la pantalla táctil produciéndose rara vez, por lo tanto su mantenimiento adecuado es el correctivo. Las fallas que se encuentran bajo control son: a) fuente de poder del absorbedor, b) selector de ventilación, c) fuelle, d) desgaste de o´ring y e) carga de cilindros. Ésta última se engloba dentro de la categoría de falla de usuario, pero es relevante dejarla al descubierto por ocurrir más de una vez y ser simplemente un descuido. Además esto es parte de una rutina de inspección antes de cada procedimiento quirúrgico.

Tabla 3.5. Tabla de datos para criterio de Jackknife para máquina de anestesia

Tipo de falla	N° de fallas (c/ 4 años)	TFS total (días c/ 4 años)	TFS total (meses c/ 4 años)	TFS (meses)	TFS meses * n° de fallas (adim)	Indisponibilidad media
Asociada al usuario	11	243	7,99	0,73	7,99	0,34
Sensor de flujo	6	199	6,54	1,09	6,54	0,62
Celda de O2	5	283	9,30	1,86	9,30	0,74
Flujometro lateral	4	239	7,86	1,96	7,86	0,93
Desgaste de o´ring	3	14	0,46	0,15	0,46	1,23
Fuelle	2	2	0,07	0,03	0,07	1,85
Carga en los cilindros	2	12	0,39	0,20	0,39	1,85
Pantalla táctil	2	132	4,34	2,17	4,34	1,85
Fuente de poder del absorbedor	1	1	0,03	0,03	0,03	3,70
Selector de ventilación	1	1	0,03	0,03	0,03	3,70
Promedio	3,7		3,702	0,8	3,702	

Tabla 3.6. MTTF para el sensor de flujo de la máquina de anestesia

	TTF <sub>1</sub> [días]	TTF <sub>2</sub> [días]	MTTF [meses]
<b>Componente 4</b>	415	394	9,44
<b>Componente 5</b>	41		

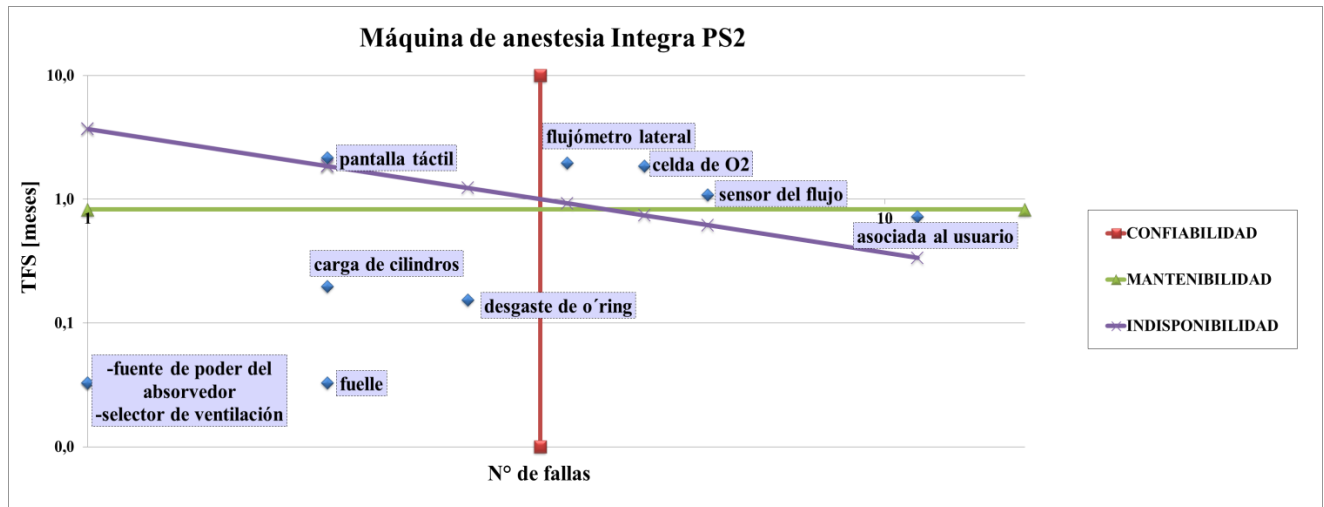


Figura 3.12. Criterio de Jackknife para máquina de anestesia

### 3.5. Distribución estadística

Como se detalló anteriormente, la distribución Weibull es característica para equipos mecánicos, sin embargo, también representa los equipos del tipo electrotécnicos, ya que, cuando  $\beta=1$  esta distribución se convierte en exponencial.

El método que determina los parámetros de una distribución del tipo Weibull es llamado Allen Plait -detallado en la sección 2.5.2-.Éste utiliza una aproximación consensuada para determinar la función de distribución  $F(t)$ , cuya curva se describe en base a sus TTF. Permitiendo conocer así, el estado actual de los equipos a través de, la tasa de falla, función de densidad, entre otros. Para este caso de estudio, no se utilizan todos los equipos previamente seleccionados, es decir, los 13 ventiladores mecánicos y las 5 máquinas de anestesia, ya que, los resultados se pueden ver alterados si existe un desfase entre las fechas en que comienzan a funcionar los equipos y de registro de su historial de fallas. Por consiguiente, para solucionar esta problemática se tienen dos opciones: 1) seleccionar los componentes que tengan registro de su comportamiento desde el momento que comenzó a funcionar y 2) duplicar las fallas ocurridas para completar la data de los años que se desconoce. Esto último ocurre en las máquinas de anestesia, consecuentemente se seleccionaron los componentes 1 y 2, cuya fecha de inicio de actividades es el 2007 y se tiene registro desde el 2011, se completa la data desconocida en estos dos años, con las fallas ocurridas entre el 2011 y el 2014. Por otra parte, en el caso de los ventiladores mecánicos, se utiliza la solución 1), ya que existen componentes como el 6, 9, 10 y 13, con historial completo desde el 2008.

### 3.5.1. Aplicación 1: Ventilador mecánico

Al identificar los datos, para los ventiladores mecánicos, con un 99.75 % de coeficiente de correlación, se obtuvieron los parámetros expuestos en la Tabla 3.7. Allí  $\beta$  es cercano a 0.9. Por lo tanto, se aproxima bastante a una distribución exponencial donde, su tasa de falla tiende a una constante, ver Figura 3.14.

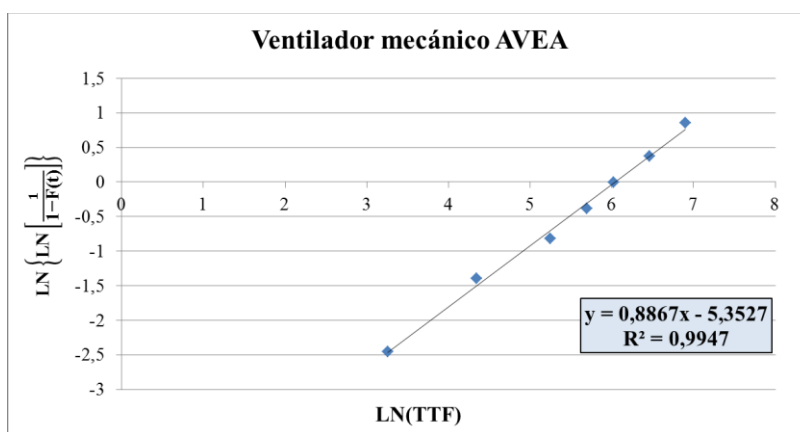


Figura 3.13. Distribución Weibull para ventilador mecánico

Tabla 3.7. Parámetros Weibull para el ventilador mecánico

<b>Beta (<math>\beta</math>)</b>	0,87
<b>Alfa (<math>\alpha</math>)</b>	406,53

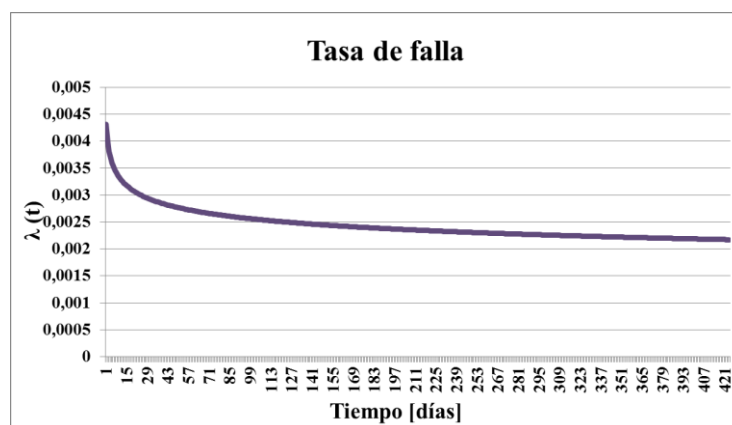


Figura 3.14. Tasa de falla descrita para ventilador mecánico

Para describir la curva de confiabilidad se utilizan los datos de TBF o TTF, es decir, los mismos ocupados para determinar los parámetros  $\beta$  y  $\alpha$ . Para la curva de mantenibilidad se manipulan los TFS, el cual contiene el TTR -utilizados en la teoría de confiabilidad, Figura C.3-, ver Figura 2.4.

En la Figura 3.15 se visualiza que, a medida que van aconteciendo los días el porcentaje de certeza que no ocurra una falla va disminuyendo rápidamente. En un caso específico, de los primeros 18 días, con un 90 % de probabilidad se puede afirmar que no ocurrirá una falla. Por otra parte, con un 70 % de probabilidad se puede afirmar que la próxima reparación se demorará menos 15 días, ver Figura 3.16.

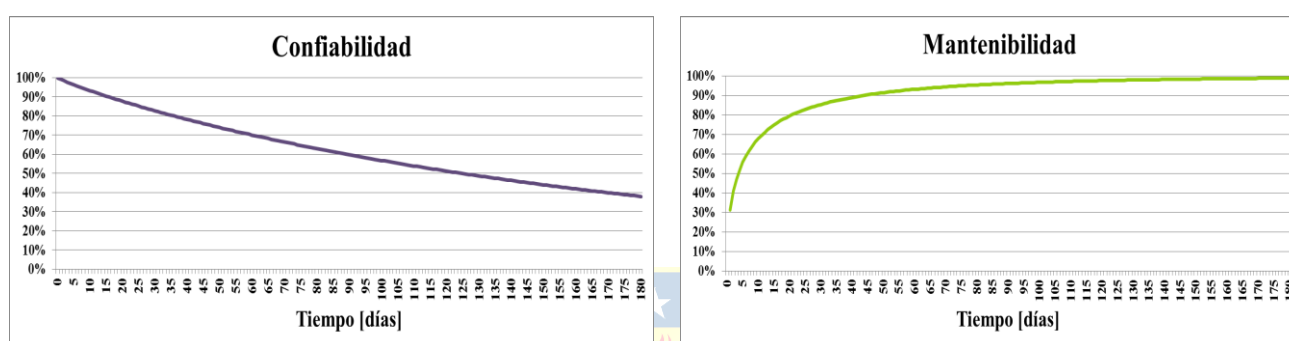


Figura 3.15. Curva de confiabilidad para el ventilador mecánico. Figura 3.16. Curva de mantenibilidad para el ventilador mecánico.

En la Figura 3.17, se representa la  $f(t)$  para los ventiladores mecánicos, donde la tasa de decrecimiento es lenta en un principio. Posteriormente el modo asintótico no se alcanza a visualizar en la ventana de tiempo de la figura.

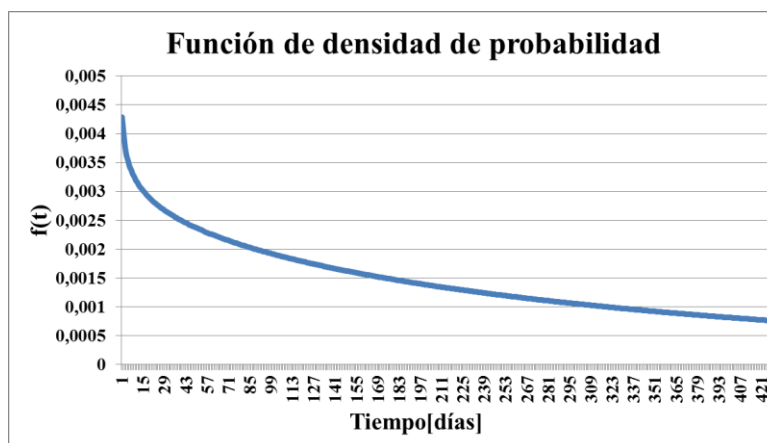


Figura 3.17. Función de densidad de probabilidad para ventilador mecánico



### 3.5.2. Aplicación 2: Máquina de anestesia

Utilizando el mismo método anterior, de la máquina de anestesia, ver Figura 3.18, se logra un coeficiente de correlación de 0.92, por lo tanto, la ecuación de la recta obtenida y los parámetros Weibull que serán extraídos de ella, son representativos.

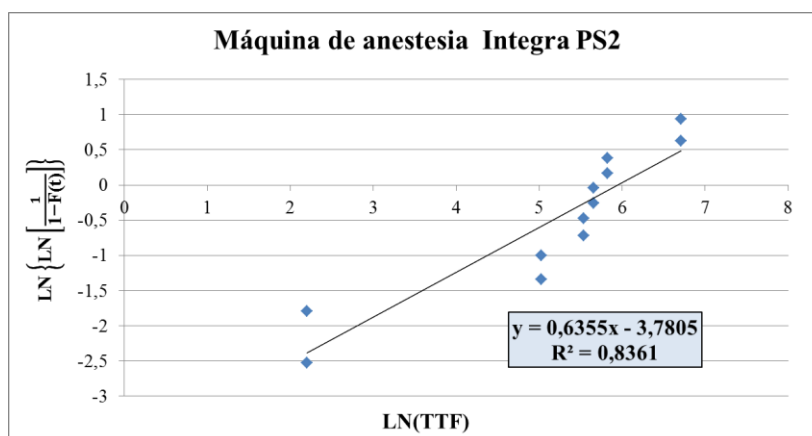


Figura 3.18. Distribución Weibull para máquina de anestesia

Tabla 3.8. Parámetros Weibull para máquina de anestesia

Beta ( $\beta$ )	0,636
Alfa ( $\alpha$ )	381

En Tabla 3.8, se muestran los parámetros obtenidos, donde  $\beta < 1$ , es decir, el equipo se encuentra en la etapa de mortalidad infantil. Esto se confirma con la Figura 3.19. Donde se presenta una curva más pronunciada que en el caso anterior.

