

**UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA JOSÉ SIMEÓN CAÑAS
UNIVERSIDAD DON BOSCO**



**“DISEÑO DE PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PARA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AEROBIA EN
INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE AVES EN EL SALVADOR”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO PARA LA FACULTAD DE
POSTGRADOS UCA**

Y

FACULTAD DE INGENIERÍA UDB

**PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
POR**

ALEJANDRO ALBERTO GÁLVEZ CUBÍAS

LUIS RAÚL LARREYNAGA MATAMOROS

DAVID ERNESTO HENRÍQUEZ CHÁVEZ

Agosto de 2021

ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C.A.

Rectores

Andreu Oliva de la Esperanza, S.J.

Mario Rafael Olmos Argueta, SDB.

Secretarias Generales

Silvia Elinor Azucena de Fernández

Yesenia Xiomara Martínez Oviedo

Decana de Postgrados UCA

Nelly Arely Chévez Reynosa

Decano Facultad de Ingeniería

Mario Guillermo Juárez Pérez

Directores de la Maestría en Ciencias Sociales

José Luis Martínez UDB

Diana Carolina Cruz UCA

Director de Tesis

Carlos Alberto Parra Márquez

Resumen

En la actualidad, las normativas medioambientales son imperantes para garantizar el desarrollo sostenible de la sociedad, regulando ciertas actividades del sector industrial. Dentro de dichas regulaciones, se contempla el tratamiento de aguas de desecho industrial, y específicamente en el rubro pecuario, cuyos procesos productivos generan una cantidad considerable de agua residual con características fisicoquímicas (DQO, DBO, SST, etc.) que podrían causar efectos adversos en un cuerpo receptor/sistema de alcantarillado. Por lo que es de suma importancia la correcta mantenimiento de las instalaciones dónde se trata dicha agua.

La presente investigación desarrolla el diseño de un programa de mantenimiento, cuyos activos físicos objetivo conforman una planta de tratamiento de aguas residuales de una fábrica de procesamiento de aves, con el propósito de garantizar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de estos.

Para ello, se utilizó el modelo de gestión de mantenimiento integral, propuesto por Carlos Parra y Adolfo Crespo, acotado a las fases correspondientes a la eficacia y eficiencia (omitiendo programación de mantenimiento), dónde se tomó como insumos el estado inicial de la gestión de mantenimiento de la PTAR de estudio y los sistemas (activos) conformantes de este, junto con la información histórica existente, para la obtención de los siguientes resultados:

- Cuadro de mando integral.
- Jerarquización cuantitativa y semicuantitativa de sistemas integrantes.
- ACR (Análisis de causa raíz) en sistema crítico según AHP (Proceso analítico jerárquico).
- Plan de mantenimiento desarrollado a partir de FMEA/RCM.

Este último, es el resultado final, el cual, puede incorporarse a un ciclo iterativo para siguientes etapas del estudio, dónde se contemple el resto de las etapas del MGM.

Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. EJEMPLO DE GRAFICA RESULTADO AUDITORIA AMORMS.	24
ILUSTRACIÓN 2. GRÁFICO DE PROMEDIO DE AUDITORIA AMORMS.	25
ILUSTRACIÓN 3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO AIREADOR DE FONDO.	78
ILUSTRACIÓN 4. FLUJO INTERNO EN PROCESO DE AIREACIÓN.	78
ILUSTRACIÓN 5. DIFUSORES DEL AIREADOR DE FONDO.	79
ILUSTRACIÓN 6. ESQUEMA ENTRADAS Y SALIDAS DE DAF 1.	91

Índice de Diagramas

DIAGRAMA 1: MODELO (MGM), (CRESPO MARQUEZ, 2007).....	21
DIAGRAMA 4: PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (ADAPTADO DE LOZANO RIVAS, W.A, 2012).	31
DIAGRAMA 5: TANQUE DE CAPTACIÓN, AMORTIGUAMIENTO Y REACTOR CON SEMBRADO DE EQUIPO	44
DIAGRAMA 6: FASE 1 MODELO MGM(CRESPO MARQUEZ, 2007).....	47
DIAGRAMA 7: INDICADORES FUNCIONALES PARA LOS INDICADORES CLAVES. (CRESPO MÁRQUEZ, 2007).	51
DIAGRAMA 8: INDICADORES FUNCIONALES PARA LOS INDICADORES CLAVES (CRESPO MÁRQUEZ, 2007).	51
DIAGRAMA 9: ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO (CRESPO MARQUEZ, 2007).....	53
DIAGRAMA 10: ESQUEMA DE APLICACIÓN AHP.....	55
DIAGRAMA 11: MODELO AHP DISEÑADO PARA JERARQUIZAR LOS SISTEMAS DE LA PTAR.....	61
DIAGRAMA 13: FASE 3, MGMI (CRESPO MARQUEZ, 2007).....	77
DIAGRAMA 14: ESQUEMA DE PROCESO, AIREADOR DE FONDO.....	79
DIAGRAMA 15: ÁRBOL DE FALLAS ANÁLISIS ACR, “AIREADOR DE FONDO # 2”.	82
DIAGRAMA 16: FASE 4, MGMI (CRESPO MARQUEZ, 2007).....	89
DIAGRAMA 17: FLUJO DE IMPLEMENTACIÓN RCM.	90
DIAGRAMA 18: EQUIPO DE TRABAJO AHP.	90
DIAGRAMA 19: ESQUEMA DE PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA E INCORPORACIÓN DE QUÍMICOS EN SISTEMA DAF 1.....	92
DIAGRAMA 20: ESQUEMA DE PROCESO DAF 1.....	93
DIAGRAMA 21: ESQUEMA DE PARETO: RIESGO (\$/AÑO) POR FALLAS FUNCIONALES (ELABORACIÓN PROPIA, 2021).	135
DIAGRAMA 22: ESQUEMA DE PARETO: RIESGO (\$/AÑO) POR MODO DE FALLA (ELABORACIÓN PROPIA, 2021).	139
DIAGRAMA 23: ETAPA DE PRETRATAMIENTO DE LODOS EN SISTEMA PTAR.	155
DIAGRAMA 24: ETAPA DE TRATAMIENTO PRIMARIO DE LODOS EN SISTEMA PTAR.....	155
DIAGRAMA 25: ETAPA DE TRATAMIENTO SECUNDARIO DE LODOS EN SISTEMA PTAR.....	156
DIAGRAMA 26: ETAPA DE TRATAMIENTO TERCARIO DE LODOS EN SISTEMA PTAR.....	156
DIAGRAMA 27: ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL.....	157

Índice de Tablas

TABLA 1. DESCRIPCIÓN OCHO FASES MODELO MGM. (CRESPO MARQUEZ, 2007).....	22
TABLA 2. EJEMPLO RESULTADOS AUDITORIA AMORMS.....	24
TABLA 3. RESULTADO DE ENCUESTA AMORMS.....	25
TABLA 4. RECOMENDACIONES.....	26
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DE LAS ETAPAS DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES (ADAPTADO DE LOZANO RIVAS, W.A., 2012).....	32
TABLA 6. TOLERANCIA DE MICROORGANISMOS EN PRESENCIA DE OXÍGENO (BASADO EN HENZE ET AL., 2001).....	34
TABLA 7. PRINCIPALES CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES DESCARGADAS POR CATEGORÍA (BASADO EN HENZE ET AL., 2001).....	35
TABLA 8. LEGISLACIÓN AMBIENTAL APLICABLE A LAS AGUAS RESIDUALES Y EXCRETAS (ADAPTADO DE: MARN: ELEMENTOS DE UN MODELO DE GESTIÓN PARA PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, 2019).....	36
TABLA 9. VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS PARA VERTER AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL AL CUERPO RECEPTOR POR TIPO DE ACTIVIDAD (ADAPTADO DE REGLAMENTO TÉCNICO SALVADOREÑO: AGUAS RESIDUALES. PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES PARA DESCARGA Y MANEJO DE LODOS RESIDUALES RTS 13.05.01:18, 2019).....	38
TABLA 10. PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS SOBRE VALORES PERMISIBLES PARA AGUAS RESIDUALES (ADAPTADO DE REGLAMENTO TÉCNICO SALVADOREÑO: AGUAS RESIDUALES. PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES PARA DESCARGA Y MANEJO DE LODOS RESIDUALES RTS 13.05.01:18, 2019).....	39
TABLA 11. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS ASOCIADOS A LAS AGUAS RESIDUALES A TRATAR EN EL SISTEMA PROPUESTO.....	40
TABLA 12. EVOLUCIÓN APROXIMADA DEL PARÁMETRO DBO EN AGUA DE PROCESOS AVÍCOLAS DETERMINADO POR DIFERENTES EQUIPOS.....	41
TABLA 13. CUADRO DE MANDO INTEGRAL.....	50
TABLA 14. INDICADORES DE MANTENIMIENTO.....	52
TABLA 15. VALORACIÓN DE LOS JUICIOS (SAATY, 1990).....	56
TABLA 16. VALORES IR PARA MATRICES DE DIFERENTES ÓRDENES (SAATY, 1980).....	56
TABLA 17. SISTEMA DE PRE-TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.....	57
TABLA 18. SISTEMA DE MICRO-TAMIZADO.....	57
TABLA 19. SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO.....	57
TABLA 20. SISTEMA DAF 1.....	58
TABLA 21. SISTEMAS DE REACCIÓN BIOLÓGICA.....	58
TABLA 22. SISTEMA DAF 2.....	59
TABLA 23. SISTEMA DE CAPTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA REICLADA.....	59
TABLA 24. SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN DE LODOS.....	59
TABLA 25. SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS.....	60
TABLA 26. COMPARACIÓN DE PARES DE CRITERIOS DE JERARQUIZACIÓN.....	62
TABLA 27. HISTORIAL DE FALLAS DE EQUIPOS DESDE INSTALACIÓN DE PTAR 2018-2020.....	63
TABLA 28. DEFINICIÓN DE NIVELES PARA CRITERIO “FRECUENCIA DE FALLAS” (PARRA & CRESPO, 2018).....	64
TABLA 29. DEFINICIÓN DE NIVELES PARA CRITERIO “SEVERIDAD DE FALLOS” (PARRA & CRESPO, 2018).....	65
TABLA 30. DEFINICIÓN DE NIVELES PARA CRITERIO “NIVEL DE MANTENIBILIDAD”.....	66
TABLA 31. DEFINICIÓN DE NIVELES PARA CRITERIO “NIVEL DE COSTES” (PARRA & CRESPO, 2018).....	67
TABLA 32. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS (SISTEMAS) PARA CADA UNO DE LOS CRITERIOS SELECCIONADOS.....	68
TABLA 33. ESTIMACIÓN DEL IR Y JERARQUIZACIÓN DE LOS CRITERIOS EVALUADOS.....	69
TABLA 34. JERARQUIZACIÓN TOTAL AHP.....	71
TABLA 35. JERARQUIZACIÓN AHP TOTAL ORDENADA.....	72
TABLA 36. JERARQUIZACIÓN TOTAL MCR.....	75
TABLA 37. JERARQUIZACIÓN MCR TOTAL ORDENADA.....	76

TABLA 38. COMPARACIÓN JERARQUIZACIÓN AHP VRS. MCR	76
TABLA 39. AIREADOR DE FONDO # 2.	80
TABLA 40. JERARQUIZACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO.....	83
TABLA 41. CAUSAS RAÍCES DE LOS MODOS DE FALLOS.....	84
TABLA 42. RECOMENDACIONES PROPUESTAS, ACR.....	87
TABLA 43. COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y LA ESPERADA.....	88
TABLA 44. RESUMEN DE LOS BENEFICIOS.....	88
TABLA 45. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (1/19).....	94
TABLA 46. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (2/19).....	95
TABLA 47. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (3/19).....	96
TABLA 48. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (4/19).....	97
TABLA 49. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (5/19).....	98
TABLA 50. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (6/19).....	99
TABLA 51. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (7/19).....	100
TABLA 52. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (8/19).....	101
TABLA 53. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (9/19).....	102
TABLA 54. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (10/19).....	103
TABLA 55. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (11/19).....	104
TABLA 56. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (12/19).....	105
TABLA 57. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (13/19).....	106
TABLA 58. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (14/19).....	107
TABLA 59. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (15/19).....	108
TABLA 60. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (16/19).....	109
TABLA 61. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (17/19).....	110
TABLA 62. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (18/19).....	111
TABLA 63. RESULTADOS DEL FMEA DAF 1 (19/19).....	112
TABLA 64. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (1/11).	113
TABLA 65. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (2/11).	114
TABLA 66. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (3/11).	115
TABLA 67. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (4/11).	116
TABLA 68. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (5/11).	117
TABLA 69. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (6/11).	118
TABLA 70. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (7/11).	119
TABLA 71. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (8/11).....	120
TABLA 72. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (9/11).	121
TABLA 73. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (10/11).	122
TABLA 74. PLAN DE MANTENIMIENTO RCM DAF (11/11).	123
TABLA 75. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (1/10)	124
TABLA 76. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (2/10)	125
TABLA 77. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (3/10)	126
TABLA 78. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (4/10)	127
TABLA 79. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (5/10)	128
TABLA 80. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (6/10)	129
TABLA 81. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (7/10)	130
TABLA 82. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (8/10)	131
TABLA 83. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (9/10)	132
TABLA 84. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO PROPUESTO VRS RIESGO ANUAL POR FALLAS (10/10)	133
TABLA 85. ESTRUCTURACIÓN DE RIESGOS ANUALES Y % PESO ACUMULADO POR FALLA FUNCIONAL (1/2)....	134
TABLA 86. ESTRUCTURACIÓN DE RIESGOS ANUALES Y % PESO ACUMULADO POR FALLA FUNCIONAL (2/2)....	135
TABLA 87. ESTRUCTURACIÓN DE RIESGOS ANUALES Y % PESO ACUMULADO POR MODO DE FALLA (1/4).....	136
TABLA 88. ESTRUCTURACIÓN DE RIESGOS ANUALES Y % PESO ACUMULADO POR MODO DE FALLA (2/4).....	137
TABLA 89. ESTRUCTURACIÓN DE RIESGOS ANUALES Y % PESO ACUMULADO POR MODO DE FALLA (3/4).....	138

TABLA 90. ESTRUCTURACIÓN DE RIESGOS ANUALES Y % PESO ACUMULADO POR MODO DE FALLA (4/4).....	139
TABLA 91. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO VRS. RIESGO ANUAL (1/4).....	141
TABLA 92. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO VRS. RIESGO ANUAL (2/4).....	142
TABLA 93. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO VRS. RIESGO ANUAL (3/4).....	143
TABLA 94. COSTO DE PLAN DE MANTENIMIENTO VRS. RIESGO ANUAL (4/4).....	144
TABLA 95. ANÁLISIS VAN BAJO ESCENARIO EVENTUAL ÓPTIMO (REDUCCIÓN DE RIESGO ANUAL AL 100%)..	145
TABLA 96. ANÁLISIS VAN BAJO ESCENARIO EVENTUAL REALISTA (REDUCCIÓN DE RIESGO ANUAL AL 70%).	145
TABLA 97. ANÁLISIS VAN BAJO ESCENARIO EVENTUAL PESIMISTA (REDUCCIÓN DE RIESGO ANUAL AL 50%)	146

Índice de Abreviaturas

ACR	: Análisis de Causa Raíz
AHP	: <i>Analytic hierarchy process</i> (Proceso analítico jerárquico)
AMORMS	: <i>Asset Management, Operational Reliability & Maintenance Survey</i>
BSC	: <i>Balanced Scorecard</i>
CBM	: Mantenimiento basado en criticidad
CD	: Costes directos.
CF	: Costo por fallos.
CIF	: Coste de indisponibilidad por fallos.
CP	: Costes de penalización.
D	: Disponibilidad.
DAF	: <i>Dissolved Air Flootation</i> (Flotación por aire disuelto)
DBO	: Demanda bioquímica de oxígeno.
DQO	: Demanda química de oxígeno.
EBITDA	: <i>Earnings Before Interest Taxes Depreciation and Amortization</i> (Utilidad antes de la depreciación y amortización de impuestos a los intereses)
EDAR	: Estación Depuradora de Aguas Residuales
EVA	: <i>Economic Value Adde</i> (Valor económico agregado)
F	: Físicas.
FF	: Frecuencia de fallos.
FMEA	: <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (Modo de Falla y Análisis de Efectos)
GMAO	: Gestión de mantenimiento asistido por ordenador.
H	: Humanas.
IR	: Radio de inconsistencia
IP	: Impacto en producción.
ISO	: <i>International Organization for Standardization</i> (Organización Internacional de Normalización)
KPI	: <i>Key Performance Indicator</i> (Indicador clave de rendimiento)
L	: Latentes.

LCCA	: <i>Life cycle cost analysis</i> (Análisis de costes del ciclo de vida).
MARN	: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
MCA	: Metros de columna de agua.
MCF	: Mantenimiento Centrado en Fiabilidad
MCR	: Matriz de criticidad por riesgo.
MDT	: <i>Mean Down Time</i> (Tiempo de inactividad medio).
MGM	: Modelo de gestión de mantenimiento.
MF	: Mantenibilidad
MTTF	: <i>Mean Time to Failure</i> (Tiempo de inactividad medio).
MTTR	: <i>Mean time to Repair</i> (Tiempo estimado o promedio para reparar).
PTAR	: Planta de tratamiento de aguas residuales.
RAM	: <i>Reliability, Availability and Maintainability</i> (Fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad).
RCA	: <i>Root Cause Analysis</i> (Análisis de causa raíz).
RCM	: <i>Reliability Centred Maintenance</i> (Mantenimiento centrado en la confiabilidad).
ROS	: <i>Return on sales</i> (Rendimiento de las ventas).
RPM	: Revoluciones por minuto.
RTS	: Reglamento Técnico Salvadoreño
SHA	: Seguridad, Higiene y Ambiente
SF	: Severidad de fallos.
TPFS	: Tiempo promedio fuera de servicio
TPM	: Mantenimiento Productivo Total.
TPO	: Tiempo promedio operativo
TPPR	: Tiempo Promedio para Reparar

Unidades

bar	bar
cc	centímetro cúbico
CFM	<i>Cubic Feet per Minute</i> (pie cúbico por minuto)
°C	grado Celsius
d	día
h	hora
HP	<i>Horse Power</i> (caballos de fuerza)
kg	kilogramo
l	litro
lpm	litros por minuto
lps	litros por segundo
m	metro
mA	miliamperio
m ³	metro cúbico
mca	metros cúbicos de agua
mg	miligramo
mm	milímetro
ml	mililitro
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i> (unidades nefelométricas de turbidez)
ppm	partes por millón
s	segundo

Índice General

Resumen.....	3
Introducción.....	15
CAPÍTULO I: MARCO METODOLÓGICO Y OPERACIONAL.....	16
1.1 Antecedentes.....	16
1.2 Planteamiento del Problema.....	17
1.3 Objetivo general y Objetivos específicos.....	18
1.4 Alcance y limitaciones.....	19
1.5 Tipo de investigación.....	20
1.6 Modelo de implementación: MGM.....	21
1.7 Estado actual de gestión de mantenimiento: Auditoria AMORMS.....	23
CAPITULO II: FUNDAMENTOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SALVADOR.....	27
2.1 Antecedentes y clasificación.....	27
2.2 Trasfondo en el proceso de tratamiento por lodos activados.....	30
2.3 Perspectiva del área en la realidad local.....	33
2.4 Condiciones ambientales: oxígeno, temperatura.....	33
2.5 Caracterización de aguas residuales.....	34
2.6 DBO y DQO.....	35
2.7 Reglamento salvadoreño aplicable a actividades de tratamiento de aguas residuales.....	35
2.8 Ley de medio ambiente.....	37
2.9 Reglamento Técnico Salvadoreño: Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para Descarga y Manejo de Lodos Residuales RTS 13.05.01:18.....	38
CAPITULO III: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ESTUDIO.....	40
3.1 Tratamiento aplicado en aguas residuales de planta de procesamiento de aves.....	40
3.2 Características de operación de planta de tratamiento de aguas.....	41
3.3 Desbaste.....	41
3.4 Amortiguamiento y desbaste.....	43
3.6 Producción de lodos primarios con alto contenido de grasas.....	45
CAPITULO IV: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MGM.....	47
4.1 Fase I. Cuadro de mando integral e indicadores funcionales.....	47
4.1.2 Misión y Visión de la empresa.....	47
4.1.3 Objetivos organizacionales.....	48

4.1.4	Objetivos de mantenimiento.	48
4.1.5	Cuadro de mando integral.	49
4.1.6	Indicadores funcionales de mantenimiento.	51
4.1.7	Indicadores de mantenimiento.	52
4.1.8	Estrategias de mantenimiento.	53
4.2	Fase II. Jerarquización de los sistemas.	54
4.2.1	Modelo AHP propuesto para jerarquizar plantas de tratamiento de aguas residuales aerobias en la industria avícola en El Salvador y su esquema de aplicación.	54
4.2.2	Aplicación de AHP a sistemas principales de planta de tratamiento de aguas residuales de planta procesadora de aves de estudio.	57
4.2.3	Definición de los criterios de decisión en forma de objetivos jerárquicos.	62
4.2.4	Evaluación de las alternativas para cada criterio seleccionado.	62
4.2.4.1	Criterio de Frecuencia de fallas (FF).	62
4.2.4.2	Criterio de Severidad de fallas (SF).	65
4.2.4.3	Criterio de Nivel de mantenibilidad (MF).	66
4.2.4.4	Criterio de Nivel de costes (CF).	67
4.2.5	Resultados de la evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios seleccionados.	67
4.2.6	Estimación de congruencia de juicios con radio de inconsistencia IR y jerarquización de criterios evaluados.	68
4.2.7	Jerarquización final de los 9 sistemas de la PTAR planta procesadora de aves de estudio.	69
4.2.8	Jerarquización AHP.	71
4.2.9	Jerarquización MCR.	72
4.2.10	Comparación jerarquización AHP vrs. MCR.	76
4.3	Fase III. Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto.	77
4.3.1	Contexto operacional del sistema: "Aireador de Fondo # 2".	78
4.3.2	Descripción general del sistema.	78
4.3.3	Descripción específica del proceso.	79
4.3.4	Equipos principales.	79
4.3.5	Diagrama de proceso aireador de fondo, entrada - proceso - salida.	79
4.3.6	Antecedentes relacionados con los aireadores de la PTAR.	80
4.3.7	Grupo de trabajo RCA.	81
4.3.8	Definición del problema.	81
4.3.9	Aplicación de la herramienta árbol de fallos.	82
4.3.9	Definición y jerarquización de los modos de fallos.	83
4.3.10	Definición de la hipótesis y las causas raíces para los modos de fallos críticos.	84

4.3.11 Recomendaciones propuestas para minimizar las causas raíces de los modos de fallos....	87
4.3.12 Análisis económico.....	88
4.4 Fase IV. Mantenimiento centrado en fiabilidad (MCF).....	89
4.4.1 Formación del equipo natural de trabajo.....	90
4.4.2 Selección del sistema.	91
4.4.3 Contexto operacional DAF 1.	91
4.4.4 Resultados del FMEA del sub-sistema: DAF 1.	94
4.4.5 Plan de mantenimiento desarrollado a partir del RCM en el sub-sistema DAF 1.....	113
4.4.6 Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas.	124
4.4.7 Curva de Pareto de “Fallas funcionales”.....	134
4.4.8 Curva de Pareto de “Modos de falla”.....	136
4.4.9 Costo de plan de mantenimiento vrs. Riesgo anual.	141
4.4.10 Análisis económico (caso de negocio) de plan de mantenimiento.....	145
CAPITULO V: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	147
BIBLIOGRAFÍA	152
ANEXOS	154

Introducción.

La investigación planteada tiene por objeto, garantizar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de los “ítems mantenibles” de una planta de tratamiento de aguas residuales, que opera dentro una fábrica de procesamiento de aves, por medio del diseño e implementación de un programa de mantenimiento, basado en un modelo de “gestión integral del mantenimiento” acotado a las etapas de “eficacia” y “eficiencia”. Dicho modelo propuesto por Carlos Parra y Adolfo Crespo (Crespo Marquez, 2007), aborda de forma secuencial y sistemática procesos meta como Análisis causa raíz (ACR) y Mantenimiento basado en confiabilidad (RCM).

La investigación desarrolla en una primera etapa, un análisis sobre los paradigmas de mantenimiento aplicados hasta la fecha en los sistemas conformantes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), de estudio, y la gestión de mantenimiento en general, que en conjunto, con la información bibliográfica, datos obtenidos en campo y registros históricos de falla de los equipos, en las etapas subsiguientes, se desarrollaron 4 fases del modelo implementado: Objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento, Jerarquización de equipos, RCA y RCM. El producto de esta implementación es un plan de mantenimiento, cuyo propósito último es garantizar la disponibilidad de los activos y un costo operativo optimizado.

Si bien el Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM), de Carlos Parra y Adolfo Crespo ya es ampliamente conocido y utilizado en diversos rubros, no se conocen aplicaciones relevantes en el sector de procesamiento de aves, específicamente en plantas de tratamiento de aguas residuales, lo cual, para este tipo de industria es de significativa importancia por los volúmenes de agua requerido de tratar debido a la naturaleza de sus procesos y el potencial impacto medioambiental negativo que podría generarse por una falla de los sistemas componentes de la planta.

El entregable del proyecto es un plan de mantenimiento, construido sistemáticamente bajo el esquema del MGM propuesto por Carlos Parra y Adolfo Crespo. Dicho modelo cuenta con tres grandes etapas: Eficacia, eficiencia y evaluación, siendo las dos primeras altamente sistematizables. La tercera etapa depende de que el modelo establecido sea sostenible en el tiempo. Esto se cumple si el modelo de gestión es bueno, es decir dependiendo no de personas, sino de procesos (TORRES, 2004).

CAPÍTULO I: MARCO METODOLÓGICO Y OPERACIONAL.

1.1 Antecedentes.

La planta de tratamiento, en la cual se desarrolló la investigación, opera dentro de una fábrica de procesamiento de aves a escala industrial, que trata volúmenes de agua residual de hasta 15,000 m³ por semana, y contando con equipos especializados como son los sistemas *dissolved air flotation* (DAF), aireadores sumergibles, equipos para generación de micro-burbuja, etc.; operando muchos de estos de forma inaccesible para realizar mantenimientos/inspecciones rutinarios de alta frecuencia, aunado a la alta disponibilidad de parte de ellos requerida para la operación, es imperante una sólida gestión del mantenimiento, evitando así impactos económicos negativos para la utilidad de la empresa, daños a la imagen corporativa/marca, y daños al medioambiente.

En El Salvador, el operar de las PTAR se rige por el decreto N° 39, referente al reglamento especial de aguas residuales (DECRETO N° 39), donde se establecen características físico-químicas y microbiológicas del agua como producto final. Dichas características dependen de muchas variables, de las que existe una fuerte dependencia del correcto funcionamiento de los equipos que componen la planta, así como de la disponibilidad de estos, pues una falla implica no procesar agua (fallas evidentes: orden de paro de procesos en plantas) o fallas no evidentes (descarga de agua con incumplimiento de especificaciones entre periodos de muestreo de efluente), lo que conduce a diversos escenarios, según determine un juez ambiental: paro temporal de procesos productivos, cierre total de operaciones, etc.

1.2 Planteamiento del Problema.

El agua es necesaria para la vida y de gran importancia en el desarrollo en general. Es necesaria en las actividades agrícolas, de comercio o industriales. El agua es primordial en las actividades humanas y su uso requiere realizar, modificaciones a su composición natural y degrade de su calidad, poniendo en riesgo la salud de las personas y la preservación o conservación del ambiente (MARN, 2012)

El manejo de las aguas residuales en El Salvador está relacionado a catorce instrumentos jurídicos, donde se establecen, características físico-químicas y microbiológicas del agua como producto final, además, se establecen rutas para determinar incumplimientos y penalizaciones sancionadas por tribunales ambientales respaldados por la Corte Suprema de Justicia con carácter operativo y económico a causa de daños ambientales ocasionados, que son categorizados en magnitud a través de estudios técnicos realizados por las unidades ambientales del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Si bien la planta de tratamiento de estudio, por su diseño y construcción cumple con los parámetros establecidos a nivel regulatorio, es imperante que dichos resultados sean sostenidos en el tiempo. Para ello, la gestión mantenimiento de los activos físicos que en ella operan debe garantizar el funcionamiento ininterrumpido de estos.

La gestión de mantenimiento actual de la PTAR de estudio no es sistemática. Los planes de mantenimiento existentes se basan meramente en recomendación de fabricantes y/o establecimiento empírico, lo que conlleva al desconocimiento de la afectación de fallas, costo de indisponibilidad por fallas (CIF), intervenciones de mantenimiento no necesario, fallas generadas por factor humano, falencias de ingeniería, etc.

1.3 Objetivo general y Objetivos específicos.

Objetivo General:

Desarrollar un programa de conservación industrial de activos físicos críticos conformantes de planta de tratamiento de aguas residuales que opera en un plantel de procesamiento de aves en El Salvador, desarrollado bajo un esquema de Modelo de Gestión de Mantenimiento.

Objetivos Específicos:

1. Realizar el diagnóstico inicial de la gestión de mantenimiento de planta de tratamiento de aguas residuales que opera en un plantel de procesamiento de aves en El Salvador, haciendo uso de la auditoria *Asset Management, Operational Reliability & Maintenance Survey (AMORMS)*.
2. Establecer el cuadro de mando integral, y la estrategia de mantenimiento.
3. Definir la criticidad de los sistemas conformantes, bajo un modelo de jerarquización cuantitativo de la PTAR de estudio.
4. Realizar análisis de puntos débiles en los equipos categorizados de alto impacto en los sistemas conformantes de la PTAR de estudio.
5. Definir un plan de mantenimiento para la PTAR en estudio.

1.4 Alcance y limitaciones.

Alcances.

1. Estimación del estado actual de la gestión de mantenimiento a través de la auditoría AMORMS.
2. Definición de los indicadores de desempeño bajo las perspectivas financiera, cliente procesos internos, y aprendizaje.
3. Jerarquización de los activos basada en el modelo cuantitativo *Analytic hierarchy process* (AHP).
4. Determinación de puntos débiles en equipos de alto impacto a través de la herramienta RCA.
5. Establecimiento de un plan de mantenimiento tomando los análisis FMEA/RCM como insumo principal.

Limitantes.

1. La información utilizada para la obtención de frecuencia de fallos delimitó el intervalo de tiempo considerado para la investigación (veintiocho meses).
2. El período de tiempo contemplado para el desarrollo de la investigación es de nueve meses.
3. Se excluye del análisis obra civil y estructuras de los sistemas de estudio.

1.5 Tipo de investigación.

El presente documento corresponde a una “investigación aplicada”, de carácter bibliográfico, dado que se utilizó información no confidencial de la empresa en la cual se desarrolló la investigación, así como datos obtenidos de fuentes bibliográficas de fabricantes de equipos y metodologías asociadas al estudio.

Por su nivel de profundidad, la investigación es de carácter “exploratorio” dado que, si bien la metodología es bastante conocida en el rubro del mantenimiento industrial, la extensión de esta en el presente documento se delimita a un área bastante específica.

Además, según el periodo de estudio es una investigación “longitudinal”, ya que las variables consideradas de estudio se delimitaron a lo documentado en un periodo de tiempo de veintiocho meses.

1.6 Modelo de implementación: MGM.

El modelo de gestión, que se tomó para la implementación en la planta, es el descrito en el libro “Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos” de Carlos parra y Adolfo Crespo, este modelo tiene la característica de estar alineado a la gestión de activos, y de ser una propuesta genérica, la cual permite realizar un diseño hecho a la medida donde se realicen los ajustes necesarios a las necesidades de la industria donde se requiera.

El modelo considera los procesos que deben de administrarse en la gestión del mantenimiento y permite alinear estos procesos con los objetivos organizacionales, para poder aportar valor desde el área de mantenimiento, y presenta estos procesos en ocho fases, encerradas en un ciclo de mejora continua, como se muestra en el diagrama 1.



Diagrama 1: Modelo (MGM), (Crespo Marquez, 2007)

Las 8 fases propuestas por del modelo de gestión (MGM), se desglosan según la siguiente descripción:

Tabla 1. Descripción ocho fases modelo MGM. (Crespo Marquez, 2007).

<i>FASE</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
Fase 1: Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento.	En la fase uno, se definen los objetivos de mantenimiento y como estos deben de estar alineados a los objetivos del negocio y a los indicadores financieros, en los cuales mantenimiento pueda generar un impacto. Se implementa la herramienta de cuadro de mando integral y se define la estrategia de mantenimiento.
Fase 2: Jerarquización de los equipos de acuerdo con la importancia de su función.	En la fase dos, se define el proceso de jerarquización de los activos, y como el modelo de jerarquización debe de estar alineado a los intereses de los propietarios, además define la importancia y el riesgo de estos activos, para maximizar y direccionar los recursos de una forma eficiente y eficaz.
Fase 3: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto.	En la fase tres, se identifican los puntos débiles de la organización y se utilizan herramientas comerciales para abordar estos problemas, esta fase se presenta como muy importante ya que de esta depende alinear la fase cuatro y cinco, donde se implementarán las técnicas de optimización a los activos críticos.
Fase 4: Diseño de planes de mantenimiento preventivo y de los recursos necesarios.	En la fase cuatro, se define como crear una planificación y programación en un mediano y largo plazo, para el plan de mantenimiento, e integrar herramientas informáticas, y de confiabilidad que generen los planes de operación de los activos. Obteniendo como resultado tareas y actividades para el plan de mantenimiento.
Fase 5: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos.	La fase cinco, integra los modelos de optimización, para mejorar los programas de mantenimiento a través de herramientas como TPM y RCM. La implementación de estas herramientas sumado al análisis estadístico y económico permite encontrar puntos óptimos de capacidades en el área de mantenimiento como personal, repuestos, etc.
Fase 6: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento.	En la fase seis, se generan los procesos de control y supervisión, es donde se toma como referencia la fase uno para alinear nuestros KPI con los indicadores claves del negocio. Se establecen los indicadores RAM y la importancia de relacionarlos, a indicadores financieros como el EBITDA, EVA y ROS, entre otros, y como puede mantenimiento aportar valor.
Fase 7: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de los equipos.	En la fase siete, se generan los procesos de análisis de costes de ciclo de vida y obsolescencia, todo este tipo de evaluaciones basadas en criterios técnicos y económicos, introduciendo la evaluación de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad generada en las fases anteriores.
Fase 8: Implantación del proceso de mejora continua y adopción de nuevas tecnologías.	En la fase ocho, se cierra el ciclo con la mejora continua, cómo auditar y evaluar los procesos creados en las fases anteriores.

1.7 Estado actual de gestión de mantenimiento: Auditoría AMORMS.

La efectividad de la gestión del mantenimiento sólo puede ser evaluada y medida por el análisis exhaustivo de una amplia variedad de factores (Crespo Marquez, 2007). La auditoría AMORMS nos ayudara a identificar las aéreas con mayor oportunidad de mejora en la empresa (Viveros-Gunckel, Kristjanpoller-Rodríguez, Parra-Márquez, Crespo-Márquez, & González-Prida-Diaz, 2020).

La auditoría realizada, es la propuesta por Parra y Crespo, denominada AMORMS. Esta auditoría está basada en el modelo de las ocho fases propuesto para esta implementación (Viveros-Gunckel, Kristjanpoller-Rodríguez, Parra-Márquez, Crespo-Márquez, & González-Prida-Diaz, 2020)..

