

**DESARROLLO DE UN MODELO PARA EVALUAR LA DISPONIBILIDAD Y  
CONFIABILIDAD EN UN SISTEMA DE BOMBEO**

**ANDRÉS RICARDO CARTAGENA JADETH**



**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2012**

**DESARROLLO DE UN MODELO PARA EVALUAR LA DISPONIBILIDAD Y  
CONFIABILIDAD EN UN SISTEMA DE BOMBEO**

**ANDRÉS RICARDO CARTAGENA JADETH**

**Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Industrial**

**Director  
VÍCTOR JAVIER ESCALLÓN SANTAMARÍA  
M.Sc.**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2012**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

Firma Presidente del Jurado

---

Firma Jurado

---

Firma Jurado

Santiago de Cali, mayo de 2012

## **AGRADECIMIENTOS**

A papá José Regulo por su apoyo y respaldo a lo largo de este tiempo.

A mi familia por su comprensión y soporte en todo momento.

A mi esposa Ana Isabel por su apoyo, su ánimo y en especial por su comprensión y paciencia.

A la empresa en la que laboro por el apoyo económico y profesional.

Finalmente, gracias a quienes apoyaron de una u otra manera este proyecto.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	17
RESUMEN .....	18
ABSTRACT .....	19
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	20
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	20
1.2. ALCANCES DEL TRABAJO DE GRADO .....	20
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	21
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
2.3. RESULTADOS ESPERADOS.....	21
3. MÉTODOS PARA ESTIMAR LA DISPONIBILIDAD Y LA CONFIABILIDAD...22	
3.1. MIL STANDARD 217 .....	22
3.2. AMFE / AMFEC.....	23
3.3. DIAGRAMA DE BLOQUES.....	23
3.4. ÁRBOLES DE FALLA .....	23
3.5. CADENAS DE MARKOV .....	24
4. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA CONFIABILIDAD .....	25
4.1. MODELOS NO DINÁMICOS.....	26
4.2. MODELOS DINÁMICOS .....	27
5. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA .....	28
6. SISTEMA DE BOMBEO .....	31
6.1. CICLO DE VIDA DE LAS BOMBAS.....	31
6.1.1. Ubicación con bomba standby.....	31
6.1.2. Ubicación sin bomba standby .....	33
6.2. MODOS DE FALLA DE LAS BOMBAS.....	35
7. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	38
7.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA A ESTUDIAR .....	38
7.1.1. Líneas de bombeo .....	38
7.1.2. Listado de las unidades de bombeo .....	38

7.1.3.	Clasificación de las fallas.....	41
7.1.4.	Tiempo de operación de los equipos .....	41
7.1.5.	Modos de falla dominantes .....	41
7.2.	TIPO DE DATOS EN ESTUDIOS DE CONFIABILIDAD .....	43
7.2.1.	Datos completos .....	43
7.2.2.	Datos sesgados .....	43
7.3.	ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLA .....	43
7.3.1.	Supuestos.....	43
7.3.2.	Estimación de la probabilidad de falla para cada ubicación técnica .....	44
7.4.	TIEMPO DE PUESTA EN SERVICIO (REPARACIÓN) .....	45
7.5.	COSTOS DE MANO DE OBRA, DE REPUESTOS Y DE MONITOREO DE CONDICIÓN .....	45
7.5.1.	Costos de mano de obra.....	45
7.5.2.	Costos de repuestos .....	46
7.5.3.	Costos de monitoreo por condición.....	47
7.6.	DISPONIBILIDAD Y COSTOS ANUALES POR UBICACIÓN TÉCNICA .....	47
7.6.1.	Evaluación comparativa del tiempo promedio entre falla con estadísticas internacionales.....	48
8.	MODELACIÓN DE CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD .....	51
8.1.	DIAGRAMAS DE BLOQUES .....	51
8.1.1.	Ventajas y desventajas de los diagramas de bloque .....	52
8.2.	ÁRBOLES DE FALLAS.....	52
8.2.1.	Comparación entre los árboles de fallas y los diagramas de bloques .....	53
8.2.2.	Ventajas y desventajas de los árboles de fallas.....	53
8.3.	MODELOS DINÁMICOS .....	54
8.3.1.	Ventajas y desventajas de los modelos dinámicos .....	54
8.4.	MÉTODO EMPLEADO .....	55
8.5.	SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE MODELACIÓN.....	55
9.	CONDICIÓN ACTUAL DE LA PLANTA.....	57
9.1.	PROCEDIMIENTO PARA DESARROLLAR EL MODELO.....	57
9.1.1.	Datos de entrada .....	58
9.2.	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN .....	59
9.2.1.	Resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.....	59

9.2.2.	Resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.....	62
9.3.	ESTIMACIÓN DEL ERROR.....	65
9.4.	COSTO DEL TIEMPO PERDIDO POR LÍNEA DE BOMBEO.....	67
9.5.	ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS.....	68
10.	PROPUESTAS DE MEJORA PARA CADA BLOQUE.....	71
10.1.	CRITICIDAD DE LOS EQUIPOS.....	71
10.1.1.	Ubicaciones técnicas críticas en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.....	72
10.1.2.	Ubicaciones técnicas críticas en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.....	72
10.2.	ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO.....	73
10.2.1.	Resultados de la estrategia de mantenimiento periódico en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.....	74
10.2.2.	Resultados de la estrategia de mantenimiento periódico en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.....	74
10.2.3.	Análisis de resultados.....	75
10.3.	ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA Y EFECTOS.....	76
10.3.1.	Modos de falla dominantes en las ubicaciones técnicas de mayor criticidad.....	76
10.3.2.	Número de Prioridad de Riesgo.....	81
10.4.	LÓGICA DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD.....	81
10.5.	CARACTERÍSTICAS DE LA PROPUESTA DE REDISEÑO.....	83
10.5.1.	Confiabilidad estimada de la propuesta de mejora.....	84
11.	PROPUESTAS DE MEJORA PARA CADA LÍNEA DE BOMBEO.....	89
11.1.	PROPUESTAS DE MEJORA PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DESDE EL CLARIFICADOR DE LICOR VERDE AL TANQUE DE LICOR BLANCO.....	89
11.1.1.	Propuesta 1 – Licor Blanco a plantas de pulpa.....	89
11.1.2.	Propuesta 2 – Licor Blanco a plantas de pulpa.....	89
11.2.	PROPUESTAS DE MEJORA PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DESDE EL CLARIFICADOR DE LICOR VERDE HASTA EL HORNO DE CAL.....	91
11.2.1.	Propuesta 1 – Lodos al Horno de Cal.....	91
11.2.2.	Propuesta 2 – Lodos al Horno de Cal.....	91
11.2.3.	Propuesta 3 – Lodos al Horno de Cal.....	92

11.2.4.	Propuesta 4 – Lodos al Horno de Cal.....	92
11.2.5.	Propuesta 5 – Lodos al Horno de Cal.....	94
11.2.6.	Propuesta 6 – Lodos al Horno de Cal.....	94
11.2.7.	Propuesta 7 – Lodos al Horno de Cal.....	95
11.2.8.	Propuesta 8 – Lodos al Horno de Cal.....	96
11.2.9.	Propuesta 9 – Lodos al Horno de Cal.....	97
11.2.10.	Propuesta 10 – Lodos al Horno de Cal.....	97
11.2.11.	Propuesta 11 – Lodos al Horno de Cal.....	98
11.2.12.	Propuesta 12 – Lodos al Horno de Cal.....	98
11.2.13.	Propuesta 13 – Lodos al Horno de Cal.....	100
11.2.14.	Propuesta 14 – Lodos al Horno de Cal.....	100
11.2.15.	Propuesta 15 – Lodos al Horno de Cal.....	100
11.3.	PROPUESTAS COMBINADAS .....	102
11.3.1.	Propuesta 1C – Lodos al Horno de Cal (combinada) .....	102
11.3.2.	Propuesta 2C – Lodos al Horno de Cal (combinada) .....	102
12.	EVALUACIÓN DE COSTOS.....	104
12.1.	EVALUACIÓN DE COSTOS PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DESDE EL CLARIFICADOR DE LICOR VERDE AL TANQUE DE LICOR BLANCO .....	104
12.1.1.	Evaluación de costos para la propuesta 2 del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de Licor Blanco .....	104
12.1.1	Evaluación de costos para la propuesta 1 del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de Licor Blanco .....	105
12.2.	EVALUACIÓN DE COSTOS PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DESDE EL CLARIFICADOR DE LICOR VERDE HASTA EL HORNO DE CAL .....	106
12.2.1.	Evaluación de costos para la propuesta 15 del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal .....	106
12.3.	EVALUACIÓN DE COSTOS PARA LA PROPUESTA COMBINADA .....	107
12.3.1.	Evaluación de costos para la propuesta 2C del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal .....	107
12.4.	PROPUESTA RECOMENDADA.....	108
13.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	111
13.1.	TRABAJO POSTERIOR .....	112
14.	GRAN RESUMEN .....	114
14.1.	SISTEMAS DE BOMBEO EN LA PLANTA DE CAUSTIFICACIÓN DE LA EMPRESA XYZ S.A.....	114