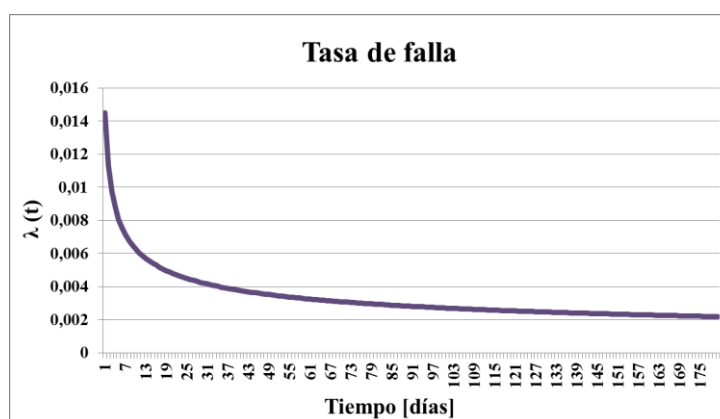


Figura 3.19. Tasa de falla descrita para máquina de anestesia

La Figura 3.20, a diferencia de la Figura 3.15, presenta un decaimiento de la confiabilidad más lento. Por lo tanto existe un % de probabilidad más alto de que no ocurrirá una falla, transcurridos más días desde la partida del equipo. Esto se debe a que  $\beta$  es cercano a 1.

La mantenibilidad, ver Figura 3.21, es muy similar a la expuesta en la Figura 3.16, teniendo aproximadamente un 80 % de certeza que la próxima reparación ocupará menos de 25 días.

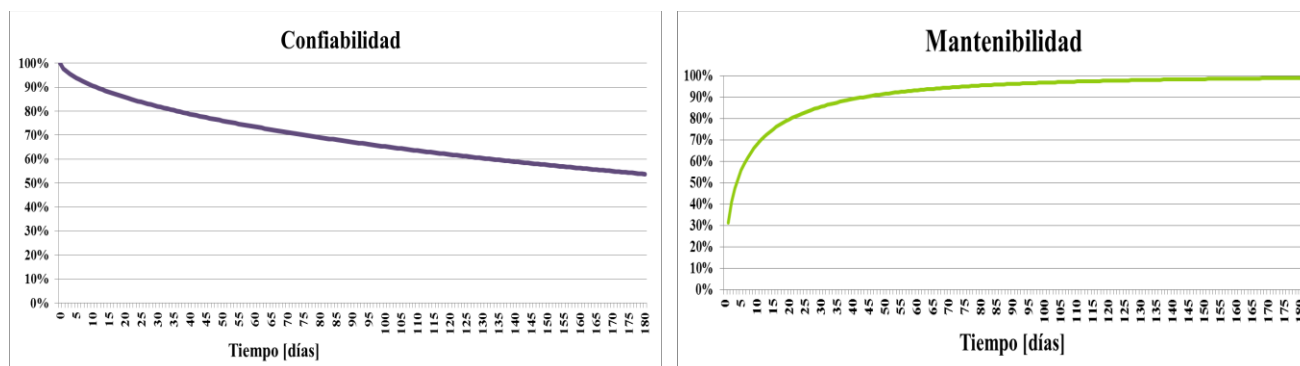


Figura 3.20. Curva de confiabilidad para la máquina de anestesia. Figura 3.21. Curva de mantenibilidad para la máquina de anestesia.

La función de densidad de probabilidad  $f(t)$ , para la máquina de anestesia, ver Figura 3.22, a medida que pasan los días, la probabilidad se hace más pequeña. Por ejemplo, la velocidad de cambio de mantenibilidad es extremadamente alta al inicio del proceso. Solamente después de pasado unos 90 días se podría hablar de una tendencia asintótica.

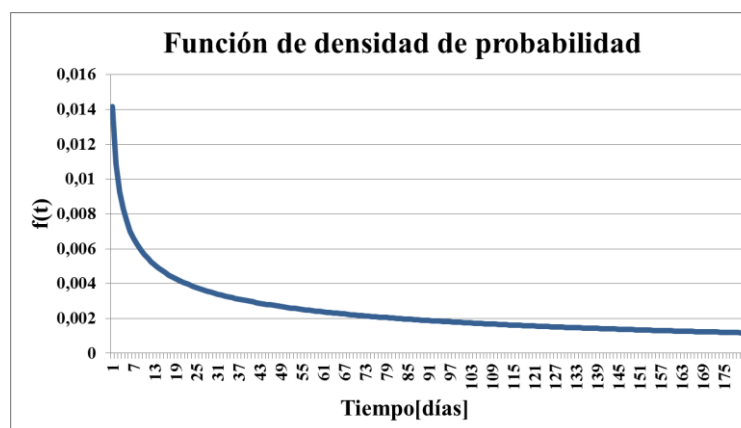


Figura 3.22. Función de densidad de probabilidad para máquina de anestesia

### 3.6. Determinación de la periodicidad de las mantenciones

Para solucionar esta problemática planteada el modelo seleccionado es el número 3 de la sección 2.6.3, ya que, en comparación a los anteriores, es el único que reúne dos características esenciales como son: a) determinar el número de mantenciones a realizar en unidades de tiempo (ut) y b) la disponibilidad de los datos necesarios. Estos se condicionaron previamente de la siguiente forma: a) 4 componentes del ventilador mecánico, cuyo historial se inicia el año 2008 y b) 2 componentes de la máquina de anestesia, cuya data se completa desde el 2007.

Las adaptaciones al ámbito biomédico del modelo previamente planteado son:

- En el área mecánica, existe una diferencia entre inspeccionar y mantenimiento preventivo. El primero es, solamente intervenir el equipo visualizando qué componentes pueden estar fallando, qué acciones son necesarias para que continúe funcionando correctamente, etc. Todo esto para luego tomar una decisión sobre el tipo de intervención y cuando se realizará, i.e., de mantenimiento preventivo o correctivo. En el área hospitalaria, no existe tal divergencia de conceptos, solamente existe el mantenimiento preventivo. Por ende, los conceptos de inspeccionar y mantenimiento preventivo, se toman como equivalentes.
- Según el modelo 3, existe una diferencia entre el “ $c_f$ ” asociado al “mean time to inspections” (MTTI) y MTTR. El primero sería asociado a la falta de producción concretada solamente al momento de inspeccionar. El segundo, sería el costo relacionado por dejar de producir debido a una salida forzada. Cuando se averigua el costo de indisponibilidad de un equipo médico, se conocen costos por un día, no por un tiempo menor. En relación a esto, ambos “ $c_f$ ” se consideraron iguales. Una confirmación a esta idea, se puede ver en [24], donde al citar este modelo también hace esta aproximación.
- Es importante destacar la discrepancia entre los conceptos “tasa de fallas” y “número de fallas en ut”. A grandes rasgos el primer concepto, considera el número de componentes que comienzan el experimento, ver Anexo C.4. Mientras que el segundo, no considera esto.

#### 3.6.1. MTTR y MTTI

Cada tipo de falla tiene asociado un TTR, ver Tabla 3.9. Cada uno de los TTR, ver Figura 2.4, se componen del tiempo en: a) reparación, i.e. tiempo *in situ* ocupado en intervenir el equipo, y b) diagnosticar  $\approx 1$  hora. Luego, gracias al registro de cada equipamiento se logra determinar el MTTR, ver ecuación 3.1.

Tabla 3.9. TTR para cada tipo de falla

Tipo de falla	TTR [días]
Desgaste de o´ring	0,04
Falla de la celda de O <sub>2</sub>	0,04
Falla en el flujómetro lateral	0,06
Falla en el fuelle	0,04
Falla en el sensor de flujo	0,04
Falta de carga en los cilindros	0,05
Fuente de poder del absorbedor	0,06
Falla en pantalla táctil	0,06
problemas de usuario, montaje	0,04
Selector de ventilación	0,05

$$MTTR = \frac{\sum_{k=1}^N 1 + \tau_k}{N} \quad (3.1)$$

Donde,

$\tau_k$  : tiempo *in situ* ocupado en reparar el equipo [hrs]

$N$  : Número total de tiempos para reparar.

$MTTR$  : Tiempo medio para reparar.

Finalmente, para los 6 años de operación que posee el ventilador mecánico, y los 5 años de registro de la máquina de anestesia, se obtienen los MTTR, MTTI y el tiempo total ocupado en inspecciones y reparaciones, presentados en la Tabla 3.10. El MTTI se calcula en base a que una inspección se demora aproximadamente 45 [min] ó 0.03 [días].

Tabla 3.10. MTTR y MTTI para cada tipo de equipamiento

Equipo	$\sum$ TTI [días]	MTTI [días]	$\sum$ TTR [días]	MTTR [días]
Ventilador mecánico	1.625	0.03	0.4	0.04
Máquina de anestesia	1	0.03	2.8	0.04

### 3.6.2. Costos

Los tres tipos de costos evaluados en esta sección son: a) “ $c_f$ ”, costo de falla asociado a la indisponibilidad del equipo, b) “ $c_r$ ”, costo de la reparación, y c) “ $c_i$ ”, costo de una inspección.

El  $c_f$ , lleva consigo un costo de daño al paciente. Por ejemplo, que la máquina de anestesia no se encuentre disponible involucra, no solamente la pérdida de un arriendo de un pabellón, sino también, otros costos de daño al paciente, difíciles de cuantificar. En cualquier escenario, estos desembolsos deben ser remunerados por el hospital. Cuanto está dispuesto a ser retribuido un paciente (cliente) por estos tipos de daños, se conoce en la teoría económica como “*willing to pay*” y “*willing to receive*”. Lo previo implica realizar una compleja recopilación de todos los sucesos que dejarían satisfecho al paciente medio (compensación media por falla de servicio). Estas fallas de servicio, involucra investigaciones y encuestas extremadamente complicadas. En el presente documento se hará abstracción de esta teoría. Es por ello, que se adoptan las siguientes simplificaciones: a) ventilador mecánico, se asocia al costo de indisponibilidad de una cama UCI, ya que, esto implica comprar un día de este servicio a una clínica dentro de la región y b) máquina de anestesia implica dejar de realizar una cirugía, por lo tanto, se relaciona al costo por arriendo de pabellón. Ambos resultados son un promedio del costo de falla cobrado por la Clínica Universitaria de Concepción, Sanatorio Alemán, Clínica Biobío y Hospital Clínica del Sur, , ver Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Costos de falla para equipos de estudio

<b>Equipamiento</b>	<b>[<math>c_f</math> /componente]</b>
Día cama UCI	\$612.921
Arriendo de pabellón	\$513.468

El  $c_i$  se compone de: a) los costos de repuestos renovados periódicamente de manera preventiva ( $c_{rep,i}$ ), entre otros el kit de mantención anual y baterías y b) costo de mano de obra por inspección ( $c_{mo,i}$ ). Análogamente,  $c_r$  incluye: a) los costos de repuestos necesarios para poner nuevamente en operación al equipo ( $c_{rep,r}$ ), y b) los costos de mano de obra por reparación ( $c_{mo,r}$ ). Los  $c_{mo}$  son contenidos en el contrato de mantención (normalmente, adjudicado por 2 años), para mantenciones programadas y correctivas. Estas últimas las veces que sea necesario. Un contrato actual tiene, aproximadamente, los valores por componente mostrados en la Tabla 3.12. Esto se extrapoló a los

años anteriores a modo de facilitar los cálculos. Para obtener los valores de  $c_{mo,i}$  y de  $c_{mo,r}$ , se utilizan los días de TTI y TTR, respectivamente, ver Tabla 3.13.

Tabla 3.12. Costo de mano de obra “ $c_{mo}$ ” para mantenimiento.

Equipo	$c_{mo}$ [\$/mes]	$c_{mo}$ [\$/día]
Ventilador mecánico	\$24.000	\$ 800
Máquina de anestesia	\$20.053	\$ 659

Tabla 3.13. “ $c_{mo,i}$ ” y “ $c_{mo,r}$ ” para cada tipo de equipo

Equipo	$c_{mo,i}$ [\$/día]	$c_{mo,r}$ [\$/día]
Ventilador mecánico	\$ 0,14	\$ 0,59
Máquina de anestesia	\$ 0,4	\$ 0,9

Los costos de repuestos tanto para mantenimiento preventivo como reparativo, se estipulan en la Tabla 3.14. Mientras que estos mismos valores, por cada componente, se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.14. Costo de repuestos “ $c_{rep}$ ” para mantenimiento

Equipo	$c_{rep,i}$ [\$/año]	$c_{rep,i}$ [\$/día]	$c_{rep,r}$ [\$/año]	$c_{rep,r}$ [\$/día]
Ventilador mecánico	\$ 583.221	\$ 1.598	\$ 398.527	\$ 1.092
Máquina de anestesia	\$ 307.020	\$ 841	\$ 698.617	\$ 1.914

Tabla 3.15. “ $c_{rep,i}$ ” y “ $c_{rep,r}$ ” por componente

Equipo	$c_{rep,i}$ [\$/día]	$c_{rep,r}$ [\$/día]
Ventilador mecánico	\$ 123	\$ 84
Máquina de anestesia	\$ 168	\$ 383

### 3.6.3. Constante “ $k$ ”

Según la ecuación 2.16 del capítulo 2, las inspecciones son inversamente (hiperbólicamente) proporcionales al número de fallas, cuya constante de relación es denominada  $k$ . Una opción para determinar ésta, es aplicar el método de mínimos cuadrados, ver ecuación 3.3,

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{pmatrix} = k * \begin{pmatrix} f^{-1} & 1 \\ \vdots & \\ f^{-1} & N \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$(f^{-1})^t * (f^{-1}) * k = (f^{-1})^t * \lambda \quad (3.3)$$

$$k = \{(f^{-1})^t * (f^{-1})\}^{-1} * (f^{-1})^t * \lambda \quad (3.4)$$

El levantamiento de datos se realiza por mes, registrando la cantidad de fallas e inspecciones presentadas, ver Anexo M. Los valores de  $k$  en un año para cada tipo de equipo, se detallan en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Valores de “ $k$ ” para cada tipo de equipo

Equipo	$k$ [fallas/días] inspección
Ventilador mecánico	0,00015
Máquina de anestesia	0,0002

### 3.6.4. Frecuencia de mantenimientos

Los datos necesarios fijados anteriormente, para aplicar la ecuación 2.17, de la sección 2.6.3 (característica del modelo 3), se resumen en la Tabla 3.17 y Tabla 3.18. Como en este caso particular  $c_f \gg c_{rep}$ , el resultado final será independiente de ellos. Esto es consecuente a lo ocurrido en el área hospitalaria, ya que el costo de indisponibilidad de un equipo, puede gatillar en muerte de un paciente fisiológicamente dependiente, cuyo valor monetario es incalculable. Por otra parte, es dependiente de una proporción que involucra índices de confiabilidad. Consecuentemente si disminuyen estos, también se podrán realizar menos mantenimientos preventivas.

El número de inspecciones recomendadas dentro del año para: a) la máquina de anestesia de 1 inspección cada 2 meses y b) el ventilador mecánico de 1 inspección cada 2 meses y medio, ver Tabla 3.19. Ambas soluciones implicarían aumentar la frecuencia actual de las mantenimientos realizadas, por lo tanto aumentaría la cantidad de recursos económicos involucrados a la prevención de fallas.