Los elementos a evaluar en la auditoria son:

- Recursos Gerenciales.
- Sistemas de manejo de la información (GMAO).
- Tecnologías aplicadas al mantenimiento preventivo y predictivo.
- Procesos de planificación y estimación.
- Control de calidad en mantenimiento.
- Procesos de soporte (logística, inventarios).
- Planificación de paradas de plantas.
- Integración entre Mantenimiento y Producción.
- Metodologías de Ingeniería de Fiabilidad.
- Aspectos de motivación y comunicación, etc.

La auditoría está dirigida a personal de la empresa con mandos medios y gerencias, los cuales deberán de completar, 150 preguntas que siguen un orden lógico recorriendo las ocho fases del modelo, y las cuales calificaran del 1 al 5 según se describe a continuación.

1. Proceso muy deficiente.
2. Proceso debajo del promedio.
3. Proceso estándar promedio.
4. Proceso con muy buenas prácticas.
5. Proceso a nivel de Clase Mundial.

Luego de completar la auditoria los resultados se tabularán y se presentarán como en la ilustración 1.

Tabla 2. Ejemplo resultados auditoria AMORMS.

<i>Auditoria AMORMS</i>		
	Áreas Evaluadas	Puntuación
1	Gestión de Activos, Objetivos del Negocio (KPIs) y Organización de Soporte	#
2	Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (Criticidad de Activos)	#
3	Proceso de Análisis de Problemas (Análisis de Causa Raíz)	#
4	Procesos de programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento, inspección y operaciones	#
5	Procesos de asignación de recursos, soporte informático y soporte logístico a los procesos de Mantenimiento y Confiabilidad	#
6	Procesos de control y análisis de indicadores técnicos del negocio (RAM)	#
7	Procesos de Análisis de Costos de Ciclo de Vida	#
8	Proceso de revisión y mejora continua	#

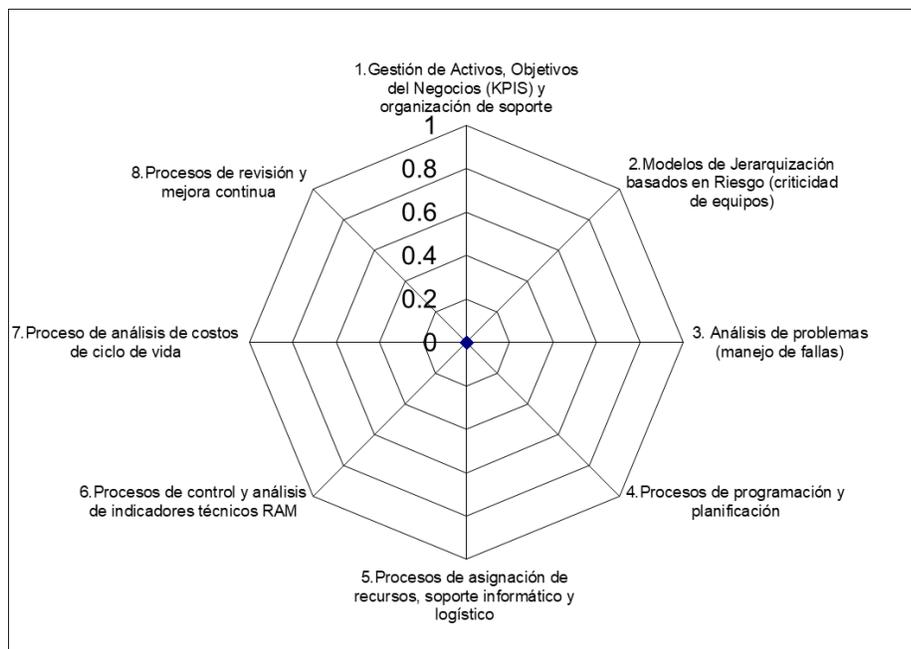


Ilustración 1. Ejemplo de grafica resultado auditoria AMORMS.

La auditoría se realizó, considerando la percepción del personal relacionado a las labores de la planta PTAR, encuestando a gerentes, jefe de mantenimiento y coordinadores, específicamente de las áreas

de compras, planificación y mantenimiento. El producto de las encuestas realizadas se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Resultado de encuesta AMORMS.

<i>Resultados de Auditoria AMORMS.</i>										
FASES	Promedio	Gerente 1	Gerente 2	Gerente 3	Jefe de Área.	coordinador 1	coordinador 2	coordinador 3	coordinador 4	
1. Gestión de Activos, Objetivos del Negocio (KPIS) y Organización de Soporte	1.6	2.5	1.9	1.7	1.3	1.2	1.4	1.3	1.5	
2. Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (Criticidad de Activos)	1.7	1.9	2.1	1.5	1.4	1.9	1.5	1.6	1.7	
3. Proceso de Análisis de Problemas (Análisis de Causa Raíz)	1.7	1.9	1.7	1.5	1.8	1.4	1.9	1.7	1.7	
4. Procesos de programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento, inspección y operaciones	1.5	1.4	1.5	1.6	1.6	1.3	1.4	1.3	1.9	
5. Procesos de asignación de recursos, soporte informático y soporte logístico a los procesos de Mantenimiento y Confiabilidad	1.7	1.4	1.5	1.6	1.6	1.3	1.4	1.3	1.9	
6. Procesos de control y análisis de indicadores técnicos del negocio (RAM)	1.1	1.1	1.3	1.2	1.1	1.3	1.4	1.1	1.1	
7. Procesos de Análisis de Costos de Ciclo de Vida	1.3	1.3	1.5	1.6	1.3	1.1	1.1	1.3	1.2	
8. Proceso de revisión y mejora continua	1.8	2.0	1.6	1.8	1.9	1.5	1.8	1.9	1.9	



Ilustración 2. Gráfico de promedio de auditoria AMORMS.

A simple vista se puede apreciar en la ilustración 2, que en todas las áreas expuestas en la técnica de auditoría AMORMS (Asset Management, Operational Reliability and Maintenance Survey), existe gran oportunidad de mejoras.

La organización no posee un sistema de gestión de activos, por lo cual los encuestados expresan el desconocimiento de la importancia de alinear sus objetivos con los de la compañía, y comentan no tener claro, cuáles son las directrices corporativas sobre los activos, además indican que la organización no posee un modelo de jerarquización basado en niveles de consecuencia, probabilidad o aspectos de seguridad y ambiente, y las decisiones sobre el ciclo de vida de los activos, son tomadas por métodos empíricos.

Con base en la información recolecta se generan las siguientes recomendaciones para las categorías con mayor potencial de mejora.

Tabla 4. Recomendaciones.

<i>Recomendaciones</i>		
Item	Categoría	Recomendación
1	Gestión de Activos, Objetivos del Negocio (KPIS) y Organización de Soporte	Alinear los objetivos de mantenimiento, con los objetivos organizacionales para que, desde el buen desempeño de los indicadores KPI de mantenimiento, se pueda impactar en los indicadores financieros claves.
2	Procesos de programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento, inspección y operaciones	Implementar una solución GMAO que ayude a aumentar la visibilidad de la organización mediante el control de rendimiento de los equipos, las tasas de terminación de órdenes de trabajo, el tipo de trabajo que se realiza, y cualesquiera otras métricas clave.
3	Proceso de Análisis de Problemas (Análisis de Causa Raíz)	Establecer un proceso para la gestión de la información recopilada de las fallas, que facilite la obtención de datos claves en los casos, y reservar un espacio en el GMAO, que permita visualizar las evidencias.

CAPITULO II: FUNDAMENTOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL SALVADOR.

2.1 Antecedentes y clasificación.

En los últimos años, los sistemas de tratamiento de aguas residuales han evolucionado desde enfoques basados en pasos desarrollados de forma experimental a enfoques que dan cobertura a principios característicos de la química, microbiología e ingeniería de procesos. La gran mayoría de estos avances se transforman a tal grado que se armonizan bajo modelos para su implementación. La complejidad y robustez de los modelos desarrollados puede ser amplio, particularmente en sectores sociales e industriales que ven un auge en el acceso a los recursos de nuevas tecnologías.

Clasificación de las aguas residuales

Los distintos tipos de aguas residuales son caracterizados en los literales a) hasta i):

a) Por su función:

- De uso prioritario u origen
- De su contenido en determinados contaminantes (Napa, 2016)

b) Según su naturaleza

Conservativos: Su concentración en la vertiente natural de descarga depende de la dilución en el caudal de vertido. Generalmente: compuestos inorgánicos y estables (Borja, 2011)

No Conservativos: Su concentración en la vertiente natural no está ligada directamente a la del vertido. Corresponden a compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden alterarse en el río por vía física, química o biológica. (Borja, 2011)

c) Aguas residuales urbanas

Éstas proceden de la contaminación en los núcleos urbanos:

- Servicios domésticos y públicos
- Limpieza de locales
- Drenado de aguas pluviales (Carrera, 2011)

d) Aguas residuales industriales

Relacionadas a los líquidos residuales originarios de actividades de empresas, industria o taller donde exista un proceso de producción o transformación donde intervenga el agua. Los líquidos residuales son en sí disoluciones de productos químicos derivados de la fabricación de los productos de uso y consumo en todas las ramas industriales (Napa, 2016).

La reutilización de las aguas residuales para el proceso en varias industrias para fines de lavado, refrigeración de equipos, etc. Es un proceso incorporado en segunda instancia, en miras a conciencia social empresarial y gestión responsable de uso del recurso en distintas etapas, por lo que, en algunas industrias, según regulación local, se redirigen las aguas a pretratamiento. Se considera también la existencia de productos que evitan problemas de explotación del recurso hídrico (estabilizantes contra las incrustaciones y corrosiones) que pueden ser catalogados como contaminantes (Liriano & Jalissa Trinidad, 2016).

e) Tipos de Vertidos Industriales

- Continuos: Donde existe una entrada y salida de agua constante en todo el proceso (Procesos de transporte de materiales, lavado, refrigeración).
- Discontinuos: Proceden de operaciones intermedias. Cabe destacar que son los más contaminados (baños de curtiembres, lejías negras, emulsiones).

Al aumentar el tamaño de la industria, algunos vertidos discontinuos pueden convertirse en continuos (Napa, 2016).

f) Contaminación característica de la industria

Para tener una valoración de la carga contaminante es conveniente conocer el origen del vertido industrial, pues cada actividad industrial brinda una contaminación determinada y conociendo este origen podemos reducir el número de parámetros que definen la carga contaminante (Napa, 2016)

g) Contaminantes específicos

Son microcontaminantes que se derivan principalmente de la actualización en los sistemas de producción industrial y que a una concentración (ppm) muy pequeña, tienen un efecto perjudicial.

Ej: Agentes tensoactivos, pesticidas, derivados halogenados o fosforados de hidrocarburos, compuestos orgánicos específicos, sales metálicas, compuestos eutrofizantes, etc (Napa, 2016).

h) Valoración y clasificación de los contaminantes específicos

La determinación de los riesgos potenciales ocasionados por los contaminantes específicos requiere conocer aspectos tales como:

- Tipo y estructura del compuesto químico
- Propiedades físicas y químicas fundamentales, biodegradabilidad
- Producción total
- Orígenes y vías de distribución.
- Condiciones prácticas en las que se realizan a los cauces.
- Cumplimiento de las normativas legales.

En el rubro de agua de consumo doméstico, los dos puntos anteriores se explican y concretan teniendo en cuenta los procesos del suministrador de agua potable (pública de red) que ha de asegurarse con un límite razonable de confianza de que el producto servido “siempre” es potable, es decir, puede ser ingerido sin peligro de provocar ningún tipo de intoxicaciones (microbiológicas y/o fisicoquímicas) en el potencial consumidor (Napa, 2016).

Se consideran los siguientes aspectos del agua cuyo origen se encuentra en la red nacional:

- Agua entregada según condiciones de utilización
- Efectos tóxicos u otros efectos negativos de los contaminantes sobre la calidad de las aguas y su adecuación ecología (persistencia, bioacumulación, degradación en el medio)
- Medios técnicos existentes de lucha contra la contaminación (Napa, 2016).

i) Origen de las aguas residuales:

En resumen, respecto al origen de las aguas residuales, se derivan las características propias de cada tipo, de los cuales se destaca:

- Agua Residual Doméstica: residuos líquidos de viviendas, zonas residenciales, establecimientos comerciales o institucionales. Estas, además, se pueden subdividir en:
- Aguas Negras: aguas que transportan desechos humanos, provenientes del inodoro.
- Aguas Grises: aguas jabonosas que pueden contener grasas también, provenientes de la ducha, tina, lavamanos, lavaplatos, lavadero y lavadora.
- Agua Residual Municipal o Urbana: residuos líquidos de un conglomerado urbano.
- incluye actividades domésticas e industriales y son transportadas por una red de alcantarillado.
- Agua Residual Industrial: residuos líquidos provenientes de procesos productivos industriales, que incluso pueden tener origen agrícola o pecuario. (Napa, 2016)

2.2 Trasfondo en el proceso de tratamiento por lodos activados.

El proceso de lodos activados fue descubierto en el Reino Unido, a raíz de experimentos llevados a cabo para el tratamiento de agua en un reactor de llenado y vaciado (el precursor del actual reactor discontinuo secuencial) que produjo un efluente altamente tratado. Creyendo que el lodo había sido activado, al igual que el carbón activado, el proceso fue llamado “lodos activados” (William T., 1914).

Actualmente, se requieren cinco días para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se debe a que este era el tiempo máximo requerido en los ríos del Reino Unido, antes de alcanzar las aguas del mar. Como contraparte, se incrementaron los requerimientos para el tratamiento de aguas residuales para alcanzar mejores eficiencias de anulación de materia orgánica. Para reducir la demanda de oxígeno en los ríos, así como para eliminar los efectos nocivos del amonio, fue introducida la nitrificación. Esto propició que se construyeran algunas plantas con filtros percoladores de baja carga para eliminar materia orgánica y amonio. La digestión anaerobia fue incluida en estas plantas para tratar el lodo primario y el producido en el filtro percolador (Henze, van Loosdrecht, G.A., & Brdjanovic, 2008)

Esquema de depuración

El diseño de una depuradora dependerá, inicialmente, del origen (tipo) de agua a tratar, de las características fisicoquímicas del efluente y del cumplimiento de la legislación vigente.

Finalidad del proceso de depuración

Una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) o Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), es el conjunto de procesos y operaciones unitarias encaminadas a la depuración de las aguas residuales antes de su vertido a un cuerpo receptor, mitigando el daño al medio acuático. De esta manera, la depuración de las aguas residuales busca eliminar o disminuir la concentración de sustancias o elementos contaminantes que afectan la calidad del agua o fuente receptora para un uso específico (Lozano Rivas, 2012).

Operaciones y procesos unitarios de una depuradora

La diferencia entre operaciones unitarias y procesos unitarios radica en que las primeras (operaciones unitarias) hacen referencia a unidades y procedimientos en donde prevalecen mecanismos de tipo físico, mientras que los procesos unitarios involucran reacciones químicas o bioquímicas y cambios a nivel molecular (Lozano Rivas, 2012).

Estos procesos y operaciones unitarias intervienen en diferentes etapas de la depuración de las aguas residuales. El esquema de depuración se representa en el siguiente diagrama:

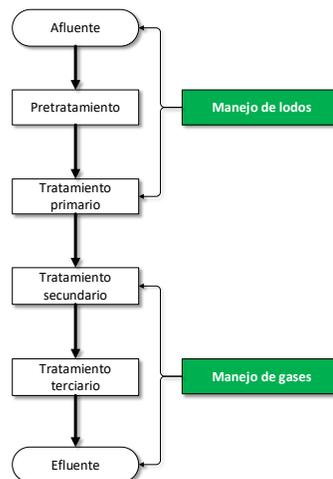


Diagrama 2: Proceso de tratamiento de aguas residuales (adaptado de Lozano Rivas, W.A, 2012).

Las características de las etapas de la depuración de aguas residuales, comprendidas en etapas de pretratamiento y tratamiento fisicoquímico – biológico se desglosa brevemente en la tabla 5 y en los diagramas 23 al 26, incluidos en la sección de Anexos.

Componentes del proceso de depuración de aguas residuales

Tabla 5. Características de las etapas de depuración de aguas residuales (adaptado de Lozano Rivas, W.A., 2012).

Etapa	Objetivo	Unidades representativas	Fenómenos principales involucrados	Eficiencia
Pretratamiento	Remoción de sólidos gruesos para evitar atascos, abrasión y daños a tuberías, bombas, equipos y a otros elementos de la depuradora.	<ul style="list-style-type: none"> • Rejillas • Desarenador • Desengrasador • Tanque de Igualación u homogenización (efluentes industriales, especialmente) • Tanque de neutralización (efluentes industriales, especialmente) • Reactores biológicos aerobios (ejemplo: lodos activados, filtros percoladores, humedales, lagunas) • Reactores biológicos anaerobios • Coagulación-floculación • Adsorción • Intercambio iónico • Filtración • Lagunas • Desinfección 	<ul style="list-style-type: none"> • Físicos. • Químicos (neutralización) 	No se considera que se logren remociones significativas en DBO y SST.
Tratamiento Primario	Remoción de sólidos gruesos para evitar atascos, abrasión y daños a tuberías, bombas, equipos y a otros elementos de la depuradora.	<ul style="list-style-type: none"> • Decantadores primarios (por gravedad o asistidos químicamente) • DAF (unidades de flotación por aire disuelto. Usadas para efluentes industriales, especialmente) • Tamices (efluentes industriales, especialmente) 	<ul style="list-style-type: none"> • Físicos. • Químicos (decantación asistida). • Biológicos 	<ul style="list-style-type: none"> • DBO: hasta 50% (hasta 80% con decantación asistida) • SST: hasta 70% (hasta 85% con decantación asistida)
Tratamiento Secundario	<ul style="list-style-type: none"> • Remoción de materia orgánica soluble y suspendida. • Eliminar organismos patógenos y otros elementos contaminantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reactores biológicos aerobios (lodos activados, filtros percoladores, humedales, lagunas) • Reactores biológicos anaerobios 	<ul style="list-style-type: none"> • Físicos • Químicos (decantación asistida) • Biológicos 	<ul style="list-style-type: none"> • DBO: hasta un 92% • SST: hasta un 90 %
Tratamiento Terciario	<ul style="list-style-type: none"> • Pulimento en la reducción de la materia orgánica. • Eliminación de contaminantes específicos (ejemplo: nitratos, patógenos, metales, pesticidas, disruptores endocrinos). 	<ul style="list-style-type: none"> • Coagulación-floculación • Adsorción • Intercambio iónico • Filtración • Lagunas • Desinfección 	<ul style="list-style-type: none"> • Químicos • Biológicos 	Eficiencias variables de remoción, dependiendo del tipo de contaminante

2.3 Perspectiva del área en la realidad local.

La demanda de sistemas de tratamiento de aguas residuales aumenta bajo necesidad comercial y por requerimiento de regulación del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, hoy en día la atención se centra en los contaminantes que pueden acumularse en el ciclo del agua o afectar los ecosistemas. El tratamiento de aguas permitirá más adelante el desarrollo y la implementación de tecnologías para el tratamiento y reúso del agua.

Las regulaciones y requerimientos pueden viabilizar en beneficios para la industria el uso de efluentes de aguas residuales en sustitución de agua dulce. Sin embargo, requiere de tiempo y estudio para desarrollarse según la necesidad y capacidad del sitio donde es implementado, para el caso de estudio, el tratamiento de aguas residuales se ha vuelto inherente a la operación.

Finalmente, pero no menos importante, un serio problema es la capacitación y educación de profesionales para diseñar plantas de tratamiento y/o actualizar las instaladas, se requieren de técnicos que las operen para favorecer el funcionamiento habitual. Existe la necesidad en las zonas e industrias en desarrollo. El conocimiento no sólo se nivela en el alcance del proceso, sino en la propuesta de nuevas configuraciones en el tratamiento- en donde el uso de modelos es necesario para manejar varias aristas de los sistemas.

2.4 Condiciones ambientales: oxígeno, temperatura.

Los principales factores que afectan al crecimiento de microorganismos son el oxígeno y la temperatura, pero el pH (típicamente de 6 a 8) y la presión osmótica (depende de la concentración de sales) también deben ser los apropiados (Henze, 2001).

Oxígeno

La necesidad, tolerancia o sensibilidad al oxígeno molecular (O_2) varía ampliamente entre los microorganismos. Los aerobios utilizan oxígeno y pueden requerirlo (estrictos), funcionar en su ausencia (facultativos) o requerirlo en niveles bajos (microaerófilo). Los anaerobios no utilizan oxígeno, pero pueden tolerarlo (aerotolerantes) o no (estrictos) (Henze, 2001).

Tabla 6. Tolerancia de microorganismos en presencia de oxígeno (basado en Henze et al., 2001).

<i>El oxígeno y los microorganismos</i>		
Grupo	Relación con el O_2	Tipo de metabolismo
Aerobios		
Obligados	Requerido (por ejemplo, 20%)	Respiración aerobia
Facultativos	Mejor si presente, no esencial	Aerobia o respiración con nitrato, fermentación
Microaerofilicos	Requiere bajos niveles (p.ej. 1%)	Respiración aerobia
Anaerobios		
Aerotolerantes	No requerido, no afectado por su presencia	Fermentación o sulfato reducción
Obligados	O_2 dañino o letal	Fermentación o fermentación anaerobia

Temperatura

La temperatura tiene un efecto significativo en la tasa de crecimiento de los microorganismos. Al aumentar la temperatura, se observa un aumento gradual de la tasa de crecimiento hasta que se observa una caída abrupta debido a la desnaturalización de las proteínas a una temperatura más alta. Generalmente estos microorganismos son categorizados como psicrófilos por debajo de 15 °C, mesófilos entre 15-40 °C, termófilos entre 40 °C - 70 °C e hipertermófilos por encima de 70 °C hasta alrededor de 110 °C. (Henze, 2001)

2.5 Caracterización de aguas residuales.

La constitución de las aguas residuales afecta sensiblemente el procesamiento posterior. Actualmente a nivel general, en el tejido urbano e industrial, se encuentran segregados los sistemas de alcantarillado, manteniéndoles separados. El agua de lluvia es transportada en cauces, conductos o tuberías. En algunos entornos puntuales, las redes urbanas conforman los sistemas de alcantarillado con diferentes tipos de aguas residuales. En los sistemas mixtos, puede variar la condición del total de las aguas residuales que es descargada en cuerpos de agua, los cuales reciben aguas de diversas fuentes y volúmenes que a menudo llegan sin pretratamiento con importante carga contaminante que afecta directamente las propiedades de DBO y DQO como referencias de carga contaminante del agua. (Henze, 2001)

Tabla 7. Principales contaminantes en aguas residuales descargadas por categoría (basado en Henze et al., 2001).

<i>Contaminantes presentes en las Aguas Residuales</i>		
<i>Contaminantes de las Aguas Residuales</i>		
Microorganismos	Organismos patógenos como bacterias, virus y huevos de helminto.	Riesgo para actividades acuáticas, baños y el consumo de mariscos.
Materia orgánica biodegradable	Disminución del oxígeno disuelto en ríos, lagos y fiordos.	Muerte de peces, olor.
Otros compuestos orgánicos	Detergentes, plaguicidas, grasas y aceites, colorantes, solventes, amoníaco	Efectos tóxicos, inconvenientes estéticos, bio-acumulación en la cadena alimenticia.
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo, amoníaco	Eutrofización, agotamiento del oxígeno disuelto, efectos tóxicos.
Metales	<i>Hg, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni</i>	Efectos tóxicos, bio-acumulación.
Otros compuestos inorgánicos	Ácidos, por ejemplo sulfuro de hidrógeno, bases.	Corrosión, efectos tóxicos.
Efectos térmicos	Agua caliente	Cambio en las condiciones de vida de la flora y fauna.
Olor (y gusto)	Sulfuro de hidrógeno	Inconvenientes estéticos, efectos tóxicos.
Radioactividad		Efectos tóxicos, acumulación.

2.6 DBO y DQO

La materia orgánica es el principal contaminante en las aguas residuales. Tradicionalmente, la materia orgánica ha sido medida por los parámetros DBO o DQO. La determinación de la DQO es de obtención rápida. La determinación de la DBO es de larga duración debido a la necesidad de realizar diluciones en serie (Henze, 2001).

El contenido de DQO se puede derivar en secciones útiles para el análisis y diseño de los procesos de tratamiento.

El ensayo de la DBO mide el oxígeno consumido para la oxidación de una parte de la materia orgánica. La determinación de la DBO tiene su origen en la monitorización de efluentes y ésta es la razón de que su uso sea tan extendido. El ensayo base de DBO dura 5 días (DBO₅) (Henze, 2001).

2.7 Reglamento salvadoreño aplicable a actividades de tratamiento de aguas residuales.

Se considera dentro del marco regulatorio, las normativas legales vigentes en la República de El Salvador, que tienen como principal enfoque, la gestión y responsabilidad ambiental.

Se destaca que las normativas contemplan dentro de su alcance, incumplimientos, sanciones y penalizaciones de tipo económicas y cierre de operaciones por faltas cometidas en la realización de vertidos, que no hayan cumplido con las especificaciones detalladas en los estatutos técnicos, detallados en el Reglamento Técnico Salvadoreño: Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para Descarga y Manejo de Lodos Residuales RTS 13.05.01:18 (MARN, 2019) y la Norma para regular la calidad de las aguas residuales de tipo especial descargadas al alcantarillado sanitario (ANDA, 2004), bajo la figura de daños al medio ambiente, como medio probatorio, estimados en dimensión, por unidades técnicas ambientales formadas por personal del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Posteriormente, la aplicación de condenas, restituciones, reparos, restauraciones y penalizaciones, son ejecutadas por la corte suprema de justicia a través de tribunales ambientales quienes definen la gravedad del daño cometido asignando responsabilidad civil al ente infractor.

Tabla 8. Legislación ambiental aplicable a las aguas residuales y excretas (adaptado de: MARN: Elementos de un modelo de gestión para plantas de tratamiento de aguas residuales, 2019).

<i>Legislación ambiental aplicable a las aguas residuales y excretas.</i>			
N	Instrumento legal	Fecha publicación	Autoridad competente
1	Ley de Medio Ambiente.	Mayo 1998 (última reforma, noviembre 2012)	MARN
2	Ley de Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. (ANDA)	Octubre 1961 (última reforma, diciembre 1980)	ANDA
3	Ley de Riego y Avenamiento.	Noviembre 1970	MAG
4	Código de Salud.	Abril 1988	MINSAL
5	Guía técnica sanitaria para instalación y funcionamiento de sistemas de tratamiento individual de aguas negras y grises.	Marzo 2009	MINSAL
6	Norma técnica de letrinas sin arrastre de agua.	Octubre 2004	MINSAL
7	Reglamento General de Medio Ambiente.	Marzo 2000	MARN
8	Reglamento Especial de Normas Técnicas de Calidad Ambiental.	Mayo 2000	MARN
9	Reglamento Especial de Aguas Residuales.	Mayo 2000	MARN
10	Reglamento Técnico Salvadoreño: Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para Descarga y Manejo de Lodos Residuales RTS 13.05.01:18	Mayo 2019	MARN
11	Norma para regular la calidad de las aguas residuales de tipo especial descargadas al alcantarillado sanitario.	Octubre 2004	ANDA
12	Permiso de Instalación y funcionamiento.	Junio 2007	MINSAL
13	Código Municipal	Enero 1986	Ministerio de Gobernación
14	Ley Orgánica del Instituto Salvadoreño de Desarrollo Municipal	Marzo 1987	ISDEM

2.8 Ley de medio ambiente.

Objeto de la Ley.

Art. 1.- La presente Ley tiene por objeto desarrollar las disposiciones de la Constitución de la República, que se refiere a la protección, conservación y recuperación del medio ambiente; el uso sostenible de los recursos naturales que permitan mejorar la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones; así como también, normar la gestión ambiental, pública y privada y la protección ambiental como obligación básica del Estado, los municipios y los habitantes en general; y asegurar la aplicación de los tratados o convenios internacionales celebrados por El Salvador en esta materia.

Aplicación de las sanciones.

Art. 88.- Las sanciones por las infracciones establecidas en esta Ley, serán aplicadas por el Ministerio, previo el cumplimiento del debido proceso legal.

El Ministerio podrá delegar la instrucción del procedimiento en funcionarios de su dependencia.

Fijación de multas.

Art. 89.- Las multas se establecerán en salarios mínimos mensuales, equivaliendo cada salario mínimo mensual a treinta salarios mínimos diarios urbanos vigentes para la ciudad de San Salvador. Las infracciones menos graves se sancionarán de dos a cien salarios mínimos mensuales; y las graves, de ciento uno a cinco mil salarios mínimos mensuales.

Corresponderá a la autoridad sancionadora calificar la infracción. Las sanciones administrativas no exoneran al sancionado de la responsabilidad penal en que incurra.

Proporcionalidad y base de las sanciones.

Art. 90.- En la imposición de las sanciones administrativas reguladas y establecidas en la presente ley, se aplicará el principio de proporcionalidad en la infracción y la sanción, tomando en cuenta las circunstancias siguientes:

- a. La gravedad del daño causado al medio ambiente, a la salud o calidad de vida de las personas;
- b. Las acciones que el infractor tomó para reparar el daño causado;
- c. El beneficio obtenido por el infractor;
- d. La capacidad económica del infractor; y
- e. La reiteración en la violación de la presente ley y su reglamento.

Suspensión para operar.

Art. 110.- Las actividades, obras o proyectos que se encuentren operando y que no cumplan con lo establecido en los Art. 107, 108 y 109, serán suspendidas hasta que cumplan con las exigencias legales establecidas.

2.9 Reglamento Técnico Salvadoreño: Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para Descarga y Manejo de Lodos Residuales RTS 13.05.01:18

Objeto.

Establecer las características y valores físico-químicos, microbiológicos y radiactivos permisibles que debe presentar el agua residual para proteger y rescatar los cuerpos receptores, según la regulación local vigente en la República de El Salvador.

Requisitos.

Los niveles máximos permisibles de los parámetros de la regulación deberán ser alcanzados por medio de los tratamientos respectivos. Para alcanzar dichos niveles no será permitida la dilución.

Tabla 9. Valores máximos permisibles de parámetros para verter aguas residuales de tipo especial al cuerpo receptor por tipo de actividad (Adaptado de Reglamento Técnico Salvadoreño: Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para Descarga y Manejo de Lodos Residuales RTS 13.05.01:18, 2019).

ACTIVIDAD	DQO (mg/l)	DBO _{5,20} (mg/l)	Sólidos sedimentables (ml/l)	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	Aceites y grasas (mg/l)
I. ANIMALES VIVOS Y PRODUCTOS DEL REINO ANIMAL					
1. Producción agropecuaria	800	300	15	150	50
2. Matanza de ganado y preparación y conservación de carnes	400	200	15	125	50
3. Productos de molinería	750	250	15	350	130
4. Enlatados de mariscos y fabricación de sus harinas	300	150	15	100	50
5. Productos avícolas	800	300	15	150	50
6. Porcicultura	1800	300	15	150	50
7. Procesamiento de atún y sus derivados	1800	600	15	350	50

Tabla 10. Parámetros Complementarios sobre valores permisibles para Aguas Residuales (Adaptado de Reglamento Técnico Salvadoreño: Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para Descarga y Manejo de Lodos Residuales RTS 13.05.01:18, 2019).

Parámetros		Valores máximos permisibles
Aluminio (Al)	mg/l	5
Zinc (Zn)	mg/l	5
Coliformes fecales	NMP/100ml	2 000
Coliformes totales	NMP/100ml	10 000
Detergentes (SAAM)	mg/l	10
Fósforo total (P)	mg/l	15
Organofluorina	mg/l	0.1
Hierro total (Fe)	mg/l	10
Litio (Li)	mg/l	2
Mercurio (Hg)	mg/l	0,01
pH	Unidades	5,5 – 9,0 ²⁾
Temperatura	°C	20-35 °C ³⁾
Turbidez (Turbiedad)	NTU	4)

¹⁾ efluente líquido no deberá incrementar color visible al cuerpo receptor

²⁾ El valor de pH 5,5-9,0 aplica para descargas en aguas limnias; definiéndose un valor de pH entre 6.0-9.5 para vertidos en aguas costero marinas

³⁾ En todo caso la temperatura del H2O de descarga al cuerpo receptor no podrá alterar ± 5 °C, con respecto a la temperatura natural del cuerpo hídrico receptor.

⁴⁾ No se incrementara en 5 Unidades la turbidez del cuerpo receptor.

CAPITULO III: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ESTUDIO.

3.1 Tratamiento aplicado en aguas residuales de planta de procesamiento de aves

El sistema del proceso contempla la cobertura de las etapas que conlleva el tratamiento de lodos y reducir las siguientes características no deseadas:

- Organismos solubles que disminuyan el contenido de oxígeno disuelto, ya que la proporción de éstos en las aguas tratadas influirán directamente en la delimitación de los efluentes.
- Sólidos suspendidos, de ser éstos de origen orgánico, propiciarán la descomposición progresiva que se traducirá en un déficit de oxígeno en los lodos y producción de gases orgánicos nocivos.
- Nitrógeno y fósforo, si los efluentes son descargados a redes naturales, la presencia de nitrógeno y fósforo hace propicio que el agua tratada se eutrofice y estimula el crecimiento algal.

Parámetros básicos

Los parámetros asociados al agua residual citados a continuación son considerados como parte de los procedimientos de desarrollo de diseño del proceso de tratamiento de aguas residuales de la planta en evaluación.

Características fisicoquímicas de aguas residuales de planta de tratamiento

Tabla 11. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos asociados a las aguas residuales a tratar en el sistema propuesto.

<i>Concepto</i>		<i>Influente promedio anual</i>	<i>Efluente promedio anual</i>
DBO	mg./l.	1590	<300
SST	mg./l.	1414	<150
GRASAS Y ACEITES	mg./l.	684	<50
COLIFORMES FECALES NMP/100	ml	1,000,000	100

Evolución aproximada de la DBO en el proceso:

Tabla 12. Evolución aproximada del parámetro DBO en agua de procesos avícolas determinado por diferentes equipos.

	Equipo DAF 1	Equipo reactor biológico + DAF 2	Proceso de post cloración
EFICIENCIAS POSIBLES	- 30%	- 75 %	
DBO 1,590 / l.	1113 mg/l	270 – 300 mg/l	265 – 294 mg/l

Se determina a partir de los datos mostrados en la tabla anterior, que la evolución de la DBO mostrada requiere del desarrollo y adaptación previa de la biomasa a las condiciones de trabajo.

3.2 Características de operación de planta de tratamiento de aguas.

Las características de operación de la planta están definidas para determinar la corriente de agua que será sujeta a tratamiento por métodos de sustitución, con la incorporación de aditivos en el reactor biológico.

Se lista a continuación, los parámetros estructurales y operativos para la instalación de tratamiento de agua:

- Capacidad de la planta: 1,918.0 m³ por día.
- Caudal recibido: 29.6 lps. (106.6 m³/h).
- Caudal pico instantáneo (estimado): 60.0 lps. (360 m³/h.)

La adecuación de capacidad se efectúa en un tanque específico, pues la capacidad de amortiguamiento está fijada en 321,000 l antes de la alimentación constante a tratamiento, a través de un sistema de flotación por aire disuelto (DAF).

3.3 Desbaste.

En la etapa de desbaste, el principal objetivo es que los lodos químicamente tratados, no aporten en contenido materiales que puedan obstruir el proceso de desaguar la mezcla tratada.