14.2. MODELACIÓN DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD EN LA  
INDUSTRIA.....116  
BIBLIOGRAFÍA.....118  
ANEXOS .....124

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estados de una bomba con standby.....	33
Tabla 2. Modos de falla de una bomba centrífuga.....	36
Tabla 3. Modos de falla de bandas y poleas.....	37
Tabla 4. Modos de falla de un motor eléctrico.....	37
Tabla 5. Equipos de la línea de bombeo del Clarificador de Licor Verde al Tanque de Almacenamiento de Licor Blanco.....	39
Tabla 6. Equipos de la línea de bombeo del Clarificador de Licor Verde al Horno de Cal.....	40
Tabla 7. Tarifas de presentación de servicios de mantenimiento mecánico para el año de 2011 (COP).....	46
Tabla 8. Costo de materiales por evento para las ubicaciones técnicas estudiadas (COP).....	47
Tabla 9. Resultados de la modelación para cada ubicación técnica en un periodo de 365 días.....	48
Tabla 10. Tiempo promedio entre fallas para bombas.....	49
Tabla 11. Evaluación de los programas de modelación.....	56
Tabla 12. Resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.....	60
Tabla 13. Resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.....	63
Tabla 14. Comparación de resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.....	66
Tabla 15. Comparación de resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.....	66
Tabla 16. Precios de materias primas.....	68
Tabla 17. Costo de materias primas por día de no disponibilidad.....	68
Tabla 18. Estado actual del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.....	69
Tabla 19. Estado actual del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.....	69
Tabla 20. Índice de criticidad para las ubicaciones técnicas del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.....	72

Tabla 21. Índice de criticidad para las ubicaciones técnicas del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	73
Tabla 22. Resultados de la implementación de la estrategia de mantenimiento periódico (MP1-2) al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco. ....	74
Tabla 23. Resultados de la implementación de la estrategia de mantenimiento periódico (MP1-2) al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	75
Tabla 24. Resultados para cálculo del número de prioridad de riesgo. ....	81
Tabla 25. Decisiones basadas en la lógica del mantenimiento centrado en la confiabilidad. ....	83
Tabla 26. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70BL02. ....	85
Tabla 27. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LV06. ....	85
Tabla 28. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LL23. ....	86
Tabla 29. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LL24. ....	86
Tabla 30. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LL10. ....	87
Tabla 31. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LL15. ....	87
Tabla 32. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70BL11. ....	88
Tabla 33. Resultados de la implementación de la propuesta 1 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco. ....	90
Tabla 34. Resultados de la implementación de la propuesta 2 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco. ....	90
Tabla 35. Resultados de la implementación de la propuesta 1 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	91
Tabla 36. Resultados de la implementación de la propuesta 2 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	92
Tabla 37. Resultados de la implementación de la propuesta 3 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	93

Tabla 38. Resultados de la implementación de la propuesta 4 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	93
Tabla 39. Resultados de la implementación de la propuesta 5 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	94
Tabla 40. Resultados de la implementación de la propuesta 6 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	95
Tabla 41. Resultados de la implementación de la propuesta 7 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	96
Tabla 42. Resultados de la implementación de la propuesta 8 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	96
Tabla 43. Resultados de la implementación de la propuesta 9 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	97
Tabla 44. Resultados de la implementación de la propuesta 10 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	98
Tabla 45. Resultados de la implementación de la propuesta 11 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	99
Tabla 46. Resultados de la implementación de la propuesta 12 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	99
Tabla 47. Resultados de la implementación de la propuesta 13 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	100
Tabla 48. Resultados de la implementación de la propuesta 14 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	101
Tabla 49. Resultados de la implementación de la propuesta 15 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	101
Tabla 50. Resultados de la implementación de la propuesta 1C al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	102
Tabla 51. Resultados de la implementación de la propuesta 2C al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	103
Tabla 52. Costos de implementación para las ubicaciones técnicas mejoradas en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco. ....	104
Tabla 53. Evaluación de costos de la propuesta 2 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco. ....	105
Tabla 54. Evaluación de costos de la propuesta 1 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco. ....	105
Tabla 55. Costos de implementación para las ubicaciones técnicas mejoradas en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	106

Tabla 56. Evaluación de costos de la propuesta 15 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco. ....107

Tabla 57. Evaluación de costos de la propuesta combinada 2C al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco..... 108

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Recuperación de Químicos y Producción de Pulpa. ....	28
Figura 2. Diagrama de la Planta de Caustificación. ....	29
Figura 3. Diagrama del ciclo de vida y sub estados de una ubicación técnica con una bomba standby. ....	32
Figura 4. Diagrama del ciclo de vida y sub estados de una ubicación técnica sin bomba standby. ....	35
Figura 5. Diagrama esquemático de los componentes de la bomba. ....	36
Figura 6. Fallas dominantes en los sistemas de bombeo de lodos y de licor.....	42
Figura 7. Fallas dominantes en el sistema de bombeo. ....	50
Figura 8. Procedimiento para construir el modelo.....	57
Figura 9. Comportamiento de la confiabilidad en el tiempo del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco. ....	61
Figura 10. Simulación puntual de la disponibilidad de equipos y del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.....	62
Figura 11. Comportamiento de la confiabilidad en el tiempo del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	64
Figura 12. Simulación puntual de la disponibilidad de equipos y del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	65
Figura 13. Distribución de costos del estado actual en el sistema de .....	69
Figura 14. Distribución de costos del estado actual en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. ....	70
Figura 15. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70BL02. .	76
Figura 16. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70BL03. .	76
Figura 17. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LV05. .	77
Figura 18. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LV06. .	78
Figura 19. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LL23...	78
Figura 20. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LL24...	79
Figura 21. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LL10...	79
Figura 22. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LL15...	80
Figura 23. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70BL11. .	80

Figura 24. Diagrama lógico de decisiones .....82

Figura 25. Distribución de costos de la propuesta 2C para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. .... 109

Figura 26. Simulación puntual de la disponibilidad de equipos y del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal para la propuesta 2C. ....110

## ANEXOS

Anexo A. Tiempos de Operación y Clasificación de los Eventos de Acuerdo a los Modos de Falla para cada Ubicación Técnica .....	125
Anexo B. Graficas de Confiabilidad y Resultados de las Pruebas KS, Chi-cuadrado y Coeficiente de Correlación para cada Ubicación Técnica.....	141
Anexo C. Grafica de Probabilidad y Resultados de las Pruebas KS, Chi-cuadrado y Coeficiente de Correlación para los Tiempos Perdidos .....	156
Anexo D. Resultados de la Modelación para Cada Ubicación Técnica .....	157
Anexo E. Diagramas de Bloques Desarrollados para la Modelación de las Líneas de Bombeo en la Planta de Caustificación.....	165
Anexo F. Índice de Criticidad de la Ubicaciones Técnicas para la Modelación de las Líneas de Bombeo en la Planta de Caustificación .....	168
Anexo G. Tablas de Clasificación para Calcular el Número de Prioridad de Riesgo.....	169
Anexo H. Características de los Materiales de Liners e Impulsores .....	171
Anexo I. Índice de Criticidad de la Ubicaciones Técnicas para la Modelación de las Líneas de Bombeo en la Planta de Caustificación Implementando las Propuestas de Mejora.....	172

## INTRODUCCIÓN

Debido a las exigencias actuales de rentabilidad en las empresas al igual que la permanente búsqueda de proveer lugares seguros para el trabajo, las compañías han visto la necesidad de recurrir a herramientas de mejoramiento con el fin de alcanzar dichos objetivos.

Este proyecto de grado se enmarca dentro de la modelación de estados con el fin de establecer la condición actual de los sistemas de bombeo de una planta de caustificación respecto a su disponibilidad y confiabilidad. Esta modelación permitió evaluar propuestas de mejora que finalmente impactaron de manera positiva dichos indicadores y a la vez mejoró la rentabilidad de la empresa y permitió brindar un lugar más seguro para trabajar.

Para llevar a cabo el proyecto, inicialmente se recopiló la información consignada en el sistema de información de la compañía con el fin de establecer la tasa de falla de cada uno de los equipos estudiados. Posteriormente, se definió el mejor modelo para simular los diferentes estados de los equipos junto con los costos de mantenimiento e inspección.