Tabla 3.17. Resumen de los datos obtenidos previamente.

Equipo	$k$ [fallas/días] inspección	MTTR/MTTI
Ventilador mecánico	0,00015	1,3
Máquina de anestesia	0,00005	1,3

Tabla 3.18. Resumen de los costos

Equipo	$c_f$ [\$/día]	$c_{rep,i}$ [\$/día]	$c_{rep,r}$ [\$/año]
Ventilador mecánico	\$ 612.921	\$ 123	\$ 84
Máquina de anestesia	\$513.468	\$ 168	\$ 383

Tabla 3.19. Frecuencia de mantenimientos para cada equipamiento médico

Equipo	n° de inspecciones al año
Ventilador mecánico	5
Máquina de anestesia	6

Al implementar la frecuencia de mantenimiento recomendada en la Tabla 3.19, la confiabilidad para el ventilador mecánico queda presentada en la Figura 3.23. Mientras que para la máquina de anestesia, se visualiza en la Figura 3.24. El modelo propuesto al determinar una nueva frecuencia de mantenimiento preventivo, mayor a la implementada actualmente, lleva consigo, consecuentemente, un aumento de la confiabilidad del equipamiento.

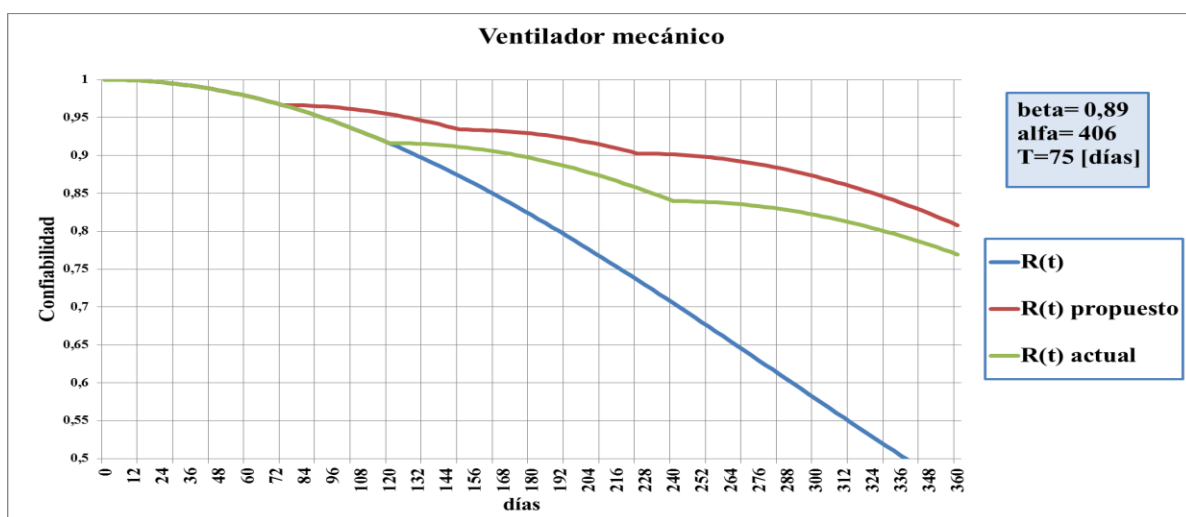


Figura 3.23. Confiabilidad de la solución propuesta para el ventilador mecánico



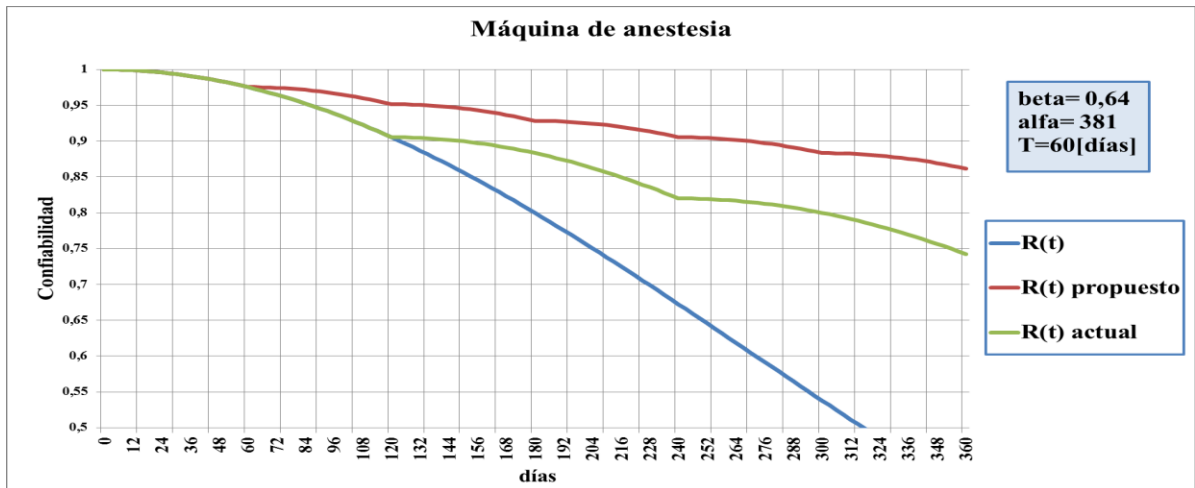


Figura 3.24. Confiabilidad de la solución propuesta para la máquina de anestesia

### 3.7. Conclusiones del capítulo

Con FMECA se deja en evidencia que las hojas de servicios técnicos son muy generales. Siendo a veces difícil de deducir cual es la relación entre la falla funcional y el modo de falla. Para esto se sugiere que el mantenedor registre: las horas de trabajo reales que involucra cualquier tipo de mantenimiento y redacte técnicamente, la falla encontrada y su causa. Con esto se podrá nutrir con más información el FMECA disponiendo así, en un futuro, de antecedentes que aporten más frente a un evento. Luego, al emplear el criterio de Jackknife, se concluye que la falla de la celda de oxígeno y las asociadas al usuario, son del tipo crónicas para el ventilador mecánico. Es por ello, que en el primer caso, al conocer cómo funciona la compra de repuestos del hospital, es necesario tomar acciones con meses de antelación respecto a cuándo corresponde cambiar el repuesto. Por otra parte, para la máquina de anestesia, existen fallas agudas y crónicas. A diferencia del ventilador mecánico éstos, involucran al flujómetro lateral y sensor de flujo. Las fallas asociadas al usuario, son del tipo crónicas en ambos equipos de estudio, es por ello, que se sugiere tener capacitaciones y supervisiones de la manipulación de estos equipos. Teniendo comunicación constante con los usuarios sobre “inquietudes” de manipulación.

En la etapa de elegir la distribución más adecuada, previendo que los resultados se pueden ver alterados si existe un desfase entre las fechas en que comienzan a funcionar los equipos y de registro de su historial de fallas, se realizan las siguientes modificaciones a la data para : 1) el ventilador mecánico, se seleccionan los componentes que tengan registro de su comportamiento desde el momento que comenzó a funcionar y 2) la máquina de anestesia, se duplicaron las fallas ocurridas para completar la data de los años que se desconoce. Luego de esto, en consecuencia a que: i)  $\beta$  es

cercano a 1 y ii) los equipos de este estudio, son del tipo electromecánicos, se utiliza la distribución Weibull. Los resultados arrojados para ambos equipos, evidencian que se encuentran en la fase de mortalidad infantil presentando, en el caso del ventilador mecánico, un decaimiento significativo de la probabilidad de buen funcionamiento y un crecimiento de la mantenibilidad más lento.

Finalmente al emplear el modelo 3, para determinar la frecuencia óptima de las mantenciones, el resultado se hizo independiente de los costos, ya que, los costos de fallas son muy superiores a los de mano de obra y repuestos. En consecuencia, las mantenciones preventivas deben ser realizadas para: a) el ventilador mecánico, cada 2,5 meses y b) la máquina de anestesia cada 2 meses. Ambas soluciones proponen una frecuencia mayor a las implementadas actualmente. Por lo tanto, implica involucrar mayor cantidad de recursos. Aunque en comparación a los costos de indisponibilidad, se trata de una inversión menor.



## CAPITULO 4. Conclusiones

---

El RCM es una tarea que debe cumplir con dos aspectos esenciales: a) compromiso de todos los actores del mantenimiento, i.e., los usuarios, planificadores de mantenimiento, abastecimiento, entre otros y b) necesita una fuente abundante de datos históricos sobre las reparaciones, entre otros: fechas y tiempos asociados al ciclo de operación y falla, informes técnicos de diagnóstico, costos de convenios y actividades correctivas. Cualquier metodología de RCM, a través del FMECA, informa sobre el mantenimiento, las fallas ocurridas, los modos de falla y días de indisponibilidad involucrados. Por esta vía se revelan los costos asociados.

A nivel hospitalario, es factible implementar RCM y realizar planillas de FMECA. Éste trabajo deja en evidencia que las hojas de servicios técnicos actualmente utilizadas son muy generales. Consecuentemente, a veces resulta difícil deducir cual es la relación entre la falla funcional y el modo de falla. Cabe destacar que la calidad de las conclusiones, están en directa relación con la información otorgada por el técnico encargado de las mantenciones como la logística en la cual se apoya.

Por otra parte, el criterio de Jackknife muestra que el origen de las fallas es atribuible, principalmente, a la imprudente operación del usuario. En los equipos electromecánicos hospitalarios existen: 1) componentes delicados donde no es importante la frecuencia de mantención sino más bien los cuidados que deben tenerse durante la operación del mismo (por ejemplo, las “pantallas touch”), 2) dispositivos que requieren una prudente práctica de ajuste y mantención luego de un procedimiento médico (por ejemplo, el “circuito paciente”, acoplamiento del “canister”) y 3) Otros componentes, que se caracterizan por exhibir una frecuencia de falla importante (celda de oxígeno). Para ellos es necesario emitir una orden de compra meses previo a su reemplazo programado (por esta vía se evitarían indisponibilidades de hasta 271 días al año, i.e., aproximadamente 5 meses, en el caso del ventilador mecánico analizado).

Lo anterior, refuerza la necesidad de las capacitaciones y supervisiones al personal médico, sobre la correcta manipulación de estos equipos. Así mismo, los fines organizacionales mayores, conllevan a acatar las tres medidas planteadas previamente. Como consecuencia de esto, se dispondrá de más

tiempo para evaluar otros escenarios y mejoras de los procesos hospitalarios. Todo lo previo se traduce en un mejor servicio al paciente.

Al optimizar los costos para determinar la frecuencia de las mantenciones, paradójicamente en el modelo existe poca influencia de los precios unitarios. Lo previo se debe a que el costo de indisponibilidad asociado a la externalización del servicio clínico, es muy alto comparado con el costo de repuestos y mano de obra. Según este modelo, el número de mantenciones preventivas al año, para el ventilador mecánico y la máquina de anestesia deben ser 5 y 6, respectivamente. Ambas soluciones proponen una frecuencia mayor a la actual y consecuentemente, aumentan la confiabilidad. Por lo tanto, involucran mayor cantidad de recursos por concepto de inversiones. No obstante la reducción del costo de indisponibilidad es mayor a estos.

El mantenimiento hospitalario, actualmente, presenta un vacío legal en relación a las técnicas de mantenimiento. Esto no ocurre en el ámbito de las ingenierías mecánica y eléctrica. Lo anterior describe un proceso dicotómico, debido a que por una parte la acreditación hospitalaria busca entregar calidad y seguridad del paciente y por otra, le otorga poca relevancia a estos temas y se muestra deficiente.

Finalmente, esta memoria de título: 1) explota ciertos procedimientos de mantenimiento utilizados a nivel industrial que son extrapolados al área biomédica. Esto es: a) FMECA, b) criterio de Jackknife y c) frecuencia económica de las mantenciones preventivas y 2) propone una estrategia de optimización bi-objetivo para el mantenimiento de equipos médicos críticos.

### **Trabajos Futuros**

Desarrollar un software, que automáticamente entregue la frecuencia óptima de mantención y los índices de confiabilidad estandarizados. Además, que entregue una alerta sobre las actividades que se deben materializarse en el corto, mediano y largo plazo, i.e., coordinar una visita preventiva, mediciones de parámetros, preguntar a los usuarios sobre el funcionamiento del equipamiento, inspeccionar en terreno el estado de los equipos, etc.

Desarrollar programas de mantenimiento predictivo, que permitan monitorear los parámetros del equipamiento médico y constituir un registro de hoja de vida. Para esto es necesario invertir en analizadores biomédicos de seguridad eléctrica, de flujo para ventiladores o de flujo de gases en el caso de las máquinas de anestesia y en software de gestión.