Se asocia de la misma forma para la retención de contaminantes de la fase soluble e insoluble de las aguas tratadas, sobre todo para determinar la fracción coloidal, la cual es responsable de la toxicidad de los lodos.

- Desbaste: doble reja (desbaste grueso y desbaste fino).
- Rejilla de desbaste en perfiles de: $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ " separación de 19 mm.
- Rejilla de desbaste en perfiles de: $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ " separación de 9.0 mm.

Desarenado: el proceso se lleva a cabo por medio de trampas instaladas de arena y grasa ubicadas estratégicamente a pie de proceso, las cuales operan, son limpiadas y mantenidas periódicamente.

Función del cárcamo de elevación:

- El agua desbastada se vierte en un cárcamo de captación, para amortiguamiento y bombeo, con capacidad de 321.0 m³.
- El tiempo de retención delimitado para volumen de agua a tratar se fija en 60.0 lps. en tiempo aprox. de 3.0 horas

Bombeo de elevación al micro tamizado y descarga al tanque de amortiguamiento:

El microtamizado y tratamiento de amortiguación tienen como función la minimización de fluctuaciones de las aguas tratadas, en miras a proporcionar las condiciones óptimas para los procesos subsecuentes. El volumen al interior del tanque de amortiguamiento varía con la cantidad de agua de descarga y la variabilidad de las corrientes, absorbiendo las fluctuaciones causadas por las variaciones de la planta de producción.

Los principales propósitos de esta etapa están fijados en:

- Propiciar el humedecimiento requerido en fluctuaciones orgánicas, lo cual previene la sobrecarga de sistemas biológicos. En la planta de tratamiento biológico, la concentración del efluente es proporcional a la concentración del influente bajo un período de 24 horas.
- Controlar del pH, disminuyendo los requerimientos químicos para la neutralización.
- Minimizar los sobre flujos al tratamiento fisicoquímico que permitan que las tasas de alimentación de químicos sean compatibles con la alimentación de los equipos.
- Alimentar continuamente a los sistemas biológicos a tasa constante, aún cuando la planta de producción no esté operando.
- Proveer capacidad de descarga controlada de desechos a los sistemas municipales para la distribución de la carga de desechos bajo periodicidad.
- Prevenir la alta concentración de materiales tóxicos que puedan ingresar a la planta de

tratamiento.

Las bombas de operación se encuentran a diferente altura o nivel de captación. La bomba situada más elevada sobre una estructura lateral, tiene por objeto la captación preferencial de agua con grasa

3.4 Amortiguamiento y desbaste.

El tanque de amortiguamiento, de capacidad de 321.0 m³ con mezcla total combinada tanto superficial como de barrido de fondo del volumen, contempla una etapa de pre-aireación combinada por burbuja de fondo y aireación superficial cuyo objeto consiste en consolidar la mezcla absoluta y la emulsión de las grasas que tenderían a flotar.

Especial enfoque se tiene en el cárcamo de elevación como elemento de captación, debido a la superficie elevada del tanque amortiguador, donde existe riesgo de que los sólidos suspendidos sedimenten como situación indeseable, que es evitada por un sistema de mezcla total del volumen involucrado (321.0 m³). Paralelamente es conveniente la pre-aireación activa del agua residual para evitar su descomposición.

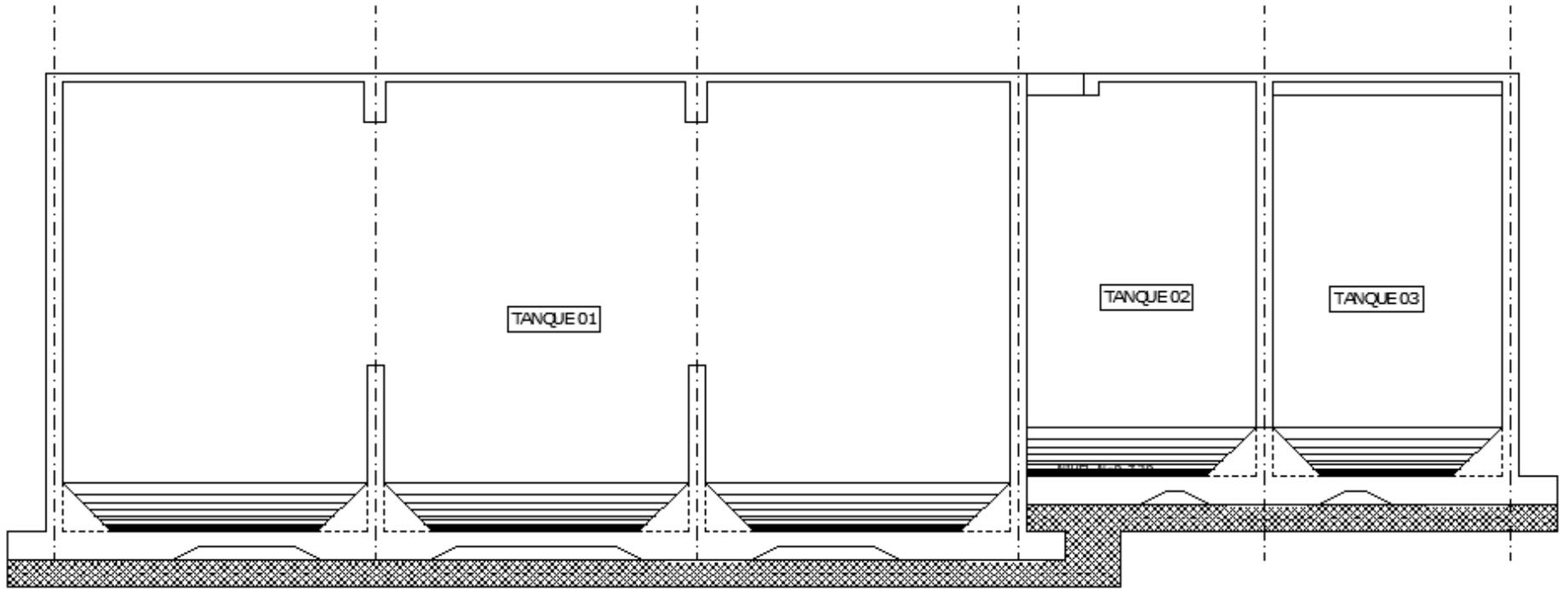


Diagrama 3: Tanque de captación, amortiguamiento y reactor con sembrado de equipo

Los lodos desechados se descargan por gravedad a los tanques de estabilización por una tubería de 8" PVC adecuadamente soportada.

Una línea de agua de servicio, conectada a la línea anterior, permite el enjuagado de forma eventual.

La recepción de la descarga se realiza en un mezclador en línea, junto con una lechada de cal, concentración necesaria para elevar el pH. a valores de 11 a 12.

Alimentación al sistema DAF 1

En esta etapa, el bombeo regulado del tanque de amortiguamiento se desarrolla a razón de 29.6 lps, a través de una descarga unitaria de 8" en un cabezal de 8" directamente conectado a un mezclador en línea o similar, en modalidad líquido/líquido, consistente en lodo movilizado a 29.6 lps.

Prosigue su trayecto por un floculador de contacto o similar.

Esta etapa desemboca en la tubería vertical de admisión al DAF 1, con velocidad de entrada aproximada de 0.95 m/s. en este punto es incorporado el floculante e inmediatamente después, penetra el agua presurizada con aire disuelto.

Dosificación de reactivos para el sistema DAF 1

La etapa de dosificado contempla la adición de coagulante en primera instancia. La preparación con agitación se realiza a mediana velocidad con un agitador de 3.0 HP.

En la segunda incorporación de reactivos se integra el floculante a la mezcla, para disminuir la turbidez de la mezcla a través de la aglutinación.

La operación de preparación del floculante utiliza polímero de alta densidad, en un tanque con capacidad de 10,000 l donde tiene un tiempo de retención de 8 a 12 horas con agitación a velocidad menor a 350 rpm.

3.6 Producción de lodos primarios con alto contenido de grasas.

Los lodos primarios producidos se obtienen en exceso promedio de 5.0% al 10% de margen tendiendo su producción con base teórica de 29.6 lps durante 18 horas a partir de los parámetros:

DBO: 1590 mg./l

SST: 1414 mg./l

Grasas y Aceites: 684 mg./l

En el escenario anterior, se logra con una producción de lodos aproximada de 3,496 kg. en 18 horas

La transferencia de lodos por gravedad es concretada través de una tubería de 8", auxiliado con una línea de 1" de agua de servicio para lavado eventual. La colocación de medidores de flujo de paso libre es incluida en este proceso para monitorizar los indicadores del flujo de lodos tanto instantáneo como totalizado

Cal incorporada a lodos como medio de separación de grasas

El lodo primario recibe la aplicación paralela de cal en un mezclador en línea de 8" situado a la descarga del de lodos del DAF 1

La cal adicionada al lodo proviene por dosificación separada del sistema de preparación común, al del exceso de lodos.

La cal no es un coagulante, pero reacciona de forma selectiva para precipitar en carbonato de calcio e hidróxido de calcio y obtener un buen desempeño en la clarificación en presencia de hidróxido de magnesio.

El lodo mezclado con la cal integrada se descargará en tanques de estabilización y contacto comunes con el exceso de los lodos secundarios.

CAPITULO IV: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MGM.

4.1 Fase I. Cuadro de mando integral e indicadores funcionales.

En la fase uno, se presenta la misión y la visión de la empresa, como un punto de partida para entender los objetivos organizacionales, los cuales expresan las situaciones deseadas que la empresa procura alcanzar en las distintas áreas que la componen. A partir de estos insumos se plantean los objetivos de mantenimiento, el cuadro de mando integral y los indicadores de mantenimiento. los cuales son la base de la estrategia del área.



Diagrama 4: Fase 1 Modelo MGM(Crespo Marquez, 2007)

4.1.2 Misión y Visión de la empresa.

La misión y visión de la empresa nos permite observar el horizonte de la organización, y nos ayuda a desarrollar las estrategias con pleno conocimiento de sus objetivos.

MISIÓN:

Ser una empresa, líder en industria alimentaria, que garantice rentabilidad para sus accionistas y bienestar para sus consumidores, clientes, proveedores, colaboradores y la comunidad.

VISIÓN:

Ser una empresa con estándares de primer nivel de producción de alimentos de consumo masivo y crecimiento sostenible.

4.1.3 Objetivos organizacionales.

Los objetivos organizacionales son propios de la organización, y representan lo que la empresa debe lograr con el fin de satisfacer la declaración de la misión (Cockrell, 2012).

La organización expone los siguientes objetivos organizacionales, como una guía para el futuro.

1. Maximizar el valor para los accionistas.
2. Crear un entorno laboral positivo.
3. Ser socialmente responsable y cuidar del medio ambiente.

4.1.4 Objetivos de mantenimiento.

Los objetivos de mantenimiento forman parte importante en el establecimiento de la estrategia de mantenimiento de ahí que, el objetivo principal de una operación de mantenimiento es proporcionar eficiencia del equipo. El objetivo secundario es brindar eficiencia al equipo de la manera más rentable posible. (Mobley, 2004)

Los objetivos de mantenimiento se establecieron en línea con los objetivos organizacionales, y están fundamentados desde los aspectos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, lo que mantendrá un enfoque en la disminución de tiempos de fallas, optimización de los equipos y la traducción de estos en un impacto financiero.

Objetivos de Mantenimiento:

1. Reducir los eventos de fallas imprevistas.
2. Restaurar la función de los sistemas en el menor tiempo.
3. Minimizar los potenciales costes por indisponibilidad incluyendo costos de penalizaciones provocados por estos eventos.
4. Dar cumplimiento al correcto manejo de los presupuestos de mantenimiento.

4.1.5 Cuadro de mando integral.

El método del cuadro de mando integral introducido por Kaplan y Norton (1992) es un buen ejemplo de una forma de medir el desempeño de una organización para mejorar el logro de las metas organizacionales y la implementación de la estrategia. El cuadro de mando se puede utilizar para derivar objetivos y medidas relacionados con la visión y la estrategia de la empresa que se puedan promover los objetivos específicos del proyecto que están bien alineados con la estrategia empresarial. (Peter W. G. Morris).

Los objetivos para medir se dividen en cuatro perspectivas:

- Financiera.
- Cliente.
- Procesos internos.
- Aprendizaje y crecimiento.

El cuadro de mando integral aplicado a el área de mantenimiento, presenta los objetivos que se persiguen con cada indicador y la meta propuesta tras un plazo de tiempo. Además, se programa la frecuencia de seguimiento de los indicadores, para tomar medidas en caso de desviaciones notables.

Así pues, para cada perspectiva se definirá:

- **Objetivos:** Se plantean para cada perspectiva desde los aspectos de, mejorar la eficiencia de los costes, restaurar la función de los sistemas en el menor tiempo y capacitación del personal.
- **Metas:** Se realiza una definición numérica, del estado actual y el estado final deseado en un periodo de tiempo, las metas se determinan para ser factibles y estar orientadas a la mejora.
- **Indicadores clave de desempeño:** Se establecen indicadores están en concordancia con los objetivos y relacionados de manera más directa con las operaciones de mantenimiento.

Finalmente, un conjunto de indicadores efectivos y eficientes, proporcionarán a los líderes del área, una fuente de información que les permitirá navegar con un menor grado de incertidumbre y de esta forma lograr con éxitos las metas planteadas (Crespo, 2020). El resultado del cuadro de mando integral se presenta en la tabla 13.

Tabla 13. Cuadro de mando integral.

<i>CUADRO DE MANDO INTEGRAL</i>				
PERSPECTIVA	OBJETIVOS ESTRATÉGICOS	FRECUENCIA	META	INDICADORES CLAVES DE DESEMPEÑO
Financiera	Mejorar la eficiencia de los costes de mantenimiento.	Anual	Alto: $\geq 2\%$ Medio: $<2\%$ y $\geq 0.5\%$ Bajo: $< 0.5\%$	<i>Coste de mantenimiento por metro cubico tratado</i>
	Minimizar el costo de subcontratistas.	Mensual	Alto: $\geq 2\%$ Medio: $<2\%$ y $\geq 0.5\%$ Bajo: $< 0.5\%$	$\frac{\text{Costo de subcontrata}}{\text{Costo total del manttenimiento}} * 100$
Cliente	Restaurar la función de los sistemas en el menor tiempo.	Mensual	Reducir en un 5%	$\frac{\text{Total horas fuera de servicio}}{\text{Total numero de incidentes}}$
	Mejorar la disponibilidad	Mensual	Alto: $\geq 90\%$ Medio: $<90\%$ y $\geq 85\%$ Bajo: $< 85\%$	$\frac{MTTF}{(MTTF + MDT)} * 100$
Procesos	Minimizar proporción OT preventivas vs correctivas.	Trimestral	Alto: $\geq 2\%$ Medio: $<2\%$ y $\geq 0.5\%$ Bajo: $< 0.5\%$	$\frac{\text{Ordenes de mantenimiento correctivas}}{\text{Ordenes de mantenimiento totales}} * 100$
	Cumplimiento del mantenimiento planificado	Mensual	Alto: $\geq 95\%$ Medio: $<95\%$ y $\geq 80\%$ Bajo: $< 80\%$	$\frac{\text{Mantenimientos realizados}}{\text{Mantenimientos programados}} * 100$
Aprendizaje	Cuantificar las horas de capacitación del personal.	Anual	Actual: 10 Meta: 15	<i>Registro de horas dedicadas a la formacion</i>
	Observaciones a los empleados sobre actitud o acciones inseguras.	Anual	Alto: ≥ 4 Medio: <4 y ≥ 2 Bajo: < 2	<i># de observaciones</i>

Cabe destacar que los valores descritos en las metas son hipotéticos, ya que no se posee implementación de indicadores dentro de la gestión existente.

4.1.6 Indicadores funcionales de mantenimiento.

En consecuencia, la eficacia de los indicadores planteados anteriormente depende de un nivel inferior de medidores, este nuevo grupo de medidores se denominan indicadores funcionales, con los cuales es posible profundizar y determinar circunstancias relacionadas a los indicadores claves de desempeño propuestos, en la tabla 13, la clave del objetivo estratégico desde la perspectiva financiera se establece como: "Coste de mantenimiento por metro cubico tratado". Siguiendo esta línea se determinan otra serie de métricas adicionales en áreas como planificación, programación, calidad o aprendizaje que sirvan de soporte a este indicador clave, el resultado se muestra en el diagrama 7. Se presentan los indicadores funcionales para mejorar el tiempo de reparación MTTR en el diagrama 8.

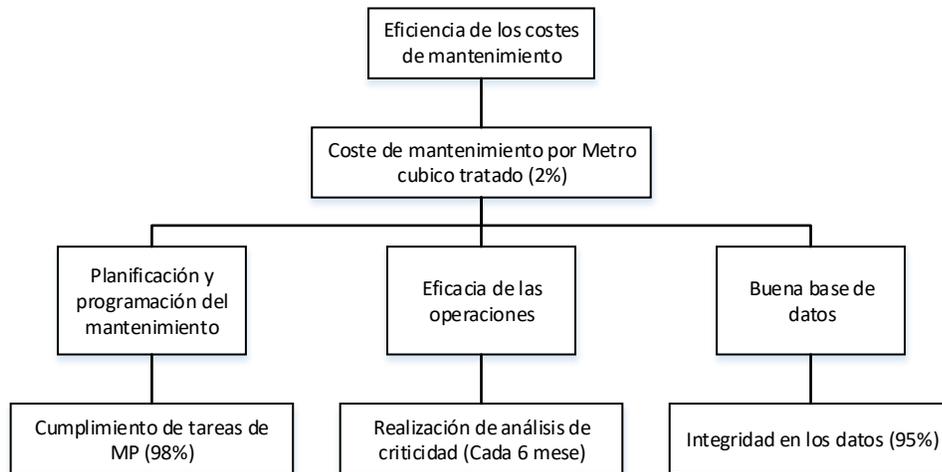


Diagrama 5: Indicadores funcionales para los indicadores claves. (Crespo Márquez, 2007).

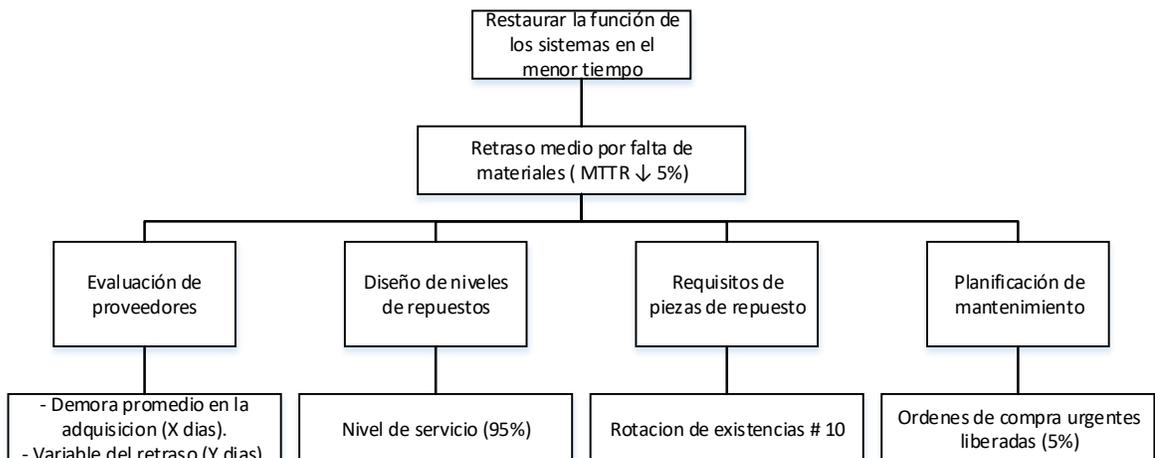


Diagrama 6: Indicadores funcionales para los indicadores claves (Crespo Márquez, 2007).

4.1.7 Indicadores de mantenimiento.

Es de gran importancia definir los indicadores clave de rendimiento destinados a medir el rendimiento del mantenimiento en el marco de los factores que influyen en el mismo, tales como los aspectos económicos, técnicos y organizativos, con objeto de evaluar y mejorar la eficiencia y la eficacia para conseguir la excelencia en el mantenimiento de los Activos Técnicos. (UNE15341, 2008)

Los indicadores de mantenimiento propuestos abordan los factores de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y representan la base para la gestión del área, estos definen claramente los objetivos que se persigue y se vinculan con los responsables de darles seguimiento, el resultado se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Indicadores de mantenimiento.

<i>Indicadores de mantenimiento</i>						
NOMBRE	SIGLA	DEFINICION	FORMULA	FRECUENCIA	META	RESPONSIBLE
Confiabilidad	TPO (Tiempo promedio operativo)	Mide el tiempo promedio que es capaz de operar un equipo sin interrupciones	$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TTF_i}{n}$	Mensual	95%	Coordinador de mantenimiento
Frecuencia de fallos	FF	Mide el número de fallos que aparecen en el periodo de evaluación considerado	$FF = \frac{1}{MTTF}$	Mensual	<5% Periodo anterior	Coordinador de mantenimiento
Mantenibilidad	TPFS (Tiempo promedio fuera de servicio)	Mide el tiempo promedio que se tarda en restituir a un componente a una condición adecuada	$MDT = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} DT_i}{n}$	Mensual	<5% Periodo anterior	Coordinador de mantenimiento
Disponibilidad	D (Disponibilidad)	Indica el porcentaje de tiempo total que un equipo está en condiciones para cumplir con su función	$D = \frac{MTTF}{(MTTF+MDT)} * 100\%$	Mensual	95%	Coordinador de mantenimiento
Coste de indisponibilidad por fallos	CIF	Mide el impacto económico ocasionado por los efectos de fallos en un periodo de tiempo	$D = FF * MDT * (CD + CP)$	Mensual		Gerente de mantenimiento

Se plantea una lista de indicadores de mantenimiento, alineados a los procesos claves en la gestión del mantenimiento, los cuales se conviertan en instrumento para el seguimiento y control. La mejora de estos indicadores técnicos como la confiabilidad, la disminución de la frecuencia de fallos, los tiempos fuera de servicio o la mejora de la disponibilidad, al final ayudaran a maximizar la rentabilidad de los procesos, impactando directamente en indicadores financieros como el EBITDA.

4.1.8 Estrategias de mantenimiento.

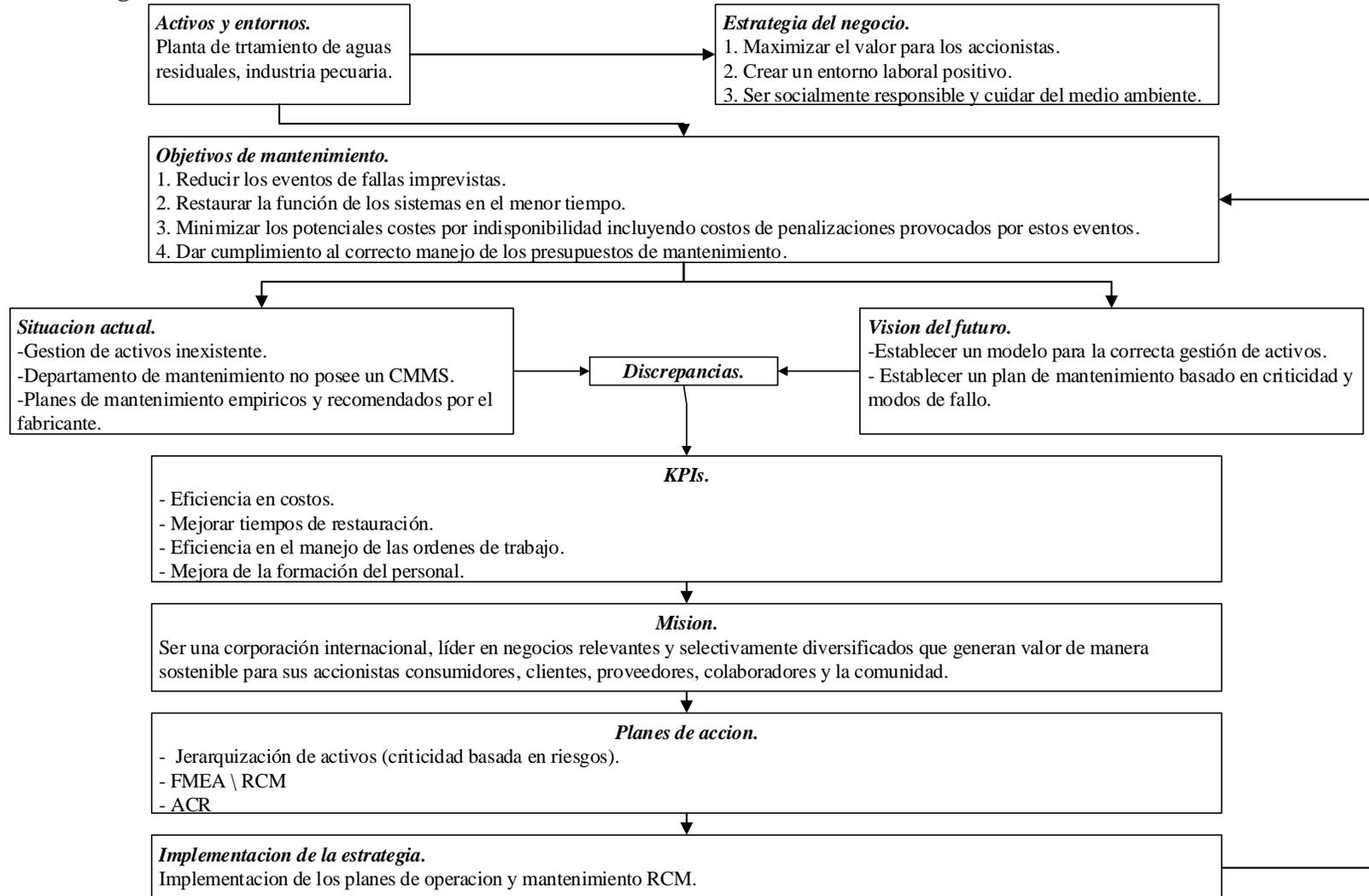


Diagrama 7: Estrategia de mantenimiento (Crespo Marquez, 2007).

4.2 Fase II. Jerarquización de los sistemas.

Existen muchos pilares que soportan la gestión de los activos industriales, de cuya eficacia depende el éxito general de la actividad de mantenimiento (B.S Dhillon, 2002). El modelo del proceso de gestión del mantenimiento (MGM) propuesto por Carlos Parra y Adolfo Crespo, considera dentro de sus tres primeras etapas, actividades orientadas a la eficacia de la gestión. Una de ellas es la jerarquización de los activos, cuyo propósito principal es identificar y jerarquizar por su criticidad los activos de una instalación sobre los cuales vale la pena dirigir recursos humanos, económicos y tecnológico (Parra & Crespo, 2019) sentando una base sólida y objetiva para la toma de decisiones de los gestores de mantenimiento y líderes de negocio.

Se han desarrollado gran cantidad de métodos para el cálculo de jerarquización de activos por criticidad o riesgo, entre los que destacan: el método del flujograma de análisis de criticidad, proceso de análisis jerárquico (AHP) Metodología de los puntos, método de criticidad de Ciliberti, mantenimiento basado en criticidad (CBM), análisis de criticidad basada en API 1160, análisis de Criticidad Integral de Activos, criticidad del Estándar militar MIL-STD882D (Torrez Porras, 2017).

4.2.1 Modelo AHP propuesto para jerarquizar plantas de tratamiento de aguas residuales aerobias en la industria avícola en El Salvador y su esquema de aplicación.

La jerarquización de equipos operantes en la planta de estudio, por lo general, históricamente se ha realizado sin metodología alguna. Es decir, dicho proceso no forma parte de un flujo sistemático con etapas definidas. Por el contrario, este se ha fundamentado únicamente en la experiencia del personal operativo, y solo algunas veces, tomando en cuenta los costos por mantenimiento correctivo.

Dado que el campo de acción de una planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra relacionado con diversas áreas de la empresa: legal, producción, mantenimiento, operaciones, etc. Es imperante establecer un proceso de jerarquización, donde se disminuya la incertidumbre en la toma de decisiones por los potenciales impactos por indisponibilidad de los equipos (Parra C. , 2002)

Por lo tanto, dentro del modelo de gestión propuesto, se considera para la fase 2 el método cuantitativo “proceso de análisis jerárquico (AHP)”, propuesto por Saaty, método que cuyo propósito es hacer más objetiva la toma de decisiones multicriterio (Saaty, 1990). Su esquema de aplicación puede resumirse según el diagrama 10.

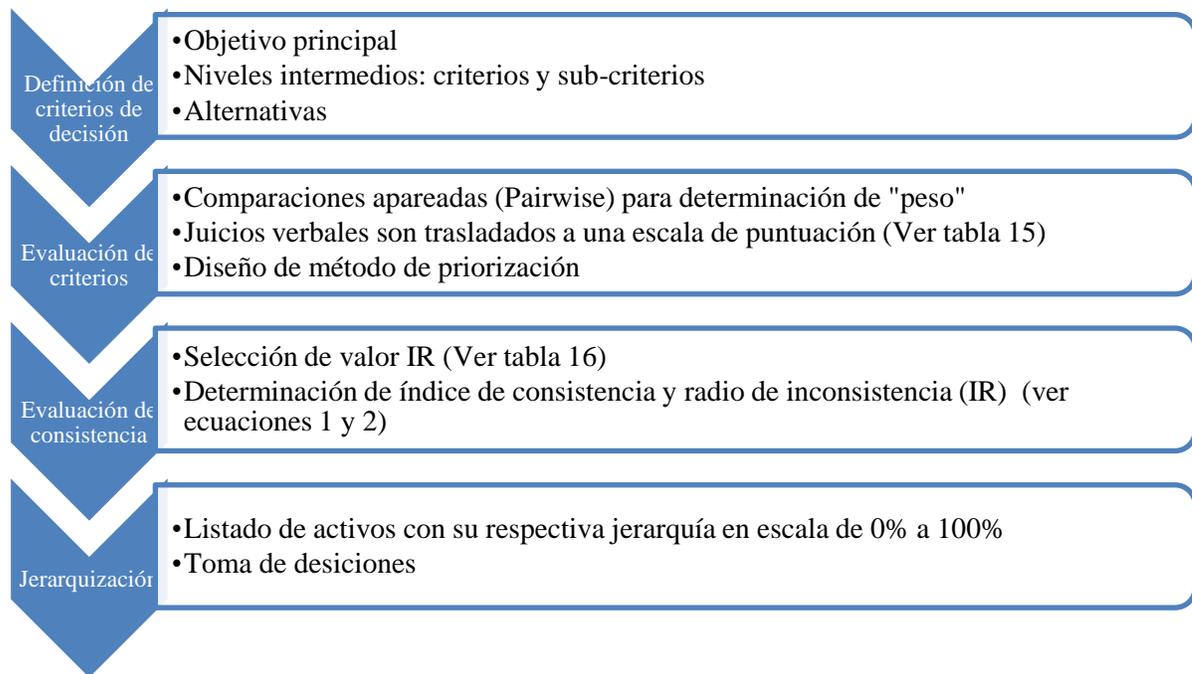


Diagrama 8: Esquema de aplicación AHP.

En una primera etapa, la jerarquización se estructura en niveles, siendo el nivel más bajo las “alternativas”, las cuales, para nuestro caso de estudio se convierten en los “sistemas” constituyentes de PTAR.

Posteriormente, en la evaluación de criterios, se parte de valoraciones o juicios verbales, a los cuales se les asigna una escala de puntuación, permitiendo evaluar los criterios, subcriterios y alternativas, asignándoles prioridad.

Luego, se obtiene una matriz de juicios, donde, con la obtención del vector de prioridad, se pesan los elementos de la matriz (establecer porcentaje de importancia). Posteriormente se diseñan tablas de priorización, para cuantificación del peso de cada criterio a analizar (Wind & Saaty, 1980)

Con el objetivo de evaluar la congruencia de los juicios, se calcula el radio de inconsistencia, y consecuentemente el índice de consistencia, utilizando las ecuaciones (1) y (2).

Tabla 15. Valoración de los juicios (Saaty, 1990).

<i>Intensidad de importancia en escala absoluta</i>	<i>Definición</i>
1	Igual importancia
3	Moderada importancia de uno sobre otro
5	Esencial o fuerte importancia
7	Muy fuerte importancia
9	Extrema importancia
2,4,6,8	Valores intermedios entre los dos juicios adyacentes
Recíprocos	Si la actividad <i>i</i> tiene asignado uno de los números de arriba cuando es comparada con la actividad <i>j</i> , entonces <i>j</i> tiene el valor recíproco cuando es comparado con <i>i</i>
Racionales	Ratios que surgen de la escala

$$CI = \frac{\lambda \max - n}{n - 1} \quad Ec. 1$$

$$I_R = \frac{CI}{RI} \quad Ec. 2$$

Dónde IR viene dado por la tabla 16.

Tabla 16. Valores IR para matrices de diferentes órdenes (Saaty, 1980).

<i>N</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35

Si IR es menor o igual a 0.1, los juicios pueden ser considerados aceptables.

Finalmente, se hace la jerarquización, calculando el nivel de preferencia sobre una escala entre 0.000 – 1.000, obteniéndose como resultado una lista de todas las alternativas (sistemas) en función de los criterios evaluados (Parra C. , 2002)

4.2.2 Aplicación de AHP a sistemas principales de planta de tratamiento de aguas residuales de planta procesadora de aves de estudio.

La presente investigación, dentro de la fase II del modelo de gestión de mantenimiento propuesta por Carlos Parra y Adolfo Crespo, contempla los equipos listados en las tablas 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 y 25, según las diversas áreas conformantes de la PTAR tomada en cuenta.

En la actualidad, la PTAR no cuenta con una jerarquización de activos, por lo que no existe una fundamentación sólida para asignación de recursos de mantenimiento para los equipos contenidos en esta.

Tabla 17. Sistema de pre-tratamiento de agua residual.

<i>Código Sistema</i>	<i>Sistema</i>	<i>Código Equipo</i>	<i>Equipo</i>
PTAR-PT-01	Sistema de pre-tratamiento de agua residual	PTAR-PT-01-01	Tamiz desarenador
		PTAR-PT-01-02	Doble reja de desbaste
		PTAR-PT-01-03	Aireador flotante
		PTAR-PT-01-04	Aireador de fondo
		PTAR-PT-01-05	Bomba de descarga (Fondo) 1
		PTAR-PT-01-06	Bomba de descarga (Fondo) 2
		PTAR-PT-01-07	Bomba de descarga (Superior)

Tabla 18. Sistema de micro-tamizado.

<i>Código Sistema</i>	<i>Sistema</i>	<i>Código Equipo</i>	<i>Equipo</i>
PTAR-MT-02	Sistema de micro-tamizado	PTAR-MT-02-01	Tamizador
		PTAR-MT-02-02	Hidro lavadora

Tabla 19. Sistema de amortiguamiento.

<i>Código Sistema</i>	<i>Sistema</i>	<i>Código Equipo</i>	<i>Equipo</i>
PTAR-AT-03	Sistema de amortiguamiento	PTAR-AT-03-01	Aireador flotante
		PTAR-AT-03-02	Bomba de descarga (Fondo) 1
		PTAR-AT-03-03	Bomba de descarga (Fondo) 2

Tabla 20. Sistema DAF 1.