Una vez hecho esto, se desarrolló el modelo que permitiera simular la disponibilidad y confiabilidad del sistema de bombeo junto con el estimado de costos para su mantenimiento. Igualmente, el modelo permitió identificar los equipos con menor confiabilidad y con mayor impacto en la disponibilidad del sistema, para los cuales se identificaron que componentes eran susceptibles de ser mejorados y se estimó la nueva confiabilidad de los equipos al implementar dichas mejoras.

Luego se generaron diversas propuestas de mejora al sistema de bombeo y se evaluó el retorno de inversión con el fin de conocer la viabilidad económica de las mismas.

## RESUMEN

El impacto negativo que tienen las fallas de las bombas centrifugas en las líneas de bombeo de la planta de caustificación en la Empresa XYZ. S.A.; que pertenece al sector de Pulpa y Papel, ha hecho necesario hacer un estudio que permita establecer cuál es el impacto real de las mismas sobre el desempeño global del sistema. Para esto se identificaron los modos de falla de los equipos que inciden en el bombeo de material y para cada equipo se halló su tasa de falla.

Una vez definidas las tasas de falla junto con los costos de mano de obra, de repuestos y de material no procesado, se modela la disponibilidad y la confiabilidad de las dos líneas de bombeo que son de interés en la planta de caustificación. Dicha modelación permite identificar los equipos que más inciden en el correcto funcionamiento de la planta y teniendo esto en cuenta se generan propuestas de mejora.

Posteriormente, cada propuesta de mejora se evalúa con el fin de establecer su viabilidad financiera hasta que se halla una solución que mejora la disponibilidad y la confiabilidad de la planta de caustificación.

Palabras Clave: Disponibilidad, Confiabilidad, Tasa de falla, Modos de falla, Análisis modal de fallos y efectos, Bomba centrifuga, Caustificación

## **ABSTRACT**

The negative impact that the failures of the centrifugal pumps have on the pumping lines in the recausticizing plant of the Empresa XYZ S.A.; which main activity is within the Pulp and Paper sector, have made it necessary to perform a study that allows to establish the real impact of such failures in the overall performance of the system. In order to do this, the failure modes of the involved equipment were identified and for each one a failure rate was defined.

Once these failure rates were known in conjunction with the labor, spare parts and non-process material costs, it was able to model the availability and reliability of the two pumping lines of interest within the recausticizing plant. The developed model allowed identifying the equipment that has major impact on the proper operation of the plant and taking this into account several improvement options were designed.

Afterwards, each option was assessed with the purpose of defining its financial feasibility till one of these is a proper solution that improves the availability and reliability of the recausticizing plant.

Key words: Availability, Reliability, Failure rate, Failure modes, Failure mode and effect analysis, centrifugal pump, Recasuticizing.

## **1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente el desempeño del sistema de bombeo de lodos en una planta de caustificación que está compuesto por: bombas centrifugas, motores eléctricos y tuberías, con sus accesorios, ha tenido un impacto negativo en la operación de la Empresa XYZ S.A. durante los últimos años al incrementar los costos de mantenimiento, las paradas programadas y no programadas, y la necesidad de reponer material no procesado. Debido a esto, se requiere establecer cuál es la disponibilidad y la confiabilidad actual de la planta de caustificación y qué medidas se pueden tomar con el fin de mejorarla, ya que de esta depende la capacidad de procesar la madera para producir pulpa y a la vez, producir el combustible empleado en la caldera de recuperación.

### **1.2. ALCANCES DEL TRABAJO DE GRADO**

Con el fin de establecer cuál es la disponibilidad y la confiabilidad del sistema de bombeo, se hizo un levantamiento de información basándose en los registros de falla que se tienen en el CMMS (Comuterized Maintenance Management System) para identificar los modos de falla de los equipos y su frecuencia. Posteriormente, se realizó un análisis de efectos y se estableció la severidad de cada uno de los modos de falla.

Una vez hecho esto, se desarrolló un modelo basado en diagramas de bloque que permitió establecer el nivel de disponibilidad actual y a la vez permitió calcular niveles de confiabilidad de acuerdo a las propuestas de mejora propuestas.

## **2. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Generar y evaluar propuestas para mejorar la disponibilidad del sistema de bombeo de la planta de caustificación con el fin de mejorar la rentabilidad.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar la causa raíz de los eventos de falla de los equipos estudiados y su gravedad.
- Determinar el modo de falla de los equipos que integran el sistema de bombeo.
- Establecer la condición actual de la planta de caustificación respecto a la confiabilidad de los equipos.
- Desarrollar un modelo que permita establecer el impacto de las fallas en el sistema de bombeo sobre la disponibilidad y la confiabilidad en la planta de caustificación.
- Evaluar diferentes propuestas de mejora de acuerdo a los puntos de mayor vulnerabilidad, evaluando sus beneficios en la operación.

### **2.3. RESULTADOS ESPERADOS**

- Tener caracterizados los modos de falla de los equipos estudiados.
- Disponer de propuestas estructuradas para mejorar los indicadores de operación de la planta.
- Definir un modelo que permita calcular la disponibilidad y la confiabilidad del sistema de bombeo para futuras condiciones, en las cuales se evalúen las propuestas.

### 3. MÉTODOS PARA ESTIMAR LA DISPONIBILIDAD Y LA CONFIABILIDAD

La confiabilidad es una de las medidas de desempeño que se puede calcular para un sistema o componente y se define como la probabilidad de que un ítem se desempeñe de acuerdo a lo requerido por un periodo de servicio fijo y bajo unas condiciones de entorno establecidas. En el caso de que los componentes sean objetos físicos, las propiedades de los mismos pueden cambiar, al igual que sus condiciones de entorno, por lo que la confiabilidad del componente o sistema también puede variar.<sup>1</sup>

Los métodos para estimar valores de confiabilidad se empezaron a gestar con el científico alemán Dr. Wernher Von Braun y el matemático Eric Pieruschka alrededor de 1940 al tratar de superar varios problemas de confiabilidad con el cohete V-1. Pieruschka ayudó a Von Braun a desarrollar el modelo de confiabilidad para el cohete y de esta manera se creó el primer documento para modelar la confiabilidad de un sistema. Posteriormente, la NASA junto con el crecimiento de la industria nuclear ayudó a madurar los modelos y el análisis en el campo de la confiabilidad, de tal manera que hoy en día, se cuenta con diversos métodos para estimar valores de disponibilidad, confiabilidad y otros indicadores para cuantificar el comportamiento de un sistema.<sup>2</sup>

#### 3.1. MIL STANDARD 217

Fue publicada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos en 1965 y fue creada para la estimación de la confiabilidad de equipos y sistemas electrónicos en el ámbito militar, con el fin de incrementar la confiabilidad de los equipos que se estaban diseñando. Existen dos formas con las que se puede estimar la confiabilidad con el estándar 217: predicción por medio del conteo de partes y predicción por medio del análisis de esfuerzos.

En 1996 el ejército de Estados Unidos anunció que se debía discontinuar el uso del estándar debido a que se había demostrado ser poco confiable y que su aplicación podría indicar predicciones erróneas de confiabilidad, por lo que actualmente el estándar 217 no se usa con frecuencia.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> BAZOVSKY, Igor. Reliability theory and practice. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc. 1961. 292 p.

<sup>2</sup> TORRELL, Wendy; AVELAR, Victor. Mean time between failures: explanation and standards. APC by Schneider Electric, white paper 78, rev 1, 2010. 10 p.

<sup>3</sup> Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment. West Bethesda: Naval Surface Warfare Centre, 2011. 522 p.

### **3.2. AMFE / AMFEC**

El análisis de modos de fallas y efectos (AMFE) es un proceso que se emplea para determinar el impacto que cada falla tiene sobre el desempeño del producto, con el fin de mejorar el diseño del mismo. El análisis puede incluir una instancia adicional al evaluar la severidad de cada uno de los modos de falla, para lo cual adopta el nombre de análisis de modos de fallas, efectos y criticidad (AMFEC). Estos métodos fuera de ser empleados como herramientas de diseño, también se pueden emplear para calcular la confiabilidad de un sistema.<sup>4</sup>

### **3.3. DIAGRAMA DE BLOQUES**

Un diagrama de bloque es un dibujo representativo y una herramienta de cálculo que se utiliza para modelar la disponibilidad y la confiabilidad de un sistema. La estructura del diagrama de bloques define la interacción lógica de las fallas dentro del sistema, ya que cada bloque puede representar un componente individual, un subsistema u otra falla representativa. El diagrama puede representar un sistema completo, un subsistema o una combinación de los dos que requiere un análisis de fallas, de confiabilidad o de disponibilidad. También sirve de herramienta de análisis para comprender como es la operación de cada elemento y su relación con la función del sistema, al igual que se puede identificar como cada elemento afecta la operación del sistema de una manera holística.<sup>5</sup>

### **3.4. ÁRBOLES DE FALLA**

El análisis de árboles de falla es una técnica que se desarrolló en Bell Telephone Laboratories con el fin de evaluar la seguridad de control de lanzamiento de los misiles nucleares Minuteman y posteriormente fue empleado para análisis de confiabilidad. Los árboles de falla pueden ayudar a precisar el camino de eventos; tanto de falla como de operación, que conllevan a una falla del sistema o a un evento no deseado. La confiabilidad se calcula al convertir un árbol de falla en una serie equivalente de ecuaciones; esto se hace por medio del álgebra de eventos o álgebra Booleana.<sup>6</sup>

---

<sup>4</sup> MCDERMOTT, Robin; MIKULAK, Raymond; BEAUREGARD, Michael. The basics of FMEA. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 90 p.