## BIBLIOGRAFÍA

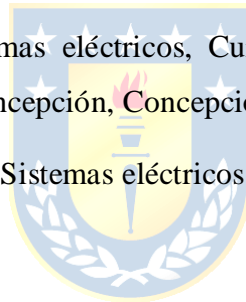
- [1] Amendola L. (2006). Gestión de activos de proyectos industriales. Universidad Politécnica de Valencia. Editorial de la UPV
- [2] Departamento de tecnologías Sanitarias Esenciales (2012). Introducción al programa de mantenimiento de equipos médicos. Serie de documentos técnicos de la OMS sobre dispositivos médicos. Ver [http://whqlibdoc.who.int/publications/2012/9789243501536\\_spa.pdf](http://whqlibdoc.who.int/publications/2012/9789243501536_spa.pdf)
- [3] Dhillon B.S. (2006). Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers. Editorial CRC Press.
- [4] Mariángel D., Avendaño G. (2011). Programa de mantención preventiva equipamiento médico crítico de uso clínico HGGB. C.R Operaciones Hospital Regional Guillermo Grant Benavente, Concepción, Chile
- [5] Saéz R., Avendaño G. (2012). Especificaciones técnicas, servicio de mantención preventiva y reparativa, de máquinas de anestesia del Hospital Clínico Regional “Guillermo Grant Benavente” de Concepción. C.R Operaciones Hospital Regional Guillermo Grant Benavente, Concepción, Chile
- [6] Moubray J. (2004). RCM II: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Editorial Aladon LLC, North Carolina, USA
- [7] Poveda A. (2011). Aplicación de la Metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para el Desarrollo de Planes de Mantenimiento. Artículo de Tesis Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ver <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/20586/1/Articulo%20CICYT%20APOVEDA%20RCM.pdf>
- [8] Viveros P., Stegmaier R., Kristjanpoller F., Barbera L., Crespo A. (2012). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. Revista de Chilena de Ingeniería, Volumen 21, N°1, pp. 125-138. Ver [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052013000100011](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052013000100011)
- [9] Parra V. Metodología RCM aplicada a un equipo crítico de la línea de molienda SAG, Planta concentradora Laguna Seca, Minera Escondida LTDA. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

- [10] Moubray J., Pérez C. (2013). Paradigmas del mantenimiento. Curso Gestión de la Mantención, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, Octubre 2013.
- [11] Jairo J., Beltrán F., Moreno S (2009). Modelo para el proceso de mejoramiento de planes de mantenimiento basado en RCM para equipos críticos de facilidades de superficie en campos petroleros en tierra firme. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisico-mecánicas. Ver [repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7687/2/132270.pdf](http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7687/2/132270.pdf)
- [12] AMFE: Análisis Modal de Fallos y Efectos. Librería Hor Dago. (2014). Departamento de Promoción Económica. Ver <http://blog.pucp.edu.pe/media/avatar/665.pdf>
- [13] Belmonte C (2012). Propuestas de mejoras de análisis de criticidad en la mantención de equipos médicos en Hospital Penco- Liquen. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [14] Almendras C (2013). Modelo de Plan de Mantención para la Unidad de pacientes Críticos Infantil del Hospital de los Ángeles Dr. Víctor Ríos Ruiz. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [15] Departamento de tecnologías Sanitarias Esenciales (2012). Introducción al programa de mantenimiento de equipos médicos. Serie de documentos técnicos de la OMS sobre dispositivos médicos. Ver [http://whqlibdoc.who.int/publications/2012/9789243501536\\_spa.pdf](http://whqlibdoc.who.int/publications/2012/9789243501536_spa.pdf)
- [16] Shiwray A. (2011). Mantenimiento IV: Diagrama de Pareto. Ver <http://mtto4.blogspot.com/2011/10/diagrama-de-pareto.html>
- [17] Barrientos G (2013). Ejercicio en clases. Curso de Gestión de la Mantención, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [18] Bergero H., Furlanetto L., Macchi M., Mastroforti C., Turconi G. (2008). Introducción a la gestión del mantenimiento, Tenaris University, Buenos Aires, Argentina.
- [19] Centro de Seguridad de Procesos Químicos. (2010). Appendix G: Statistical Distributions Available for Use as Failure Rate Models. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Second Edition. Ver <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470935422.app7/pdf>
- [20] Pascual R. (2008). El arte de mantener. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, Santiago, Chile

- [21] Tamborero J. Fiabilidad: la distribución de Weibull. (2014). Centro Nacional de Condiciones de Trabajo. Ministerio del Trabajo y asuntos sociales, España. Ver [http://www.dmae.upm.es/WebpersonalBartolo/Probabilidad/8\\_distribuciones-continuas/Weibull.pdf](http://www.dmae.upm.es/WebpersonalBartolo/Probabilidad/8_distribuciones-continuas/Weibull.pdf)
- [22] Barrientos G (2013). “Gestión de la Mantención”. Curso de Gestión de la Mantención, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile
- [23] Dhillon B.S (2006). Maintainability, maintenance, and reliability for engineers. Taylor & Francis Group. Editorial CRC Press.
- [24] Meruane V. (2014). Gestión de Activos Físicos. Apuntes del curso ME5701. Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile. Ver <http://viviana.meruane.com/me5701.pdf>
- [25] Superintendencia de Salud. (2009). Manual del Estándar General de Acreditación para Prestadores Institucionales de Atención Cerrada. Gobierno de Chile. Ver [http://www.supersalud.gob.cl/porta1/articles-4530\\_Manual\\_AC\\_pdf.pdf](http://www.supersalud.gob.cl/porta1/articles-4530_Manual_AC_pdf.pdf)
- [26] Superintendencia de Salud. (2009). Manual del Estándar General de Acreditación para Prestadores Institucionales de Atención Cerrada. Gobierno de Chile Ver [http://www.supersalud.gob.cl/porta1/articles-4530\\_pauta\\_AC\\_pdf.pdf](http://www.supersalud.gob.cl/porta1/articles-4530_pauta_AC_pdf.pdf)
- [27] Artigas M. (2014). Autorización Sanitaria. Departamento de Calidad y Seguridad del Paciente. Ver <http://web.minsal.cl/porta1/url/item/b64310d5aaef070ce04001016401488f.pdf>
- [28] Ministerio de Salud. (1999). Aprueba Reglamento de Control de Productos y Elementos de Uso Médico. Biblioteca del Congreso Nacional. Identificación de Norma: DTO-825. Ver [http://www.ispch.cl/sites/default/files/5\\_agencia\\_reguladora/D.S.%20825-98.pdf](http://www.ispch.cl/sites/default/files/5_agencia_reguladora/D.S.%20825-98.pdf)
- [29] Ministerio de Salud. (2012). Aprueba Guía Técnica de sistema de Tecnovigilancia de Dispositivos Médicos en Chile. Ver [http://www.ispch.cl/sites/default/files/res\\_exenta\\_2622.pdf](http://www.ispch.cl/sites/default/files/res_exenta_2622.pdf)
- [30] Martínez J., Moreno Y., Pinilla G. (2009). Máquina de anestesia. Manual Mantenimiento de equipo biomédico. Ver <http://es.scribd.com/doc/20171149/Taller-Maquina-Anestesia>
- [31] Hernández A., Triolet A. (2002). Modos de ventilación mecánica. Revista Cubana de Medicina Intensiva y Emergencias, pp. 82-94. Ver [http://bvs.sld.cu/revistas/mie/voll\\_1\\_02/mie14102.pdf](http://bvs.sld.cu/revistas/mie/voll_1_02/mie14102.pdf)



- [32] Chan A. Y. K. (2008). Biomedical Devices Tecnology: Principles and Design. Editorial Charles C Thomas Publisher LTD, Estados Unidos. Ver <http://books.google.cl/books?id=al9LufqNF4UC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- [33] Center For Safety, Simulation and Advanced Learning Technologies. (2014). VAM – Anestesia Virtual Machine.[Online] Ver <http://vam.anest.ufl.edu/simulations/vam.php>
- [34] Grupo de anestesia (Equimed, Propersa, farMed, Equifarma). (2014). La Máquina de Anestesia. [Online] Ver <http://190.156.226.185/sam/docs/varios/protocolosinternet/informacion%20ventilador/LA%20MAQUINA%20DE%20ANESTESIA>
- [35] Barraza E. (1995). Máquinas para anestesia. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. Ver <http://tesiuami.izt.uam.mx/uam/aspum/tesis.php?documento=UAM5003.PDF>
- [36] Duque D. (2014). Máquinas de Anestesia. Ver <http://prezi.com/reei0tfmmf-k/maquinas-de-anestesia/>
- [37] López E. Confiabilidad de Sistemas eléctricos, Curso de Confiabilidad, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [38] Procobre. (2014). Confiabilidad de Sistemas eléctricos. Ver [http://procobre.org/es/ddownload\\_category/sistemas-electricos-ie/](http://procobre.org/es/ddownload_category/sistemas-electricos-ie/)



## BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA


- ✓ Estrada J., Cifuentes P. (2011). Gestión de mantenimiento de equipos médicos en la fundación clínica infantil Club Noel: Módulo de Ingeniería Biomédica. Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali. Ver <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/1141/1/TBM00269.pdf>.
- ✓ Rodríguez E., Miguel M., Sánchez M.C. (2001). Gestión del Mantenimiento para equipos médicos. Memorias II Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, La Habana, Cuba. Ver <http://www.hab2001.sld.cu/arrepdf/00187.pdf>
- ✓ Amendola L. Depool T. (2011). Estrategias de confiabilidad en los procesos de paradas de planta. Departamento de Proyectos de Ingeniería, Universidad Politécnica de Valencia. Ver [http://www.pmmlearning.com/images/stories/JORGE/estrategias\\_confiabilidad\\_en\\_paradas.pdf](http://www.pmmlearning.com/images/stories/JORGE/estrategias_confiabilidad_en_paradas.pdf)
- ✓ Gangi S., Ingaramo t., Sastre J., Pontelli D. (2014). Mantenimiento centrado en confiabilidad: Ejemplo de aplicación a la industria farmacéutica. Facultad de Ciencias Exactas Físicas Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Ver <http://www.fices.unsl.edu.ar/~uniram/trabajos/130%20-MANTENIMIENTO%20CENTRADO%20EN%20LA%20CONFIABILIDAD%20%20EN%20INDUSTRIA%20FARMACEUTICA-Gangi%20S.,%20Ingaramo%20R%20%20y%20otros.pdf>
- ✓ Amendola J. (2006). Gestión de Proyectos de Activos industriales. Editorial Universidad Politécnica Valencia.
- ✓ Aránguiz A. (2013). “Introducción a la resolución de problemas mediante Análisis Causa Raíz”. Curso de Gestión de la Mantención, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- ✓ Arya D. (2014). La innovación en los sistemas de salud públicos de salud ¿Entendemos realmente su potencial?. Revista de Innovación Sanitaria y Atención Integrada, Volumen 6, N° 1. Ver <http://pub.bsalut.net/risai/vol6/iss1/1/>
- ✓ Perilla M. (2005). Modelo de evaluación de gestión de mantenimiento de equipo biomédico en las IPS. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas. Ver <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7797/2/116652.pdf>

- ✓ Orozco W., Cortés F. (2012). Caracterización de la gestión del mantenimiento de equipo biomédico en servicios de urgencia de clínicas y hospitales de Medellín en el período 2008-2009. Ver <http://revistas.urosario.edu.co/index.php/revsalud/article/view/2457>



# ANEXOS

## A. Hoja de trabajo de ventilador mecánico


Nº 000067

**Retiro y Entrega Ventiladores Mecánicos para Mantenimiento**

Cliente y Identificación de Equipo	
Establecimiento: <i>Hospital Regional de Concepción</i>	
Equipo: <i>Ventilador Mecánico</i>	Marca: <i>Siemens</i>
Modelo: <i>Servo I</i>	Servicio: <i>Uci Quirúrgica</i>
Serie: <i>06087511</i>	Inventario: <i>2-23785</i>
Hrs: <i>38443</i>	Fecha Revisión: <i>18/02/2014</i>

Accesorios	SI	NO
Cable Poder	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Manguera de Aire	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Manguera de Oxígeno	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Brazo Articulado	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Soporte de Filtro Exhalatorio	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Cassette Exhalatorio	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Carro de Transporte	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Nombre del Funcionario Responsable para el Retiro Del Equipo	Nombre del Funcionario Responsable para la Entrega Del Equipo
Nombre: <i>Solange Pampuez</i>	Nombre: <i>Solange Pampuez</i>
Firma: <i>[Firma]</i>	Firma: <i>[Firma]</i>

Observaciones :

---



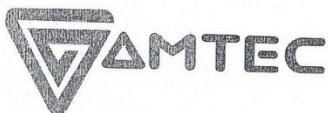
---



---

AVENIDA LAS NIEVES ORIENTE 2590 # 15. PUENTE ALTO - SANTIAGO  
 SANTIAGO TELEFONO (02) 27690638 - CHILLAN TELEFONO (042)2334865  
[Servicio.tecnico@ventmedical.cl](mailto:Servicio.tecnico@ventmedical.cl)  
[ventas@ventmedical.cl](mailto:ventas@ventmedical.cl)  
[www.ventmedical.cl](http://www.ventmedical.cl)

## B. Hoja de trabajo de máquina de anestesia



GUIA DE SERVICIO  
N° 0017830

Agosto ..... del 2011

Nombre del Cliente :

RUT :

Equipo : VENTILADOR Marca :

Modelo :

Serie N° :

Convenio Mantención Preventiva SI  NO

Servicio :

Inv. N° :

Hrs. ....

### PROTOCOLO MANTENIMIENTO PREVENTIVO

✦ LIMPIEZA - REVISION SISTEMA ELECTRONEUMATICO	SI	NO	N/A
✦ LIMPIEZA - REVISION SISTEMA ELECTRONICO	SI	NO	N/A
✦ CABLE DE PODER	SI	NO	N/A
✦ MANGUERAS ALTA PRESION GRADO HOSPITALARIO	SI	NO	N/A
✦ FILTRO DE REFRIGERACION	SI	NO	N/A
✦ CARRO DE TRASPORTE	SI	NO	N/A
✦ ELEMENTOS PERIFERICOS ( CIRCUITO DE PACIENTE / SENSORES DE FLUJO / DIAFRAGMAS / FILTROS DE BACTERIA / VALVULAS DE EXHALACION / BRAZO ARTICULADO )	SI	NO	N/A
✦ BATERIA DE RESPALDO Y SISTEMA DE CARGA ( FUENTE DE PODER )	SI	NO	N/A
✦ SISTEMA MEZCLA AIRE OXIGENO ( BLENDER )	SI	NO	N/A
✦ SENSOR DE OXIGENO	SI	NO	N/A
✦ PANEL FRONTAL / PANTALLA TOUCH	SI	NO	N/A
✦ RED DE AIRE PROPIA ( SISTEMA DE TURBINA / COMPRESOR )	SI	NO	N/A
✦ PERFORMANCE DE CALIBRACION EXIGIDAS POR EL FABRICANTE	SI	NO	N/A
✦ AUTOTEST DE SERVICIO / USUARIO	SI	NO	N/A
✦ PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO / EQUIPO OPERATIVO	SI	NO	N/A

OBSERVACIONES : .....

.....

.....

- SI PRUEBA CUMPLE LOS STANDARES DEL FABRICANTE PARA GARANTIZAR SU FUNCIONAMIENTO
- NO PRUEBA NO CUMPLE, VER OBSERVACIONES
- N/A PRUEBA NO CORRESPONDE A ESTE EQUIPO

CLIENTE

NOMBRE : \_\_\_\_\_

FIRMA : \_\_\_\_\_

NOMBRE : \_\_\_\_\_

FIRMA : \_\_\_\_\_



## C. Teoría de Confiabilidad

Para poder comprender en que consiste el mantenimiento basado en confiabilidad es necesario primero manejar los conceptos de indisponibilidad, confiabilidad, desconfiabilidad, tasas de fallas, entre otros. Los cuales se analizarán a continuación [37]

### C.1. Confiabilidad

1. La confiabilidad o fiabilidad de un equipo es la probabilidad de que no ocurra una falla o de buen funcionamiento en un intervalo de tiempo y se representa como  $R(t)$ .
2. Otra definición dada por la Norma Británica BS 4778 (1991) es “*Característica de un ítem-ya sea un equipo o sistema-, expresada por la probabilidad de que efectúe una función requerida, bajo ciertas condiciones, en un periodo establecido*” [38]. Se entiende que la función requerida, no necesariamente obliga a que un componente o sistema cumpla con la eficiencia que traía al momento de adquirirlo, sino que este dentro de un rango aceptable para poder operar.