<i>Código Sistema</i>	<i>Sistema</i>	<i>Código Equipo</i>	<i>Equipo</i>
PTAR-DF-04	Sistema DAF 1	PTAR-DF-04-01	DAF Maxcell 55
		PTAR-DF-04-02	Mezclador cuagulante
		PTAR-DF-04-03	Medidor de flujo magnético
		PTAR-DF-04-04	ADR-1X1210 de maxcell 55
		PTAR-DF-04-05	Bomba de descarga
		PTAR-DF-04-06	Tanque 1 de coagulante
		PTAR-DF-04-07	Tanque 2 de coagulante
		PTAR-DF-04-08	Bomba 1 de coagulante
		PTAR-DF-04-09	Bomba 2 de coagulante
		PTAR-DF-04-10	Tanque 1 de floculante
		PTAR-DF-04-11	Tanque 2 de floculante
		PTAR-DF-04-12	Bomba 1 de floculante
		PTAR-DF-04-13	Bomba 2 de floculante

Tabla 21. Sistemas de reacción biológica.

<i>Código Sistema</i>	<i>Sistema</i>	<i>Código Equipo</i>	<i>Equipo</i>
PTAR-RB-05	Sistema de reacción biológica	PTAR-RB-05-01	Aireador de fondo 1
		PTAR-RB-05-02	Aireador de fondo 2
		PTAR-RB-05-03	Aireador de fondo 3
		PTAR-RB-05-04	Bomba de descarga (Fondo)
		PTAR-RB-05-05	Bomba de descarga (Fondo)

Tabla 22. Sistema DAF 2.

<i>Código Sistema</i>	<i>Sistema</i>	<i>Código Equipo</i>	<i>Equipo</i>
PTAR-DF-06	Sistema DAF 2	PTAR-DF-06-01	DAF Maxcell 61
		PTAR-DF-06-02	Mezclador cuagulante
		PTAR-DF-06-03	Medidor de flujo magnetico
		PTAR-DF-06-04	ADR-1X1210 de maxcell 61
		PTAR-DF-06-05	Bomba de descarga
		PTAR-DF-06-06	Tanque 3 de coagulante
		PTAR-DF-06-07	Tanque 4 de coagulante
		PTAR-DF-06-08	Bomba 3 de coagulante
		PTAR-DF-06-09	Bomba 4 de coagulante
		PTAR-DF-06-10	Tanque 3 de floculante
		PTAR-DF-06-11	Tanque 4 de floculante
		PTAR-DF-06-12	Bomba 3 de floculante
		PTAR-DF-06-13	Bomba 4 de floculante

Tabla 23. Sistema de captación y distribución de agua reciclada.

<i>Código Sistema</i>	<i>Sistema</i>	<i>Código Equipo</i>	<i>Equipo</i>
PTAR-AR-07	Sistema de captación y distribución de agua reciclada	PTAR-AR-07-01	Aireador de fondo
		PTAR-AR-07-02	Bomba de servicio
		PTAR-AR-07-03	Tanque hidroneumático 1
		PTAR-AR-07-04	Tanque hidroneumático 2
		PTAR-AR-07-05	Tanque hidroneumático 3
		PTAR-AR-07-06	Bomba de servicio 1
		PTAR-AR-07-07	Bomba de servicio 2

Tabla 24. Sistema de estabilización de lodos.

<i>Código Sistema</i>	<i>Sistema</i>	<i>Código Equipo</i>	<i>Equipo</i>
PTAR-EL-08	Sistema de estabilización de lodos	PTAR-EL-08-01	Agitador de lodos
		PTAR-EL-08-02	Tanque de cal

Tabla 25. Sistema de deshidratación de lodos.

<i>Código Sistema</i>	<i>Sistema</i>	<i>Código Equipo</i>	<i>Equipo</i>
PTAR-DL-09	Sistema de deshidratación de lodos	PTAR-DL-09-01	Bomba de lodos
		PTAR-DL-09-02	Bomba de limpieza
		PTAR-DL-09-03	Filtro-prensa de lodos
		PTAR-DL-09-04	Tanque 1 de polímero
		PTAR-DL-09-05	Tanque 2 de polímero
		PTAR-DL-09-06	Bomba 1 de polímero
		PTAR-DL-09-07	Bomba 2 de polímero

El modelo AHP propuesto por Carlos Parra, se basa en riesgo (severidad y probabilidad), por lo que se retoma los criterios de severidad y frecuencia, pero se adicionan, debido a objetivos estratégicos de la empresa:

-Mantenibilidad

-Costos

En general, el término “crítico” se conforma de una superposición de criterios, los cuales tienen peso cuantitativo. El realizar un bucle de evaluación efectiva de todas las alternativas (sistemas) respecto a dichos criterios y sus respectivos pesos, más, la comparación entre ellos mismos brinda una jerarquización que supera cualquier tipo de subjetividad, permitiendo la toma de decisiones fundamentada y objetiva.

A continuación, el esquema general del modelo AHP implementado para la jerarquización de los sistemas de las diversas áreas de la planta de tratamiento de aguas residuales:

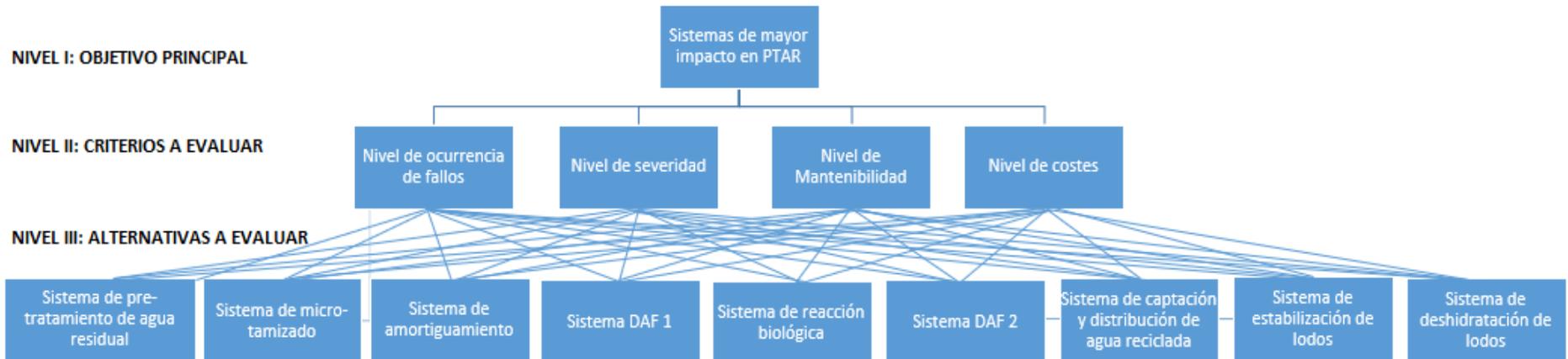


Diagrama 9: Modelo AHP diseñado para jerarquizar los sistemas de la PTAR.

El diagrama 11, describe los niveles del modelo AHP y su interrelación. El modelo cuenta con 3 niveles:

Nivel 1: Definición del objetivo principal

Nivel 2: Definición de los criterios de evaluación

Nivel 3: Descripción de las alternativas a ser jerarquizadas

La definición del objetivo principal y de los criterios de evaluación tomó en consideración los objetivos estratégicos del negocio, así como todos los sistemas conformantes de la planta de tratamiento de aguas residuales.

4.2.3 Definición de los criterios de decisión en forma de objetivos jerárquicos.

Los criterios de evaluación funcionan como eslabón intermediario entre el objetivo principal y las alternativas a evaluar dentro del esquema de niveles para la jerarquización propuesto por Saaty. La definición de estos criterios depende en su totalidad del contexto del área donde se ejecute la jerarquización de activos.

El equipo de trabajo realizó esta etapa bajo dos premisas:

1. Los criterios de frecuencia de fallos y severidad de fallos deben estar presentes, como en todo análisis de riesgos.
2. Es imperante definir el resto de los criterios basados en los objetivos del negocio.

Tomando en cuenta lo anterior, se establecieron los criterios según indica el diagrama 11, posteriormente, por medio de diversas reuniones de trabajo del equipo de trabajo en planta, y considerando los juicios de la tabla 15, se ponderó de “forma apareada” los 4 criterios seleccionados, según se muestra en la tabla 26:

Tabla 26. Comparación de pares de criterios de jerarquización.

<i>Criterios</i>	<i>Frecuencia de fallos</i>	<i>Severidad de fallos</i>	<i>Nivel de mantenibilidad</i>	<i>Nivel de costo</i>
Frecuencia de fallos	1	1	3	1
Severidad de fallos	1	1	2	½
Nivel de mantenibilidad	1/3	½	1	½
Nivel de costo	1	2	2	1

La tabla 26 es una matriz cuyo propósito es hacer comparaciones apareadas basadas en los juicios de Saaty, entre los mismos criterios, estableciendo de dicha manera con un valor numérico su importancia relativa.

4.2.4 Evaluación de las alternativas para cada criterio seleccionado

4.2.4.1 Criterio de Frecuencia de fallas (FF).

Tomando como base la escala numérica del 1 al 10, se establecieron niveles segmentados por “cotas”. Dichas cotas parten de información histórica de fallas de equipos operantes en PTAR, según se ejemplifica en la tabla 27.

La información tomada en cuenta se tomó de bitácoras que se comenzaron a llenar desde el arranque de la planta de tratamientos de aguas residuales en 2018, por lo que es un insumo objetivo y real.

Tabla 27. Historial de fallas de equipos desde instalación de PTAR 2018-2020.

HISTORIAL DE FALLAS EQUIPOS																																
Organización: CMI Alimentos - AVINSA																																
Planta: PTAR																																
Denominación	2018												2019												2020						Frecuencia de fallas	Ponderación
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago				
Sistema de pre-tratamiento de agua residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1304347826	5			
Tamiz desarenador																												0	1			
Doble reja de desbaste																												0	1			
Aireador flotante																												0.434782609	1			
Aireador de fondo																												0	1			
Bomba de descarga (Fondo) 1																												0.434782609	1			
Bomba de descarga (Fondo) 2																												0.434782609	1			
Bomba de descarga (Superior)																												0	1			
Sistema de micro-Tamizado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1304347826	5			
Tamiz rotativo																												0.88965217	1			
Hidrolavadora																												0.434782609	1			
Sistema de amortiguamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1304347826	5			
Aireador flotante																												1304347826	2			
Bomba de descarga (Fondo) 1																												0	1			
Bomba de descarga (Fondo) 2																												0	1			
Sistema de flotación por aire disuelto 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0	0	2	0	0	0	0	3.043478261	7			
DAF 1 MAXCELL 55																												1304347826	2			
Mesclador coagulante																												0	1			
Medidor de flujo magnetico maxcell 55																												0	1			
ADR-1X120 de maxcell 55																												0	1			
Bomba de descarga																												0	1			
Tanque 1 de coagulante																												1304347826	2			
Tanque 2 de coagulante																												0	1			
Bomba 1 de coagulante																												0	1			

En la tabla 28 se presentan los diferentes niveles de frecuencia de fallos disponibles:

Tabla 28. Definición de niveles para criterio “Frecuencia de fallos” (Parra & Crespo, 2018).

<i>FF</i>	<i>Nivel de Frecuencia de fallos</i>	<i>Cota</i>	<i>Definición del nivel de frecuencia de ocurrencia de fallos</i>
10	Muy alta: Fallo que es casi inevitable	1 semana	>57 Fallas/año
9		1 mes	>12 Fallas/año
8	Alta: Continuamente	3 meses	>4 Fallas/año
7		6 meses	>2 Fallas/año
6	Moderada: Ocasionalmente	9 meses	>1.33 Fallas/año
5		12 meses	>1 Fallas/año
4	Baja: Fallo ocurre muy poco	15 meses	>0.8 Fallas/año
3		18 meses	>0.66 Fallas/año
2	Remota: No es probable que ocurra el fallo	21 meses	>0.57 Fallas/año
1		24 meses	>0.5 Fallas/año

4.2.4.2 Criterio de Severidad de fallas (SF).

La tabla 29, presenta los niveles de severidad de fallos considerados por Carlos Parra en su modelo de jerarquización aplicado a una planta de refinación petrolera, ahora aplicado a una PTAR:

Tabla 29. Definición de niveles para criterio “Severidad de fallos” (Parra & Crespo, 2018).

<i>SF</i>	<i>Nivel de Severidad de fallos</i>	<i>Definición del nivel de severidad de fallos</i>
10	Peligrosamente alto	-Fallos que pueden causar pérdidas humanas.
9		-Fallos que pueden crear complicaciones con regulación.
8		-Fallos que hacen inoperables los equipos y provocan pérdida de función de diseño.
7	Alto	-Fallos que causan un alto grado de insatisfacción al cliente que recibe el servicio.
6		-Fallos que afectan un subsistema y originan un mal funcionamiento de los equipos disminuyendo la calidad del servicio.
5	Bajo	-Fallos que provocan la pérdida de eficiencia y causa que el cliente se queje.
4		-Fallos que pueden ser mejoradas con pequeñas modificaciones y su impacto sobre la eficiencia de los equipos es pequeña.
3	Menor	-Fallos que podrían crear mínimas molestias al cliente, molestias que el mismo cliente podría corregir en el proceso sin necesidad de perder eficiencia.
2		-Fallos que son difíciles de reconocer por el cliente y cuyos efectos serán insignificantes para el proceso.
1	Ninguno	-Fallos que no son identificables por el cliente y no afectan la eficiencia del proceso.

Dichos niveles fueron evaluados por el equipo de trabajo, quienes unánimemente estuvieron de acuerdo con el evaluar los equipos operantes en PTAR bajo las mismas premisas.

4.2.4.3 Criterio de Nivel de mantenibilidad (MF).

Tabla 30. Definición de niveles para criterio “Nivel de mantenibilidad”.

<i>MF</i>	<i>Nivel de Mantenibilidad</i>	<i>Definición del nivel de Mantenibilidad</i>
10	Muy baja mantenibilidad	-Acceso totalmente restringido a mantenimiento e inspección de partes permanentemente/requiere mano de obra/herramental especializado (externo)/Disponibilidad limitada de repuestos/Servicio postventa nulo.
9		
8	Baja mantenibilidad	-Acceso restringido a inspección y mantenimiento de partes durante operación / Requiere mano de obra/herramental especializado (externo) / Disponibilidad limitada de repuestos/Servicio postventa limitado
7		
6	Baja mantenibilidad	-Acceso únicamente a inspección de partes durante operación / No requiere mano de obra/herramental especializado (externo) / disponibilidad limitada de repuestos/Servicio postventa limitado
5		
4	Alta mantenibilidad	-Acceso a mantenimiento de partes durante operación / No requiere mano de obra/herramental especializado (externo) / Alta disponibilidad de repuestos/Servicio postventa óptimo
3		
2		-Acceso a mantenimiento de partes durante operación / Actividades realizadas únicamente con recurso interno /Alta disponibilidad de repuestos / Se cuenta con instructivos de trabajo claros y concisos
1	Muy alta mantenibilidad	

Los niveles correspondientes al criterio de mantenibilidad se denotan en la tabla 30, y consideran aspectos tales como acceso a las partes de los equipos, tipo de mano de obra para efectuar mantenimiento (especializada/no especializada) y servicio postventa de parte del proveedor.

4.2.4.4 Criterio de Nivel de costes (CF).

Los niveles correspondientes a la ponderación del criterio de costes se muestran en la tabla 31, dichos niveles se diseñaron bajo diversas cotas monetarias en USD (moneda operante en El Salvador), partiendo de un foro con el equipo de trabajo donde se establecieron y cuantificaron potenciales impactos económicos por la indisponibilidad de los equipos de PTAR. Se consideraron desde los costos de mantenimiento correctivo de los equipos, hasta pago de penalizaciones a entes regulatorios de El Salvador.

Tabla 31. Definición de niveles para criterio “Nivel de costes” (Parra & Crespo, 2018).

<i>CF</i>	<i>Nivel de Costes</i>	<i>Definición del nivel de costes</i>
10	Peligrosamente alto	-Fallo que provocan altos costes por aspectos de seguridad y ambiente (indemnizaciones\cierre de operaciones).
9		
8	Muy alto	-Fallos que provocan altos costes por pérdida total de producción.
7		
6	Alto	-Fallos que generan altos costes por reparaciones correctivas.
5		
4	Moderado	-Fallos que generan costes significativos de producción y/o reparación.
3		
2		
1	Muy bajos	-Fallos que generan costes insignificantes - no afectan el proceso de producción.

4.2.5 Resultados de la evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios seleccionados.

En la tabla 32, se presentan los resultados obtenidos en la evaluación realizada a los 9 sistemas de la PTAR de industria pecuaria, en función de cada uno de los cuatro criterios considerados (Frecuencia de fallos (FF), Severidad de fallos (SF), Nivel de mantenibilidad (MF) y Nivel de costes por fallo (CF).

Tabla 32. Resultados de la evaluación de las alternativas (sistemas) para cada uno de los criterios seleccionados.

<i>Sistema</i>	<i>FF</i>	<i>FF/TOTAL</i>	<i>MF</i>	<i>MF/TOTAL</i>	<i>FF</i>	<i>FF/TOTAL</i>	<i>CF</i>	<i>CF/TOTAL</i>
Sistema de pre-tratamiento de A.R	5	0.1162	8	0.0857	5	0.1290	8	0.06349
Sistema de micro-tamizado	5	0.1162	6	0.0857	5	0.0967	6	0.09523
Sistema de amortiguamiento	5	0.1162	8	0.0857	5	0.1290	8	0.09523
Sistema DAF 1	7	0.1627	6	0.1285	7	0.0967	6	0.15873
Sistema de reacción biológica	6	0.1395	8	0.1285	6	0.1290	8	0.15873
Sistema DAF 2	1	0.0232	6	0.1285	1	0.0967	6	0.12698
Sistema de captación y distribución	4	0.0930	8	0.1	4	0.1290	8	0.01587
Sistema de estabilización de lodos	5	0.1162	6	0.1285	5	0.0967	6	0.15873
Sistema de deshidratación de lodos	5	0.1162	6	0.1285	5	0.0967	6	0.12698

4.2.6 Estimación de congruencia de juicios con radio de inconsistencia IR y jerarquización de criterios evaluados.

A continuación, se representa la tabla 33, referente a “comparación de pares de criterios de jerarquización” de forma matricial:

$$\text{Matriz de criterios} = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 3.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 2.00 & 0.50 \\ 0.33 & 0.50 & 1.00 & 0.50 \\ 1.00 & 2.00 & 2.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

Al normalizar:

$$\text{Matriz de criterios normalizada} = \begin{bmatrix} 0.300 & 0.222 & 0.375 & 0.333 \\ 0.300 & 0.222 & 0.250 & 0.167 \\ 0.100 & 0.111 & 0.125 & 0.167 \\ 0.300 & 0.444 & 0.250 & 0.333 \end{bmatrix}$$

Al multiplicar la matriz de criterios normalizada por el vector promedio de filas de esta:

$$\text{Vector Fila} = \begin{bmatrix} 1.6685 \\ 1.2796 \\ 0.6820 \\ 1.8138 \end{bmatrix}$$

Se divide cada componente del vector fila por el promedio de cada fila de la matriz normalizada obtenemos:

$$\text{Vector } \lambda = \begin{bmatrix} 4.07 \\ 4.09 \\ 4.07 \\ 4.10 \end{bmatrix}$$

Siendo λ_{max} el promedio del vector λ , es decir, $\lambda_{max} = 4.0811$. Sustituyendo $\lambda_{max} = 4.0811$ y $n=4$ en Ec. 1:

$$CI = 0.0270$$

Sustituyendo $CI = 0.027$, y $RI=0.89$ (según...) en Ec. 2, se tiene:

$$I_R = 0.0304$$

Finalmente, se presentan los resultados de la jerarquización de los criterios evaluados:

Tabla 33. Estimación del IR y jerarquización de los criterios evaluados.

<i>Criterios</i>	<i>Frecuencia de fallos</i>	<i>Severidad de fallos</i>	<i>Nivel de mantenibilidad</i>	<i>Nivel de costo</i>	<i>Jerarquización total por criterio</i>
Frecuencia de fallos	1	1	3	1	0.3065
Severidad de fallos	1	1	2	½	0.2349
Nivel de mantenibilidad	1/3	½	1	½	0.1254
Nivel de costo	1	2	2	1	0.3333
Radio de inconsistencia	0.0304				

Los cálculos se realizaron utilizando Excel, del paquete de Microsoft Office 365.

4.2.7 Jerarquización final de los 9 sistemas de la PTAR planta procesadora de aves de estudio

Según se indicó al principio del capítulo, los equipos de PTAR no poseían una jerarquización definida bajo algún esquema metodológico. Únicamente se priorizaban recursos con fundamento en una jerarquía de tipo “apreciativa” de parte del personal operativo, estrictamente empírico.

Los resultados que se muestran en la tabla 34 representan la jerarquización de los activos, en función de la cuantificación realizada a cada uno de los criterios (local/total), y posteriormente se ordenan por nivel de importancia (mayor a menor valor de “jerarquización final”) en la tabla 35.

A lo largo del capítulo se ha expuesto que la metodología utilizada para jerarquizar fue AHP (Proceso analítico jerárquico), y la presente investigación utilizó dichos resultados para las fases posteriores. Dicho modelo, es considerado una forma “cuantitativa” para establecer un orden jerárquico de los sistemas componentes del área de estudio.

Por su parte, existen diversos modelos de tipo cualitativo y semi-cuantitativo. Dentro de los últimos antes citados, tenemos el “modelo de criticidad semicuantitativo – MCR” - (matriz de criticidad por riesgo) (Parra & Crespo, 2018), el cuál fue aplicado a los mismos sistemas del presente documento, obteniendo los resultados presentados en la tabla 36.

Es posible comparar los modelos bajo las siguientes condiciones:

- Utilizar los mismos criterios en AHP y en MCR
- Ambos modelos basados en riesgo
- Evaluar los mismos sistemas

Tabla 34. Jerarquización total AHP.

4.2.8 Jerarquización AHP

<i>Sistema</i>	<i>Jerarquización local FF</i>	<i>Jerarquización total FF</i>	<i>Jerarquización local SF</i>	<i>Jerarquización total SF</i>	<i>Jerarquización local MF</i>	<i>Jerarquización total MF</i>	<i>Jerarquización local CF</i>	<i>Jerarquización total CF</i>	<i>Jerarquización TOTAL</i>
Sistema de pre-tratamiento de agua residual	0.1162	0.0356	0.0857	0.0201	0.1290	0.0162	0.0635	0.0212	0.0931
Sistema de micro-tamizado	0.1162	0.0356	0.0857	0.0201	0.0968	0.0121	0.0952	0.0317	0.0996
Sistema de amortiguamiento	0.1162	0.0356	0.0857	0.0201	0.1290	0.0162	0.0952	0.0317	0.1037
Sistema DAF 1	0.1627	0.0499	0.1286	0.0302	0.0968	0.0121	0.1587	0.0529	0.1451
Sistema de reacción biológica	0.1395	0.0428	0.1286	0.0302	0.1290	0.0162	0.1587	0.0529	0.1420
Sistema DAF 2	0.0232	0.0071	0.1286	0.0302	0.0968	0.0121	0.1270	0.0423	0.0918
Sistema de captación/ distribución de agua R	0.0930	0.0285	0.1000	0.0235	0.1290	0.0162	0.0159	0.0053	0.0735
Sistema de estabilización de lodos	0.1162	0.0356	0.1286	0.0302	0.0968	0.0121	0.1587	0.0529	0.1309
Sistema de deshidratación de lodos	0.1162	0.0356	0.1286	0.0302	0.0968	0.0121	0.1270	0.0423	0.1203

Tabla 35. Jerarquización AHP total ordenada.

<i>Sistema</i>	<i>Jerarquización TOTAL</i>	<i>Posición</i>
Sistema DAF 1	0.1451	1
Sistema de reacción biológica	0.1420	2
Sistema de estabilización de lodos	0.1309	3
Sistema de deshidratación de lodos	0.1203	4
Sistema de amortiguamiento	0.1037	5
Sistema de micro-tamizado	0.0996	6
Sistema de pre-tratamiento de agua residual	0.0931	7
Sistema DAF 2	0.0918	8
Sistema de captación y distribución de agua reciclada	0.0735	9

4.2.9 Jerarquización MCR.

La selección de los factores ponderados considerados en el modelo MCR se realiza con la participación del equipo de labor involucrado en el contexto operacional de las etapas del sistema de tratamiento de aguas residuales abordado, abarcando los activos (operaciones, mantenimiento, procesos, seguridad y ambiente). Posteriormente, se seleccionan los sistemas a priorizar y se genera la alimentación de datos en la que se le asignan a cada equipo los valores correspondientes a cada uno de los factores que integran el modelo. Para obtener el nivel de criticidad de cada equipo/sistema, se toman los valores totales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias de los fallos (Parra & Crespo, 2019).

El modelo de Criticidad por Riesgo es un proceso de análisis, soportado en el concepto del riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de un fallo por la severidad de este.

El modelo MCR excluye la ponderación de “pesos”, y únicamente toma en cuenta la definición de “riesgo”:

$$R = FF \times C \quad Ec. 3$$

Dónde:

FF = Frecuencia de fallos (número de fallas en un tiempo determinado)

C = Consecuencias de los fallos a la seguridad, ambiente, calidad, producción, etc.

$$C = (\text{Impacto en Seguridad y Medio Ambiente (SHA)} \times 0,2) + \\ (\text{Impacto en Calidad (IC)} \times 0,2) + \\ (\text{Impacto Producción (IP)} \times 0,2) + \\ (\text{Impacto por mantenibilidad (MF)} \times 0,2) + \\ (\text{Costos de Mantenimiento (CF)} \times 0,2) \quad (3.5)$$

Se presenta también, los factores ponderados diseñados para el proceso de jerarquización de los factores de frecuencia y consecuencias de fallos:

Criterios de frecuencia de fallos (FF) (escala 1 - 10)

Muy alta: Fallo que es casi inevitable (9-10)

Alta: Continuamente (7-8)

Moderada: Ocasionalmente (5-6)

Baja: Fallo ocurre muy poco (3-4)

Remota: No es probable que ocurra el fallo (1-2)

Factores de Consecuencias (escala 1 - 10)

Nivel de impacto por mantenibilidad (MF) (escala 1 - 10)

Muy baja mantenibilidad (9-10)

Baja mantenibilidad (7-8)

Baja mantenibilidad (5-6)

Alta mantenibilidad (3-4)

Muy alta mantenibilidad (1-2)

Nivel de impacto de severidad de fallos (SF)

Peligrosamente alto (9-10)

Alto (7-8)

Bajo (5-6)

Menor (3-4)

Ninguno (1-2)

Impacto en Costos de Mantenimiento (CF)

Peligrosamente alto (9-10)

Muy alto (7-8)

Alto (5-6)

Moderado (3-4)

Muy bajos (1-2)

Al utilizar las ponderaciones brindadas a cada sistema, de cada criterio, durante el ejercicio AHP, obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 36. Jerarquización total MCR.

<i>Sistema</i>	<i>FF (Frecuencia de falla)</i>	<i>SF (Impacto por severidad)</i>	<i>MF (Impacto por baja mantenibilidad)</i>	<i>CF (Impacto por costos)</i>	<i>C (Consecuencia)</i>	<i>R (Riesgo)</i>
Sistema DAF 1	7	9	6	10	8.3333	58.3333
Sistema de reacción biológica	6	9	8	10	9.0000	54.0000
Sistema de estabilización de lodos	5	9	6	10	8.3333	41.6667
Sistema de deshidratación de lodos	5	9	6	8	7.6667	38.3333
Sistema de amortiguamiento	5	6	8	6	6.6667	33.3333
Sistema de micro-tamizado	5	6	6	6	6.0000	30.0000
Sistema de pre-tratamiento de agua residual	5	6	8	4	6.0000	30.0000
Sistema de captación / distribución de agua R	4	7	8	1	5.3333	21.3333
Sistema DAF 2	1	9	6	8	7.6667	7.6667

Tabla 37. Jerarquización MCR total ordenada.

<i>Sistema</i>	<i>R (Riesgo)</i>	<i>Posición</i>
Sistema DAF 1	58.3333	1
Sistema de reacción biológica	54.0000	2
Sistema de estabilización de lodos	41.6667	3
Sistema de deshidratación de lodos	38.3333	4
Sistema de amortiguamiento	33.3333	5
Sistema de micro-tamizado	30.0000	6
Sistema de pre-tratamiento de agua residual	30.0000	7
Sistema de captación / distribución de agua R	21.3333	8
Sistema DAF 2	7.6667	9

4.2.10 Comparación jerarquización AHP vs. MCR.

Tabla 38. Comparación jerarquización AHP vs. MCR.

POSICIÓN	JERARQUIZACIÓN MCR		JERARQUIZACIÓN AHP		COINCIDENCIA
	EQUIPO	RIESGO	EQUIPO	PESO TOTAL	
1	Sistema DAF 1	58.3333	Sistema DAF 1	0.1451	1
2	Sistema de reacción biológica	54.0000	Sistema de reacción biológica	0.1420	1
3	Sistema de estabilización de lodos	41.6667	Sistema de estabilización de lodos	0.1309	1
4	Sistema de deshidratación de lodos	38.3333	Sistema de deshidratación de lodos	0.1203	1
5	Sistema de amortiguamiento	33.3333	Sistema de amortiguamiento	0.1037	1
6	Sistema de micro-tamizado	30.0000	Sistema de micro-tamizado	0.0996	1
7	Sistema de pre-tratamiento de agua residual	30.0000	Sistema de pre-tratamiento de agua residual	0.0931	1
8	Sistema de captación y distribución de agua reciclada	21.3333	Sistema DAF 2	0.0918	0
9	Sistema DAF 2	7.6667	Sistema de captación y distribución de agua reciclada	0.0735	0
	TOTAL DE COINCIDENCIAS				7
	TOTAL DE SISTEMAS				9
	PORCENTAJE DE COINCIDENCIA				77.78%

La comparativa mostrada en la tabla 38 solamente es posible dado que ambos modelos (AHP y MCR) se basan en riesgo y que para ambos ejercicios se utilizaron los mismos criterios. Es claro que un modelo semicuantitativo como el MCR, al no brindar porcentajes de peso a los criterios, estos, se ponderan bajo el mismo nivel, a diferencia del modelo AHP donde cada criterio tiene un impacto diferente en el análisis, según lo determine así la industria donde se aplica.

4.3 Fase III. Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto.

Dentro de este marco, la técnica de Análisis Causa Raíz (RCA – Root Cause Analysis) es una de las herramientas con el mayor potencial para ayudar a cumplir los objetivos de minimización del impacto de los fallos y de maximización de la fiabilidad operacional (Parra & Crespo, 2019)



Diagrama 10: Fase 3, MGMI (Crespo Marquez, 2007).

A continuación, se presenta la implementación de la metodología de análisis causa raíz propuesta por Parra y Crespo, se desarrollará el caso práctico dentro de la industria de procesamiento de aves, se presentará los miembros del equipo de trabajo, así como las causas raíces, físicas, humanas y latentes, y las recomendaciones para erradicar dichas causas.

La implementación del análisis se centrará en el sistema reactor biológico, específicamente en el aireador de fondo dos, dado que de los tres instalados este representa una mayor cantidad de incidentes y se requiere validar si las fallas tienen un origen de ingeniería, humano o de proceso.

4.3.1 Contexto operacional del sistema: "Aireador de Fondo # 2".

Difusión de oxígeno a reactor biológico a una tasa de 50 kg de O₂/h con un nivel de operación de 7 MCA.

4.3.2 Descripción general del sistema.

El motor eléctrico acciona un impulsor que tiene una doble función (ilustración 1):

- En su lado superior, el impulsor aspira agua a través de la abertura central en el cuerpo del aireador.
- En su lado inferior, se induce una subpresión en la cámara de vacío y, en consecuencia, se aspira aire a través del tubo de admisión de aire, tanto el aire aspirado como el agua se centrifugan en los canales del cuerpo del aireador y se mezclan allí.

La mezcla de agua / aire se expulsa al tanque de aireación e induce un flujo importante a lo largo del tanque (ilustración 3).

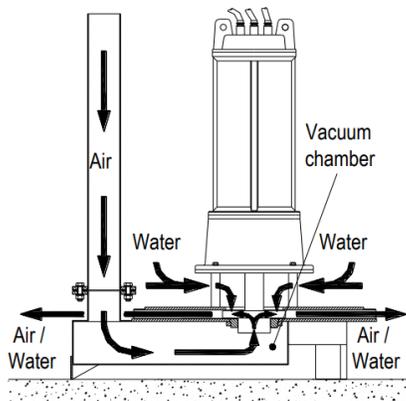


Ilustración 3. Principio de funcionamiento aireador de fondo.

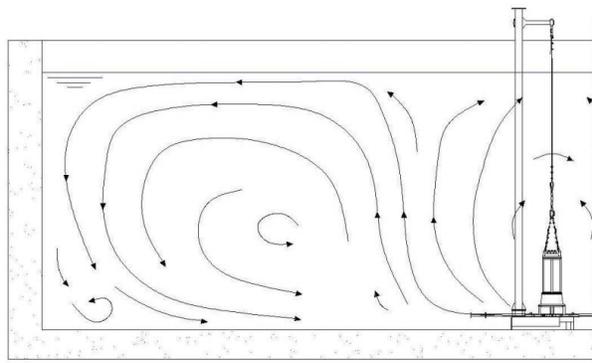


Ilustración 4. Flujo interno en proceso de aireación.

4.3.3 Descripción específica del proceso.

El motor eléctrico de 70 HP convierte la energía eléctrica en energía mecánica rotacional, acoplado a una estructura difusora de acero AISI 304L y un impulsor, el cuál por el lado inferior induce una subpresión en la cámara de vacío, aspirando aire (20.94% de oxígeno, 78.08% de nitrógeno, 0.93 % de argón, 0.04 % de dióxido de carbono y pequeñas cantidades de otros gases), y por la parte superior se aspira agua para mezclarse con el aire de ingreso, inyectando oxígeno a una tasa de 50 Kg/H al reactor biológico. Por su parte los canales difusores se encargan de aumentar la transferencia de oxígeno, hasta un 20%, asegurar la mejor distribución de las de las finas burbujas que se forman en el depósito y garantizar una distribución óptima del aire gracias a los orificios bilaterales (1) en la parte externa y media de los canales (2) anillos anti obstrucción (3) y conexión anti obstrucción con el aireador (4). (INTERNATIONAL)

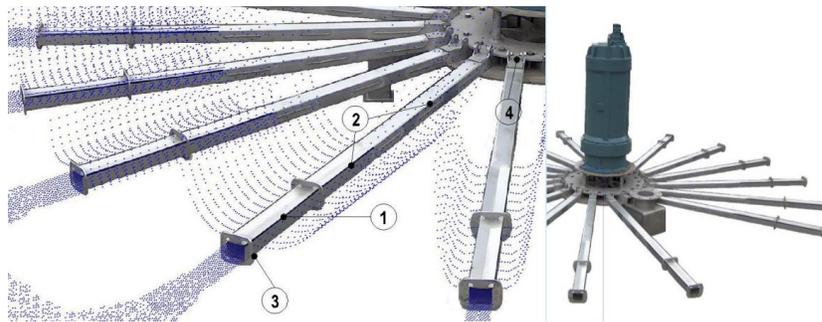


Ilustración 5. Difusores del aireador de fondo.

4.3.4 Equipos principales.

- Estructura difusora
- Motor sumergible
- Control eléctrico

4.3.5 Diagrama de proceso aireador de fondo, entrada - proceso – salida.

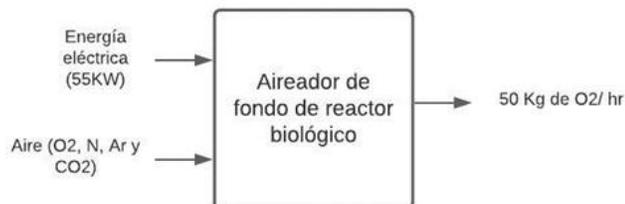


Diagrama 11: Esquema de proceso, aireador de fondo.