<sup>5</sup> RAUSAND, Marvin; HØYLAND, Arnljot. System reliability theory – Models, statistical methods and applications. 2 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 636 p.

<sup>6</sup> ROBERTS, Norman; VESELY, William; HAASL, David; GOLDBERG, Francine. Fault tree handbook. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981.

### **3.5. CADENAS DE MARKOV**

La modelación con cadenas de Markov provee la habilidad de analizar sistemas complejos y también son conocidos como diagramas de espacio de estados o gráficas de estado. El espacio de estados se define como una colección de todos los estados que puede tener un sistema y a diferencia de los diagramas de bloque, las gráficas de espacio de estados proveen una representación más precisa del sistema.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> FUQUA, Norman. The applicability of Markov analysis methods to reliability, maintainability and safety. Selected Topics in Assurance Related Technologies, 2003, vol. 10, No. 2. p. 1-8.

#### 4. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

Con el fin de realizar un modelamiento de la confiabilidad de un sistema, este usualmente se debe descomponer en las partes que lo componen. El modelo debe indicar la relación de las fallas de sus componentes o subsistemas respecto al comportamiento del sistema. Para esto el estado del sistema se expresa en términos de los estados de sus componentes y existen dos formas de estudio:

- Progresivo, en el cual al iniciar con los eventos de falla de cada componente, se estima la falla del sistema como consecuencia de los mismos.
- Jerárquico, se inicia a nivel del sistema y el comportamiento del mismo se relaciona con las fallas de los subsistemas y estos con las fallas de sus componentes.

De cualquiera de las dos formas se puede vincular el desempeño del sistema con el de sus componentes de manera cuantitativa y cualitativa. Un análisis cualitativo da como resultado la relación lógica entre los componentes y con un análisis cuantitativo se obtiene una medida del desempeño del sistema.

Las relaciones lógicas se pueden expresar de manera gráfica, para lo cual los métodos más empleados son los diagramas de bloques y los árboles de falla. En los diagramas de bloque las relaciones lógicas indican la condición y secuencia bajo la cual el sistema cumple su misión, mientras que en los árboles de falla se establecen las relaciones y condiciones bajo las cuales el sistema falla debido a la falla de sus componentes. También existen otro tipo de métodos para establecer relaciones gráficas como lo son: árboles de eventos, diagramas binarios, árboles de causa efecto, etc.

La modelación de confiabilidad se basa en el supuesto de que cada componente o sistema solamente puede tener dos estados, completamente operativo o en falla; por lo tanto el modelo se considera de dos estados. No obstante, se han considerado modelos con múltiples estados, que son útiles para analizar condiciones intermedias; dichos modelos son diagramas de bloques y árboles de falla dinámicos.

Estos modelos dinámicos también permiten analizar configuraciones empleadas para mejorar la confiabilidad de los sistemas, como lo son equipos en standby y/o distribución de carga. Estas condiciones solo podrían ser analizadas con los métodos de diagramas de bloques y árboles de falla mientras se garantice la independencia de eventos para cada componente en el sistema; es decir, que la

falla de un componente no afecta la tasa de falla de los demás componentes. Con los modelos dinámicos se pueden simular condiciones de equipos en standby, pero no condiciones de distribución de carga, para lo cual se deben emplear cadenas de Markov.<sup>8</sup>

Teniendo en cuenta lo anterior, los modelos empleados en la modelación de confiabilidad se pueden dividir en dos grupos: no dinámicos y modelos de espacio de estados (dinámicos). Los modelos no dinámicos se resuelven por medio de técnicas combinatorias mientras que los modelos de espacio de estados se deben resolver por medio de cadenas de Markov o similares, como lo son las redes de Petri. Otros tipos de modelos denominados híbridos emplean un alto nivel de descripción matemática formal que resulta conveniente ya que reduce la complejidad del modelo.

#### **4.1. MODELOS NO DINÁMICOS**

Los modelos no dinámicos clásicos son:

- Diagramas de bloque con configuraciones en paralelo y/o en serie.
- Gráficas de confiabilidad.
- Árboles de falla sin repetición de eventos.
- Árboles de falla con repetición de eventos.

Todos los modelos tienen la similitud en que establecen la condición en la que falla el sistema en términos de la relación estructural entre los componentes del sistema. De hecho estos modelos son solucionados usualmente al recopilar la estructura funcional del sistema; que es la combinación de eventos que conlleva a que el sistema falle y se resuelven de manera analítica empleando técnicas como: algebra booleana, convolución y órdenes estadísticas. En el modelo a cada uno de los componentes se le puede asignar una probabilidad de falla, una tasa de falla, una distribución de falla o una disponibilidad instantánea y al asumir independencia estadística, se puede emplear el modelo para estimar la confiabilidad (sin reparaciones), confiabilidad puntual y en estado estable, al igual que el tiempo promedio para que falle el sistema.<sup>9,10</sup>

---

<sup>8</sup> MANNO, Gabriele. Reliability modeling of complex systems: an adaptive transition system approach to match accuracy and efficiency. Tesi di dottorato. Dottorato di Ricerca in Matematica Applicata all'Ingegneria. Catania: Università degli studi di Catania. 2011. 189 p.

<sup>9</sup> KECECIOGLU, Dimitri. Reliability engineering handbook, Lancaster: DEStech Publications, Inc., 2002, vol 2. 550 p.

<sup>10</sup> VERMA, Ajit; AJIT; Srividya; KARANKI, Durga. Reliability and safety engineering. London: Springer-Verlag London Limited, 2010. 535 p.

## 4.2. MODELOS DINÁMICOS

El desarrollo de los modelos dinámicos se debió a que la independencia de los componentes de un sistema no era una condición real. A raíz de esto, los modelos de diagramas de bloques y de árboles de falla no pueden ser empleados para modelar de manera acertada el comportamiento del sistema. Inclusive, los modelos no dinámicos no pueden modelar correctamente mecanismos de fallas dependientes como lo son: condiciones de operación cambiantes, manejo de repuestos, etc. Es debido a la necesidad de obtener una mejor estimación de la confiabilidad al elaborar modelos de sistemas sin los supuestos de independencia y modelar por medio de cadenas de Markov.

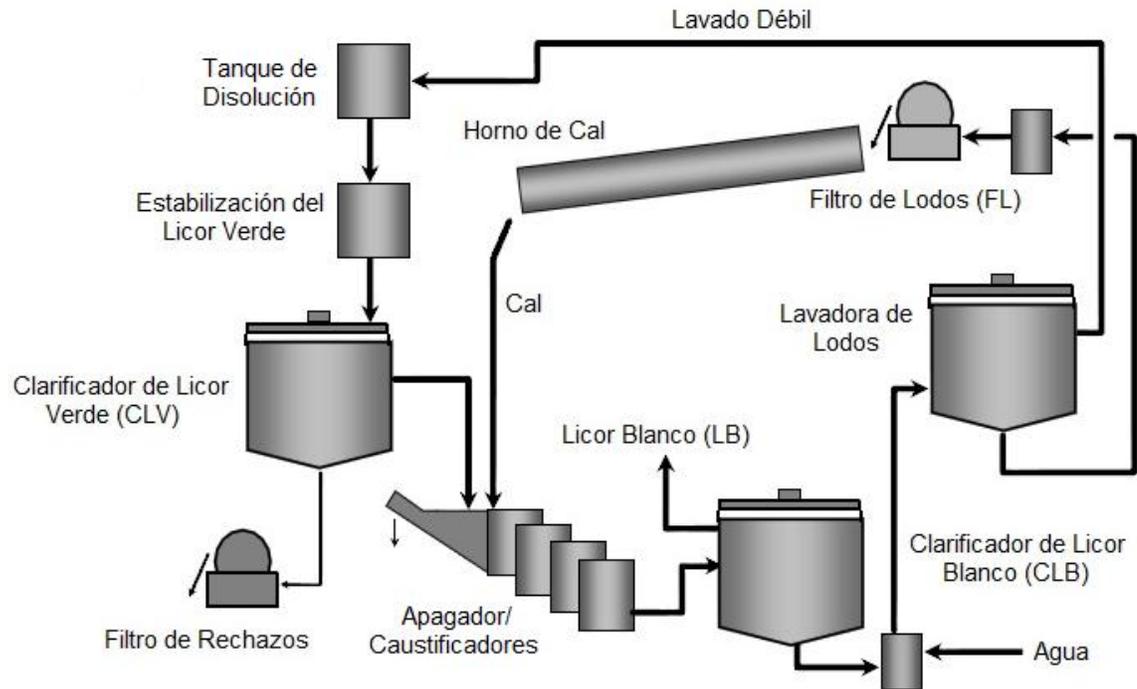
Las cadenas de Markov son extremadamente flexibles y pueden capturar de manera precisa las fallas de acuerdo a los mecanismos de falla, también pueden mantener registro del número de recursos que se encuentran operativos, o establecer el periodo de recuperación de cada recurso y definir la ubicación de los recursos a las operaciones requeridas. Las transiciones están definidas por el cambio de un estado a otro y representan el cambio de estado del sistema de acuerdo a los eventos que hayan ocurrido.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Ibid



Figura 2. Diagrama de la Planta de Caustificación.