Con el objetivo de determinar la confiabilidad de un equipo o sistema, se necesita un historial de datos que refleje el comportamiento a lo largo del tiempo, consecuentemente, mientras más rica sea la información, más certeza se tendrá de la probabilidad.

$$R(t) = \frac{\text{Número de componentes sobrevivientes}}{\text{Número de componentes idénticos sometidos a prueba}} = \frac{N_s}{N} \quad (\text{C.1})$$

### C.2. Definición de desconfiabilidad

La desconfiabilidad [ $Q(t)$  ó  $F(t)$ ], es la probabilidad de que ocurra una falla en un tiempo determinado, igualmente conocida como la distribución de fallas acumuladas. Por lo tanto, es la función complementaria a la confiabilidad.

$$Q(t) = \frac{\text{Número de fallas acumuladas}}{\text{Número de componentes idénticos sometidos a prueba}} = \frac{N_f}{N} \quad (\text{C.2})$$

$$Q(t) = 1 - R(t) \quad (\text{C.3})$$

Las curvas de confiabilidad y desconfiabilidad, siguen la tendencia que se muestra en la Figura C.1.

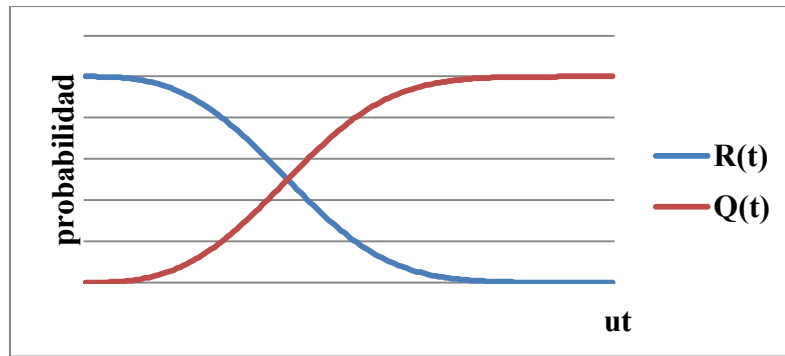


Figura C.1. Representación de curvas de Confiabilidad y Desconfiabilidad

### C.3. Función de densidad de fallas

La función de densidad de fallas o  $f(t)$ , especifica el comportamiento aleatorio de un componente o equipo. La variable estocástica es el tiempo de operación. Puesto que dicha variable probabilística es continua y no negativa, el modelo de TTF corresponde a una densidad de probabilidad. Una imagen de esta característica se muestra en la Figura C.2, donde el área bajo la curva, se divide entre  $Q(t)$  o no confiabilidad, que va desde tiempo cero donde se comienza a utilizar el componente, hasta el momento  $t$  cuando falla [37], como se representa en la ecuación C.4.

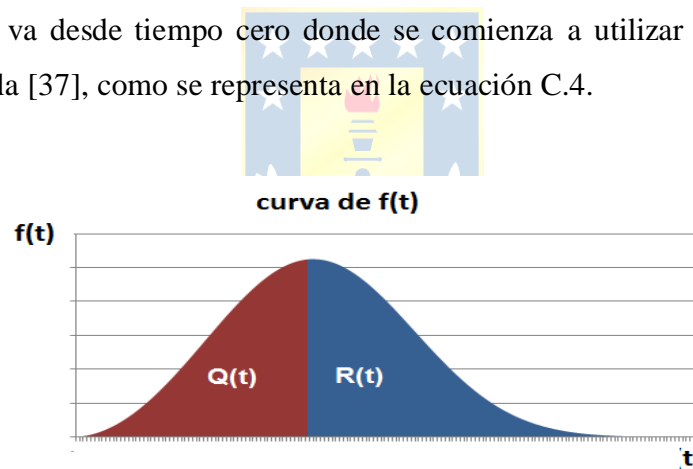


Figura C.2. Distribución de la función de densidad de fallas

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (C.4)$$

y  $R(t)$  o confiabilidad,

$$R(t) = \int_t^{+\infty} f(t) dt \quad (C.5)$$



Para cada componente existe una representación que lo caracteriza, i.e., una distribución probabilística. Finalmente su expresión, en relación con los parámetros  $R(t)$  y  $Q(t)$ , está dada por:

$$f(t) = -\frac{d}{dt} R(t) = \frac{d}{dt} Q(t) \quad (C.6)$$

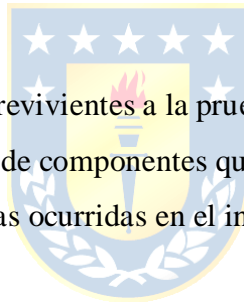
#### C.4. Definición de tasa de falla

A lo largo de su vida un componente, presenta tiempos de buen funcionamiento y otros tiempos en los cuales se producen fallas, las causas son diversas. Un recuento final del número de componentes que no logran sobrevivir a una prueba real o de laboratorio, dentro de un universo  $N_{iniciales}$  de componentes que se encuentran propensos a fallar, es la frecuencia o tasa con la que fallan los componentes. Su expresión se define como:

$$\lambda(t) = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{Promedio entre } N_s \text{ y } N_i} = 2 * \frac{N_f}{(N_i + N_s)} \quad (C.7)$$

Donde,

$N_s$	:	Número de sobrevivientes a la prueba
$N_i$	:	Número inicial de componentes que se encuentran propensos a fallar
$N_f$	:	Número de fallas ocurridas en el intervalo



Recurriendo a la función de densidad de fallas –ecuación C.6-,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{(1 - Q(t))} \quad (C.8)$$

La expresión para la confiabilidad, en base a la tasa de fallas es,

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (C.9)$$

Por lo tanto, la desconfiabilidad se expresa como,

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (C.10)$$

Finalmente, se deriva la expresión de la función de densidad de falla que sigue una “*distribución exponencial*” representada por,



$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{C.11})$$

En la distribución exponencial, la probabilidad de falla, en un tiempo determinado constante, no tiene dependencia, ni relación con lo ocurrido en un instante anterior, característica denominada “memoryless” (sin memoria) y se encuentra también, en los procesos Markovianos.

### C.5. Disponibilidad e Indisponibilidad

El tiempo promedio que se asigna, de acuerdo a su historial, a un componente en presentar la falla, es el MTTF. Éste tiempo se relaciona con el inverso de la tasa de falla. Posteriormente, el tiempo de “outage” para poder realizar acciones correctivas se denomina MTTR. Si puede asumirse una distribución exponencial a los tiempos de reparación, le corresponde una “tasa de reparación” que se calcula como el inverso de este. La suma de ambos tiempos se denomina MTBF o tiempo de ciclo.

En consecuencia al tener tiempos donde tiene un buen funcionamiento, luego ocurre la falla y entra en reparación el sistema, se cumple un ciclo de operación y reparación, representado en la Figura C.3.

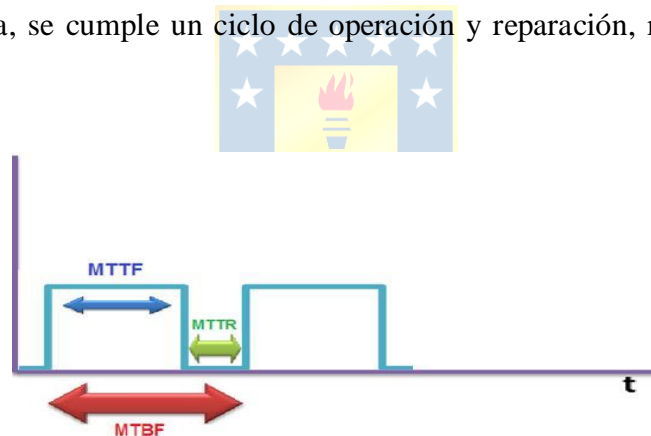


Figura C.3. Ciclo operación – reparación

A partir de lo previo, podemos escribir:

$$MTTF + MTTR = MTBF \quad (\text{C.12})$$

Del despeje de la ecuación C.12, se puede obtener una proporción del tiempo para fallar y el tiempo total entre fallas se denomina Disponibilidad; y una proporción entre el tiempo para reparar y el tiempo entre fallas, se denomina Indisponibilidad. Por consiguiente,

$$\frac{MTTF}{MTBF} = A \quad (\text{C.13})$$

$$\frac{MTTR}{MTBF} = U \quad (\text{C.14})$$

En la práctica el tiempo de operación del equipo es muy grande en comparación al tiempo en reparación, por lo tanto,

$$U = \frac{MTTR}{MTBF} = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} \approx \frac{MTTR}{MTTF} \quad (\text{C.15})$$

Simplificando la notación podemos escribir:

$$U = \lambda \cdot r \quad (\text{C.16})$$

Donde, MTTR es  $r$  (*tiempo de reparación*) y  $\lambda$  la tasa de falla dada por el inverso de MTTF.

$$MTTR = \frac{1}{r} \quad (\text{C.17})$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{C.18})$$


## D. Tablas del Criterio de Fennigkoh y Smith [15]

Tabla D.1. Función del equipo del Criterio de Fennigkoh y Smith

<b>Función del equipo</b>	<b>Puntuación</b>
Terapéutico	10-8
Diagnóstico	7-6
Analítico	5-3
Otros: relacionados	2-1

Tabla D.2. Riesgo durante el uso del Criterio de Fennigkoh y Smith

<b>Riesgo durante el uso</b>	<b>Puntuación</b>
Muerte del paciente	5
Lesión paciente u operador	4
Error diagnóstico	3
Daño equipo	2
Daño insignificante	1

Tabla D.3. Requisitos de mantenimiento del Criterio de Fennigkoh y Smith

<b>Requerimiento de mantenimiento</b>	<b>Ponderación</b>
Importante reemplazo de piezas periódicos y exige calibración	5
Superiores al promedio	4
Usuales: verificación de funcionamiento y pruebas de seguridad	3
Inferiores al promedio	2
Mínimos: inspección visual	1

Tabla D.4. Antecedentes de problemas del equipo del Criterio de Fennigkoh y Smith

<b>Antecedentes de problemas del equipo</b>	<b>Ponderación</b>
Significativo: +1 c/6 meses	+2
Moderado: 1 c/6-9 meses	+1
Usual: 1 c/9-18 meses	0
Mínimo: 1 c/18-30 meses	-1
Insignificante: -1 en los 30 meses anteriores	-2

## D.5. Determinación de la inclusión en el programa de mantenimiento

<b>N° GE</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Sigla</b>
$1 \leq GE \leq 11$	No incluido	N
$12 \leq GE \leq 22$	Incluido	I