4.3.6 Antecedentes relacionados con los aireadores de la PTAR.

La planta de tratamiento de aguas residuales, fue inaugurada en mayo de 2018, esta ópera dentro de la fábrica de procesamiento de pollo, tratando volúmenes de agua residual de hasta 15,000 m³ por semana, en esta planta se cuenta con equipos aireadores los cuales operan de forma continua y de forma inaccesible para realizar mantenimientos o inspecciones rutinarios.

Los tres equipos aireadores son de la marca AQUASYSTEMS INTERNATIONAL, durante el periodo de agosto de 2019 a marzo de 2020, se han registrado, cuatro eventos de fallo mayores en estos equipos, los cuales se presentan a continuación.

- Año 2019: 01 evento. Falla aireador de fondo 1.
- Año 2020: 03 evento. Falla aireador de fondo 2.

Solo en el equipo aireador de fondo 3, no se han reportado anomalías.

Tabla 39. Aireador de fondo # 2.

<i>Imágenes Aireador de fondo # 2</i>	<i>Descripción.</i>
	Instalación de aireador de fondo, dentro de cárcamo, con capacidad de 1800M ³ .
	Método de desmontaje, para revisión de equipo. Es necesario el alquiler de una grúa.
	Motor sumergible, desmontado listo para revisiones mecánicas y eléctricas.

4.3.7 Grupo de trabajo RCA.

El esfuerzo de RCA en cualquier organización requerirá un número de participantes en varios niveles de la organización, para el estudio se conformó el grupo de trabajo tomando en cuenta habilidades, como el conocimiento de los procesos, personal involucrado en fallas, y proveedores de servicios. Con el objetivo de descubrir los problemas de mayor impacto y definir los modos de fallos relacionados a estos problemas.

- Ingeniero de mantenimiento.
- Supervisor PTAR.
- Gerente de procesamiento.
- Supervisor de operaciones.
- Operador de turno PTAR.
- Mecánico de turno.
- Ingeniero proveedor de servicios tercerizados.

4.3.8 Definición del problema.

La definición del problema se realizará a través de un método de análisis que cuestiona las características fundamentales de una situación, este es conocido como 5 "W" + "H". Contestando estas simples preguntas, se facilitará la representación general, de la situación en contexto.

- ¿Que? Falta de oxigenación en agua de reactor biológico.
- ¿Donde? Aireador de fondo, reactor biológico, planta de tratamiento de aguas residuales.
- ¿Cuándo? Operación continua.
- ¿Quien? Operador PTAR y mecánico de planta.
- ¿Cual? Aleatorio.
- ¿Como? Falla en uno de los aireadores.

A continuación, se define el enunciado del problema como, ***"Incumplimiento en parámetros DBO, debido a parada de uno de los aireadores sumergible"***.

4.3.9 Aplicación de la herramienta árbol de fallos.

Una vez identificadas las hipótesis, el equipo de trabajo procede a definir las posibles causas raíces para cada una de las hipótesis validadas. La metodología propone identificar y clasificar las causas raíces en tres categorías (Parra & Crespo, 2019)

- Causa Raíz Física (CRF): Causas raíces que envuelven materiales o cosas tangibles
- Causa Raíz Humana (CRH): Causas raíces que generan fallos debido a una intervención humana.
- Causa Raíz Latente (CRL): Causas raíces relacionadas con la falta o deficiencia en los sistemas de gestión y administrativos.

Para realizar la evaluación hasta sus causas raíces, se utiliza la herramienta de árbol de fallas la cual facilito identificar las posibles causas por las que ocurrió el evento.

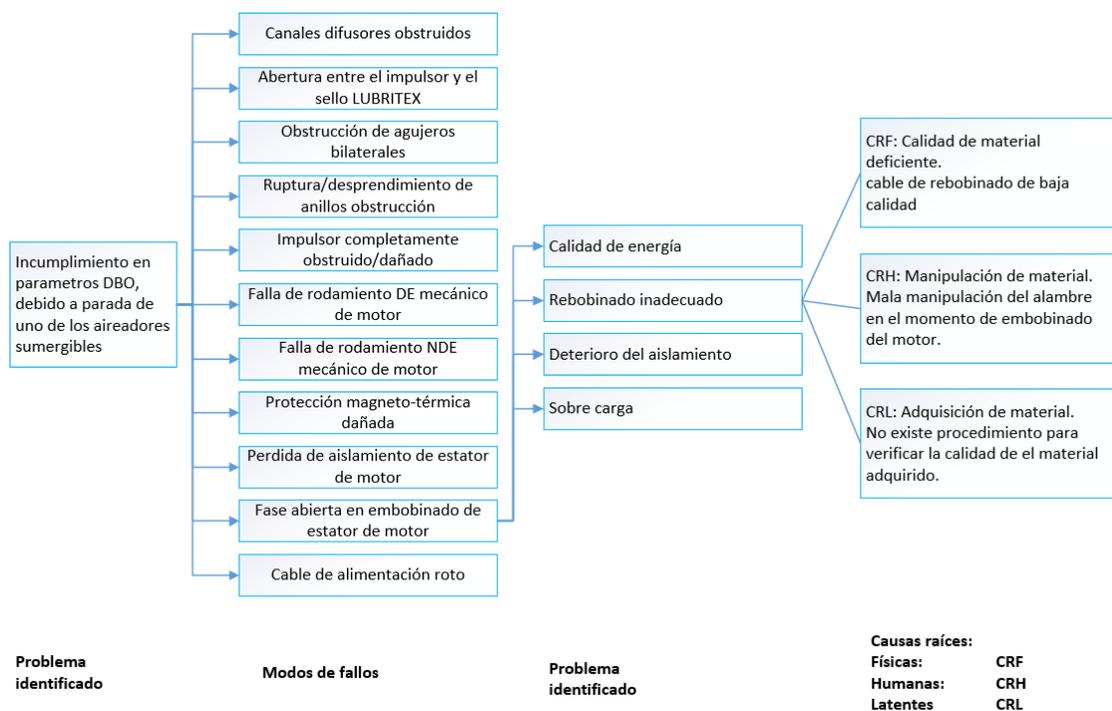


Diagrama 12: Árbol de fallas análisis ACR, “Aireador de Fondo # 2”.

4.3.9 Definición y jerarquización de los modos de fallos.

En esta etapa del proceso de la implantación de la metodología de RCA, se toman los problemas de mayor impacto y se identifican los posibles modos de fallos que provocaron estos problemas. Los modos de fallos dentro del RCA, se definen como los eventos físicos que generan el paro imprevisto. (Latino, 2002).

Tabla 40. Jerarquización de los modos de fallo.

<i>Jerarquización de los Modos de Fallos</i>						
<i>#</i>	<i>Modos de fallos</i>	<i>Frecuencia de eventos por año fallas/año</i>	<i>TI (Tiempo indisponibilidad)</i>	<i>Imp. Prod. \$/hora</i>	<i>Costos directos por falla \$/falla</i>	<i>Riesgo \$/año</i>
1	Fase abierta en embobinado de estator de motor	1.3	15	18,868	1560	369,954
2	Falla de rodamiento DE mecánico de motor	0.5	3	18,868	860	28,732
3	Falla de rodamiento NDE mecánico de motor	0.5	3	18,868	860	28,732
4	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	0.1	15	18,868	1560	28,458
5	Cable de alimentación roto	0.1	15	18,868	1100	28,412
6	Abertura entre el impulsor y el sello LUBRITEX	0.25	2	18,868	972.8	9,677
7	Canales difusores obstruidos	0.25	1	18,868	815.2	4,920
8	Impulsor completamente obstruido/dañado	0.25	1	18,868	815.12	4,920
9	Ruptura/desprendimiento de anillos anti-obstrucción	0.1	2	18,868	822.8	3,855
10	Obstrucción de agujeros bilaterales	0.1	1	18,868	815.12	1,968
11	Protección magneto-térmica dañada	0.1	0	18,868	380	38

Los valores de impacto de producción, tiempos de reparación, costos directos y costos de riesgo, se establecieron en acuerdo con el grupo de trabajo RCA, tomando como base el análisis RCM.

Los primeros tres modos de falla se consideran críticos, tal como se observa en la tabla 40 son aquellos relacionados al motor.

4.3.10 Definición de la hipótesis y las causas raíces para los modos de fallos críticos.

A continuación, se presentan los modos de fallos con las hipótesis y las causas raíces, para los aireadores de fondo.

Tabla 41. Causas raíces de los modos de fallos.

Modos de fallos		Hipótesis, Tipo A – Probabilidad Alta, Tipo B – Probabilidad Media. Tipo C – Probabilidad Baja		Causas raíces, Físicas (F), Humanas (H), Latentes (L)	
1	Canales difusores obstruidos	1.1	Obstrucción. (B)	1.1.1	Fluido del tanque con demasiados sólidos. (F)
				1.1.2	No existe estrategia de mantenimiento. (L)
				1.1.3	Capa de lodo en el fondo del tanque. (L)
2	Abertura entre el impulsor y el sello LUBRUTEX	2.1	Instalación inadecuada. (C)	2.1.1	No existe procedimiento. (L)
				2.1.2	Herramienta inadecuada. (F)
		2.2	Cambio en las condiciones de servicio. (C)	2.2.1	Fluido del tanque con demasiados sólidos. (F)
				2.2.2	Cambio de la temperatura de trabajo. (F)
		2.3	Selección de sello incorrecta. (C)	2.3.1	No existe procedimiento. (L)
				2.3.2	Falta de stock de sello. (H y L)
3	Obstrucción de agujeros bilaterales	3.1	Obstrucción. (B)	3.1.1	Fluido del tanque con demasiados sólidos. (F)
				3.1.2	No existe estrategia de mantenimiento. (L)
4	Ruptura/desprendimiento de anillos anti-obstrucción	4.1	Instalación inadecuada. (C)	4.1.1	Falta al protocolo de instalación. (L)
				4.1.2	Herramienta inadecuada. (F)
		4.2	Fatiga. (C)	4.2.1	Límite de vida útil. (H)
				4.2.2	Mal ajuste. (H y L)
				4.2.3	No existe procedimiento. (L)
		4.3	Corrosión. (C)	4.3.1	Medio ambiente. (F)
4.3.2	Ausencia de procedimiento de protección. (L)				
5	Impulsor completamente obstruido/dañado	5.1	Rodamiento trabado. (B)	5.1.1	Límite de vida útil. (H y L)
				5.1.2	No existe programa de replazo. (L)
		5.2	Desprendimiento de impeler. (C)	5.2.1	Rotura de perno sujeción de impeler. (F)
				5.2.2	Desprendimiento de parte del impeler. (F)
		5.3	Elemento extraño en cámara de succión. (C)	5.3.1	Cambio de condiciones dentro del tanque. (H y L)
6	Falla de rodamiento DE mecánico de motor	6.1	Fatiga. (C)	6.1.1	Límite de vida útil. (H)
				6.1.2	Mal ajuste al ser instalado. (H y L)
				6.1.3	No existe procedimiento. (L)
		6.2	Calor excesivo. (B)	6.2.1	Mal ajuste en la cuna del rodamiento. (H y L)
				6.2.2	Fluido del tanque muy denso. (F)
				6.2.3	Calor inducido por el motor. (F)
		6.3	Contaminación. (A)	6.3.1	Falla del sello entre la caja y motor, Ingreso de aceite o agua.
6.3.2	Falta al protocolo de instalación. (L)				

7	Falla de rodamiento NDE mecánico de motor	7.1	Fatiga. (C)	7.1.1	Límite de vida útil. (H)
				7.1.2	Mal ajuste al ser instalado. (H y L)
				7.1.2	No existe procedimiento. (L)
		7.2	Calor excesivo. (B)	7.2.1	Mal ajuste en la cuna del rodamiento. (H y L)
				7.2.2	Fluido del tanque muy denso. (F)
				7.2.3	Calor inducido por el motor. (F)
		7.3	Contaminación. (A)	7.3.1	Falla del sello entre la caja y motor, permite Ingreso de aceite o agua.
				7.3.2	Falta al protocolo de instalación. (L)
		8	Protección magneto-térmica dañada	8.1	Disparo por sobre corriente. (B)
8.1.2	Fluido del tanque muy denso. (F)				
8.2	Disparo por cortocircuito. (B)			8.2.1	Cortocircuito en cable de potencia. (F)
				8.2.2	Cortocircuito en bobinado de motor. (F)
9	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	9.1	Filtración. (A)	9.1.1	Falla del sello entre la caja y motor, permite ingreso de aceite o agua.
				9.1.2	Falta al protocolo de instalación. (L)
		9.2	Corrosión en la tapa o la carcasa. (C)	9.2.1	Medio ambiente. (F)
				9.2.2	Ausencia de procedimiento de protección. (L)
		9.3	Calidad de energía. (A)	9.3.1	Ausencia de una o más fases en el motor. (H y L)
				9.3.2	Mal aprete en terminales de potencia. (H)
				9.3.3	Bajo voltaje de operación. (F)
		9.4	Rebobinado inadecuado (C.)	9.4.1	Rebobinado mal diseñado. (H)
				9.4.2	Material local inadecuado. (L)
		10	Fase abierta en embobinado de estator de motor	10.1	Calidad de energía. (A)
10.1.2	Mal aprete en terminales de potencia. (H)				
10.1.3	Bajo voltaje de operación. (F)				
10.2	Rebobinado inadecuado (C.)			10.2.1	Rebobinado mal diseñado. (F)
				10.2.2	Manipulación de material. (H)
				10.2.3	Procedimiento de recepción. (L)
10.3	Sobre carga. (B)			10.3.1	Cambio de condiciones dentro del tanque. (F)
10.4	Deterioro del aislamiento. (C.)			10.4.1	Límite de vida útil. (F)
10.4	Deterioro del aislamiento. (C.)			10.4.2	No existe procedimiento de remplazo. (L)
				10.4.3	Falla del sello, permite Ingreso de aceite o agua.(H y L)
11.1	Fatiga. (C)	11.1.1	Límite de vida útil. (H)		
		11.1.2	Falta al protocolo de instalación. (L)		
		11.1.3	Fricción en el entorno de sujeción. (F y H)		
11.2	Remoción de cable inadecuado. (C)	11.1.4	Mal aprete en terminales. (H)		
		11.2.1	Falta al protocolo de remoción. (L)		

		11.2	Remoción de cable inadecuado. (C)	11.2.2	Herramienta inadecuada. (F)
--	--	------	-----------------------------------	--------	-----------------------------

4.3.11 Recomendaciones propuestas para minimizar las causas raíces de los modos de fallos.

Las recomendaciones se describen en la tabla 42, con la finalidad de corregir o eliminar las causas que provocaron el evento no deseado, y de esta manera evitar la reaparición del mismo.

Tabla 42. Recomendaciones propuestas, ACR.

<i>Recomendaciones propuestas para motor aireador de fondo # 2.</i>		
Evento	Causas raíz	Recomendaciones
Rebobinado inadecuado.	Físicas	- Realizar el cambio completo de la unidad motor sumergible.
	Propiedades eléctricas del conductor.	
	Alambre esmaltado no posee certificaciones eléctricas de calidad.	- Promover programa de evaluación de calidad de Talleres de Reparación de Motores Eléctricos, y fomentar certificación.
	Humanas	
	Manipulación de material.	
	Mala manipulación del alambre en el momento del embobinado del motor.	
Latentes	- Revisar especificaciones técnicas de compra de materiales eléctricos.	
Procedimiento de recepción.		
	No existe procedimiento de entrega y recepción de motores reparados.	

Se asigno como responsable, de la ejecución de las recomendaciones propuestas, a el ingeniero de mantenimiento, el cual establecerá un plan de trabajo, para ser desarrollado en 6 meses.

Entre los componentes que forman el aireador de fondo # 2, el que presentó mayor número de modos de fallo fue el motor Eléctrico, con 4 (36%) modos de un total de 11, asimismo los modos de falla de este componente están ubicados en los primeros puestos de la jerarquía, presentando mayores riesgos económicos.

4.3.12 Análisis económico.

Considerando como hipótesis válida, un inadecuado rebobinado ya sea por el proveedor o por la calidad del cable instalado, se presenta un análisis de coste riesgo beneficio, justificando la mejor propuesta de solución. "El remplazo de la unidad de motor sumergible en caso de una falla". Se establece la frecuencia de fallos en la situación esperada, con base en el mejor de los tres aireadores de fondo instalados. La situación actual y la situación esperada se presentan en la siguiente tabla 43.

Tabla 43. Comparación económica de la situación actual y la esperada.

<i>Comparación económica de la situación actual, y la esperada.</i>			
	<i>Situación Actual</i>	<i>Situación Esperada</i>	
1. Frecuencia Fallos	1.3	0.42	Fallos/año
2. Costes Mano obra	400	400	\$
3. Costes Materiales	800	3000	\$
4. Costes Anuales Reparar (2+3)x(1)	1560	1428	\$
5. Tiempo de Reparación	15	8	Horas
6. Impacto Producción	18,868	18,868	\$/hora
7. Penalización Evento (5x6)	283020	150944	\$
8. Penalización Anual x Fallos (7x1)	367926	63396.48	\$/año
Riesgo Total Anualizado (4) + (8)	369,486	64,824	\$/año

Tabla 44. Resumen de los beneficios.

<i>Resumen de los beneficios</i>		
Situación actual:		
Costes anuales reparar	1560	\$/año
Penalización anual x fallos	367,926	\$/año
Riesgo total:	369,486	\$/año
Situación futura cambio unidad motor sumergible:		
Costes anuales reparar	1428	\$/año
Penalización anual x fallos	63,396	\$/año
Riesgo total esperado:	64,824	\$/año
Beneficios del cambio:		
Costes de reparación	132	\$/año
Penalización por fallos	304,530	\$/año
Beneficios totales:	304,662	\$/año

Lo que la organización percibe como un ahorro en realizar un mantenimiento correctivo en el motor, llámese "rebobinado" lo están perdiendo con la baja confiabilidad de esta práctica, lo que hace ganadora a la situación propuesta "El remplazo de la unidad de motor sumergible en caso de una falla", es la alta confiabilidad del equipo nuevo y la reducción de la penalización por evento.

4.4 Fase IV. Mantenimiento centrado en fiabilidad (MCF).

En el capítulo anterior se desarrolló la jerarquización de los sistemas componentes de la PTAR de estudio. Dicha jerarquización, supone el insumo principal de la fase 4, dónde se considera el sistema más crítico para la implementación del RCM (Reliability Centered Maintenance).



Diagrama 13: Fase 4, MGMI (Crespo Marquez, 2007).

El RCM sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes de un contexto operacional (Gutiérrez, 2016) . Esta metodología fue desarrollada inicialmente por la industria comercial de aviación de los Estados Unidos con el objetivo de garantizar la seguridad y confiabilidad de sus equipos, específicamente en la United Airlines, por Stanley Nowlan y Howard Heap en 1978 y ha sido utilizada para determinar estrategias de mantenimiento de activos industriales en casi todas las áreas de trabajo del mundo (Campos-López, Tolentino-Eslava, Toledo-Velázquez, & Tolentino-Eslava, 2019).

El proceso de implementación del RCM, puede considerarse sistemático y secuencial. Carlos Parra y Adolfo Crespo proponen un flujograma de implementación (diagrama 17):

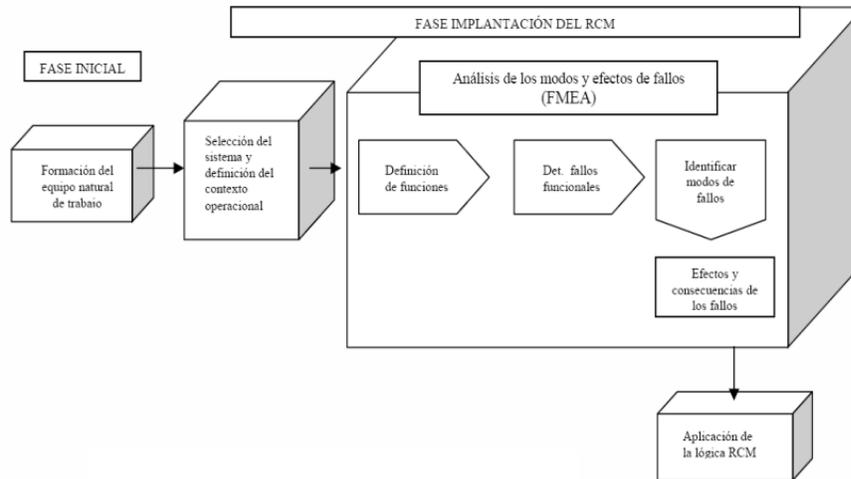


Diagrama 14: Flujo de implementación RCM.

4.4.1 Formación del equipo natural de trabajo

Con el objetivo de realizar un proceso de jerarquización integral, se seleccionó un equipo de trabajo con representación de colaboradores estratégicos de las áreas involucradas, según se indica en el diagrama 18.

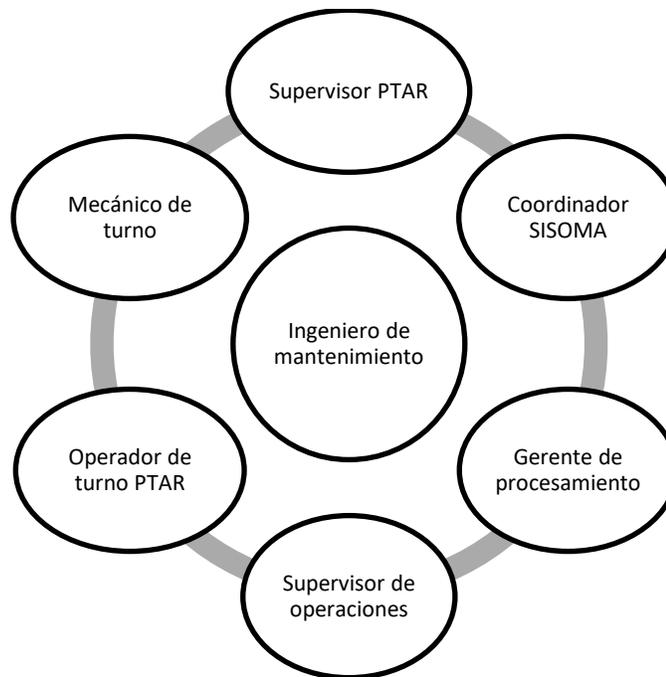


Diagrama 15: Equipo de trabajo AHP.

El modelo de trabajo fue por medio de una reunión semanal, utilizando el recurso de “videoconferencia”, donde el moderador (ingeniero de mantenimiento) presentaba pantalla al equipo para iniciar el diálogo y desarrollo del modelo aplicado a PTAR.

4.4.2 Selección del sistema.

Según la tabla 31, referente a “Resultados de la evaluación de las alternativas (sistemas) para cada uno de los criterios seleccionados”, el sistema más crítico de acuerdo con los criterios evaluados en el método cuantitativo utilizado, AHP, es el DAF 1. Por dicha razón, es a este sistema al que se le aplicó FMEA/RCM, con el objetivo de establecer el programa de mantenimiento.

4.4.3 Contexto operacional DAF 1.

PROPÓSITO

Remover hasta un 40% de la DBO, 40% de la DQO, 90% de grasas y aceites y hasta un 95% de los sólidos suspendidos totales del efluente crudo.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El efluente crudo es bombeado desde el tanque de amortiguamiento, y a su vez le es adicionado floculante y coagulante previo a su ingreso en (A). Dicha agua es depositada en el tanque estacionario externo, dónde en dicha superficie el floculante y coagulante hacen su efecto, haciendo que el "lodo primario con alto contenido de grasas" flote y sea captado por el cucharón. Dicho lodo es depositado en el tanque estacionario interno y evacuado por (B). El remanente de lodo que no logra flotar se purga por (F) y (E). Por su parte, el agua clarificada se capta en el tanque móvil intermedio, dónde por medio de (C) se envíe al reactor biológico, y por (D), parte de esta agua alimente el circuito ADR.

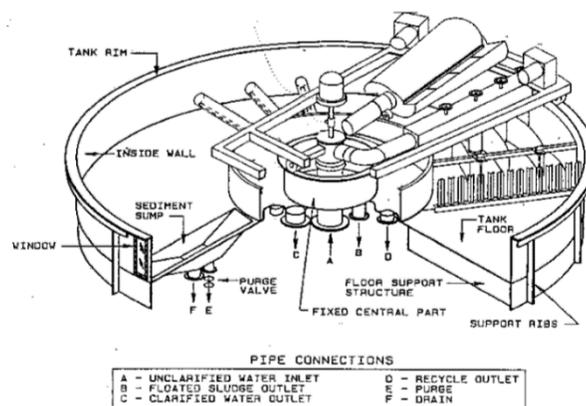


Ilustración 6. Esquema entradas y salidas de DAF 1.

DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DEL PROCESO

El efluente crudo es bombeado desde tanque de amortiguamiento a una tasa de 29.6 LPS, con paso de esfera de 3", y controlado por un variador de frecuencia, cuya consigna se ajusta según la señal de 4-20mA que es proviene de un transmisor de flujo para garantizar los 29.6 LPS, a una presión de descarga de 22 MCA. A dicho efluente se le incorpora coagulante a una tasa de 11.2 Kg/h, floculante a 535 gal/h y 1220 LPM de agua recirculada desde (D) con microburbuja desde reactor ADR previo a la incorporación a (A). La mezcla pasa 8 horas en el tanque estacionario externo dónde se lleva a cabo la separación y flotación de "lodo primario con alto contenido de grasas", dicho lodo es recogido por el cucharón en espiral y depositado en el tanque estacionario interno y drenado por (B) hacia el tanque de estabilización de lodos. El lodo que no logra flotar es barrido hacia (F) y (E) donde son drenados también hacia el tanque de estabilización de lodos. Por su parte, el agua clarificada es depositada en el tanque móvil intermedio donde es drenada en (C) hacia el tanque de agua clarificada y en (D) hacia el circuito del reactor de microburbujas ADR.

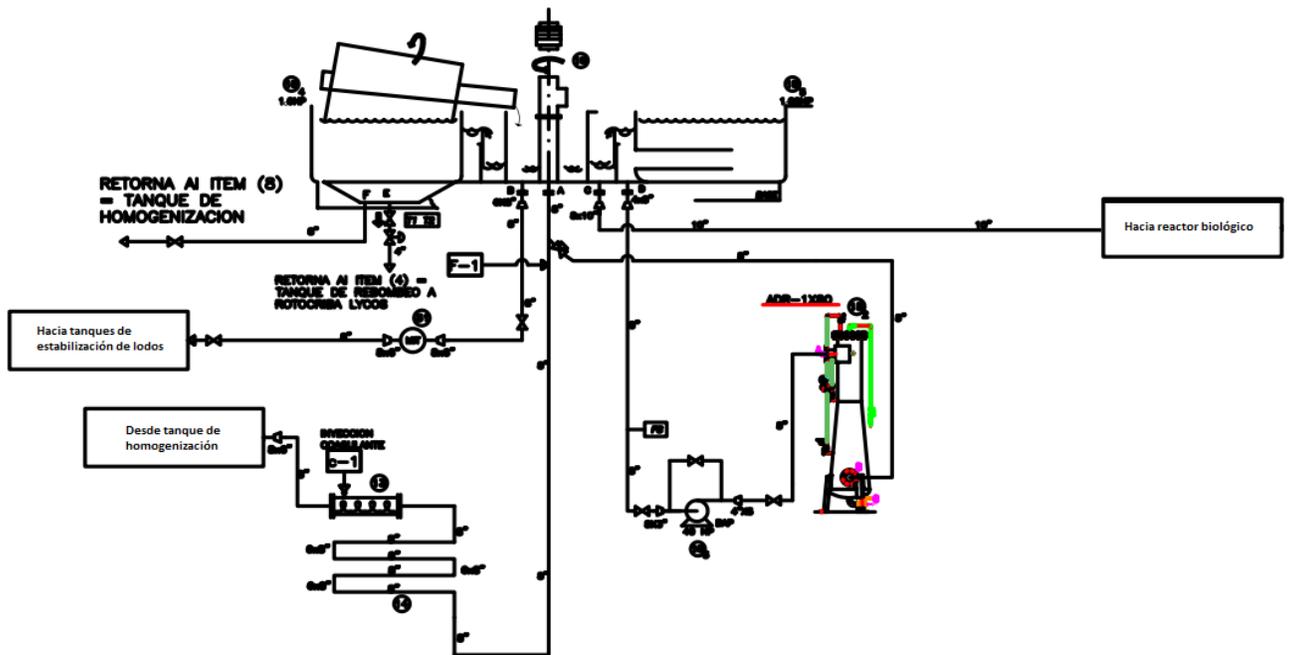


Diagrama 16: Esquema de proceso de tratamiento de agua e incorporación de químicos en sistema DAF 1.

EQUIPOS PRINCIPALES

- DAF 1
- Mezclador cuagulante 1
- Medidor de flujo magnetico 1
- ADR 120
- Bomba de descarga 30 HP
- Tanque de agitación 1 de coagulante
- Tanque de agitación 2 de coagulante
- Bomba 1 de coagulante 0.5 HP
- Bomba 2 de cuagulante 0.5 HP
- Tanque de agitación 1 de floculante
- Tanque de agitación 2 de floculante
- Bomba 1 de floculante 1 HP
- Bomba 2 de floculante 1 HP

DIAGRAMA ENTRADA - PROCESO – SALIDA

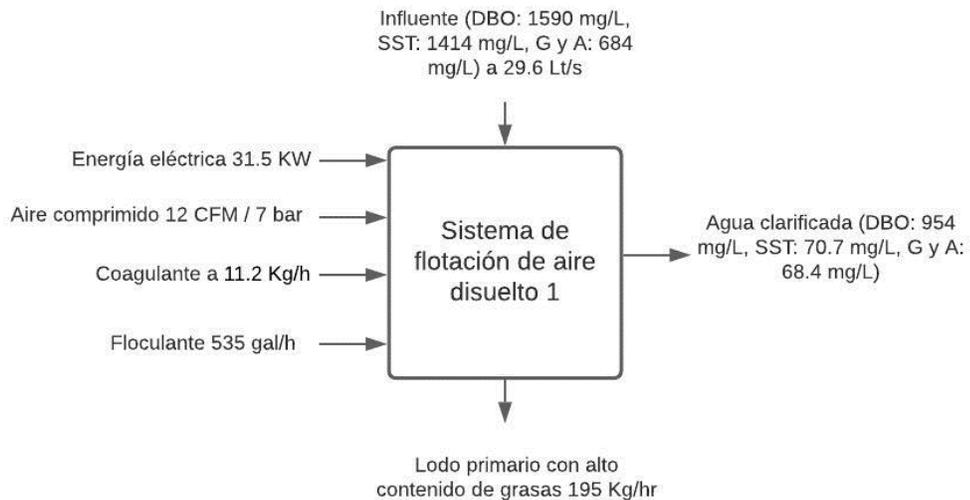


Diagrama 17: Esquema de proceso DAF 1.

4.4.4 Resultados del FMEA del sub-sistema: DAF 1.

Tabla 45. Resultados del FMEA DAF 1 (1/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
1. DAF 1: Flotación de materia contaminante contenida en influente (40% de DBO, 40% de DQO, 90% de grasas y aceites y 95% de sólidos suspendidos totales).	<p>1.A Estructura difusora sin movimiento rotacional (0 RPM)</p> <p>1.A.1 Ruptura de cubo de rueda conductora \varnothing 100 x \varnothing 40 x 50</p>	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de cubo/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 0.5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 12.5 \$/año.
	1.A.2 Falla de eje \varnothing 40 x 410 de rueda conductora	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de eje / detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año
	1.A.3 Falla de chumacera/ rodamiento SKF SYJ40TF - \varnothing 40 de rueda conductora	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de rodamiento/chumacera/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 62.66 \$/año
	1.A.4 Falla de rodamientos de caja reductora	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de rodamiento/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año
	1.A.5 Falla de piñonería de caja reductora	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de piñones caja/Detener procesos en planta. FF: 0.42 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47170 \$/h Riesgo: 43,297 \$/año
	1.A.6 Falla de rodamientos de motor	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de rodamiento/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 25 \$/año

Tabla 46. Resultados del FMEA DAF 1 (2/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	1.A.7 Falla de embobinado de estator de motor (pérdida de aislamiento)	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con materia contaminante. Acción correctiva: Rebobinado de motor/Instalación de motor repuesto/Detener procesos en planta. FF: 0.1 fallos/año. TPPR:4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 4,741.5 \$/año.
	1.A.8 Anillos rozantes de circuito de motor de rueda conductora desgastados 1.B Estructura difusora con rotación diferente a 0.16 RPM	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de contacto rotativo/Detener procesos en planta. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 23,919.8 \$/año.
	1.B.1 Deformación/rotura de rueda conductora de Vulkollan ø 160 / 50 - ø 100	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con trazas de materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de rueda conductora. FF: 0.42 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 19,922 \$/año. / Multa ambiental/Cierre de operaciones
	1.B.2 Deformación/rotura de rueda de centrado PETP ø 115 / 50 - ø 30,1	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con trazas de materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de rueda de centrado. FF: 0.25 fallos/año . TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 11858.6 \$/año. / Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	1.C Sedimentación en fondo de tanque de mezcla de influente, coagulante y floculante 1.C.1 Desgaste de plancha de neopreno 1860 x 60 x 5 de barrido de fondo	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con trazas de materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de rueda de plancha de neopreno/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación). FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 0.5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 69.75 \$/año.
	1.C.2 Falla de espárrago de 3/4" de sujeción de plancha de barrido de fondo	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con trazas de materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de rueda de espárrago/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación). FF: 0.42 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 210 \$/año.

Tabla 47. Resultados del FMEA DAF 1 (3/19).