Fuente: SANCHEZ, Dale. Reausticizing – principles and practice. TAPPI Kraft Recovery Course, 2012. p. 1-30.

El Licor Blanco (LB) se produce del fundido generado en la caldera de recuperación. Dicho fundido es estabilizado a Licor Verde (LV), posteriormente pasa por los apagadores y caustificadores, para producir LB y carbonado de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). El  $\text{CaCO}_3$  se calcina en el Horno de Cal para producir cal viva. El  $\text{CaCO}_3$  es lavado para reducir su contenido químico antes de ser alimentado al Horno de Cal y el licor lavado (lavado débil) se recicla y es enviado al tanque de disolución de la caldera de recuperación para producir LV (Figura 2).

La planta de caustificación juega un rol crítico dentro de la operación que se tiene para la producción de papel ya que es la que permite la recuperación de los químicos e indirectamente permite la generación de vapor y energía en la caldera de recuperación y en un turbogenerador, respectivamente.

Debido al ciclo de inspección y de mantenimiento de la caldera de recuperación y a la dependencia de ésta por parte de la planta de caustificación para operar, solamente se cuenta con un periodo de diez a doce días cada año para inspeccionar y hacer el mantenimiento necesario a los tanques de almacenamiento, clarificadores, apagadores, caustificadores, filtros y otros

equipos que no se pueden intervenir durante la operación de la planta. Debido a que se tiene acceso a las tuberías y bombas que componen el sistema de bombeo de la planta de caustificación durante su operación, estos no se incluyen dentro de la inspección y mantenimiento anual al detener la caldera de recuperación. Por lo que es necesario garantizar una operación continua de los equipos que componen el sistema de bombeo. Dicha necesidad se ve traducida en un alto requerimiento de disponibilidad y confiabilidad de dichos equipos, para lo que se ha desarrollado un plan de mantenimiento para cada una de las bombas, el cual consiste en inspecciones periódicas y el posterior cambio de componentes cuando se detecta una falla.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> SANCHEZ, Dale. Reausticizing – principles and practice. TAPPI Kraft Recovery Course, 2012. p. 1-30.

## **6. SISTEMA DE BOMBEO**

### **6.1. CICLO DE VIDA DE LAS BOMBAS**

En el sistema de bombeo de la planta de caustificación existe una combinación de ubicaciones que poseen dos unidades de bombeo: una bomba titular que normalmente está operando y otra bomba standby que está disponible para entrar en operación cuando se necesite. También existen otras ubicaciones que no poseen una bomba de standby y que la función de bombear depende únicamente de una sola unidad.

Teniendo en cuenta estas dos instalaciones existen diversos estados en los cuales se pueden encontrar; dichos estados indican la condición de la bomba independiente de si está operando o no. Dichos estados se describen a continuación.

#### **6.1.1. Ubicación con bomba standby.**

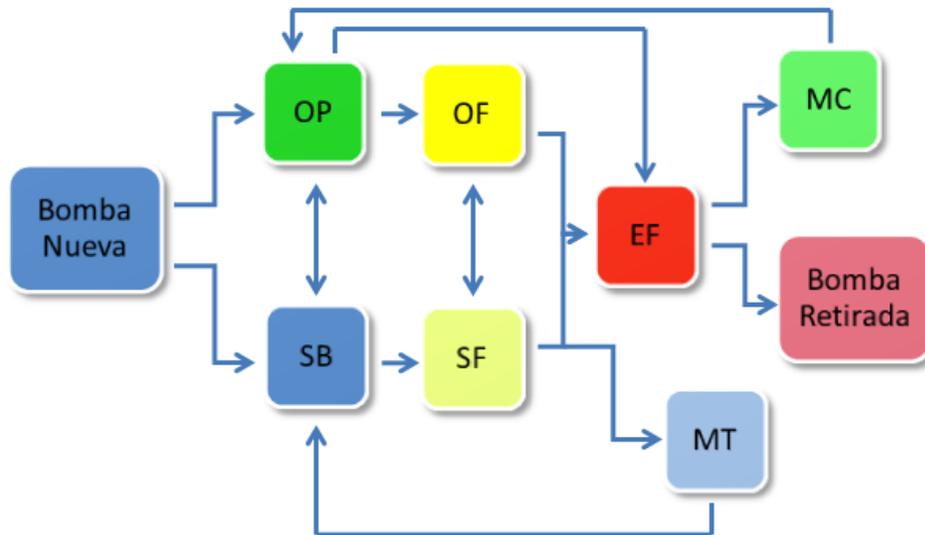
El ciclo de vida de una bomba que está instalada en una ubicación con bomba standby, es la de ser adquirida e instalada, posteriormente esta entra en operación durante un periodo de tiempo sin que sea detectada una falla (estado OP). Esta bomba puede ser apagada con el fin de que entre a operar la bomba standby; por lo tanto, la bomba en cuestión cambia su estado de OP a SB, siendo este cambio de estado reversible en cualquier momento. Una vez se detecta una falla y se define que el riesgo de seguir operando la bomba en esta condición es tolerable, el estado cambia a OF. Incluso bajo este estado, se puede apagar la bomba dejándola disponible para ser operada en el futuro, siendo este estado SF y colocando en operación la bomba standby. De manera similar, se puede encender y apagar la bomba en estudio siendo los estados OF y SF reversibles en cualquier momento. Durante este periodo el departamento de mantenimiento planea y programa la intervención con el fin de corregir la falla detectada.

Cuando la falla se ha desarrollado a un estado en el cual el riesgo de operar la bomba es inaceptable para la seguridad de las personas, la integridad de los equipos y/o la estabilidad del proceso, la bomba se apaga y se cataloga con un estado EF. En algunos casos la falla avanza hasta un estado de deterioro que se vuelve la causa de detener la bomba, inclusive antes que el operario y/o los tecnólogos de condición se den cuenta y se pueda tomar una acción preventiva con el fin de mitigar las consecuencias de la falla.

No obstante, cuando la falla se ha detectado de manera oportuna y en consecuencia la bomba ha sido apagada antes de que se presente una falla catastrófica, se pueden planear mejor las acciones de mantenimiento para restablecer su condición operativa, que si se requiriera intervenir la bomba luego de una falla catastrófica. En otras palabras, antes de que la bomba cambie su estado de OF a EF, las acciones correctivas son más fáciles y efectivas, este estado es el de MT. Esta intervención se puede desarrollar en la planta o en el taller, dependiendo de la naturaleza de la avería y de los recursos disponibles. Sin embargo, no siempre es posible prevenir la condición EF debido a falta de recursos; en el caso que dicha falla se haya detectado previamente, o debido a no detectar la falla debido a la naturaleza del modo de falla. En ocasiones se dan fallas aleatorias y las acciones correctivas requieren más recursos y tiempo en comparación con las intervenciones en el estado MT; por esta razón dicho estado se clasifica como MC. El objetivo final de estos estados de mantenimiento es el de retornar la bomba a una condición confiable en estados OP o SB (Tabla 1).

Finalmente, cuando una bomba ha pasado por muchos ciclos de mantenimiento y no es económicamente viable continuar manteniéndola, se da de baja con el fin de adquirir una bomba nueva que realice las mismas funciones con un costo de ciclo de vida menor (Figura 3).

Figura 3. Diagrama del ciclo de vida y sub estados de una ubicación técnica con una bomba standby.



Fuente: HERNANDEZ, Juan. Impact of the pump systems availability in the plant maintenance: model development. Master of Science dissertation. Manchester: The University of Manchester. Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2006. 204 p.

Tabla 1. Estados de una bomba con standby.