**E. Levantamiento de datos máquinas de anestesia PENLON**

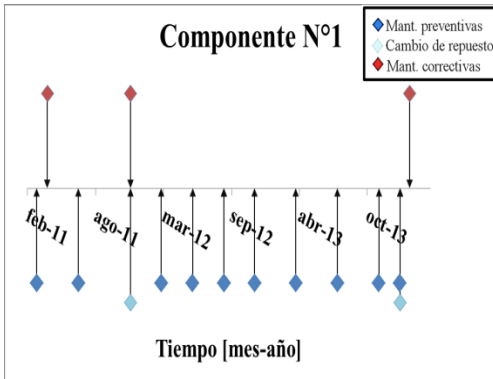


Figura E.1. Secuencia de eventos del componente N°1

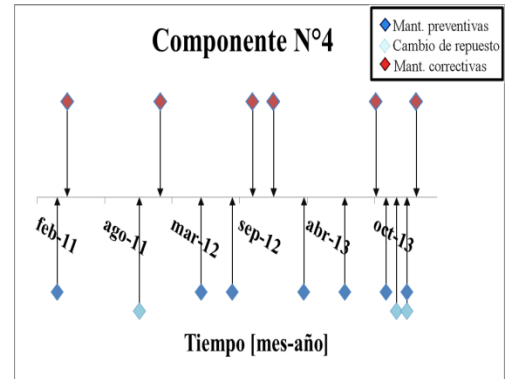


Figura E.4. Secuencia de eventos del componente N°4

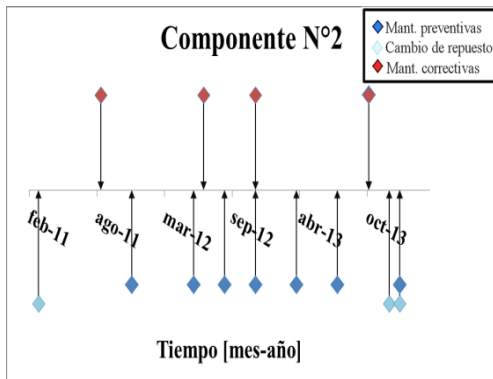


Figura E.2. Secuencia de eventos del componente N°2

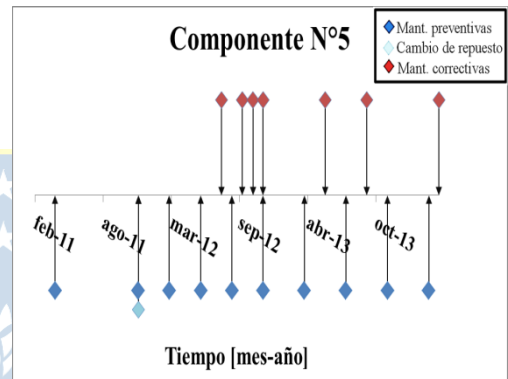


Figura E.5. Secuencia de eventos del componente N°5

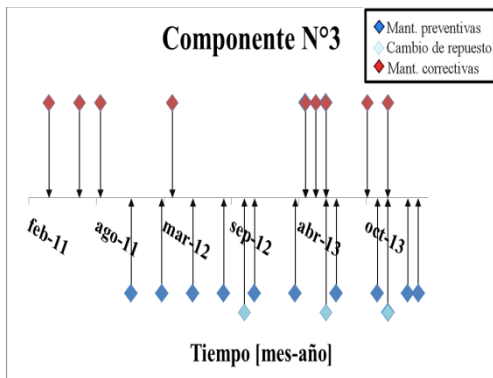


Figura E.3. Secuencia de eventos del componente N°3

## F. Levantamiento de datos ventiladores mecánicos VIASYS

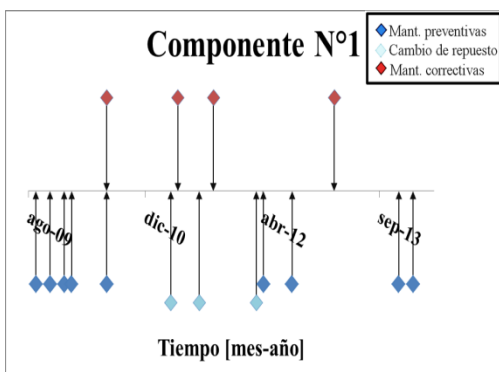


Figura F.1. Secuencia de eventos del componente N°1

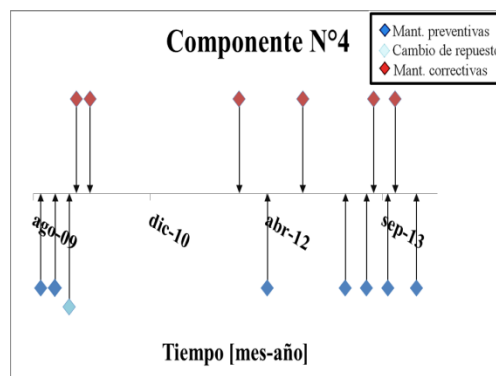


Figura F.4. Secuencia de eventos del componente N°4

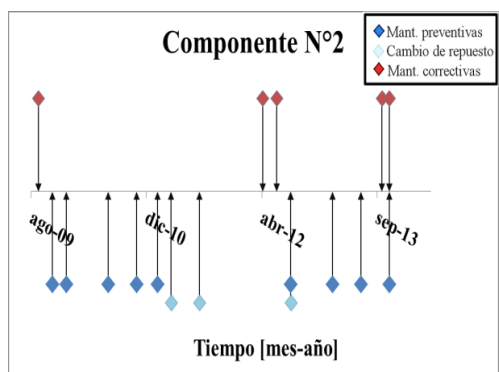


Figura F.2. Secuencia de eventos del componente N°2

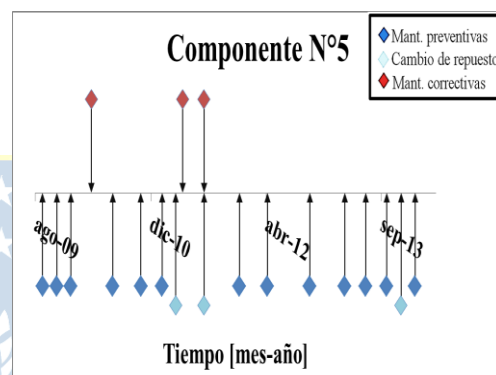


Figura F.5. Secuencia de eventos del componente N°5

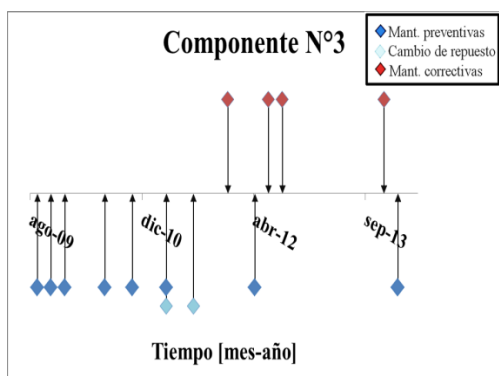


Figura F.3. Secuencia de eventos del componente N°3

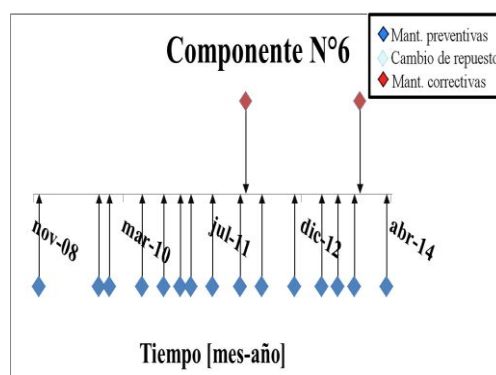


Figura F.6. Secuencia de eventos del componente N°6

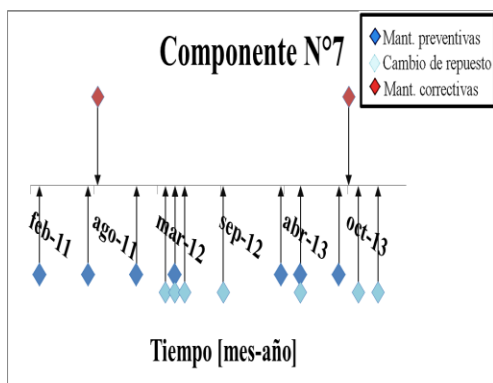


Figura F.7. Secuencia de eventos del componente N°7

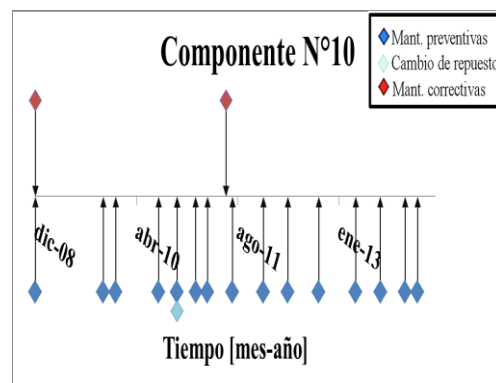


Figura F.10. Secuencia de eventos del componente N°10

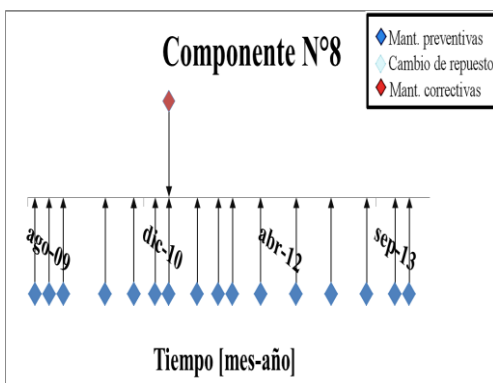


Figura F.8. Secuencia de eventos del componente N°8

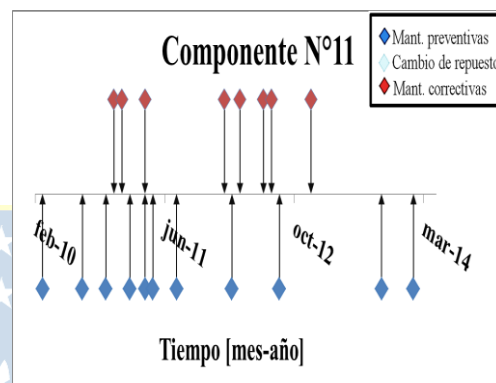


Figura F.11. Secuencia de eventos del componente N°11

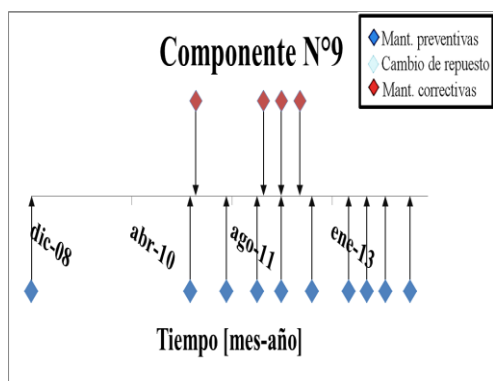


Figura F.9. Secuencia de eventos del componente N°9

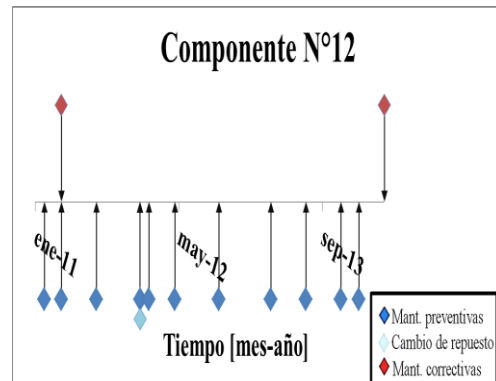


Figura F.12. Secuencia de eventos del componente N°12

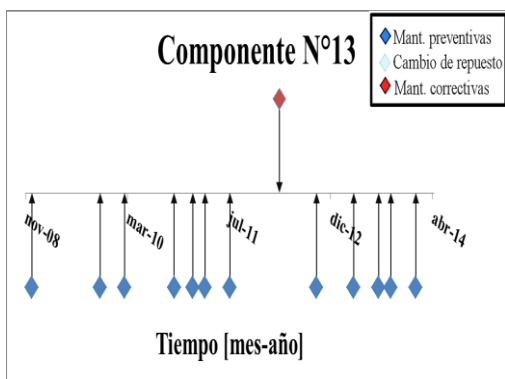


Figura F.13. Secuencia de eventos del componente N°13





## G. Ciclo operación – reparación para los ventiladores mecánicos

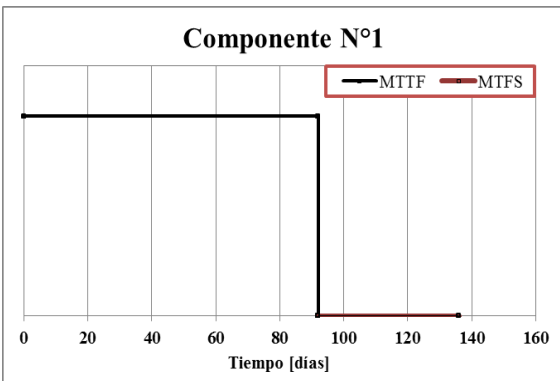


Figura G.1. Ciclo operación-reparación componente N°1