Funciones	Modo Funcional/ Modos de Fallos	Consecuencias de los fallos <i>FF: Frecuencia de fallos</i> <i>TPPR: Tiempo promedio para reparar</i> <i>IP: Impacto en producción</i>
2.DAF 1: Extracción de materia contaminante flotada (40% de DBO, 40% de DQO, 90% de grasas y aceites y 95% de sólidos suspendidos totales de influente) de tanque de flotación hacia tanque de espuma.	2.A Cucharón de espiral sin movimiento rotativo (0 RPM)	
	2.A.1 Falla de rodamiento de rueda de apoyo de cucharón	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de rodamiento. detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 15 \$/año
	2.A.2 Falla de pin de rueda de apoyo ø40 x 91 x ø30	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de pin. detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 0.5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 3.75 \$/año.
	2.A.3 Falla de rodamiento de rueda de soporte interna-externa	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de rodamiento /detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 45 \$/año
	2.A.4 Falla de pin de rueda de soporte interna-externa ø40 x 89 x ø30	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de pin. detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 0.5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 18.53 \$/año
	2.A.5 Falla de rodamientos de caja reductora	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de rodamientos /Detener procesos en planta. FF: 1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 94,390 \$/año
	2.A.6 Falla de piñonería de caja reductora	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de piñones/Detener procesos en planta. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 25,772 \$/año
2.A.7 Falla de rodamiento DE mecánico de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada. Acción correctiva: Reemplazo de rodamiento /Detener procesos en planta. FF: 1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 47,220 \$/año	

Tabla 48. Resultados del FMEA DAF 1 (4/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	2.A.8 Falla de rodamiento NDE mecánico de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada. Acción correctiva: Reemplazo de rodamiento/Detener procesos en planta. FF: 1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 47,220 \$/año
	2.A.9 Falla de embobinado de estator de motor (pérdida de aislamiento)	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Rebobinado de motor/Instalación de motor repuesto/Detener procesos en planta. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 9,458.5 \$/año
	2.A.10 Anillos rozantes de circuito de motor de cucharón desgastados	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de contacto rotativo/Detener procesos en planta. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 23,920 \$/año
	2.B Cucharón de espiral con rotación diferente a 8 RPM	
	2.B.1 Falla de sello de eje rotatorio de cucharón de ø38 x ø55 x 7	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de sello/detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación). FF: 1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 105 \$/año
	2.B.2 Deformación/rotura de rueda de apoyo de cucharón	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de sello//detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 71.37 \$/año
	2.B.3 Deformación/rotura de rueda de ø160 / 50 - ø 100 de soporte interna-externa	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de rueda/detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 71.37 \$/año
	2.B.4 Falla de sello de eje rotatorio de cucharón de ø36 x ø62 x 7	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Exceso de espuma en la superficie. Acción correctiva: Reemplazo de sello//detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 19.5 \$/año

Tabla 49. Resultados del FMEA DAF 1 (5/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
3. DAF 1: Contener mezcla de influente, coagulante y floculante	3.A Fuga de mezcla de influente, coagulante y floculante	
	3.A.1 Ruptura de anillo de bronce (medias lunas) de ϕ 310 x ϕ 216,5 x 15.	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de agua cruda en entrada de DAF. Acción correctiva: Reemplazo de anillo de bronce (medias lunas). FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 267.84 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	3.A.2 Ruptura de anillo de bronce ϕ 267 x ϕ 245 x 11	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de agua cruda en entrada de DAF. Acción correctiva: Reemplazo de anillo de bronce. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 162.54 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	3.A.3 Deterioro de empaque de teflón ϕ 310 x ϕ 204 x 3	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de agua cruda en entrada de DAF. Acción correctiva: Reemplazo de empaque. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 44.61 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	3.A.4 Deterioro de sello de ramillon # 12/12 x ~ 842	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de agua cruda en entrada de DAF. Acción correctiva: Reemplazo de sello. FF: 1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 97.8 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	3.A.5Falla de junta elástica de neopreno ϕ 224 x ϕ 212 x 180 lg	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de agua cruda en entrada de DAF. Acción correctiva: Reemplazo de junta. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 69.75 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
4. DAF 1: Contener agua clarificada	4.A Mezcla de agua clarificada y agua cruda	
	4.A.1 Deterioro de plancha de PVC ~ 5730 x 45 x 5	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con trazas de materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de plancha de PVC/Detener procesos en planta. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 8 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 59,063 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	4.A.2 Deterioro de plancha de neopreno ~ 5730 x 90 x 5	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Agua clarificada con trazas de materia contaminante. Acción correctiva: Reemplazo de plancha de neopreno/Detener procesos en planta. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 8 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 59,057 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.

Tabla 50. Resultados del FMEA DAF 1 (6/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
5. DAF 1: Contener materia flotada	5. A Fuga de materia flotada hacia el exterior	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de espuma de tanque Acción correctiva: Soldadura de tanque. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 5 \$/año / Multa ambiental/Cierre de operaciones.
6. Mezclador de coagulante: Mezclar coagulante con efluente previo a ingreso a DAF 1	6.A Nula/deficiente incorporación de floculante a 11.2 Kg/h a influente de 29.6 Lt/s	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Remoción de sedimento/detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 2 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 100 \$/año
7. Mezclador de coagulante: Barrera física para contener mezcla dinámica de influente con coagulante.	7.A Fuga de mezcla de coagulante/influente	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Fuga de coagulante Acción correctiva: Soldadura de mezclador/detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 5 \$/año
8. Medidor de flujo magnético: Medición analógica de flujo instantáneo de efluente desde homogenización hacia DAF 1 en tiempo real	8.A Desviación entre indicación de flujo medido vrs. Flujo real (descalibración)	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Sobre-Sub-alimentación de agua cruda. Acción correctiva: Reemplazo de transductor de flujo/Detener procesos de planta. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 13,543 \$/año / Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	8.A.2 Descalibración de señal 4 a 20 mA	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Sobre-Sub-alimentación de agua cruda. Acción correctiva: Calibración de lazo de control/detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 2 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 20 \$/año
	8.B No hay despliegue de medición en indicador visual	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Sobre-Sub-alimentación de agua cruda. Acción correctiva: Reemplazo de transmisor electrónico/Detener procesos de planta FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 11,916 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	8.B.1 Falla eléctrica de transmisor	

Tabla 51. Resultados del FMEA DAF 1 (7/19).

Funciones	Modo Funcional/ Modos de Fallos	Consecuencias de los fallos <i>FF: Frecuencia de fallos</i> <i>TPPR: Tiempo promedio para reparar</i> <i>IP: Impacto en producción</i>
9. Medidor de flujo magnético: Controlar con señal de 4 a 20 mA el variador de frecuencia de bomba de inyección de efluente desde homogenización hacia DAF 1	<p>9.A Señal de 4 a 20 /mA nula o invariable</p> <p>9.A.1 Falla eléctrica en salida de control</p>	<p>Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Sobre-Sub-alimentación de agua cruda. Acción correctiva: Reemplazo de transmisor electrónico/Detener procesos de planta. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 11,916 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.</p>
10. ADR (Reactor de disolución de aire): producir agua a presión con contenido de aire disuelto hasta el 80% del punto de saturación	<p>10.A Incremento de presión en el ADR</p> <p>10.A.1. Válvula de expansión bloqueada</p>	<p>Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Limpieza de válvula de expansión/Detener procesos de planta FF: 4 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 188,720 \$/año</p>
	<p>10.B Flujo de aire bajo o nulo</p> <p>10.B.1 Reductor de presión dañado</p>	<p>Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de reductor de presión/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 5.5 \$/año</p>
	<p>10.C Purga bloqueada</p> <p>10.C.1 Agujero calibrado de válvula de purga bloqueado</p>	<p>Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Limpieza de agujero de calibrado. FF: 4 fallos/año. TPPR: 0.5 h/fallo. IP: 0\$/h Riesgo: 88 \$/año</p>
	<p>10.D Grandes burbujas de aire/turbulencia en DAF</p> <p>10.D.1 Regulador de aire comprimido dañado</p>	<p>Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de regulador de aire comprimido. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 20 \$/año</p>
11. Bomba de descarga de 30 HP: Transportar el agua de recirculación de circuito DAF1-ADR a una presión de 5 bar y flujo de 1220 LPM.	<p>11.A Flujo nulo (0 Kg/h)</p> <p>11.A.1 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor de bomba</p>	<p>Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto/Detener procesos de planta FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 9,458.5 \$/año</p>
	<p>11.A.2 Fase abierta en embobinado de estator de motor de bomba</p>	<p>Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Sobre-Sub-alimentación de agua cruda. Acción correctiva: Reemplazo de transmisor electrónico/Detener procesos de planta FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 9,458.5 \$/año</p>

Tabla 52. Resultados del FMEA DAF 1 (8/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	11.A.3 Cable de alimentación eléctrica de motor de bomba roto	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Limpieza de válvula de expansión/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 5 \$/año
	11.A.4 Falla de eje/rotor de motor de bomba	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de reductor de presión/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación) FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	11.B Flujo mayor a 0 Kg/h o inferior a 1220 LPM	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Limpieza de agujero de calibrado. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 300 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	11.B.1 Desgaste de impulsor de hierro gris ASTMA-48 clase 30	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Limpieza de regulador de aire comprimido. FF: 1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	11.B.2 Falla de rodamiento DE mecánico de motor de bomba	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
12. Bomba de descarga de 30 HP: Contener el agua que circula por la bomba	12.A Fuga de agua hacia el ambiente 12.A.1 Desgaste de sello de cerámica (parte estacionaria) 12.A.2 Desgaste de anillo de carbón (parte rotatoria)	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de agua hacia el ambiente Acción correctiva: Reemplazo de sello. FF: 1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 500 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones. Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de agua hacia el ambiente Acción correctiva: Reemplazo de anillo. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 112.5 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.

Tabla 53. Resultados del FMEA DAF 1 (9/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	12.A.3 Desgaste de sello de exclusión - elastómero de Buna-N y resorte de acero inoxidable. (parte rotatoria)	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de agua hacia el ambiente Acción correctiva: Reemplazo de sello. FF: 1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 700 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
	12.A.4 Fisura en housing de impulsor de bomba	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de agua hacia el ambiente Acción correctiva: Soldadura de housing. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 10 \$/año/ Multa ambiental/Cierre de operaciones.
13. Tanque de agitación de coagulante 1: Contener 2,500 Lt. De coagulante	13.A Fuga de coagulante 13.A.1 Fisura en tanque de coagulante	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de coagulante hacia el ambiente. Acción correctiva: Aplicación de fibra de vidrio/Utilizar redundancia. FF: 0.42 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 39,631 \$/año
14. Tanque de agitación de coagulante 1: Agitar 2,500 Lt. De coagulante a 350 RPM	14.A Nula/baja agitación de coagulante 14.A.1.Falla de rodamientos de caja reductora	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamientos de caja reductora/Utilizar redundancia. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 12.5 \$/año
	14.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de caja reductora/Utilizar redundancia. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 200 \$/año
	14.A.3 Falla de rodamientos de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamientos/Utilizar redundancia FF: 1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año

Tabla 54. Resultados del FMEA DAF 1 (10/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	14.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto/Utilizar redundancia FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	14.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto/Utilizar redundancia FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	14.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Soldadura de aspa de agitador/Utilizar redundancia FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 6 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 5 \$/año
15. Tanque de agitación de coagulante 2: Contener 2,500 Lt. De coagulante	15.A Fuga de coagulante 15.A.1 Fisura en tanque de coagulante	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de coagulante hacia el ambiente. Acción correctiva: Aplicación de fibra de vidrio/Utilizar redundancia FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año
16. Tanque de agitación de coagulante 2: Agitar 2,500 Lt. De coagulante a 350 RPM	16.A Nula/baja agitación de coagulante 16.A.1 Falla de rodamientos de caja reductora 16.A.2 Falla de piñonería de caja reductora 16.A.3 Falla de rodamientos de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamientos de caja reductora/Utilizar redundancia FF: 0.42 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 21 \$/año Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de caja reductora/Utilizar redundancia FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 200 \$/año Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamientos/Utilizar redundancia. FF: 1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año

Tabla 55. Resultados del FMEA DAF 1 (11/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	16.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto/Utilizar redundancia FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	16.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto/Utilizar redundancia FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	16.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Soldadura de aspa de agitador/Utilizar redundancia FF: 1 fallos/año. TPPR: 6 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año
17. Bomba 1 de coagulante: Transportar coagulante desde Tanque de agitación 1 hacia mezclador de coagulante a 11.2 Kg/h a una presión de 10 bar	17.A Flujo nulo (0 Kg/h) 17.A.1 Protección magneto-térmica dañada	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de protección magnetotérmica/ detener tratamiento (contener influente en cárcamo de elevación). FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 40 \$/año
	17.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto/Detener proceso en plantas. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 9,458.5 \$/año
	17.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto/Detener proceso en plantas FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 9,458.5 \$/año
	17.A.4 Cable de alimentación roto	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cable/Detener proceso en plantas FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 4,722 \$/año

Tabla 56. Resultados del FMEA DAF 1 (12/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
17.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de caja reductora FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 24,085 \$/año
17.A.6 Falla mecánica en eje de piñón		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de piñón. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 23,608 \$/año
17.A.7 Falla mecánica en cremallera		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cremallera. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 9,447.9 \$/año
17.A.8 Falla mecánica de rodamiento de cremallera		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamiento. FF: 1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 47,220 \$/año
17.A.9 Desgaste de resorte		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de resorte. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 23,630 \$/año
17.B Flujo mayor a 0 Kg/h e inferior a 11.2 Kg/h		
17.B.1 Falla mecánica de flange 56C & IEC 71		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de flange. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 20 \$/año
17.B.2 Fisura en plato de cabezal #4		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cabezal. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 150 \$/año
17.B.3 Fisura en cabezal de líquido #4 PVC		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cabezal. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 375 \$/año
17.B.4 Ruptura de diafragma #4		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de diafragma. FF: 1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 1,500 \$/año

Tabla 57. Resultados del FMEA DAF 1 (13/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	17.B.5 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, descarga	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de válvula check. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año
	17.B.6 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, succión	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de válvula check. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año
	17.B.7 Desgaste en O-ring de nitrilo	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de O-ring. FF: 1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año
	17.B.8 Desgaste en O-ring de Viton	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de O-ring. FF: 1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 120 \$/año
18. Bomba 2 de coagulante: Transportar coagulante desde Tanque de agitación 1 hacia mezclador de coagulante a 11.2 Kg/h a una presión de 10 bar	18.A Flujo nulo (0 Kg/h)	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de protección magnetotérmica. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 40 \$/año
	18.A.1 Protección magneto-térmica dañada	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 9,458.5 \$/año
	18.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	18.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cable. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 4,722 \$/año
	18.A.4 Cable de alimentación roto	

Tabla 58. Resultados del FMEA DAF 1 (14/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
18.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de caja reductora. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 24,085 \$/año
18.A.6 Falla mecánica en eje de piñón		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de piñón. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 23,608 \$/año
18.A.7 Falla mecánica en cremallera		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cremallera. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 9,447.9 \$/año
18.A.8 Falla mecánica de rodamiento de cremallera		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamiento. FF: 1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 47,220 \$/año
18.A.9 Desgaste de resorte		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de resorte. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 23,630 \$/año
18.B Flujo mayor a 0 Kg/h e inferior a 11.2 Kg/h		
18.B.1 Falla mecánica de flange 56C & IEC 71		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de flange. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 20 \$/año
18.B.2 Fisura en plato de cabezal #4		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cabezal. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 150 \$/año
18.B.3 Fisura en cabezal de líquido #4 PVC		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cabezal. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 375 \$/año
18.B.4 Ruptura de diafragma #4		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de diafragma. FF: 1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 1,500 \$/año

Tabla 59. Resultados del FMEA DAF 1 (15/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	18.B.5 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, descarga	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de protección magnetotérmica. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 40 \$/año
	18.B.6 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, succión	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 9,458.5 \$/año
	18.B.7 Desgaste en O-ring de nitrilo	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto.
	18.B.8 Desgaste en O-ring de Viton	FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
		Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cable. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 47,170 \$/h Riesgo: 4,722 \$/año
19. Tanque de agitación de floculante 1: Contener 10,000 Lt. De floculante	19.A Fuga de floculante	
	19.A.1 Fisura en tanque de coagulante	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de floculante hacia el ambiente. Acción correctiva: Aplicación de fibra de vidrio. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año
20. Tanque de agitación de floculante 1: Agitar 10,000 Lt. De floculante a 350 RPM	20.A Nula/baja agitación de floculante	
	20.A.1 Falla de rodamientos de caja reductora	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamientos de caja reductora. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 12.5 \$/año
	20.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de caja reductora. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 200 \$/año
	20.A.3 Falla de rodamientos de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamientos. FF: 1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año

Tabla 60. Resultados del FMEA DAF 1 (16/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	20.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	20.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	20.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Soldadura de aspa de agitador. FF: 0.42 fallos/año. TPPR: 6 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 21 \$/año
21. Tanque de agitación de floculante 2: Contener 10,000 Lt. De floculante	21.A Fuga de floculante	Evidente / No evidente: Evident. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Fuga de floculante hacia el ambiente. Acción correctiva: Aplicación de fibra de vidrio. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año
22. Tanque de agitación de floculante 2: Agitar 10,000 Lt. De floculante a 350 RPM	21.A.1 Fisura en tanque de coagulante	
	22.A Nula/baja agitación de floculante	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamientos de caja reductora. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 12.5 \$/año
	22.A.1 Falla de rodamientos de caja reductora	
	22.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de caja reductora. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 200 \$/año
	22.A.3 Falla de rodamientos de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de rodamientos. FF: 1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 50 \$/año

Tabla 61. Resultados del FMEA DAF 1 (17/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
23. Bomba 1 de floculante: Transportar floculante desde Tanque de agitación 1 hacia DAF 1 a 535 Gal/h a 48 bar	22.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	22.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	22.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Soldadura de aspa de agitador. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 6 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 5 \$/año
	23.A Flujo nulo (0 Gal/h)	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de protección magnetotérmica. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 40 \$/año
	23.A.1 Protección magneto-térmica dañada	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	23.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 61.25 \$/año
	23.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cable. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 5 \$/año
	23.A.4 Cable de alimentación roto	

Tabla 62. Resultados del FMEA DAF 1 (18/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
	23.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de caja reductora. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 500 \$/año
	23.A.6 Falla mecánica en eje de piñón	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de piñón. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 22.5 \$/año
	23.B Flujo superior a 0 gal/h pero inferior a 535 gal/h	
	23.B.1 Housing de impulsor tipo tornillo deteriorado	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de housing. FF: 0.42 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 1,260 \$/año
	23.B.2 Impulsor tipo tornillo con rotación excentrica	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rectificación de tornillo. FF: 1 fallos/año. TPPR: 6 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 200 \$/año
24. Bomba 2 de floculante: Transportar floculante desde Tanque de agitación 1 hacia DAF 1 a 535 Gal/h a 48 bar	24.A Flujo nulo (0 Gal/h)	
	24.A.1 Protección magneto-térmica dañada	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de protección magnetotérmica. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 1 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 40 \$/año
	24.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 24.5 \$/año
	24.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rebobinado/Instalación de motor de repuesto. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 61.25 \$/año
	24.A.4 Cable de alimentación roto	Evidente / No evidente: Evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de cable. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 2 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 5 \$/año

Tabla 63. Resultados del FMEA DAF 1 (19/19).

Funciones	<i>Modo Funcional/ Modos de Fallos</i>	<i>Consecuencias de los fallos FF: Frecuencia de fallos TPPR: Tiempo promedio para reparar IP: Impacto en producción</i>
24.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de caja reductora. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 3 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 500 \$/año
24.A.6 Falla mecánica en eje de piñón		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de piñón. FF: 0.25 fallos/año. TPPR: 4 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 22.5 \$/año
24.B Flujo superior a 0 gal/h pero inferior a 535 gal/h		
24.B.1 Housing de impulsor tipo tornillo deteriorado		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Reemplazo de housing. FF: 0.1 fallos/año. TPPR: 5 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 300 \$/año
24.B.2 Impulsor tipo tornillo con rotación excentrica		Evidente / No evidente: No evidente. Afecta SHA: Si Efecto operacional (síntomas): Capa de materia flotada delgada Acción correctiva: Rectificación de tornillo. FF: 1 fallos/año. TPPR: 6 h/fallo. IP: 0 \$/h Riesgo: 200 \$/año

4.4.5 Plan de mantenimiento desarrollado a partir del RCM en el sub-sistema DAF 1.

Tabla 64. Plan de mantenimiento RCM DAF (1/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM Tarea programada en base a condición (001),Tareas de reacondicionamiento (002),Tareas de sustitución-reemplazo programado (003),Tareas de búsqueda de fallos ocultos (004),Rediseño (005), Actividades de mantenimiento no programado (006)	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
1. DAF 1: Flotación de materia contaminante contenida en influente (40% de DBO, 40% de DQO, 90% de grasas y aceites y 95% de sólidos suspendidos totales).				
1.A.1 Ruptura de cubo de rueda conductora \varnothing 100 x \varnothing 40 x 50	(001) Inspección de integridad	Anual	1	0.5
1.A.2 Falla de eje \varnothing 40 x 410 de rueda conductora	(005) Redimensionamiento de diámetro de eje	Puntual	2	24
1.A.3 Falla de chumacera/ rodamiento SKF SYJ40TF - \varnothing 40 de rueda conductora	(003) Reemplazo de rodamiento	Anual	1	2
1.A.4 Falla de rodamientos de caja reductora	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	2
1.A.5 Falla de piñonería de caja reductora	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	5
1.A.6 Falla de rodamientos de motor	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	1	3
1.A.7 Falla de embobinado de estator de motor (pérdida de aislamiento)	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
1.A.8 Anillos rozantes de circuito de motor de rueda conductora desgastados	(001) Inspección de integridad	Anual	1	1
1.B.1 Deformación/rotura de rueda conductora de Vulkollan \varnothing 160 / 50 - \varnothing 100	(001) Inspección de integridad	Semestral	1	1
1.B.2 Deformación/rotura de rueda de centrado PETP \varnothing 115 / 50 - \varnothing 30,1	(001) Inspección de integridad	Semestral	1	1
1.C.1 Desgaste de plancha de neopreno 1860 x 60 x 5 de barrido de fondo	(001) Inspección de integridad	Anual	1	1
1.C.2 Falla de espárrago de 3/4" de sujeción de plancha de barrido de fondo	(001) Reemplazo de espárrago	Puntual	2	2

Tabla 65. Plan de mantenimiento RCM DAF (2/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
2.DAF 1: Extracción de materia contaminante flotada (40% de DBO, 40% de DQO, 90% de grasas y aceites y 95% de sólidos suspendidos totales de influente) de tanque de flotación hacia tanque de espuma.				
2.A.1 Falla de rodamiento de rueda de apoyo de cucharón	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	1	1
2.A.2 Falla de pin de rueda de apoyo $\varnothing 40 \times 91 \times \varnothing 30$	(001) Inspección de integridad	Anual	1	1
2.A.3 Falla de rodamiento de rueda de soporte interna-externa	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	1
2.A.4 Falla de pin de rueda de soporte interna-externa $\varnothing 40 \times 89 \times \varnothing 30$	(001) Inspección de integridad	Anual	2	1
2.A.5 Falla de rodamientos de caja reductora	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	1	5
2.A.6 Falla de piñonería de caja reductora	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	5
2.A.7 Falla de rodamiento DE mecánico de motor	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	1	4
2.A.8 Falla de rodamiento NDE mecánico de motor	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	1	4
2.A.9 Falla de embobinado de estator de motor (pérdida de aislamiento)	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
2.A.10 Anillos rozantes de circuito de motor de cucharón desgastados	(001) Inspección de integridad	Anual	2	1
2.B.1 Falla de sello de eje rotatorio de cucharón de $\varnothing 38 \times \varnothing 55 \times 7$	(006) Reemplazo de sello	Puntual	1	1
2.B.2 Deformación/rotura de rueda de apoyo de cucharón	(001) Revisión de integridad	Anual	2	1
2.B.3 Deformación/rotura de rueda de $\varnothing 160 / 50 - \varnothing 100$ de soporte interna-externa	(001) Revisión de integridad	Anual	2	1
2.B.4 Falla de sello de eje rotatorio de cucharón de $\varnothing 36 \times \varnothing 62 \times 7$	(006) Reemplazo de sello	Puntual	1	1

Tabla 66. Plan de mantenimiento RCM DAF (3/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
3. DAF 1: Contener mezcla de influente, coagulante y floculante				
3.A.1 Ruptura de anillo de bronce (medias lunas) de ϕ 310 x ϕ 216,5 x 15.	(001) Inspección de integridad	Anual	2	4
3.A.2 Ruptura de anillo de bronce ϕ 267 x ϕ 245 x 11	(001) Inspección de integridad	Anual	2	4
3.A.3 Deterioro de empaque de teflón ϕ 310 x ϕ 204 x3	(006) Reemplazo de empaque	Puntual	2	4
3.A.4 Deterioro de sello de ramillon # 12/12 x ~ 842	(006) Reemplazo de empaque	Puntual	2	4
3.A.5Falla de junta elástica de neopreno ϕ 224 x ϕ 212 x 180 lg	(001) Inspección de integridad	Anual	2	5
4. DAF 1: Contener agua clarificada				
4.A.1 Deterioro de plancha de PVC ~ 5730 x 45 x 5	(001) Inspección de integridad	Anual	2	2
4.A.2 Deterioro de plancha de neopreno ~ 5730 x 90 x 5	(001) Inspección de integridad	Anual	2	2
5. DAF 1: Contener materia flotada				
5.A.1 Fisura de tanque de materia flotada pared externa	(006) Soldadura de tanque	Puntual	1	1
6. Mezclador de coagulante: Mezclar coagulante con efluente previo a ingreso a DAF 1				
6.A.1 Taponamiento de sedimento en mezclador	(001) Inspección/Limpieza de mezclador	Mensual	1	1
7. Mezclador de coagulante: Barrera física para contener mezcla dinámica de influente con coagulante.				
7.A.1 Fisura en housing de mezclador	(005) Redimensionamiento de housing	Puntual	1	1

Tabla 67. Plan de mantenimiento RCM DAF (4/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
8. Medidor de flujo magnético: Medición analógica de flujo instantáneo de efluente desde homogenización hacia DAF 1 en tiempo real				
8.A.1 Falla mecánica en transductor de flujo	(005) Análisis de causa raíz	Puntual	1	24
8.A.2 Descalibración de señal 4 a 20 mA	(001) Calibración de lazo 4 a 20 mA	Mensual	2	1
8.B.1 Falla eléctrica de transmisor	(006) Reemplazo de transmisor	Puntual	1	4
9. Medidor de flujo magnético: Controlar con señal de 4 a 20 mA el variador de frecuencia de bomba de inyección de efluente desde homogenización hacia DAF 1				
9.A.1 Falla eléctrica en salida de control	(006) Reemplazo de transmisor	Puntual	1	4
10. ADR (Reactor de disolución de aire): producir agua a presión con contenido de aire disuelto hasta el 80% del punto de saturación				
10.A.1. Válvula de expansión bloqueada	(001) Inspección y limpieza de válvula	Semanal	1	4
10.B.1 Reductor de presión dañado	(006) Reemplazo de reductor	Puntual	1	1
10.C.1 Agujero calibrado de válvula de purga bloqueado	(001) Inspección y limpieza de válvula	Semanal	1	0.5
10.D.1 Regulador de aire comprimido dañado	(006) Reemplazo de regulador	Puntual	1	1
11. Bomba de descarga de 30 HP: Transportar el agua de recirculación de circuito DAF1-ADR a una presión de 5 bar y flujo de 1220 LPM.				
11.A.1 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor de bomba	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
11.A.2 Fase abierta en embobinado de estator de motor de bomba	(006) Rebobinado de motor	Puntual	1	8
11.A.3 Cable de alimentación eléctrica de motor de bomba roto	(006) Reemplazar cable dañado	Puntual	2	2

Tabla 68. Plan de mantenimiento RCM DAF (5/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
11.A.4 Falla de eje/rotor de motor de bomba	(001) Inspección de eje de motor	Semestral	2	2
11.B.1 Desgaste de impulsor de hierro gris ASTM-A48 clase 30	(001) Inspección de impulsor	Anual	2	2
11.B.2 Falla de rodamiento DE mecánico de motor de bomba	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	2
11.B.3 Falla de rodamiento NDE mecánico de motor de bomba	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	2
12. Bomba de descarga de 30 HP: Contener el agua que circula por la bomba				
12.A.1 Desgaste de sello de cerámica (parte estacionaria)	(006) Reemplazo de sello	Puntual	2	5
12.A.2 Desgaste de anillo de carbón (parte rotatoria)	(001) Inspección de anillo	Anual	2	5
12.A.3 Desgaste de sello de exclusión - elastómero de Buna-N y resorte de acero inoxidable. (parte rotatoria)	(006) Reemplazo de sello	Puntual	2	5
12.A.4 Fisura en housing de impulsor de bomba	(001) Inspección de housing	Mensual	1	1
13. Tanque de agitación de coagulante 1: Contener 2,500 Lt. De coagulante				
13.A.1 Fisura en tanque de coagulante	(006) Sellado de tanque con fibra de vidrio	Puntual	2	5
14. Tanque de agitación de coagulante 1: Agitar 2,500 Lt. De coagulante a 350 RPM				
14.A.1.Falla de rodamientos de caja reductora	(003) Reemplazo de rodamiento	Anual	2	2
14.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	4
14.A.3 Falla de rodamientos de motor	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	2

Tabla 69. Plan de mantenimiento RCM DAF (6/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
14.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
14.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	(006) Rebobinado de motor	Puntual	2	8
14.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	(001) Revisión de aspás	Anual	1	2
15. Tanque de agitación de coagulante 2: Contener 2,500 Lt. De coagulante				
15.A.1 Fisura en tanque de coagulante	(006) Sellado de tanque con fibra de vidrio	Puntual	2	5
16. Tanque de agitación de coagulante 2: Agitar 2,500 Lt. De coagulante a 350 RPM				
16.A.1 Falla de rodamientos de caja reductora	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	2
16.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	3
16.A.3 Falla de rodamientos de motor	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	2
16.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
16.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	(006) Rebobinado de motor	Puntual	2	8
16.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	(001) Revisión de aspás	Anual	1	2
17. Bomba 1 de coagulante: Transportar coagulante desde Tanque de agitación 1 hacia mezclador de coagulante a 11.2 Kg/h a una presión de 10 bar				
17.A.1 Protección magneto-térmica dañada	(006) Reemplazo de protección magneto-térmica	Puntual	1	1
17.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1

Tabla 70. Plan de mantenimiento RCM DAF (7/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
17.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	(006) Rebobinado de motor	Puntual	2	8
17.A.4 Cable de alimentación roto dañada	(006) Reemplazar cable dañado	Puntual	2	4
17.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	5
17.A.6 Falla mecánica en eje de piñón	(002) Reemplazo de eje de piñón	Anual	2	5
17.A.7 Falla mecánica en cremallera	(002) Reemplazo de cremallera	Anual	2	5
17.A.8 Falla mecánica de rodamiento de cremallera	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	4
17.A.9 Desgaste de resorte	(001) Inspección de resorte	Anual	1	2
17.B.1 Falla mecánica de flange 56C & IEC 71	(006) Reemplazo de flange	Puntual	1	5
17.B.2 Fisura en plato de cabezal #4	(006) Reemplazo de plato	Puntual	1	5
17.B.3 Fisura en cabezal de líquido #4 PVC	(006) Reemplazo de cabezal	Puntual	1	4
17.B.4 Ruptura de diafragma #4	(001) Revisión de diafragma	Semestral	1	2
17.B.5 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, descarga	(001) Revisión de válvula	Mensual	1	2
17.B.6 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, succión	(001) Revisión de válvula	Mensual	1	2
17.B.7 Desgaste en O-ring de nitrilo	(003) Reemplazo de O-ring	Semestral	1	1
17.B.8 Desgaste en O-ring de Viton	(003) Reemplazo de O-ring	Semestral	1	1

Tabla 71. Plan de mantenimiento RCM DAF (8/11)

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
18. Bomba 2 de coagulante: Transportar coagulante desde Tanque de agitación 1 hacia mezclador de coagulante a 11.2 Kg/h a una presión de 10 bar				
18.A.1 Protección magneto-térmica dañada	(006) Reemplazo de protección magneto-térmica	Puntual	1	1
18.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
18.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	(006) Rebobinado de motor	Puntual	2	8
18.A.4 Cable de alimentación roto	(006) Reemplazar cable dañado	Puntual	2	4
18.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	5
18.A.6 Falla mecánica en eje de piñón	(002) Reemplazo de eje de piñón	Anual	2	5
18.A.7 Falla mecánica en cremallera	(002) Reemplazo de cremallera	Anual	2	5
18.A.8 Falla mecánica de rodamiento de cremallera	(001) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	4
18.A.9 Desgaste de resorte	(001) Inspección de resorte	Anual	1	2
18.B.1 Falla mecánica de flange 56C & IEC 71	(006) Reemplazo de flange	Puntual	1	5
18.B.2 Fisura en plato de cabezal #4	(006) Reemplazo de plato	Puntual	1	5
18.B.3 Fisura en cabezal de líquido #4 PVC	(006) Reemplazo de cabezal	Puntual	1	4
18.B.4 Ruptura de diafragma #4	(001) Revisión de diafragma	Semestral	1	2
18.B.5 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, descarga	(001) Revisión de válvula	Mensual	1	2
18.B.6 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, succión	(001) Revisión de válvula	Mensual	1	2

Tabla 72. Plan de mantenimiento RCM DAF (9/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
18.B.7 Desgaste en O-ring de nitrilo	(003) Reemplazo de O-ring	Semestral	2	1
18.B.8 Desgaste en O-ring de Viton	(003) Reemplazo de O-ring	Semestral	2	1
19. Tanque de agitación de floculante 1: Contener 10,000 Lt. De floculante				
19.A.1 Fisura en tanque de coagulante	(006) Sellado de tanque con fibra de vidrio	Puntual	1	5
20. Tanque de agitación de floculante 1: Agitar 10,000 Lt. De floculante a 350 RPM				
20.A.1 Falla de rodamientos de caja reductora	(003) Reemplazo de rodamiento	Anual	2	2
20.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	3
20.A.3 Falla de rodamientos de motor	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	2
20.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
20.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	(006) Rebobinado de motor	Puntual	2	8
20.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	(001) Revisión de aspas	Semestral	1	1
21. Tanque de agitación de floculante 2: Contener 10,000 Lt. De floculante				
21.A.1 Fisura en tanque de coagulante	(001) Sellado de tanque con fibra de vidrio	Puntual	2	5
22. Tanque de agitación de floculante 2: Agitar 10,000 Lt. De floculante a 350 RPM				
22.A.1 Falla de rodamientos de caja reductora	(001) Reemplazo de rodamiento	Anual	2	2
22.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	3
22.A.3 Falla de rodamientos de motor	(003) Reemplazo de rodamiento	Semestral	2	2

Tabla 73. Plan de mantenimiento RCM DAF (10/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
22.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
22. A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	(006) Rebobinado de motor	Puntual	2	8
22.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	(001) Revisión de aspas	Semestral	1	1
23. Bomba 1 de floculante: Transportar floculante desde Tanque de agitación 1 hacia DAF 1 a 535 Gal/h a 48 bar				
23.A.1 Protección magneto-térmica dañada	(006) Reemplazo de protección magneto-térmica	Puntual	1	2
23. A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
23.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	(006) Rebobinado de motor	Puntual	2	8
23.A.4 Cable de alimentación roto	(006) Reemplazar cable dañado	Puntual	2	2
23.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	5
23.A.6 Falla mecánica en eje de piñón	(002) Reemplazo de eje de piñón	Anual	2	5
23.B.1 Housing de impulsor tipo tornillo deteriorado	(001) Inspección de impulsor	Anual	2	2
23.B.2 Impulsor tipo tornillo con rotación excéntrica	(001) Inspección de tornillo	Semestral	2	2
24. Bomba 2 de floculante: Transportar floculante desde Tanque de agitación 1 hacia DAF 1 a 535 Gal/h a 48 bar				
24.A.1 Protección magneto-térmica dañada	(006) Reemplazo de protección magneto-térmica	Puntual	1	1
24. A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	(001) Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	1	1
24.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	(006) Rebobinado de motor	Puntual	2	8
24.A.4 Cable de alimentación roto	(006) Reemplazar cable dañado	Puntual	2	2

Tabla 74. Plan de mantenimiento RCM DAF (11/11).

Función/Modos de fallos	Estrategias de mantenimiento definidas por el RCM	Frecuencia	Número de personas	HH-Ejecución
24.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes	(002) Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2	5
24.A.6 Falla mecánica en eje de piñón	(002) Reemplazo de eje de piñón	Anual	2	4
24.B.1 Housing de impulsor tipo tornillo deteriorado	(001) Inspección de impulsor	Anual	1	2
24. B.2 Impulsor tipo tornillo con rotación excéntrica	(001) Inspección de tornillo	Semestral	1	2

4.4.6 Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas.