Estado	Sub-Estado	Descripción	Ubicación
Operando	OP	La bomba esta desempeñando su función principal de bombear fluido de acuerdo a los requerimientos de operación (caudal y presión) sin riesgo de averías a otros equipos o lesiones a personas.	Planta
	OF	La bomba se encuentra en operación de acuerdo a los requerimientos de operación con al menos una falla detectada, con un riesgo admisible.	
No Operando	SB	Bomba standby en la cual no se ha detectado ningun tipo de falla y esta disponible para entrar en operación.	
	SF	Bomba standby en la cual se ha detectado una falla pero esta disponible para entrar en operación, mientras el nivel de riesgo sea admisible.	
	EF	La unidad no puede ser operada debido a que no puede desempeñar su función principal o el riesgo de operación no es tolerable.	
	MT	Bomba que esta siendo intervenida para inspección o mantenimiento de manera planeada, por lo que no esta disponible para operación.	
	MC	La bomba esta siendo intervenida debido a una falla aleatoria.	Taller

Fuente: HERNANDEZ, Juan. Impact of the pump systems availability in the plant maintenance: model development. Master of Science dissertation. Manchester: The University of Manchester. Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2006. 204 p.

### 6.1.2. Ubicación sin bomba standby

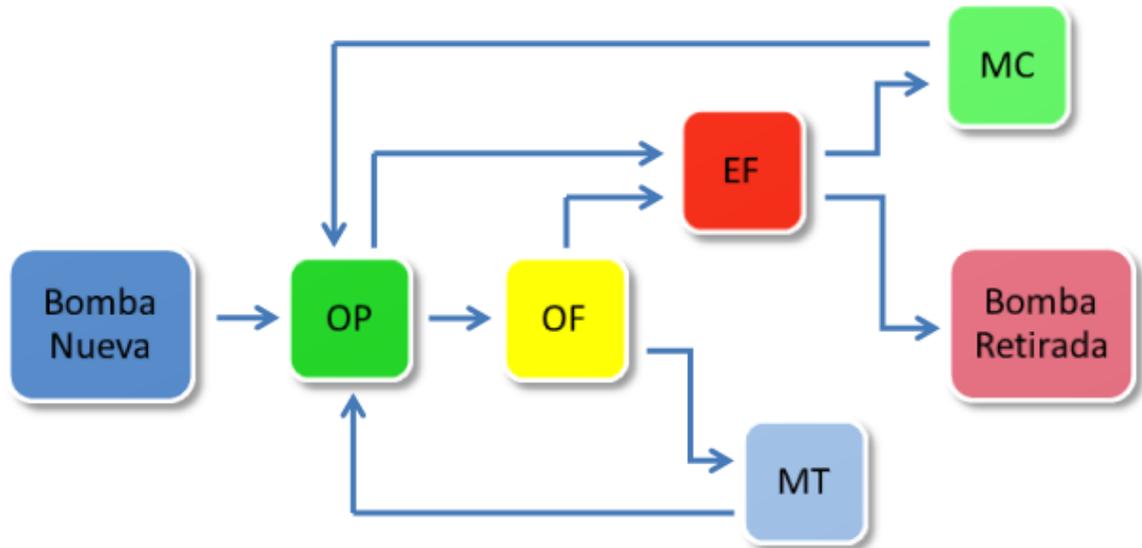
El ciclo de vida de una bomba que está instalada en una ubicación sin bomba standby, es la de ser adquirida e instalada, posteriormente esta entra en operación durante un periodo de tiempo sin que sea detectada una falla (estado OP). Una vez se detecta una falla y se define que el riesgo de seguir operando la bomba en esta condición es tolerable, el estado cambia a OF. Durante este periodo el departamento de mantenimiento planea y programa la intervención con el fin de corregir la falla detectada.

Cuando la falla se ha desarrollado a un estado en el cual el riesgo de operar la bomba es inaceptable para la seguridad de las personas, la integridad de los equipos y/o la estabilidad del proceso, la bomba se apaga y se cataloga con un estado EF. En algunos casos la falla avanza hasta un estado de deterioro que se vuelve la causa de detener la bomba, incluso antes que el operario y/o los tecnólogos de condición se den cuenta y se pueda tomar una acción preventiva con el fin de mitigar las consecuencias de la falla.

No obstante, cuando la falla se ha detectado de manera oportuna y en consecuencia la bomba ha sido apagada antes de que se presente una falla catastrófica, se pueden planear mejor las acciones de mantenimiento para restablecer su condición operativa, que si se requiriera intervenir la bomba luego de una falla catastrófica. En otras palabras, antes de que la bomba cambie su estado de OF a EF, las acciones correctivas son más fáciles y efectivas, este estado es el de MT. Esta intervención se puede desarrollar en la planta o en el taller, dependiendo de la naturaleza de la avería y de los recursos disponibles. Sin embargo, no siempre es posible prevenir la condición EF debido a falta de recursos; en el caso que dicha falla se haya detectado previamente, o debido a no detectar la falla debido a la naturaleza del modo de falla. En ocasiones se dan fallas aleatorias y las acciones correctivas requieren más recursos y tiempo en comparación con las intervenciones en el estado MT; por esta razón dicho estado se clasifica como MC. El objetivo final de estos estados de mantenimiento es el de retornar la bomba a una condición confiable en estado OP (Tabla 1).

Finalmente, cuando una bomba ha pasado por muchos ciclos de mantenimiento y no es económicamente viable continuar manteniéndola, se da de baja con el fin de adquirir una bomba nueva que ejecute las mismas funciones con un costo de ciclo de vida menor (Figura 4).

Figura 4. Diagrama del ciclo de vida y sub estados de una ubicación técnica sin bomba standby.

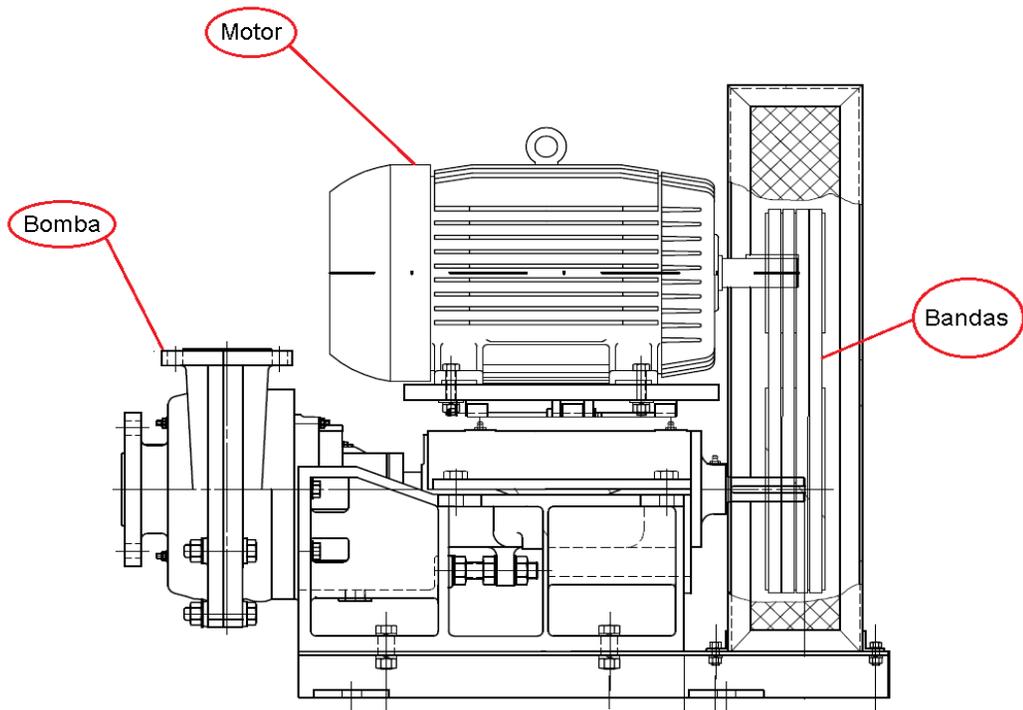


Fuente: HERNANDEZ, Juan. Impact of the pump systems availability in the plant maintenance: model development. Master of Science dissertation. Manchester: The University of Manchester. Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2006. 204 p.

## 6.2. MODOS DE FALLA DE LAS BOMBAS

A continuación se identifican los componentes de transmisión de las ubicaciones técnicas que componen el sistema de bombeo. De manera general las ubicaciones técnicas son similares en cuanto a la disposición y componentes, por lo que se realiza un estudio general de modos de falla para cada uno de los componentes. En la Figura 5 se pueden apreciar los componentes generales de una bomba.

Figura 5. Diagrama esquemático de los componentes de la bomba.



Fuente: El autor.

Igualmente en las Tablas 2, 3 y 4 se listan de manera general los modos de falla de cada uno de los componentes de la bomba:

Tabla 2. Modos de falla de una bomba centrífuga.