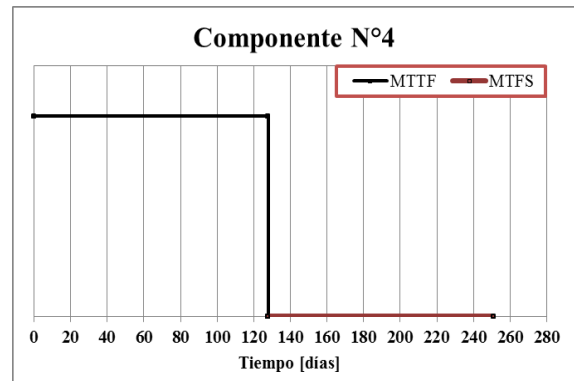


Figura G.4. Ciclo operación-reparación componente N°4

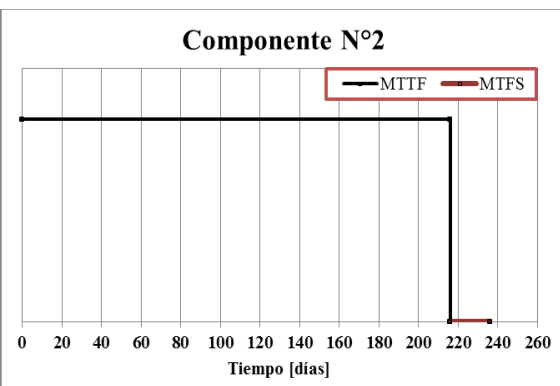


Figura G.2. Ciclo operación-reparación componente N°2

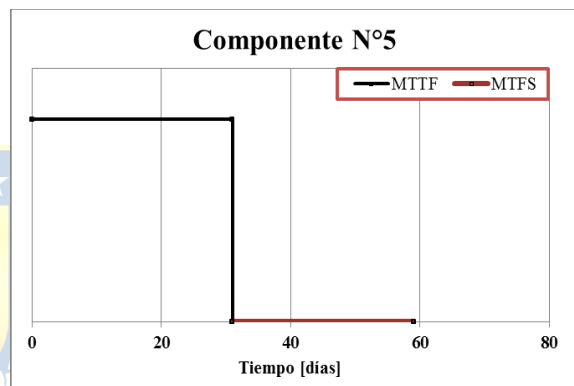


Figura G.5. Ciclo operación-reparación componente N°5

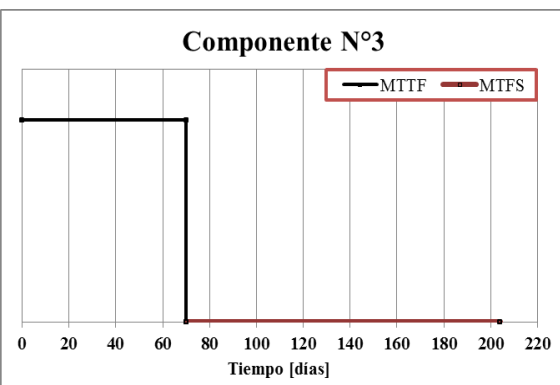


Figura G.3. Ciclo operación-reparación componente N°3

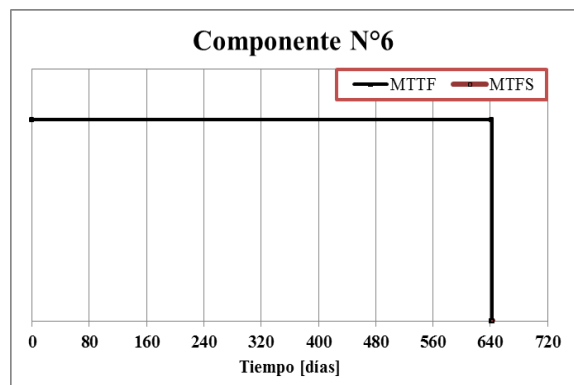


Figura G.6. Ciclo operación-reparación componente N°6

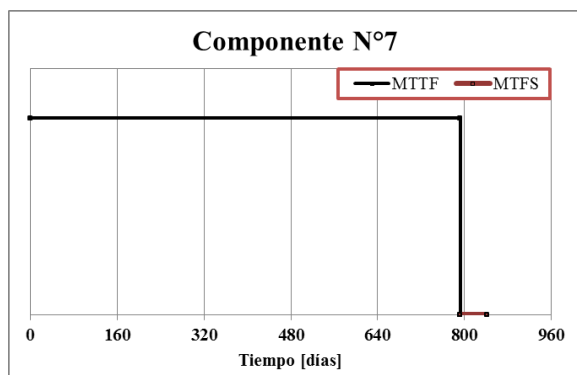


Figura G.7. Ciclo operación-reparación  
componente N°7

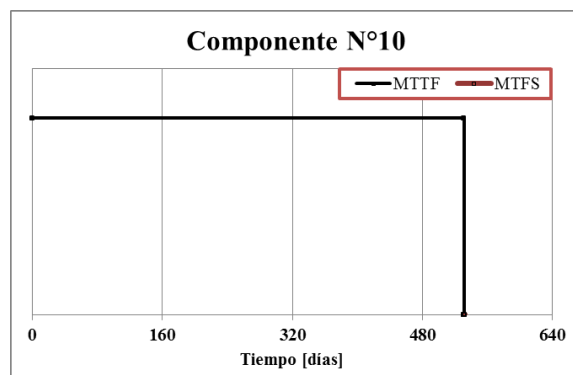


Figura G.10. Ciclo operación-reparación  
componente N°10

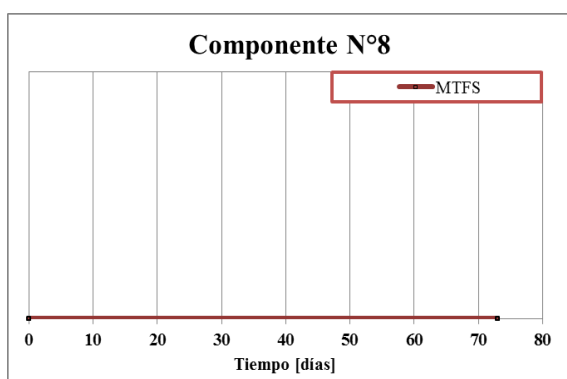


Figura G.8. Ciclo operación-reparación  
componente N°8

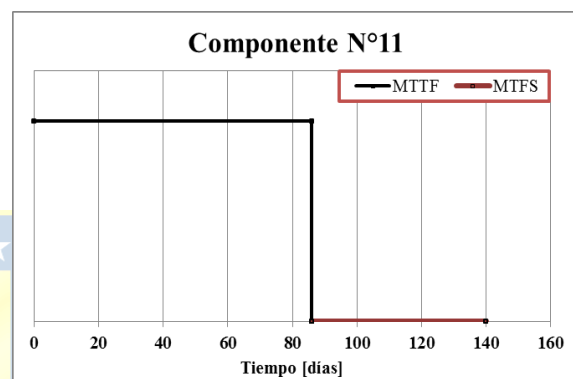


Figura G.11. Ciclo operación-reparación  
componente N°11

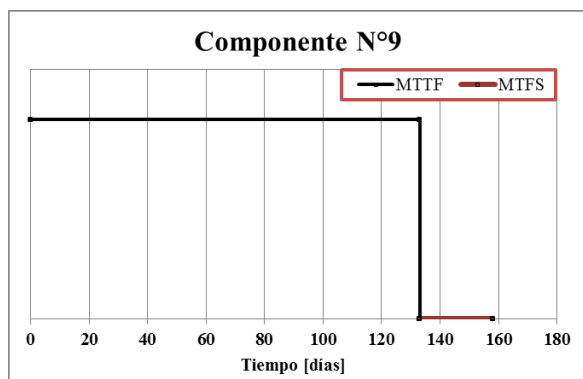


Figura G.9. Ciclo operación-reparación  
componente N°9

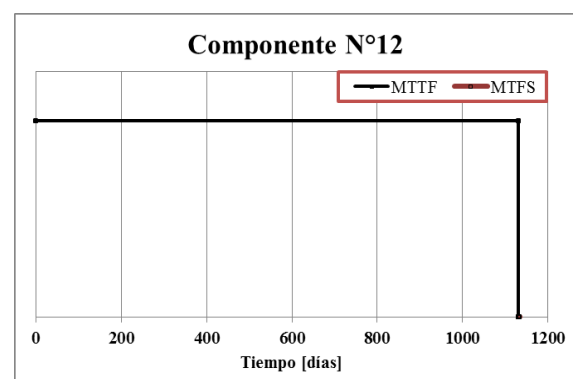


Figura G.12. Ciclo operación-reparación  
componente N°12

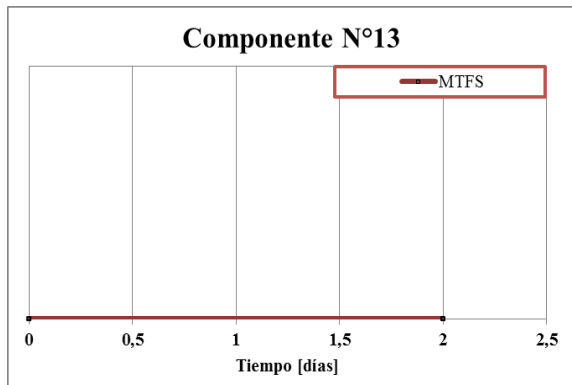


Figura G.13. Ciclo operación-reparación  
componente N°13



## H. Ciclo operación – reparación para las máquinas de anestesia

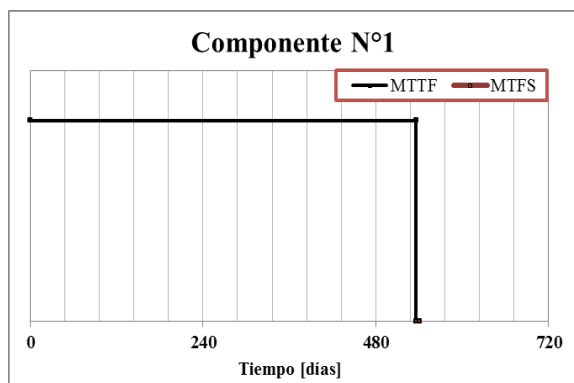


Figura H.1. Ciclo operación-reparación componente N°1

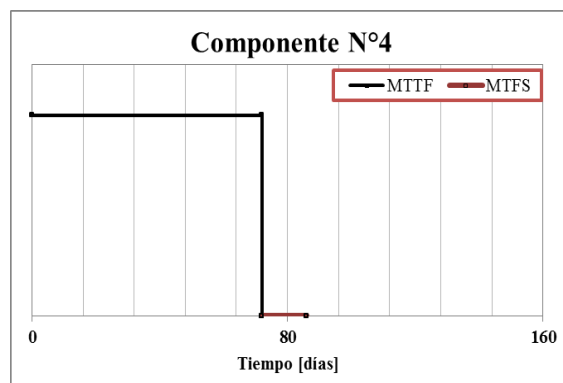


Figura H.4. Ciclo operación-reparación componente N°4

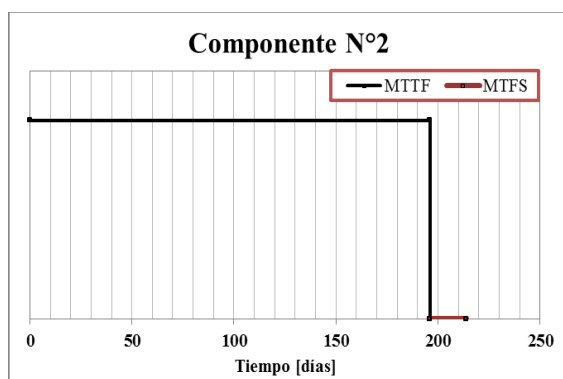


Figura H.2. Ciclo operación-reparación componente N°2

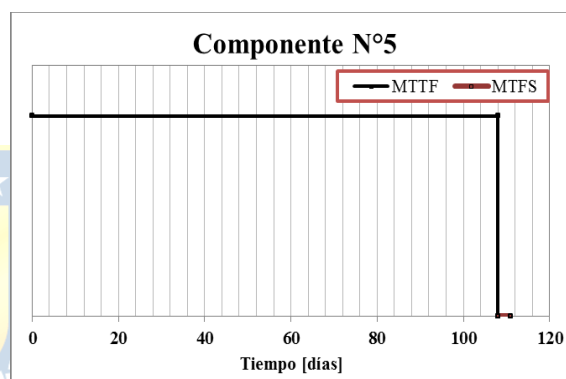


Figura H.5. Ciclo operación-reparación componente N°5

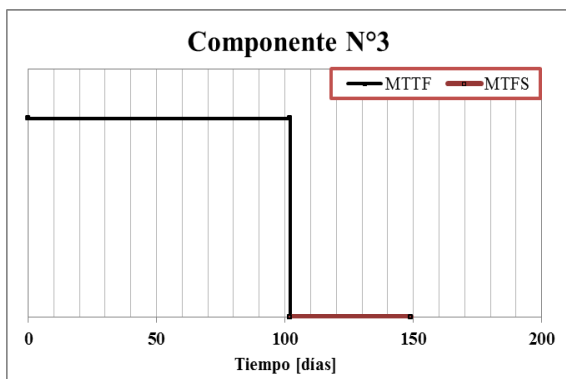


Figura H.3. Ciclo operación-reparación componente N°3

## I. TFS de las máquinas de anestesia

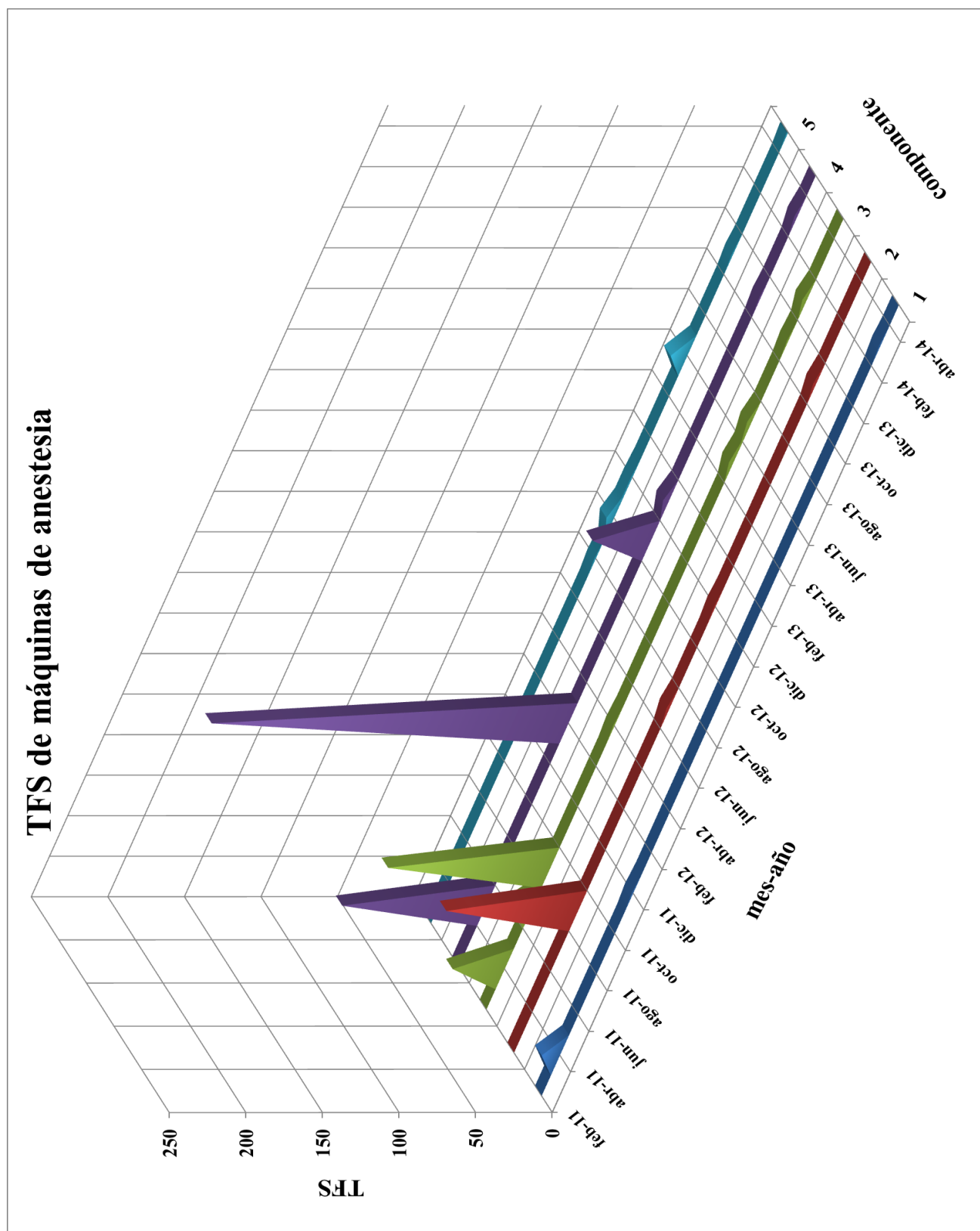


Figura I.1. TFS de máquinas de anestesia

## J. TFS de los ventiladores mecánicos

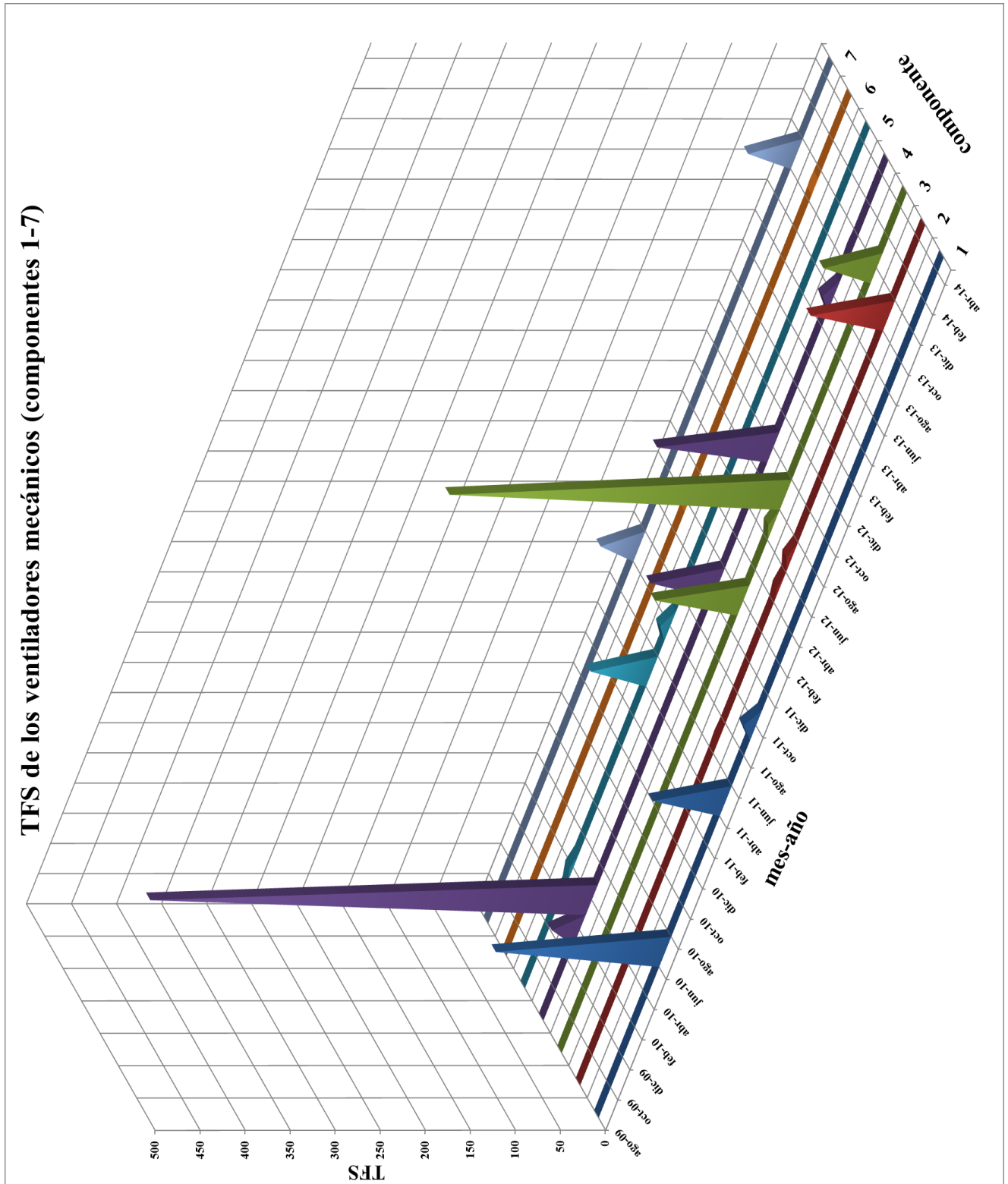


Figura J.1. TFS de los ventiladores mecánicos (componentes 1-7)