Tabla 75. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (1/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta (\$)	Costo \$/año
1.A.1 Ruptura de cubo de rueda conductora \varnothing 100 x \varnothing 40 x 50	12.5	Inspección de integridad	Anual	12	12
1.A.2 Falla de eje \varnothing 40 x 410 de rueda conductora	50	Redimensionamiento de diámetro de eje	Puntual	500	500
1.A.3 Falla de chumacera/rodamiento SKF SYJ40TF - \varnothing 40 de rueda conductora	62.66	Reemplazo de rodamiento	Anual	250.67	250.67
1.A.4 Falla de rodamientos de caja reductora	50	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
1.A.5 Falla de piñonería de caja reductora	43296.96	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	8748	8748
1.A.6 Falla de rodamientos de motor	25	Reemplazo de rodamiento	Semestral	25	50
1.A.7 Falla de embobinado de estator de motor (pérdida de aislamiento)	4741.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
1.A.8 Anillos rozantes de circuito de motor de rueda conductora desgastados	23919.8	Inspección de integridad	Anual	12	12
1.B.1 Deformación/rotura de rueda conductora de Vulkollan \varnothing 160 / 50 - \varnothing 100	19922.40	Inspección de integridad	Semestral	12	24
1.B.2 Deformación/rotura de rueda de centrado PETP \varnothing 115 / 50 - \varnothing 30,1	11858.57	Inspección de integridad	Semestral	12	24
1.C.1 Desgaste de plancha de neopreno 1860 x 60 x 5 de barrido de fondo	69.75	Inspección de integridad	Anual	12	12
1.C.2 Falla de espárrago de 3/4" de sujeción de plancha de barrido de fondo	210	Reemplazo de espárrago	Puntual	500	500

Tabla 76. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (2/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costo \$/año
2.A.1 Falla de rodamiento de rueda de apoyo de cucharón	15	Reemplazo de rodamiento	Semestral	15	30
2.A.2 Falla de pin de rueda de apoyo ø40 x 91 x ø30	3.75	Inspección de integridad	Anual	12	12
2.A.3 Falla de rodamiento de rueda de soporte interna-externa	45	Reemplazo de rodamiento	Semestral	45	90
2.A.4 Falla de pin de rueda de soporte interna-externa ø40 x 89 x ø30	18.53	Inspección de integridad	Anual	12	12
2.A.5 Falla de rodamientos de caja reductora	94390	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
2.A.6 Falla de piñonería de caja reductora	25772	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	8748	8748
2.A.7 Falla de rodamiento DE mecánico de motor	47220	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
2.A.8 Falla de rodamiento NDE mecánico de motor	47220	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
2.A.9 Falla de embobinado de estator de motor (pérdida de aislamiento)	9458.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
2.A.10 Anillos rozantes de circuito de motor de cucharón desgastados	23919.8	Inspección de integridad	Anual	12	12
2.B.1 Falla de sello de eje rotatorio de cucharón de ø38 x ø55 x 7	105	Reemplazo de sello	Puntual	105	105
2.B.2 Deformación/rotura de rueda de apoyo de cucharón	71.37	Revisión de integridad	Anual	12	12
2.B.3 Deformación/rotura de rueda de ø160 / 50 - ø 100 de soporte interna-externa	71.37	Revisión de integridad	Anual	12	12
2.B.4 Falla de sello de eje rotatorio de cucharón de ø36 x ø62 x 7	19.5	Reemplazo de sello	Puntual	78	78

Tabla 77. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (3/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costo \$/año
3.A.1 Ruptura de anillo de bronce (medias lunas) de \varnothing 310 x \varnothing 216,5 x 15.	267.84	Inspección de integridad	Anual	12	12
3.A.2 Ruptura de anillo de bronce \varnothing 267 x \varnothing 245 x 11	162.54	Inspección de integridad	Anual	12	12
3.A.3 Deterioro de empaque de teflón \varnothing 310 x \varnothing 204 x 3	44.616	Reemplazo de empaque	Puntual	446.16	446.16
3.A.4 Deterioro de sello de ramillon # 12/12 x ~ 842	97.8	Reemplazo de empaque	Puntual	400	400
3.A.5Falla de junta elástica de neopreno \varnothing 224 x \varnothing 212 x 180 lg	69.75	Inspección de integridad	Anual	12	12
4.A.1 Deterioro de plancha de PVC ~ 5730 x 45 x 5	59062.5	Inspección de integridad	Anual	12	12
4.A.2 Deterioro de plancha de neopreno ~ 5730 x 90 x 5	59057.25	Inspección de integridad	Anual	12	12
5.A.1 Fisura de tanque de materia flotada pared externa	5	Soldadura de tanque	Puntual	50	50
6.A.1 Taponamiento de sedimento en mezcaldor	100	Inspección/Limpieza de mezclador	Mensual	25	300
7.A.1 Fisura en housing de mezclador	5	Redimensionamiento de housing	Puntual	1200	1200
8.A.1 Falla mecánica en transductor de flujo	13542.5	Análisis de causa raíz	Puntual	7000	7000
8.A.2 Descalibración de señal 4 a 20 mA	20	Calibración de lazo 4 a 20 mA	Mensual	10	120
8.B.1 Falla eléctrica de transmisor	11916.25	Reemplazo de transmisor	Puntual	725	725

Tabla 78. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (4/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costo \$/año
9.A.1 Falla eléctrica en salida de control	11916.25	Reemplazo de transmisor	Puntual	725	725
10.A.1.Válvula de expansión bloqueada	188720	Inspección y limpieza de válvula	Semanal	12	624
10.B.1 Reductor de presión dañado	5.5	Reemplazo de reductor	Puntual	300	300
10.C.1 Agujero calibrado de válvula de purga bloqueado	88	Inspección y limpieza de válvula	Semanal	12	624
10.D.1 Regulador de aire comprimido dañado	20	Reemplazo de regulador	Puntual	350	350
11.A.1 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor de bomba	9458.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
11.A.2 Fase abierta en embobinado de estator de motor de bomba	9458.5	Rebobinado de motor	Puntual	245	245
11.A.3 Cable de alimentación eléctrica de motor de bomba roto	5	Reemplazar cable dañado	Puntual	50	50
11.A.4 Falla de eje/rotor de motor de bomba	24.5	Inspección de eje de motor	Semestral	12	24
11.B.1 Desgaste de impulsor de hierro gris ASTMA-48 clase 30	300	Inspección de impulsor	Anual	12	12
11.B.2 Falla de rodamiento DE mecánico de motor de bomba	50	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
11.B.3 Falla de rodamiento NDE mecánico de motor de bomba	50	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
12.A.1 Desgaste de sello de cerámica (parte estacionaria)	500	Reemplazo de sello	Puntual	500	500

Tabla 79. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (5/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costo \$/año
12.A.2 Desgaste de anillo de carbón (parte rotatoria)	112.5	Inspección de anillo	Anual	80	80
12.A.3 Desgaste de sello de exclusión - elastómero de Buna-N y resorte de acero inoxidable. (parte rotatoria)	700	Reemplazo de sello	Puntual	700	700
12.A.4 Fisura en housing de impulsor de bomba	10	Inspección de housing	Mensual	80	960
13.A.1 Fisura en tanque de coagulante	39631.2	Sellado de tanque con fibra de vidrio	Puntual	20	20
14.A.1.Falla de rodamientos de caja reductora	12.5	Reemplazo de rodamiento	Anual	50	50
14.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	200	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2000	2000
14.A.3 Falla de rodamientos de motor	50	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
14.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	24.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
14.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	24.5	Rebobinado de motor	Puntual	245	245
14.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	5	Revisión de aspas	Anual	50	50
15.A.1 Fisura en tanque de coagulante	50	Sellado de tanque con fibra de vidrio	Puntual	500	500
16.A.1 Falla de rodamientos de caja reductora	21	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
16.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	200	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2000	2000
16.A.3 Falla de rodamientos de motor	50	Reemplazo de rodamiento	Semestral	260	520

Tabla 80. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (6/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costo \$/año
16.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	24.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
16.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	24.5	Rebobinado de motor	Puntual	700	700
16.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	50	Revisión de aspás	Anual	50	50
17.A.1 Protección magneto-térmica dañada	40	Reemplazo de protección magneto-térmica	Puntual	400	400
17.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	9458.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
17.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	9458.5	Rebobinado de motor	Puntual	245	245
17.A.4 Cable de alimentación roto	4722	Reemplazar cable dañado	Puntual	50	50
17.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes	24085	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2000	2000
17.A.6 Falla mecánica en eje de piñón	23607.5	Reemplazo de eje de piñón	Anual	1600	1600
17.A.7 Falla mecánica en cremallera	9447.9	Reemplazo de cremallera	Anual	2400	2400
17.A.8 Falla mecánica de rodamiento de cremallera	47220	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
17.A.9 Desgaste de resorte	23630	Inspección de resorte	Anual	12	12
17.B.1 Falla mecánica de flange 56C & IEC 71	20	Reemplazo de flange	Puntual	1500	1500

Tabla 81. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (7/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costo \$/año
17.B.5 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, descarga	50	Revisión de válvula	Mensual	12	144
17.B.6 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, succión	50	Revisión de válvula	Mensual	12	144
17.B.7 Desgaste en O-ring de nitrilo	50	Reemplazo de O-ring	Semestral	50	100
17.B.8 Desgaste en O-ring de Viton	120	Reemplazo de O-ring	Semestral	120	240
18.A.1 Protección magneto-térmica dañada	40	Reemplazo de protección magneto-térmica	Puntual	400	400
18.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	9458.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
18.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	9458.5	Rebobinado de motor	Puntual	245	245
18.A.4 Cable de alimentación roto	4722	Reemplazar cable dañado	Puntual	50	50
18.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes	24085	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2000	2000
18.A.6 Falla mecánica en eje de piñón	23607.5	Reemplazo de eje de piñón	Anual	1600	1600
18.A.7 Falla mecánica en cremallera	9447.9	Reemplazo de cremallera	Anual	2400	2400
18.A.8 Falla mecánica de rodamiento de cremallera	47220	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
18.A.9 Desgaste de resorte	23630	Inspección de resorte	Anual	12	12
18.B.1 Falla mecánica de flange 56C & IEC 71	20	Reemplazo de flange	Puntual	1500	1500

Tabla 82. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (8/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costo \$/año
18.B.2 Fisura en plato de cabezal #4	150	Reemplazo de plato	Puntual	2800	2800
18.B.3 Fisura en cabezal de líquido #4 PVC	375	Reemplazo de cabezal	Puntual	2500	2500
18.B.4 Ruptura de diafragma #4	1500	Revisión de diafragma	Semestral	12	24
18.B.5 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, descarga	50	Revisión de válvula	Mensual	12	144
18.B.6 Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, succión	50	Revisión de válvula	Mensual	12	144
18.B.7 Desgaste en O-ring de nitrilo	50	Reemplazo de O-ring	Semestral	50	100
18.B.8 Desgaste en O-ring de Viton	120	Reemplazo de O-ring	Semestral	120	240
19.A.1 Fisura en tanque de coagulante	50	Sellado de tanque con fibra de vidrio	Puntual	20	20
20.A.1 Falla de rodamientos de caja reductora	12.5	Reemplazo de rodamiento	Anual	50	50
20.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	200	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2000	2000
20.A.3 Falla de rodamientos de motor	50	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
20.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	24.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144

Tabla 83. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (9/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costo \$/año
20.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	24.5	Rebobinado de motor	Puntual	245	245
20.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	21	Revisión de aspás	Semestral	50	100
21.A.1 Fisura en tanque de coagulante	50	Sellado de tanque con fibra de vidrio	Puntual	500	500
22.A.1 Falla de rodamientos de caja reductora	12.5	Reemplazo de rodamiento	Anual	20	20
22.A.2 Falla de piñonería de caja reductora	200	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2000	2000
22.A.3 Falla de rodamientos de motor	50	Reemplazo de rodamiento	Semestral	50	100
22.A.4 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	24.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
22.A.5 Fase abierta en embobinado de estator de motor	24.5	Rebobinado de motor	Puntual	245	245
22.A.6 Desprendimiento de aspa de agitador	5	Revisión de aspás	Semestral	50	100
23.A.1 Protección magneto-térmica dañada	40	Reemplazo de protección magneto-térmica	Puntual	400	400
23.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	24.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
23.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	61.25	Rebobinado de motor	Puntual	2450	245
23.A.4 Cable de alimentación roto	5	Reemplazar cable dañado	Puntual	2000	50
23.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes	500	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	5	2000

Tabla 84. Costo de plan de mantenimiento propuesto vrs riesgo anual por fallas (10/10)

Modo de falla	Riesgo \$/año	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta	Costo \$/año
23.A.6 Falla mecánica en eje de piñón	22.5	Reemplazo de eje de piñón	Anual	90	90
23.B.1 Housing de impulsor tipo tornillo deteriorado	1260	Inspección de impulsor	Anual	150	150
23.B.2 Impulsor tipo tornillo con rotación excéntrica	200	Inspección de tornillo	Semestral	150	300
24.A.1 Protección magnetotérmica dañada	40	Reemplazo de protección magneto-térmica	Puntual	400	400
24.A.2 Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	24.5	Medición de aislamiento de embobinado	Mensual	12	144
24.A.3 Fase abierta en embobinado de estator de motor	61.25	Rebobinado de motor	Puntual	245	245
24.A.4 Cable de alimentación roto	5	Reemplazar cable dañado	Puntual	50	50
24.A.5 Falla mecánica en piñón de caja de engranes	500	Reemplazo de piñonería de caja reductora	Anual	2000	2000
24. A.6 Falla mecánica en eje de piñón	22.5	Reemplazo de eje de piñón	Anual	90	90
24.B.1 Housing de impulsor tipo tornillo deteriorado	300	Inspección de impulsor	Anual	150	150
24.B.2 Impulsor tipo tornillo con rotación excéntrica	200	Inspección de tornillo	Semestral	150	300

La información consolidada en las tablas, 75 a la 84, indican que el riesgo anual, correspondiente al sistema DAF, el cual está conformado por la frecuencia de fallas (basada en histórico y literatura), tiempo promedio para reparar, tiempo de indisponibilidad por fallo, impacto en producción por hora, costos directos por falla e impacto SHA, es de \$1,070,670.79.

Por su parte, el costo anual del plan de mantenimiento, resultado del FMEA/RCM propuesto es de \$83,725.83.

4.4.7 Curva de Pareto de “Fallas funcionales”.

A continuación, se presentan los modos de falla con sus respectivos riesgos anuales y su peso acumulado, en orden de mayor a menor:

Tabla 85. Estructuración de riesgos anuales y % peso acumulado por falla funcional (1/2)

# Modo de falla	Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Peso (%)	Peso acumulado (%)
2A	Cucharón de espiral sin movimiento rotativo (0 RPM)	\$248,062.59	23.17%	23.169%
10A	Incremento de presión en el ADR	\$188,720.00	17.63%	40.795%
17A	Flujo nulo (0 Kg/h)	\$151,669.40	14.17%	54.961%
18A	Flujo nulo (0 Kg/h)	\$151,669.40	14.17%	69.127%
4A	Mezcla de agua clarificada y agua cruda	\$118,119.75	11.03%	80.159%
1A	Estructura difusora sin movimiento rotacional (0 RPM)	\$72,158.43	6.74%	86.899%
13A	Fuga de coagulante	\$39,631.20	3.70%	90.600%
1B	Estructura difusora con rotación diferente a 0.16 RPM	\$31,780.98	2.97%	93.569%
11A	Flujo nulo (0 Kg/h)	\$18,946.50	1.77%	95.338%
8A	Desviación entre indicación de flujo medido vs. Flujo real	\$13,562.50	1.27%	96.605%
8B	No hay despliegue de medición en indicador visual	\$11,916.25	1.11%	97.718%
9A	Señal de 4 a 20 /mA nula o invariable	\$11,916.25	1.11%	98.831%
17B	Flujo mayor a 0 Kg/h e inferior a 11.2 Kg/h	\$2,315.00	0.22%	99.047%
18B	Flujo mayor a 0 Kg/h e inferior a 11.2 Kg/h	\$2,315.00	0.22%	99.263%
23B	Flujo superior a 0 gal/h pero inferior a 535 gal/h	\$1,460.00	0.14%	99.400%
12A	Fuga de agua hacia el ambiente	\$1,322.50	0.12%	99.523%
23A	Flujo nulo (0 Gal/h)	\$653.25	0.06%	99.584%
24A	Flujo nulo (0 Gal/h)	\$653.25	0.06%	99.645%
3A	Fuga de mezcla de influente, coagulante y floculante	\$642.55	0.06%	99.705%
24B	Flujo superior a 0 gal/h pero inferior a 535 gal/h	\$500.00	0.05%	99.752%
11B	Flujo mayor a 0 Kg/h o inferior a 1220 LPM	\$400.00	0.04%	99.789%
16A	Nula/baja agitación de coagulante	\$370.00	0.03%	99.824%
20A	Nula/baja agitación de floculante	\$332.50	0.03%	99.855%
14A	Nula/baja agitación de coagulante	\$316.50	0.03%	99.884%
22A	Nula/baja agitación de floculante	\$316.50	0.03%	99.914%
1C	Sedimentación en fondo de tanque de mezcla de I/C & F	\$279.75	0.03%	99.940%
2B	Cucharón de espiral con rotación diferente a 8 RPM	\$267.25	0.02%	99.965%
6A	Nula/deficiente incorporación de floculante a 11.2 Kg/h a influente	\$100.00	0.01%	99.974%
10C	Purga bloqueada	\$88.00	0.01%	99.983%
15A	Fuga de coagulante	\$50.00	0.00%	99.987%
19A	Fuga de floculante	\$50.00	0.00%	99.992%

Tabla 86. Estructuración de riesgos anuales y % peso acumulado por falla funcional (2/2).

# Modo de falla	Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Peso (%)	Peso acumulado (%)
21A	Fuga de floculante	\$50.00	0.00%	99.997%
10D	Grandes burbujas de aire/turbulencia en DAF	\$20.00	0.00%	99.999%
10B	Flujo de aire bajo o nulo	\$5.50	0.00%	99.999%
5A	Fuga de materia flotada hacia el exterior	\$5.00	0.00%	100.000%
7A	Fuga de mezcla de coagulante/influyente	\$5.00	0.00%	100.000%

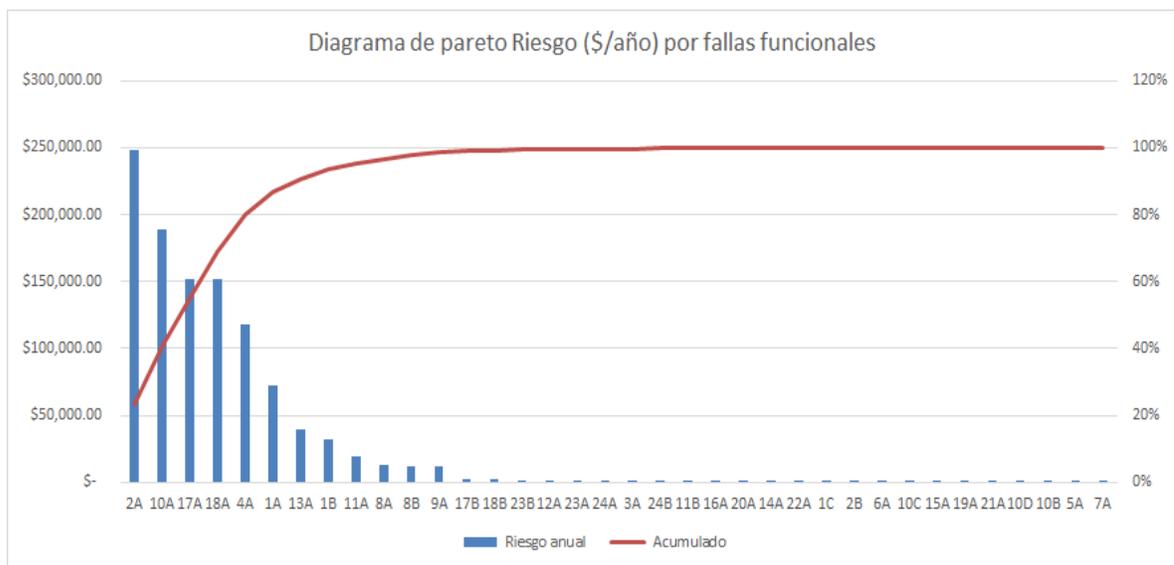


Diagrama 18: Esquema de Pareto: Riesgo (\$/año) por fallas funcionales (Elaboración Propia, 2021).

El 80% del riesgo se encuentra relegado en 4 fallas funcionales:

- 2A: Cucharón de espiral sin movimiento rotativo (0 RPM)
- 10A: Incremento de presión en el ADR
- 17A: Flujo nulo (0 Kg/h)
- 18A: Flujo nulo (0 Kg/h)
- 4A: Mezcla de agua clarificada y agua cruda

Siendo el valor de riesgo anual acumulado de \$858,241.14.

4.4.8 Curva de Pareto de “Modos de falla”.

A continuación, se presentan los modos de falla con sus respectivos riesgos anuales y su peso acumulado, en orden de mayor a menor:

Tabla 87. Estructuración de riesgos anuales y % peso acumulado por modo de falla (1/4)

# Modo de falla	Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Peso (%)	Peso acumulado (%)
10A1	Válvula de expansión bloqueada	\$188,720.00	17.63%	17.63%
2A5	Falla de rodamientos de caja reductora	\$94,390.00	8.82%	26.44%
4A1	Deterioro de plancha de PVC ~ 5730 x 45 x 5	\$59,062.50	5.52%	31.96%
4A2	Deterioro de plancha de neopreno ~ 5730 x 90 x 5	\$59,057.25	5.52%	37.47%
17A8	Falla mecánica de rodamiento de cremallera	\$47,220.00	4.41%	41.88%
18A8	Falla mecánica de rodamiento de cremallera	\$47,220.00	4.41%	46.30%
2A7	Falla de rodamiento DE mecánico de motor	\$47,220.00	4.41%	50.71%
2A8	Falla de rodamiento NDE mecánico de motor	\$47,220.00	4.41%	55.12%
1A5	Falla de piñonería de caja reductora	\$43,296.96	4.04%	59.16%
13A1	Fisura en tanque de coagulante	\$39,631.20	3.70%	62.86%
2A6	Falla de piñonería de caja reductora	\$25,772.00	2.41%	65.27%
17A5	Falla mecánica en piñón de caja de engranes	\$24,085.00	2.25%	67.52%
18A5	Falla mecánica en piñón de caja de engranes	\$24,085.00	2.25%	69.77%
1A8	Anillos rozantes de circuito de motor de rueda conductora desgastados	\$23,919.80	2.23%	72.00%
2A10	Anillos rozantes de circuito de motor de cucharón desgastados	\$23,919.80	2.23%	74.24%
17A9	Desgaste de resorte	\$23,630.00	2.21%	76.44%
18A9	Desgaste de resorte	\$23,630.00	2.21%	78.65%
17A6	Falla mecánica en eje de piñón	\$23,607.50	2.20%	80.85%
18A6	Falla mecánica en eje de piñón	\$23,607.50	2.20%	83.06%
1B1	Deformación/rotura de rueda conductora de Vulkollan ϕ 160 / 50 - ϕ 100	\$19,922.41	1.86%	84.92%
8A1	Falla mecánica en transductor de flujo	\$13,542.50	1.26%	86.19%
8B1	Falla eléctrica de transmisor	\$11,916.25	1.11%	87.30%
9A1	Falla eléctrica en salida de control	\$11,916.25	1.11%	88.41%
1B2	Deformación/rotura de rueda de centrado PETP ϕ 115 / 50 - ϕ 30,1	\$11,858.58	1.11%	89.52%
11A1	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor de bomba	\$9,458.50	0.88%	90.40%
11A2	Fase abierta en embobinado de estator de motor de bomba	\$9,458.50	0.88%	91.29%
17A2	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	\$9,458.50	0.88%	92.17%
17A3	Fase abierta en embobinado de estator de motor	\$9,458.50	0.88%	93.05%
18A2	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	\$9,458.50	0.88%	93.94%
18A3	Fase abierta en embobinado de estator de motor	\$9,458.50	0.88%	94.82%
2A9	Falla de embobinado de estator de motor (pérdida de aislamiento)	\$9,458.50	0.88%	95.70%
17A7	Falla mecánica en cremallera	\$9,447.90	0.88%	96.59%
18A7	Falla mecánica en cremallera	\$9,447.90	0.88%	97.47%

Tabla 88. Estructuración de riesgos anuales y % peso acumulado por modo de falla (2/4)

# Modo de falla	Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Peso (%)	Peso acumulado (%)
1A7	Falla de embobinado de estator de motor (pérdida de aislamiento)	\$4,741.50	0.44%	97.91%
17A4	Cable de alimentación roto	\$4,722.00	0.44%	98.35%
18A4	Cable de alimentación roto	\$4,722.00	0.44%	98.79%
17B4	Ruptura de diafragma #4	\$1,500.00	0.14%	98.93%
18B4	Ruptura de diafragma #4	\$1,500.00	0.14%	99.07%
23B1	Housing de impulsor tipo tornillo deteriorado	\$1,260.00	0.12%	99.19%
12A3	Desgaste de sello de exclusión - elastómero de Buna-N y resorte inox	\$700.00	0.07%	99.26%
12A1	Desgaste de sello de cerámica (parte estacionaria)	\$500.00	0.05%	99.30%
23A5	Falla mecánica en piñón de caja de engranes	\$500.00	0.05%	99.35%
24A5	Falla mecánica en piñón de caja de engranes	\$500.00	0.05%	99.40%
17B3	Fisura en cabezal de líquido #4 PVC	\$375.00	0.04%	99.43%
18B3	Fisura en cabezal de líquido #4 PVC	\$375.00	0.04%	99.47%
11B1	Desgaste de impulsor de hierro gris ASTMA-48 clase 30	\$300.00	0.03%	99.49%
24B1	Housing de impulsor tipo tornillo deteriorado	\$300.00	0.03%	99.52%
3A1	Ruptura de anillo de bronce (medias lunas) de ϕ 310 x ϕ 216,5 x 15.	\$267.84	0.03%	99.55%
1C2	Falla de espárrago de 3/4" de sujeción de plancha de barrido de fondo	\$210.00	0.02%	99.57%
14A2	Falla de piñonería de caja reductora	\$200.00	0.02%	99.59%
16A2	Falla de piñonería de caja reductora	\$200.00	0.02%	99.60%
20A2	Falla de piñonería de caja reductora	\$200.00	0.02%	99.62%
22A2	Falla de piñonería de caja reductora	\$200.00	0.02%	99.64%
23B2	Impulsor tipo tornillo con rotación excéntrica	\$200.00	0.02%	99.66%
24B2	Impulsor tipo tornillo con rotación excéntrica	\$200.00	0.02%	99.68%
3A2	Ruptura de anillo de bronce ϕ 267 x ϕ 245 x 11	\$162.54	0.02%	99.69%
17B2	Fisura en plato de cabezal #4	\$150.00	0.01%	99.71%
18B2	Fisura en plato de cabezal #4	\$150.00	0.01%	99.72%
17B8	Desgaste en O-ring de Viton	\$120.00	0.01%	99.73%
18B8	Desgaste en O-ring de Viton	\$120.00	0.01%	99.74%
12A2	Desgaste de anillo de carbón (parte rotatoria)	\$112.50	0.01%	99.75%
2B1	Falla de sello de eje rotatorio de cucharón de ϕ 38 x ϕ 55 x 7	\$105.00	0.01%	99.76%
6A1	Taponamiento de sedimento en mezcaldor	\$100.00	0.01%	99.77%
3A4	Deterioro de sello de ramillon # 12/12 x ~ 842	\$97.80	0.01%	99.78%
10C1	Agujero calibrado de válvula de purga bloqueado	\$88.00	0.01%	99.79%
2B2	Deformación/rotura de rueda de apoyo de cucharón	\$71.38	0.01%	99.80%
2B3	Deformación/rotura de rueda de ϕ 160 / 50 - ϕ 100 de soporte interna-	\$71.38	0.01%	99.80%
1C1	Desgaste de plancha de neopreno 1860 x 60 x 5 de barrido de fondo	\$69.75	0.01%	99.81%
3A5	Falla de junta elástica de neopreno ϕ 224 x ϕ 212 x 180 lg	\$69.75	0.01%	99.82%
1A3	Falla de chumacera/ rodamiento SKF SYJ40TF- ϕ 40 rueda conductora	\$62.67	0.01%	99.82%
23A3	Fase abierta en embobinado de estator de motor	\$61.25	0.01%	99.83%

Tabla 89. Estructuración de riesgos anuales y % peso acumulado por modo de falla (3/4)

# Modo de falla	Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Peso (%)	Peso acumulado (%)
24A3	Fase abierta en embobinado de estator de motor	\$61.25	0.01%	99.83%
11B2	Falla de rodamiento DE mecánico de motor de bomba	\$50.00	0.00%	99.84%
11B3	Falla de rodamiento NDE mecánico de motor de bomba	\$50.00	0.00%	99.84%
14A3	Falla de rodamientos de motor	\$50.00	0.00%	99.85%
15A1	Fisura en tanque de coagulante	\$50.00	0.00%	99.85%
16A3	Falla de rodamientos de motor	\$50.00	0.00%	99.86%
16A6	Desprendimiento de aspa de agitador	\$50.00	0.00%	99.86%
17B5	Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, descarga	\$50.00	0.00%	99.87%
17B6	Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, succión	\$50.00	0.00%	99.87%
17B7	Desgaste en O-ring de nitrilo	\$50.00	0.00%	99.88%
18B5	Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, descarga	\$50.00	0.00%	99.88%
18B6	Falla de válvula check 1 1/2" NPS, PVS, succión	\$50.00	0.00%	99.89%
18B7	Desgaste en O-ring de nitrilo	\$50.00	0.00%	99.89%
19A1	Fisura en tanque de coagulante	\$50.00	0.00%	99.90%
1A2	Falla de eje ϕ 40 x 410 de rueda conductora	\$50.00	0.00%	99.90%
1A4	Falla de rodamientos de caja reductora	\$50.00	0.00%	99.90%
20A3	Falla de rodamientos de motor	\$50.00	0.00%	99.91%
21A1	Fisura en tanque de coagulante	\$50.00	0.00%	99.91%
22A3	Falla de rodamientos de motor	\$50.00	0.00%	99.92%
2A3	Falla de rodamiento de rueda de soporte interna-externa	\$45.00	0.00%	99.92%
3A3	Deterioro de empaque de teflón ϕ 310 x ϕ 204 x3	\$44.62	0.00%	99.93%
17A1	Protección magneto-térmica dañada	\$40.00	0.00%	99.93%
18A1	Protección magneto-térmica dañada	\$40.00	0.00%	99.93%
23A1	Protección magneto-térmica dañada	\$40.00	0.00%	99.94%
24A1	Protección magneto-térmica dañada	\$40.00	0.00%	99.94%
1A6	Falla de rodamientos de motor	\$25.00	0.00%	99.94%
11A4	Falla de eje/rotor de motor de bomba	\$24.50	0.00%	99.95%
14A4	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.95%
14A5	Fase abierta en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.95%
16A4	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.95%
16A5	Fase abierta en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.96%
20A4	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.96%
20A5	Fase abierta en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.96%
22A4	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.96%
22A5	Fase abierta en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.97%
23A2	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.97%
24A2	Pérdida de aislamiento en embobinado de estator de motor	\$24.50	0.00%	99.97%
23A6	Falla mecánica en eje de piñón	\$22.50	0.00%	99.97%

Tabla 90. Estructuración de riesgos anuales y % peso acumulado por modo de falla (4/4)

# Modo de falla	Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Peso (%)	Peso acumulado (%)
24A6	Falla mecánica en eje de piñón	\$22.50	0.00%	99.97%
16A1	Falla de rodamientos de caja reductora	\$21.00	0.00%	99.98%
20A6	Desprendimiento de aspa de agitador	\$21.00	0.00%	99.98%
10D1	Regulador de aire comprimido dañado	\$20.00	0.00%	99.98%
17B1	Falla mecánica de flange 56C & IEC 71	\$20.00	0.00%	99.98%
18B1	Falla mecánica de flange 56C & IEC 71	\$20.00	0.00%	99.98%
8A2	Descalibración de señal 4 a 20 mA	\$20.00	0.00%	99.99%
2B4	Falla de sello de eje rotatorio de cucharón de ø36 x ø62 x 7	\$19.50	0.00%	99.99%
2A4	Falla de pin de rueda de soporte interna-externa ø40 x 89 x ø30	\$18.54	0.00%	99.99%
2A1	Falla de rodamiento de rueda de apoyo de cucharón	\$15.00	0.00%	99.99%
14A1	Falla de rodamientos de caja reductora	\$12.50	0.00%	99.99%
1A1	Ruptura de cubo de rueda conductora ø 100 x ø 40 x 50	\$12.50	0.00%	99.99%
20A1	Falla de rodamientos de caja reductora	\$12.50	0.00%	99.99%
22A1	Falla de rodamientos de caja reductora	\$12.50	0.00%	99.99%
12A4	Fisura en housing de impulsor de bomba	\$10.00	0.00%	100.00%
10B1	Reductor de presión dañado	\$5.50	0.00%	100.00%
11A3	Cable de alimentación eléctrica de motor de bomba roto	\$5.00	0.00%	100.00%
14A6	Desprendimiento de aspa de agitador	\$5.00	0.00%	100.00%
22A6	Desprendimiento de aspa de agitador	\$5.00	0.00%	100.00%
23A4	Cable de alimentación roto	\$5.00	0.00%	100.00%
24A4	Cable de alimentación roto	\$5.00	0.00%	100.00%
5A1	Fisura de tanque de materia flotada pared externa	\$5.00	0.00%	100.00%
7A1	Fisura en housing de mezclador	\$5.00	0.00%	100.00%
2A2	Falla de pin de rueda de apoyo ø40 x 91 x ø30	\$3.75	0.00%	100.00%

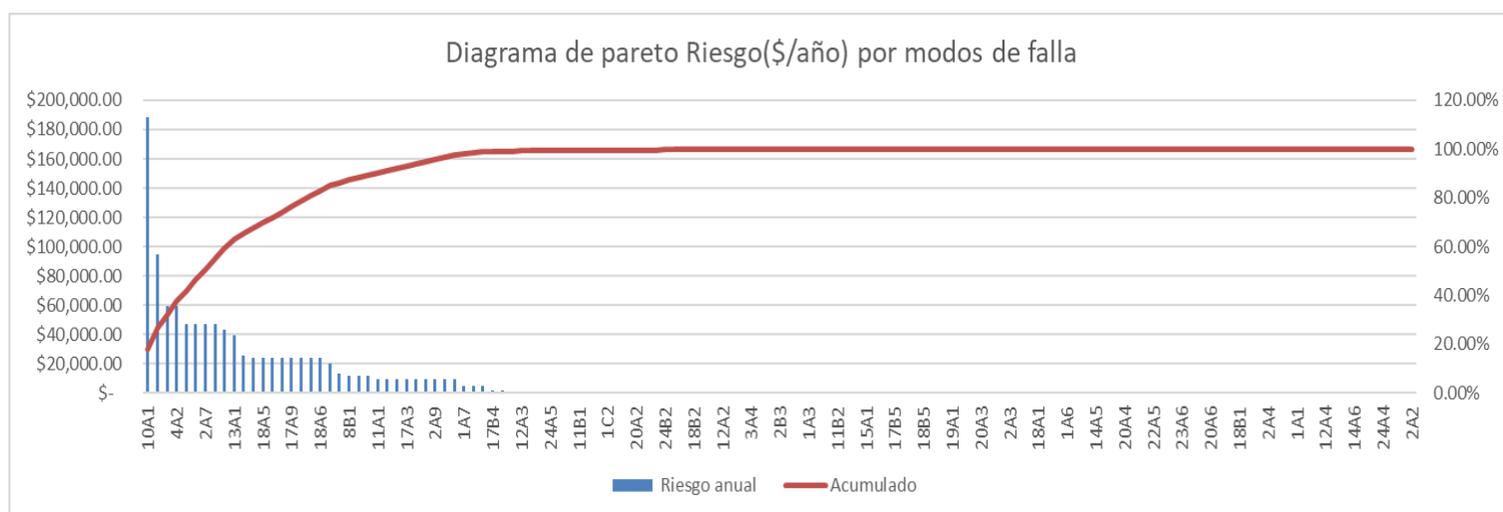


Diagrama 19: Esquema de Pareto: Riesgo (\$/año) por modo de falla (Elaboración Propia, 2021).