Sub-Sistema	Componente	Modo de Falla
Hidráulico	Impulsor	Impulsor Desgastado
		Impulsor Suelto
		Impulsor Atascado
		Impulsor Corroído
	Voluta	Liner Desgastado
		Liner Corroído
Sellado	Sello Mecánico	Fuga por el Sello
	Empaquetadura	Fuga por el Empaque
Transmisión de Potencia	Eje	Eje Fracturado
	Rodamientos	Falla de Rodamientos

Fuente: Slurry pump handbook. 5 ed. Weir Slurry Group, Inc., 2009. 56 p.

Tabla 3. Modos de falla de bandas y poleas.

Sub-Sistema	Componente	Modo de Falla
Transmisión de Potencia	Bandas	Bandas Desgastadas
		Bandas Rotas
	Poleas	Poleas Desalineadas
		Poleas Desgastadas
		Poleas Rotas

Fuente: Slurry pump handbook. 5 ed. Weir Slurry Group, Inc., 2009.

Tabla 4. Modos de falla de un motor eléctrico.

Sub-Sistema	Componente	Modo de Falla
Eléctrico	Alimentación	Falla en la Alimentación
	Estator	Falla del Bobinado
	Rotor	Barra(s) Rota(s)
Mecánico	Rodamientos	Falla de Rodamiento(s)
	Eje	Eje Fracturado
	Ventilador	Falla del Ventilador

Fuente: NESBITT, Brian. Handbook of pumps and pumping. Burlington: Elsevier Inc., 2006.

## **7. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS**

Para iniciar la recopilación de datos del sistema de bombeo en la planta de caustificación, fue necesario identificar cuáles son las líneas de bombeo que esta posee, al igual que las ubicaciones técnicas, los recipientes y otros equipos que componen cada una de las líneas. Posteriormente, se estudia la información descargada del sistema de información de la empresa y se clasifica cada uno de los eventos de acuerdo a los modos de falla descritos en el capítulo 4. Luego se establece la función de probabilidad de falla para cada una de las ubicaciones técnicas, al igual que se estudian los tiempos de reparación y puesta en servicio de las mismas luego de una intervención de mantenimiento.

### **7.1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA A ESTUDIAR**

#### **7.1.1. Líneas de bombeo**

En la planta de caustificación existen dos productos de interés, que son los lodos que alimentan el Horno de Cal y el Licor Blanco que se emplea en Plantas de Pulpa. Para la producción de dichos productos se emplean equipos como: recipientes, tuberías, agitadores, rastrillos, motores eléctricos y bombas centrifugas. No obstante, dentro del estudio de disponibilidad solo se tienen en cuenta las tuberías, motores eléctricos y bombas centrifugas, debido a que los recipientes no registran ninguna falla en un periodo de 7 años y los equipos restantes no son indispensables para garantizar el bombeo de material en cada una de las líneas.

#### **7.1.2. Listado de las unidades de bombeo**

Para iniciar la recopilación de datos de falla, primero fue necesario hacer un listado de los equipos que componen cada una de las líneas de bombeo, para lo cual se actualizó el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) de la planta de caustificación. Posteriormente, se trazaron las diferentes líneas de bombeo y de esta manera se pudo identificar que equipos y recipientes hacían parte de las diferentes líneas. En las Tablas 5 y 6 se encuentra el listado de equipos por línea de bombeo.

Tabla 5. Equipos de la línea de bombeo del Clarificador de Licor Verde al Tanque de Almacenamiento de Licor Blanco.

Ubicación Técnica	Tipo de Equipo	Nombre del Equipo
PR70LV01	Clarificador	Clarificador de Licor Verde
PR70LV05	Bomba	Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde
PR70LV06	Bomba	Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde
PR70LV07	Tanque	Tanque de Almacenamiento de Licor Verde
PR70LV08	Bomba	Bomba 1 del Tanque de Licor Verde
PR70LV09	Bomba	Bomba 2 del Tanque de Licor Verde
PR70LV10	Bomba	Bomba de Licor Verde al Pasto-ducto
PR70CA06	Apagador	Apagador No. 1
PR70CA10	Bomba	Bomba del Pasto-ducto
PR70CA12	Apagador	Apagador No. 2
PR70CA16, 18, 26	Caustificador	Caustificador No. 1, 2 y 3, respectivamente
PR70BL01	Tanque	Colector Maestro
PR70BL02	Bomba	Bomba 1 del Colector Maestro
PR70BL03	Bomba	Bomba 2 del Colector Maestro
PR70BL04	Clarificador	Clarificador de Licor Blanco
PR70BL07	Tanque	Colector de Licor Blanco
PR70BL08	Bomba	Bomba 1 del Clarificador de Licor Blanco
PR70BL09	Bomba	Bomba 2 del Clarificador de Licor Blanco
PR70BL12	Tanque	Tanque de Almacenamiento de Licor Blanco

Fuente: Empresa XYZ S.A. – Plano P&D Caustificación y Manejo de Lodos (2012).

Tabla 6. Equipos de la línea de bombeo del Clarificador de Licor Verde al Horno de Cal.

Ubicación Técnica	Tipo de Equipo	Nombre del Equipo
PR70LV01	Clarificador	Clarificador de Licor Verde
PR70LV05	Bomba	Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde
PR70LV06	Bomba	Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde
PR70LV07	Tanque	Tanque de Almacenamiento de Licor Verde
PR70LV08	Bomba	Bomba 1 del Tanque de Licor Verde
PR70LV09	Bomba	Bomba 2 del Tanque de Licor Verde
PR70LV10	Bomba	Bomba de Licor Verde al Pasto-ducto
PR70CA06	Apagador	Apagador No. 1
PR70CA10	Bomba	Bomba del Pasto-ducto
PR70CA12	Apagador	Apagador No. 2
PR70CA16,18,26	Caustificador	Caustificador No. 1, 2 y 3, respectivamente
PR70BL01	Tanque	Colector Maestro
PR70BL02	Bomba	Bomba 1 del Colector Maestro
PR70BL03	Bomba	Bomba 2 del Colector Maestro
PR70BL04	Clarificador	Clarificador de Licor Blanco
PR70BL11	Bomba	Bomba de Lodos del Clarificador de Licor Blanco
PR70BL15,16	Filtro	Filtro de Lodos #1
PR70BL18,19	Filtro	Filtro de Lodos #2
PR70LL20	Tanque	Tanque de Lodos
PR70LL23	Bomba	Bomba 1 del Tanque de Lodos
PR70LL24	Bomba	Bomba 2 del Tanque de Lodos
PR70LL13	Tanque	Tanque de Lavado de Lodos – 1ra Etapa
PR70LL15	Bomba	Bomba de Lodos – 1ra Etapa
PR70LL06	Tanque	Tanque de Mezcla de Lodos – 2nda Etapa
PR70LL08	Tanque	Tanque de Lavado de Lodos – 2nda Etapa
PR70LL10	Bomba	Bomba de Lodos – 2nda Etapa

Fuente: Empresa XYZ S.A. – Plano P&D Caustificación y Manejo de Lodos (2012).

### **7.1.3. Clasificación de las fallas**

Una vez definidos los equipos que se deben estudiar, se procedió a evaluar la información que se encontraba consignada en el sistema de información basada en los eventos reportados. Igualmente para poder clasificar cada evento de acuerdo a su modo de falla se estudiaron las órdenes de trabajo junto con las acciones documentadas en cada evento. Dicha documentación de los avisos en el sistema de información solo se da a partir del 01 de Enero de 2005, por lo que se tomó como muestra de estudio los eventos comprendidos desde esta fecha hasta el 31 de Diciembre de 2011.

Debido a que se debe establecer cuál es la disponibilidad de cada ubicación técnica para cumplir su función, también se seleccionan las fallas que implican detener la operación del conjunto motor-bomba con el fin de intervenirlo o que debido a la gravedad de la falla, no es operacional. Es decir que de acuerdo a lo establecido previamente, la ubicación técnica pasa a un estado MT o EF.