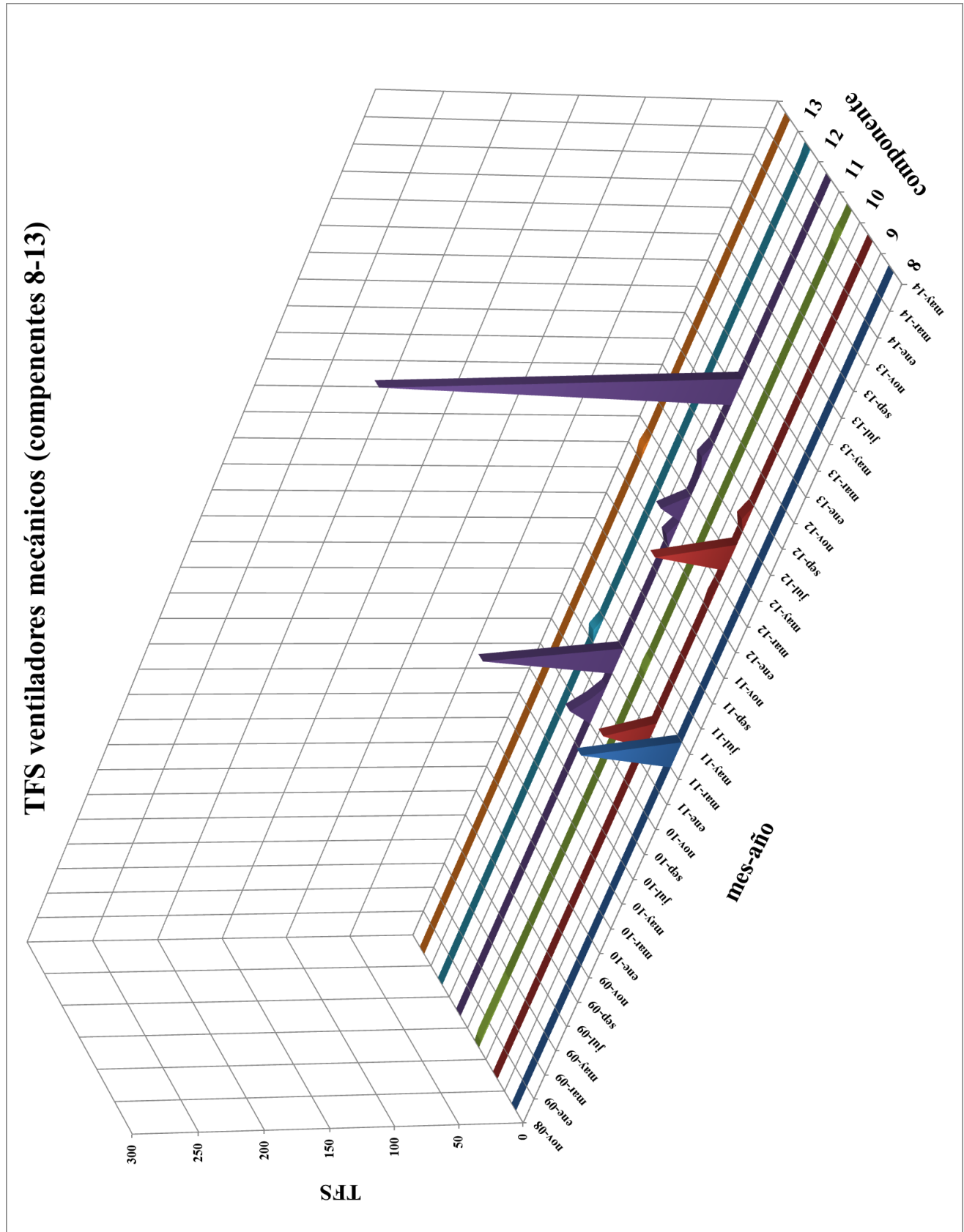


Figura J.2. TTR de los ventiladores mecánicos (componentes 8-13)

K. FMECA de los ventiladores mecánicos

HOJA DE RCM

Institución : Hospital Regional Guillermo Grant Benavente Equipo : VENTILADOR MECÁNICO Marca / Modelo : AVEA/ Función del equipo : Monitorización y control de ventilación		Autor : Constanza Mendoza R Aprobado por : Fecha de elaboración : Junio de 2014			
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LA FALLA DI: Días de indisponibilidad TR: Tarea de Reparación CR: Costo de repuestos	CONSECUENCIAS S: Seguridad O: Operacional N: No operacional H: Dañar A: Ambiente	TAREAS RECOMENDADAS
001 Monitorizar las variables fisiológicas del paciente	001 Pantalla touch incapaz de emitir señales	001 Uso indebido del usuario de la pantalla touch	DI TR CR	Operacional	Cuidado en la manipulación del usuario
	002 Pantalla touch incapaz de emitir señales	002 Falla en la circuitería interna de la pantalla	HP TR CR	Operacional	Chequeo de su función durante MP
002 Suministra al paciente de ventilación pulmonar con los parámetros definidos por un médico, adecuados para cada uno de ellos, sin dañar a los pulmones, ni otros sistemas del organismo.	001 Pantalla touch con falla en la iluminación	001 Falla en la circuitería interna de la pantalla	HP TR CR	Operacional	Chequeo de su función durante MP
	002 Incapaz de programar el volumen espirado por el paciente	002 Pícar de video fuera de funcionamiento	TR CR	Operacional	Chequeo de su función durante MP
003 Fuga en el equipo	001 Fuga en el equipo	001 Uso indebido del usuario	HP TR CR	Operacional	Chequeo de su función durante MP
	002 Fuga en el equipo	002 Sensor de oxígeno entrega datos defectuosos	HP TR CR	Operacional	Cuidado en la manipulación del usuario
	003 Fuga en el equipo	003 Sensor de flujo entrega mediciones incorrectas	HP TR CR	Operacional	Calibración de parámetros cada 6 meses
	003 Fuga en el equipo	003 Mal montaje del circuito puente	HP TR CR	Operacional	Cuidado en la manipulación del usuario
003 Desmontaje de válvula exhalatoria por fuerte flujo respiratorio	001 Desmontaje de válvula exhalatoria por fuerte flujo respiratorio	001 Desmontaje de válvula exhalatoria por fuerte flujo respiratorio	HP TR CR	Operacional	Evento fortuito, sin TR
	002 Desmontaje de válvula exhalatoria por fuerte flujo respiratorio	002 Sensor de oxígeno entrega datos defectuosos	HP TR CR	Operacional	Evento fortuito, sin TR
	003 Desmontaje de válvula exhalatoria por fuerte flujo respiratorio	003 Sensor de flujo entrega mediciones incorrectas	HP TR CR	Operacional	Evento fortuito, sin TR

Figura K.1. FMECA del ventilador mecánico (parte 1)



FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LA FALLA DI: Días de indisponibilidad TR: Tarea de Reparación CR: Costo de repuestos	CONSECUENCIAS S: Seguridad O: Operacional N: No operacional H: Salud A: Ambiente	TAREAS RECOMENDADAS
003	Fuga en el equipo	Mal montaje del circuito púente	HP TR CR	18 Verificación de parámetros	Cuidado en la manipulación del usuario
		Sensor de oxígeno entrega datos defectuosos	HP TR CR	230 \$ 108.480	Cambio de sensor cada 8 meses
		Desnomaje de válvula exhaustora por fuerte flujo respiratorio	HP TR CR	4 Corrección de la posición de la válvula exhaustora	Evento forzado, sin TR
004	Equipo no responde a órdenes, sin señal	Falla en el interface de comunicación con el display frontal	HP TR CR	188 Corrección conexión de circuitos de display frontal \$ 532.692	Cuidado en la manipulación del usuario
		Usuario no emite las órdenes correctas para el funcionamiento	HP TR CR	87	Cuidado en la manipulación del usuario
005	Lecturas erróneas de FIO2	Sensor de oxígeno entrega mediciones incorrectas	HP TR CR	495 Cambio en el sensor de oxígeno \$ 105.908	Cambio de sensor cada 8 meses
		Usuario no realiza una correcta conexión	HP TR CR	11 Corrección conexión de circuitos	Cuidado en la manipulación del usuario
		Sensor de flujo se encuentra descalibrado	HP TR CR	1 Calibración de parámetros	Calibración de parámetros cada 6 meses
006	Sistema neumático con desperfectos	Transductor de presión de entrada de oxígeno defectuoso	HP TR CR	31 368900	Chequeo de su función durante MP
007	Fuga en el circuito púente	Mal montaje del "circuito Y" por parte del usuario	HP TR CR	6 Corrección de ensamble de circuito púente	Cuidado en la manipulación del usuario
008	Incapacidad del equipo para reconocer presiones de trabajo	Ventilador de refrigeración defectuoso	HP TR CR	449 Cambio de ventilador de refrigeración \$ 309.400	Limpieza oportunista por parte del usuario
009	Falla en la malla del filtro	Usuario incapaz de realizar un montaje correcto	HP TR CR	1 Inspección de la malla de filtro	Cuidado en la manipulación del usuario

Figura K.2. FMECA del ventilador mecánico (parte 2)

L. FMECA de las máquinas de anestesia

HOJA DE RCM

Institución	: Hospital Regional Guillermo Grant Benavente
Equipo	: MAQUINA DE ANESTESIA
Marcas / Modelo	: Penton / Integra SP2
Función del equipo	: Sistema de administración de gases anestésicos

Autor	: Constanza Mendoza R
Aprobado por	:
Fecha de elaboración	: Junio de 2014

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LA FALLA DE: Días de indisponibilidad TR: Tarea de Reparación CR: Costo de repuestos	CONSECUENCIAS S: Seguridad O: Operacional N: No operacional H: Humano A: Ambiente	TAREAS RECOMENDADAS
001 Administrar al paciente medidas adecuadas de oxígeno, gas anestésico y óxido nítrico, controlando así, la profundidad del efecto ocasionado.	001 Flujómetro de oxígeno emite mediciones erróneas	Falla en la manguera interna del circuito de oxígeno	DI 2 Cambio en la manguera interna	No operacional	Evento fortuito, sin TR
		Falla en el calefactor del absorbedor	DI TR CR	Operacional	Evento fortuito, sin TR
		Sensor de flujo entrega mediciones erróneas	DI TR CR	Operacional	Calibración de parámetros cada 6 meses
		Sensor de oxígeno entrega datos defectuosos	DI TR CR	Operacional	Cambio de sensor cada 3 meses
002 No se indica salida de flujo NO2	002 Falla de carga en los cilindros	Entrada del conector de video colocada incorrectamente	DI TR CR	No Operacional	Cuidado en la manipulación del usuario
		Valvula del flujómetro externo de oxígeno defectuoso	DI TR CR	No operacional	Chequeo de su función durante MP
003 Fuga en la máquina de anestesia	003 Incapaz de ventilar al paciente	Falla de carga en los cilindros	DI TR CR	No operacional	Revisión de la carga de los cilindros tras cada intervención quirúrgica
		Falla en el montaje de diversos componentes (vaporizadores, depósito del cal)	DI TR CR	No operacional	Cuidado en la manipulación del usuario
		Desgaste de O-ring	DI TR CR	No operacional	Cambio en el kit anual
004 Tener completo control de la respiración.	004 Sensor de flujo descalibrado	Desgaste del fuelle	DI TR CR	No operacional	Chequeo de la condición del material y su función durante MP
		Tarjeta principal defectuosa	DI TR CR	Operacional	Chequeo de su función durante MP
005 Sensor de flujo descalibrado	005 Sensor de flujo descalibrado	Sensor de flujo descalibrado	DI TR CR	Operacional	Calibración de parámetros cada 6 meses
		Sensor de flujo descalibrado	DI TR CR	Operacional	Calibración de parámetros cada 6 meses

Figura L.1. FMECA de la máquina de anestesia (parte 1)

FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA DI: Días de indisponibilidad TR: Tarea de Reparación CR: Costo de repuestos	CONSECUENCIAS S: Seguridad O: Operacional N: No operacional H: Oculta A: Ambiente	TAREAS RECOMENDADAS
003	Selector de ventilación no responde a ordenes	Sensor de selector defectuoso	DI TR CR	No operacional	Chequeo de su función durante MP
		Incapacidad de entregar oxígeno al paciente	DI TR CR	Operacional	Calibración de parámetros cada 6 meses
		Incapacidad de espirometría de alcanzar lo programado	DI TR CR	Operacional	Calibración de parámetros cada 6 meses
003	Extraer el CO <sub>2</sub> exhalado por el paciente.	Falla en la empaquetadura del canister	DI TR CR	No operacional	Chequeo de la condición del material y su función durante MP
		Mal montaje del canister	DI TR CR	No operacional	Cuidado en la manipulación del usuario
		Ronra de o ring de selector de ventilación	DI TR CR	No operacional	Cambio en el kit anual
002	Alta temperatura en el absorbedor	Falla en la fuente de poder del absorbedor	DI TR CR	No operacional	Evento foruito, sin TR
		Fractura en la base del absorbedor	DI TR CR	No operacional	Cuidado en la manipulación del usuario
		Grano de cal se encuentra obstruyendo la válvula del canister	DI TR CR	No operacional	Cuidado en la manipulación del usuario
004	Nivel errónea de CO <sub>2</sub> (sobre 0)	Falla en el fuelle	DI TR CR	No operacional	Chequeo de la condición del material y su función durante MP
			DI TR CR	No operacional	
			DI TR CR	No operacional	

Figura L.2. FMECA de la máquina de anestesia (parte 2)

### M. Datos para la determinación de la constante “k”

Tabla M.1. Levantamiento de datos para constante “k” del ventilador mecánico

<b>Inspecciones[n° /mes] por año</b>	<b>Fallas [fallas/mes] por 1 año</b>
1,5	0,2
2,0	0,0
3,0	0,0
6,0	0,0
6,0	0,0
6,0	0,0
2,0	0,0
1,5	0,0
2,0	0,0
1,5	0,0
2,0	0,0
3,0	0,2
2,0	0,0
6,0	0,0
1,5	0,0
3,0	0,0
3,0	0,0
2,0	0,0
6,0	0,0
2,0	0,0
6,0	0,0
6,0	0,0

Tabla M.2. Levantamiento de datos para constante “k” de la máquina de anestesia

<b>Inspecciones[mes/n°] por año</b>	<b>Fallas [fallas/mes] por año</b>
3,5	0,0
7	0,0
7	0,1
3,5	0,1
7	0,0
3,5	0,0
3,5	0,0
3,5	0,1
3,5	0,0
3,5	0,0
3,5	0,0
7	0,0
7	0,0
1,75	0,0
3,5	0,0
7	0,0