El 80% del riesgo se encuentra relegado en 18 modos de falla:

10A1: Válvula de expansión bloqueada

2A5: Falla de rodamientos de caja reductora

4A1: Deterioro de plancha de PVC ~ 5730 x 45 x 5

4A2: Deterioro de plancha de neopreno ~ 5730 x 90 x 5

17A8: Falla mecánica de rodamiento de cremallera

18A8: Falla mecánica de rodamiento de cremallera

2A7: Falla de rodamiento DE mecánico de motor

2A8: Falla de rodamiento NDE mecánico de motor

1A5: Falla de piñonería de caja reductora

13A1: Fisura en tanque de coagulante

2A6: Falla de piñonería de caja reductora

17A5: Falla mecánica en piñón de caja de engranes

18A5: Falla mecánica en piñón de caja de engranes

1A8: Anillos rozantes de circuito de motor de rueda conductora desgastados

2A10: Anillos rozantes de circuito de motor de cucharón desgastados

17A9: Desgaste de resorte

18A9: Desgaste de resorte

17A6: Falla mecánica en eje de piñón

Siendo el valor de riesgo anual acumulado de \$865,687.01.

4.4.9 Costo de plan de mantenimiento vrs. Riesgo anual.

Tabla 91. Costo de plan de mantenimiento vrs. Riesgo anual (1/4)

# Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Costo por estrategia de mto. (\$/año)	Riesgo > Costo
10A1	\$188,720.00	\$624.00	1
11A1	\$9,458.50	\$144.00	1
11A2	\$9,458.50	\$245.00	1
11A4	\$24.50	\$24.00	1
11B1	\$300.00	\$12.00	1
12A2	\$112.50	\$80.00	1
13A1	\$39,631.20	\$20.00	1
17A2	\$9,458.50	\$144.00	1
17A3	\$9,458.50	\$245.00	1
17A4	\$4,722.00	\$50.00	1
17A5	\$24,085.00	\$2,000.00	1
17A6	\$23,607.50	\$1,600.00	1
17A7	\$9,447.90	\$2,400.00	1
17A8	\$47,220.00	\$100.00	1
17A9	\$23,630.00	\$12.00	1
17B4	\$1,500.00	\$24.00	1
18A2	\$9,458.50	\$144.00	1
18A3	\$9,458.50	\$245.00	1
18A4	\$4,722.00	\$50.00	1
18A5	\$24,085.00	\$2,000.00	1
18A6	\$23,607.50	\$1,600.00	1
18A7	\$9,447.90	\$2,400.00	1
18A8	\$47,220.00	\$100.00	1
18A9	\$23,630.00	\$12.00	1
18B4	\$1,500.00	\$24.00	1
19A1	\$50.00	\$20.00	1
1A1	\$12.50	\$12.00	1
1A5	\$43,296.96	\$8,748.00	1
1A7	\$4,741.50	\$144.00	1
1A8	\$23,919.80	\$12.00	1
1B1	\$19,922.41	\$24.00	1
1B2	\$11,858.58	\$24.00	1
1C1	\$69.75	\$12.00	1
23B1	\$1,260.00	\$150.00	1
24B1	\$300.00	\$150.00	1

Tabla 92. Costo de plan de mantenimiento vrs. Riesgo anual (2/4)

# Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Costo por estrategia de mtto. (\$/año)	Riesgo > Costo
2A10	\$23,919.80	\$12.00	1
2A4	\$18.54	\$12.00	1
2A5	\$94,390.00	\$100.00	1
2A6	\$25,772.00	\$8,748.00	1
2A7	\$47,220.00	\$100.00	1
2A8	\$47,220.00	\$100.00	1
2A9	\$9,458.50	\$144.00	1
3A1	\$267.84	\$12.00	1
3A2	\$162.54	\$12.00	1
3A5	\$69.75	\$12.00	1
4A1	\$59,062.50	\$12.00	1
4A2	\$59,057.25	\$12.00	1
8A1	\$13,542.50	\$7,000.00	1
8B1	\$11,916.25	\$725.00	1
9A1	\$11,916.25	\$725.00	1
B2	\$71.38	\$12.00	1
B3	\$71.38	\$12.00	1
10B1	\$5.50	\$300.00	0
10C1	\$88.00	\$624.00	0
10D1	\$20.00	\$350.00	0
11A3	\$5.00	\$50.00	0
11B2	\$50.00	\$100.00	0
11B3	\$50.00	\$100.00	0
12A1	\$500.00	\$500.00	0
12A3	\$700.00	\$700.00	0
12A4	\$10.00	\$960.00	0
14A1	\$12.50	\$50.00	0
14A2	\$200.00	\$2,000.00	0
14A3	\$50.00	\$100.00	0
14A4	\$24.50	\$144.00	0
14A5	\$24.50	\$245.00	0
14A6	\$5.00	\$50.00	0
15A1	\$50.00	\$500.00	0
16A1	\$21.00	\$100.00	0
16A2	\$200.00	\$2,000.00	0
16A3	\$50.00	\$520.00	0

Tabla 93. Costo de plan de mantenimiento vrs. Riesgo anual (3/4)

# Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Costo por estrategia de mtto. (\$/año)	Riesgo > Costo
16A4	\$24.50	\$144.00	0
16A5	\$24.50	\$700.00	0
16A6	\$50.00	\$50.00	0
17A1	\$40.00	\$400.00	0
17B1	\$20.00	\$1,500.00	0
17B2	\$150.00	\$2,800.00	0
17B3	\$375.00	\$2,500.00	0
17B5	\$50.00	\$144.00	0
17B6	\$50.00	\$144.00	0
17B7	\$50.00	\$100.00	0
17B8	\$120.00	\$240.00	0
18A1	\$40.00	\$400.00	0
18B1	\$20.00	\$1,500.00	0
18B2	\$150.00	\$2,800.00	0
18B3	\$375.00	\$2,500.00	0
18B5	\$50.00	\$144.00	0
18B6	\$50.00	\$144.00	0
18B7	\$50.00	\$100.00	0
18B8	\$120.00	\$240.00	0
1A2	\$50.00	\$500.00	0
1A3	\$62.67	\$250.67	0
1A4	\$50.00	\$100.00	0
1A6	\$25.00	\$50.00	0
1C2	\$210.00	\$500.00	0
20A1	\$12.50	\$50.00	0
20A2	\$200.00	\$2,000.00	0
20A3	\$50.00	\$100.00	0
20A4	\$24.50	\$144.00	0
20A5	\$24.50	\$245.00	0
20A6	\$21.00	\$100.00	0
21A1	\$50.00	\$500.00	0
22A1	\$12.50	\$20.00	0
22A2	\$200.00	\$2,000.00	0
22A3	\$50.00	\$100.00	0
22A4	\$24.50	\$144.00	0
22A5	\$24.50	\$245.00	0

Tabla 94. Costo de plan de mantenimiento vrs. Riesgo anual (4/4)

# Modo de falla	Riesgo (\$/año)	Costo por estrategia de mtto. (\$/año)	Riesgo > Costo
22A6	\$5.00	\$100.00	0
23A1	\$40.00	\$400.00	0
23A2	\$24.50	\$144.00	0
23A3	\$61.25	\$245.00	0
23A4	\$5.00	\$50.00	0
23A5	\$500.00	\$2,000.00	0
23A6	\$22.50	\$90.00	0
23B2	\$200.00	\$300.00	0
24A1	\$40.00	\$400.00	0
24A2	\$24.50	\$144.00	0
24A3	\$61.25	\$245.00	0
24A4	\$5.00	\$50.00	0
24A5	\$500.00	\$2,000.00	0
24A6	\$22.50	\$90.00	0
24B2	\$200.00	\$300.00	0
2A1	\$15.00	\$30.00	0
2A2	\$3.75	\$12.00	0
2A3	\$45.00	\$90.00	0
2B1	\$105.00	\$105.00	0
3A3	\$44.62	\$446.16	0
3A4	\$97.80	\$400.00	0
5A1	\$5.00	\$50.00	0
6A1	\$100.00	\$300.00	0
7A1	\$5.00	\$1,200.00	0
8A2	\$20.00	\$120.00	0
B4	\$19.50	\$78.00	0

52 actividades de mantenimiento cuentan con un costo de ejecución menor. El costo anual de dichas actividades suma la cantidad de \$41,345.00.

Por su parte hay 81 actividades de mantenimiento cuyo costo es superior al riesgo anual por falla. El costo anual de dichas actividades suma la cantidad de \$42,380.83.

4.4.10 Análisis económico (caso de negocio) de plan de mantenimiento

Para el análisis financiero de la implementación del plan propuesto, se considera el valor actual neto (VAN) para diferentes escenarios:

Escenario óptimo “Reducción del riesgo anual en un 100%”:

Esto supone que el plan de mantenimiento al ejecutarse eliminará completamente el riesgo anual (\$/año) identificado durante el FMEA/RCM.

Tabla 95. Análisis VAN bajo escenario eventual óptimo (reducción de riesgo anual al 100%)

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
INGRESOS		\$ 1,070,670.79	\$ 1,070,670.79	\$ 1,070,670.79	\$ 1,070,670.79	\$ 1,070,670.79
EGRESOS		\$ 83,725.83	\$ 83,725.83	\$ 83,725.83	\$ 83,725.83	\$ 83,725.83
FLUJO DE EFECTIVO		\$ 986,944.96	\$ 986,944.96	\$ 986,944.96	\$ 986,944.96	\$ 986,944.96

VAN= \$3,647,646.93

Escenario realista “Reducción del riesgo anual en un 70%”:

En este escenario, la ejecución del plan de mantenimiento supone una eficacia en reducción del 70% del riesgo anual identificado.

Tabla 96. Análisis VAN bajo escenario eventual realista (reducción de riesgo anual al 70%)

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
INGRESOS		\$749,469.55	\$749,469.55	\$749,469.55	\$749,469.55	\$749,469.55
EGRESOS		\$83,725.83	\$83,725.83	\$83,725.83	\$83,725.83	\$83,725.83
FLUJO DE EFECTIVO		\$665,743.72	\$665,743.72	\$665,743.72	\$665,743.72	\$665,743.72

VAN= \$2,460,520.24

Escenario pesimista “Reducción del riesgo anual en un 50%”:

Este es el escenario es el más conservador, dado que la implementación del plan de mantenimiento únicamente garantizaría la reducción de riesgo anual en un 50%.

Tabla 97. Análisis VAN bajo escenario eventual pesimista (reducción de riesgo anual al 50%)

	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
INGRESOS		\$535,335.39	\$535,335.39	\$535,335.39	\$535,335.39	\$535,335.39
EGRESOS		\$83,725.83	\$83,725.83	\$83,725.83	\$83,725.83	\$83,725.83
FLUJO DE EFECTIVO		\$451,609.56	\$451,609.56	\$451,609.56	\$451,609.56	\$451,609.56

VAN= \$1,669,102.44

CAPITULO V: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Resultados

- De la evaluación económica en la fase de análisis de puntos débiles, deriva en que, al realizar la comparación del riesgo entre ejecutar un mantenimiento correctivo "rebobinado" o realizar el cambio completo del motor sumergible, resulta ganadora el cambio del motor, con un beneficio mayor a los \$ 300,000. El cambio del motor genera costos directos mayores en su momento de la implementación, pero este triplica la confiabilidad de un motor rebobinado, y ese aumento de la confiabilidad minimiza los costes por penalización en un 80%.
- El costo del plan de mantenimiento resultado del RCM es de \$83,725.83, mientras que el riesgo anual por fallas del sistema DAF 1 es de \$1,070,670.79. Es decir, que el costo del plan de mantenimiento propuesto representa el 7.82% del riesgo anual.
- Los resultados obtenidos en la jerarquización de los modos de fallos bajo la metodología ACR aplicada, específicamente en el sistema del reactor biológico, aireador de fondo # 2, nos presenta que el equipo con mayor número de modos de fallo relacionados, fue el motor sumergible, con 4 (36%) modos de un total de 11, asimismo los modos de falla de este equipo están ubicados en los primeros puestos de la jerarquía, lo cual indica una baja confiabilidad y un riesgo económico alto, al momento del estudio.
- El costo del plan de mantenimiento resultado del RCM es de \$83,725.83, mientras que el riesgo anual por fallas del sistema DAF 1 es de \$1,070,670.79. Es decir, que el costo del plan de mantenimiento propuesto representa el 7.82% del riesgo anual.
- El 80% del riesgo anual (\$858,241.14) se relega a 5 fallas funcionales.
- El 80% del riesgo anual (\$865,687.01) se encuentra relegado en 18 modos de falla, cuyas actividades de mantenimiento tienen un costo de \$24,312.00, por lo que la relación de beneficio/costo del riesgo/actividades de mantenimiento es de 3560.74%.
- El 39.10% de las actividades de mantenimiento propuestas, poseen un costo de ejecución inferior al riesgo de las fallas que buscan prevenir o reducir su probabilidad de ocurrencia.
- Los resultados de los análisis de VAN bajo los enfoques óptimo, realista y pesimista (consideración de reducción de riesgo anual al 100%, 70% y 50%) arrojan resultados

favorables en cualquiera de los tres escenarios con saldos de VAN= \$3,647,646.93, VAN= \$2,460,520.24 y VAN= \$1,669,102.44 para cada uno de los casos respectivamente.

Conclusiones

- Los métodos de personalización de las primeras cuatro fases del Modelo Integral de Gestión del Mantenimiento y de la Confiabilidad desarrollado por Carlos Parra y Adolfo Crespo son suficientes, en tanto que brindan la información necesaria para la definición del plan de mantenimiento propuesto para una planta de tratamiento de aguas residuales en industria de procesamiento de aves; las fases, permiten configurar los datos de condiciones operativas y características técnicas de los equipos que conforman los sistemas, que se sustenta con información de campo durante el funcionamiento.
- La auditoría realizada bajo la técnica AMORMS, mostró ser una auditoría integral de evaluación de la gestión de mantenimiento, y mostro con un promedio de 1.5 en una escala de 1 a 5, que la organización no posee un modelo de gestión de activos. Los encuestados bajo AMORMS desconocen la alineación de los objetivos de mantenimiento con los de la organización, no teniendo claridad de las directrices corporativas sobre los activos y la jerarquización basado en niveles de consecuencia, probabilidad o aspectos de seguridad y ambiente.
- El desarrollo del cuadro de mando integral, propuesto en la fase uno ofrece una visión más amplia de la organización y pretende mantener enfocado los esfuerzos en los indicadores claves de mantenimiento como, la confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad los cuales impactaran de forma directa en los indicadores financieros importantes para la organización como el EBITDA.
- Los resultados obtenidos en la fase II “criticidad”, son función del periodo de tiempo de estudio de fallas considerado en el documento (28 meses), dado que muchas de las frecuencias de fallas ahí estipuladas son de tipo experimental, y no teórico.
- El porcentaje de coincidencia entre los resultados de la jerarquización por MCR - (matriz de criticidad por riesgo) y AHP (Proceso analítico jerárquico) fue de 77.78% para el caso de estudio. Debido a ello, se recomienda que para la expansión del MGM hacia otras áreas de la empresa, se utilice el método MCR, por su facilidad de aplicación y aproximación a los resultados de un método meramente cuantitativo. La comparación de resultados entre los modelos de jerarquización MCR - (matriz de criticidad por riesgo) y AHP (Proceso analítico

jerárquico) fue posible dado que ambos modelos fueron basados en “riesgo”, considerando los criterios de severidad y frecuencia de los fallos.

- El modelo de criticidad basado en riesgo (MCR), al ser una herramienta que se alimenta de información de datos históricos de sistemas y equipos que son procesados con operaciones matemáticas para la obtención de factores ponderados del desempeño de los equipos, posibles impactos ante fallos y mantenibilidad, permite la facilidad de ser estructurado como herramienta de seguimiento en plataformas digitales como SAP PM, como mecanismo de control en la definición de mejoras en el sistema de gestión de mantenimiento, en contraste con el modelo AHP, que como tal, su complejidad radica en la ejecución necesaria de una evaluación matricial de valoraciones obtenidas de la clasificación de riesgo basada en las frecuencia de fallos, costos, severidad y mantenibilidad para su desarrollo dentro de un módulo.
- El análisis VAN, como herramienta de perspectiva de rentabilidad del proyecto propuesto, arroja resultados satisfactorios mostrando flujos de caja positivos, no obstante, para el caso particular desarrollado, el análisis como tal, no indica que las proyecciones realizadas no provienen de una inversión realizada, sino, como origen de una mejora en el sistema de gestión de recursos de mantenimiento.

Recomendaciones

- Se recomienda que el programa de mantenimiento producto del FMEA/RCM forme parte de un ciclo iterativo dentro del MGMI (eficacia, eficiencia, evaluación y mejorar), dónde con la corrección de frecuencias de fallas e intervenciones de mantenimiento, este se logre optimizar en el transcurso del tiempo.
- Se recomienda extender la aplicación del FMEA/RCM al resto de sistemas que no son considerados cómo el más crítico (DAF 1), dado que estos, aunque en menor medida, tienen un CIF (costo de indisponibilidad por fallo) asociado.
- Se recomienda que, para futuras revisiones de ajuste de presupuesto, se realice una revisión del otro 60.90% de actividades, de forma que pueda evaluarse que estas, puedan transformarse en actividades “reactivas” siempre y cuando no exista un riesgo SHA involucrado. Esto, pues, su costo de ejecución es mayor a su riesgo anual.

BIBLIOGRAFÍA

- B.S Dhillon, P. (2002). *Engineering Maintenance: A modern Approach*. Florida, Estados Unidos: CRC Press.
- Borja, M. S. (2011). *Diseño de una planta de tratamiento para aguas residuales de la Ciudad de Guaranda*. Riobamba.
- Carrera, G. (2011). *Modelación de Oxígeno Disuelto, Materia Orgánica y su Influencia en la Distribución y Diversidad de Indicadores Bentónicos de la cuenca del río San Pedro en el tramo, Amaguaña-Guangopolo*. Sangolqui.
- Chudoba J., G. P. (1973). *Control of activated sludge filamentous bulking*. Water Research.
- Crespo Marquez, A. (2007). *The Maintenance management framework. Models and methods for complex systems maintenance*. London: Springer Verlag.
- DECRETO N° 39. (s.f.). En *REGLAMENTO ESPECIAL DE AGUAS RESIDUALES, REPÚBLICA DE EL SALVADOR*.
- Henze, M. (2001). *Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling and Design*. Londres: IWA Publishing.
- Henze, M., van Loosdrecht, M., G.A., E., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing.
- Latino, R. a. (2002). *Root Cause Analysis: Improving Perfomance for Bottom Line Results*. Ney York: CRC Press.
- Liriano, E., & Jalissa Trinidad, R. (2016). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Santo Domingo.
- Lozano Rivas, W. A. (2012). *Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales*. Bogotá.
- M. Henze, M. v. (2008). *Tratamiento biológico de LEY DE MEDIO AMBIENTE. aguas residuales Principios, modelación y diseño*. IWA Publishing.
- MARN. (2019). *Elementos de un modelo de gestion para plantas de tratamiento de aguas residuales. SAN SALVADOR*.
- MARN. (2019). *Reglamento Técnico Salvadoreño: Aguas Residuales. Parámetros de Calidad de Aguas Residuales para Descarga y Manejo de Lodos Residuales RTS 13.05.01:18. SAN SALVADOR*
- Mobley, R. K. (2004). *MAINTENACE FUNDAMENTALS*.
- Napa, J. A. (2016). *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para el cantón Rioverde, Provincia de Esmeraldas*. Riobamba.
- Parra, C. (2002). *Aplicación de la técnica de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) en los sistemas de refinación y producción de la industria petrolera Venezolana*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

- Parra, C. (2019). *Introducción al Modelo Integral de Gestión del Mantenimiento y de la Confiabilidad alineado con el enfoque de la norma: UNE 16646 (Mantenimiento en la Gestión de Activos Físicos)*. Sevilla.
- Parra, C., & Crespo, A. (2018). *Nota técnica 5: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos*. Sevilla: INGEMAN.
- Parra, C., & Crespo, A. (2019). *Técnicas de Análisis de Causa Raíz*. Sevilla, España: INGEMAN.
- Peter W. G. Morris, J. K. (s.f.). *THE WILEY GUIDE TO MANAGING PROJECTS*.
- Saaty, T. (1990). *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*. Estados Unidos: University of Pittsburgh.
- TORRES, L. D. (s.f.). *Mantenimiento, Implementación y Gestión. Documento Digital*. En L. D. TORRES, *Mantenimiento, Implementación y Gestión. Documento Digital*. Editorial McGrawHill.
- Torrez Porras, C. (2017). *MODELO DE JERARQUIZACIÓN HOLÍSTICA DE ACTIVOS POR CRITICIDAD BASADO EN CONFIABILIDAD OPERACIONAL*. Estado de Zulia, Venezuela.
- UNE15341. (2008).
- Viveros-Gunckel, P., Kristjanpoller-Rodríguez, F., Parra-Márquez, C., Crespo-Márquez, A., & González-Prida-Díaz, V. (2020). *Audit Models for Asset Management, Maintenance and Reliability Processes. Case Study: Electricity Transmission Sector*. En P. Viveros-Gunckel, F. Kristjanpoller-Rodríguez, C. Parra-Márquez, A. Crespo-Márquez, & V. González-Prida-Díaz, *Audit Models for Asset Management, Maintenance and Reliability Processes. Case Study: Electricity Transmission Sector* (pág. 14). DYNA Management.
- W.T., A. E. (1914). *Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters*. *Chem Ind*,33,523.
- William T., A. E. (1914). *Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters*. *Chem Ind*,33,523.
- Wind, Y., & Saaty, T. (1980). *Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process. Management Science*.

ANEXOS

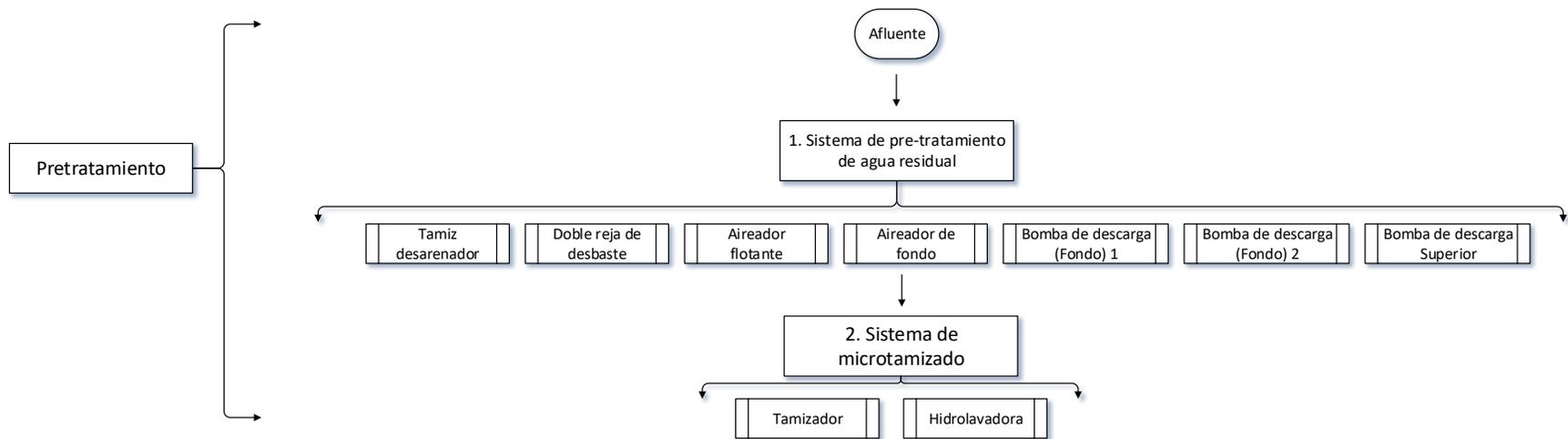


Diagrama 20: Etapa de pretratamiento de lodos en sistema PTAR.

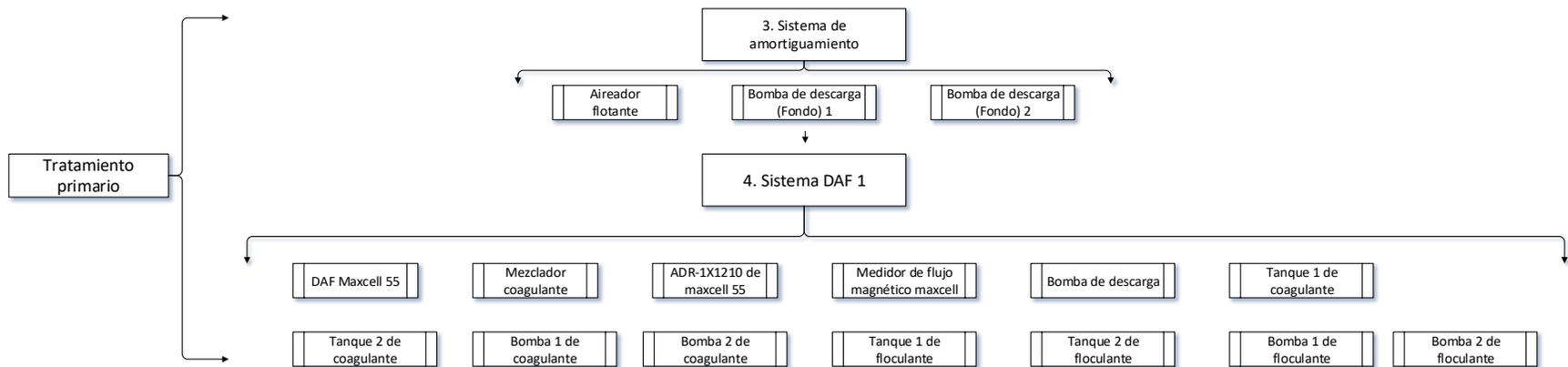


Diagrama 21: Etapa de tratamiento primario de lodos en sistema PTAR.

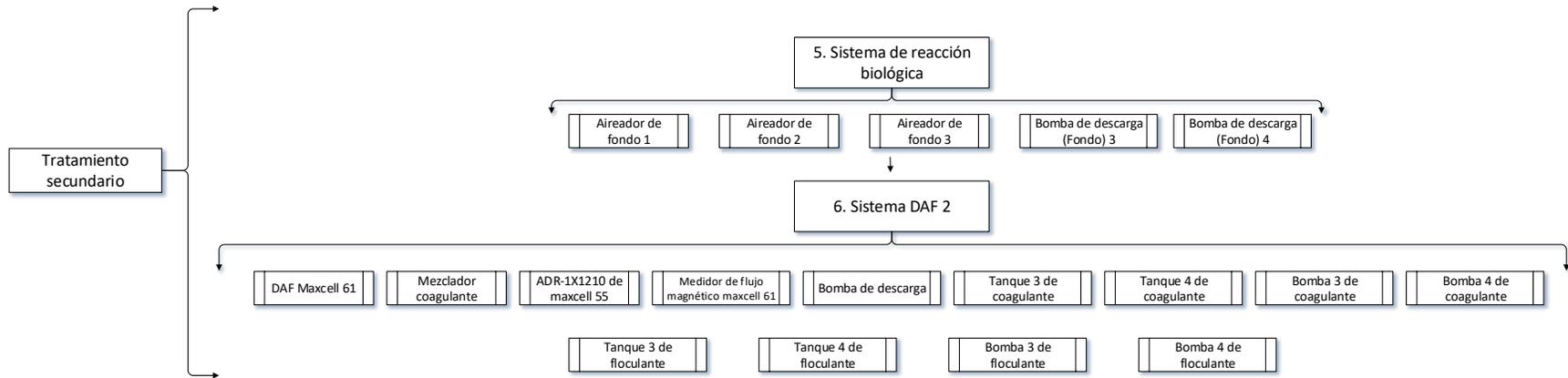


Diagrama 22: Etapa de tratamiento secundario de lodos en sistema PTAR.

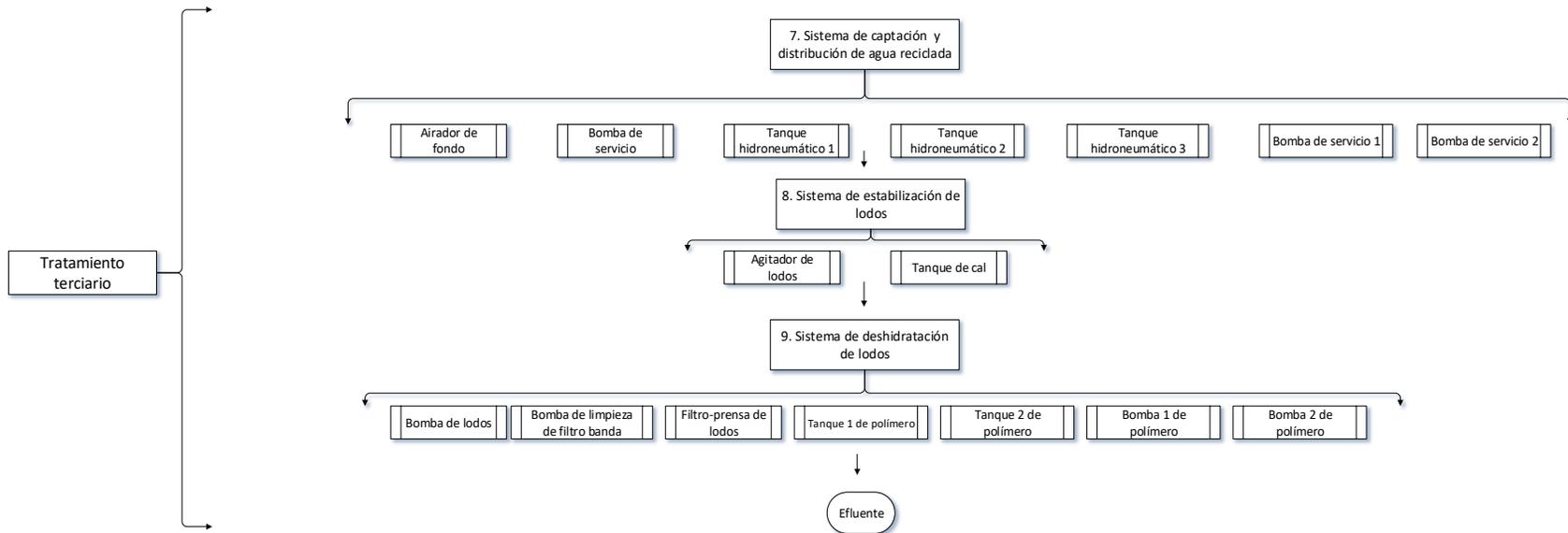


Diagrama 23: Etapa de tratamiento terciario de lodos en sistema PTAR.

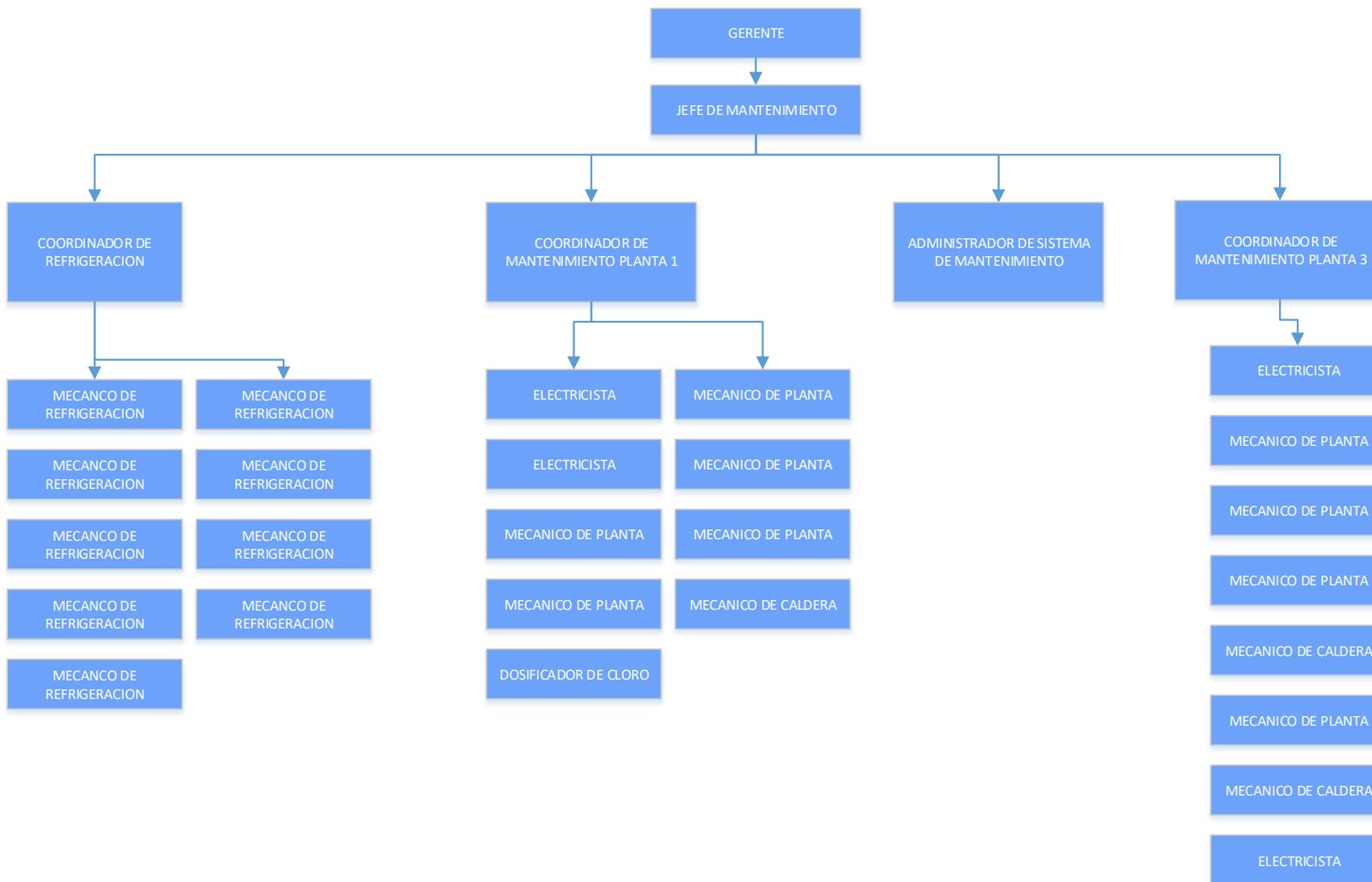


Diagrama 24: Estructura organizacional

FIN ANEXOS.