### **7.1.4. Tiempo de operación de los equipos**

Debido a que no se tiene un sistema para registrar los tiempos de operación de cada una de las ubicaciones técnicas, este se asume que es el periodo en el cual no se registran eventos de falla en el sistema de información que impliquen que el conjunto motor-bomba se encuentre en un estado MT o EF. Esta suposición se basa en los siguientes hechos:

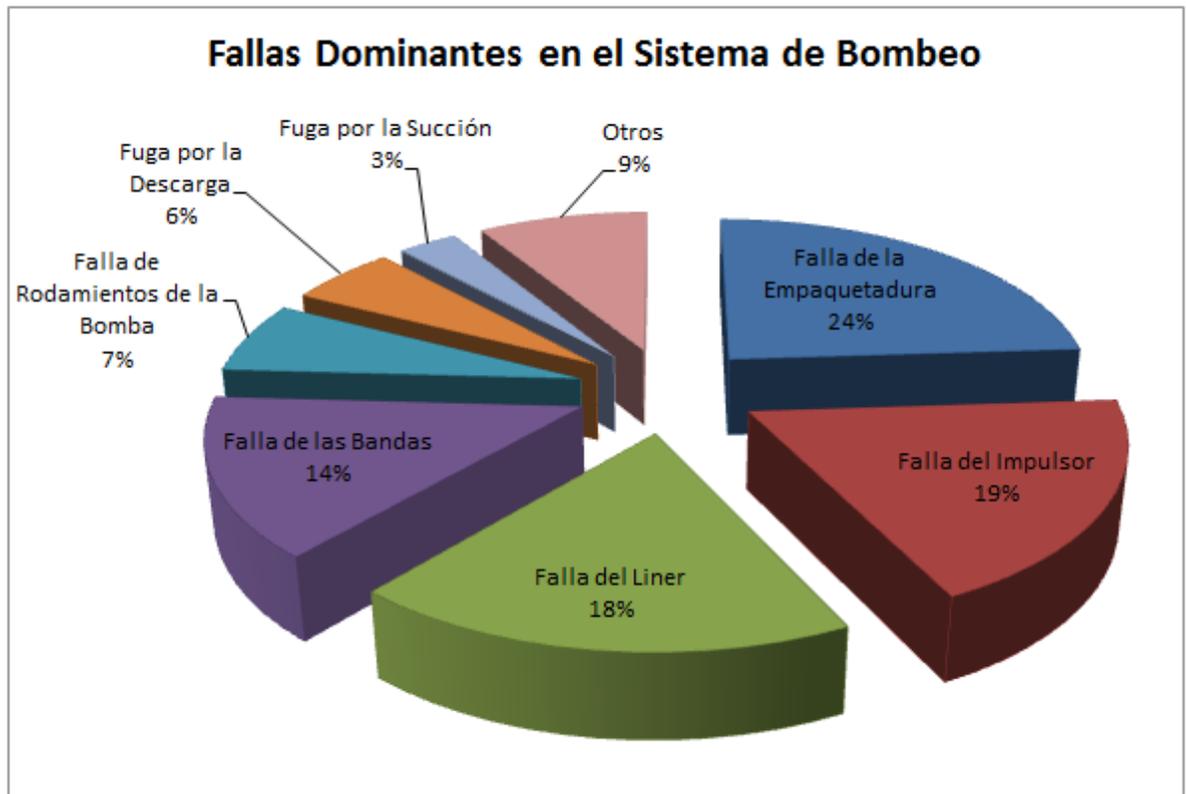
- Tan pronto como una ubicación técnica con standby se encuentra en un estado MT o EF, el conjunto motor-bomba standby inmediatamente entra en operación y se inician las actividades para restaurar la condición operativa de la ubicación técnica que ha fallado.
- Tan pronto como una ubicación técnica sin standby se encuentra en un estado MT o EF, se inician las actividades para restaurar la condición operativa de la misma.

Los datos de cada una de las ubicaciones técnicas se pueden ver en el Anexo A págs. 125 a 140.

### **7.1.5. Modos de falla dominantes**

Con la información recopilada y clasificada en el Anexo A págs. 125 a 140, se pueden identificar cuales modos de falla son los más dominantes entre los equipos estudiados. En la Figura 6 se puede ver de manera gráfica la distribución y porcentaje de cada modo de falla para los equipos estudiados.

Figura 6. Fallas dominantes en los sistemas de bombeo de lodos y de licor.



Fuente: Empresa XYZ S.A. – Muestreo tomado entre 01.01.2005 a 31.12.2011.

En la gráfica se puede observar que los modos de falla que contribuyen a más del 80% del total son:

- Falla de la empaquetadura.
- Falla del impulsor.
- Falla del liner.
- Falla de las bandas.
- Falla de los rodamientos de la bomba.

Igualmente, se debe prestar especial atención a que más del 80% de las fallas se deben a componentes de las bombas.

## **7.2. TIPO DE DATOS EN ESTUDIOS DE CONFIABILIDAD**

La mayoría de datos empleados en la estimación de la probabilidad de vida de un componente, normalmente se le llaman “datos completos”. Esto significa que el valor de cada unidad en la muestra ha sido observado o se conoce. No obstante, en muchos casos los datos presentan una incertidumbre respecto a la precisión de ocurrencia de un evento. Los datos que presentan dicha incertidumbre respecto a la precisión de cuando ocurrió un evento se les cataloga como “datos sesgados”.

### **7.2.1. Datos completos**

El tener datos completos significa que el valor de vida para cada unidad ha sido observado o se conoce. Por ejemplo, si se tuviese que calcular la nota promedio para un examen que tomaron diez estudiantes, el tener datos completos consistiría en conocer la nota de cada uno de los estudiantes. De manera similar, en el caso de datos de falla de un equipo, la muestra estaría compuesta de todos los datos de falla de cada uno de los equipos que integran la muestra.

### **7.2.2. Datos sesgados**

Al analizar datos de falla, todas las unidades de la muestra puede que no hayan fallado o no se conocen con precisión los tiempos de falla de cada una de las unidades; este tipo de datos se denominan “datos sesgados”.<sup>13</sup>

## **7.3. ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLA**

### **7.3.1. Supuestos**

Para la estimación de la probabilidad de falla de cada una de las ubicaciones técnicas, se tienen que tener en cuenta los siguientes supuestos:

- Cuando una bomba o motor eléctrico falla, se identifican que componentes han fallado y se cambian, restaurando la condición del equipo a nueva o mejor que nueva.
- Todas las fallas del equipo fueron consignadas en el sistema de información y corresponden a la ubicación técnica bajo la cual se reportaron.

---

<sup>13</sup> Op cit. RAUSAND, Marvin, et al. System reliability theory – Models, statistical methods and applications.

- La descripción del evento y la documentación de las acciones son suficientes para identificar el principal modo de falla y los secundarios.

Teniendo en cuenta lo anterior se establece que los datos empleados para la estimación de la probabilidad de falla para cada ubicación técnica son datos completos.

### **7.3.2. Estimación de la probabilidad de falla para cada ubicación técnica**

Para la estimación de la probabilidad de falla de cada ubicación técnica se empleó el programa comercial Weibull++ v.7 para hacer el ajuste de datos. Este programa tiene como criterios para establecer y evaluar el ajuste de cada distribución los siguientes parámetros:

- Prueba modificada de Kolmogorov-Smirnov (KS).
- Prueba de Chi-cuadrado.
- Coeficiente de correlación.

De acuerdo al tipo de datos empleados se puede elegir entre dos métodos para la estimación de la función de probabilidad, los cuales son:

- Mínimos cuadrados (Rank regression).
- Máxima verosimilitud (Maximum likelihood estimation).

El método de mínimos cuadrados es bueno para probabilidades de falla que puedan ser ajustadas a una línea; e igualmente, la mayoría de las distribuciones empleadas en análisis de tiempos de falla pueden ser ajustadas a una línea.

Este método también provee una buena medida respecto al ajuste de los datos a través del coeficiente de correlación. El método de mínimos cuadrados da mejores resultados para la estimación de la distribución de falla cuando se tienen datos completos y debido a esto, se emplea para el análisis de los datos en el Anexo A págs. 125 a 140.

En el Anexo B págs. 141 a 155 se pueden consultar las gráficas en las que se obtiene la distribución de falla junto con los resultados de las pruebas KS, Chi-cuadrado y el coeficiente de correlación. Debido a que el interés de la planta es visualizar la confiabilidad de sus equipos, las gráficas del Anexo B págs. 141 a 155 se presentan de esta manera junto con líneas que establecen intervalos de confianza del 95%.

#### **7.4. TIEMPO DE PUESTA EN SERVICIO (REPARACIÓN)**

Teniendo en cuenta los siguientes supuestos:

- Todos los conjuntos motor-bomba estudiados son constructivamente similares en tamaño y en facilidad de reparación.
- El tiempo que se toma para retornar una ubicación técnica a un estado operativo es similar para todas las ubicaciones técnicas.

Se recopilaron datos de tiempos perdidos y de no-disponibilidad de cada ubicación técnica; no obstante, se observó que no siempre se registran dichos tiempos. A pesar de esto, al implementar los supuestos listados se consideró que todos los conjuntos de motor-bomba presentan un comportamiento similar en cuanto al tiempo de reparación y puesta en servicio, por lo que se tomó la muestra de los datos recopilados como el comportamiento típico de la población de los equipos y se estimó la función de densidad para dichos datos (Anexo C pág. 156).

La función que mejor describe el comportamiento del tiempo de reparación y puesta en servicio de las ubicaciones técnica estudiadas es una distribución Weibull con parámetros  $\beta = 0,841$ ,  $\eta = 0,1637$  y  $\gamma = 0,0062$ .

#### **7.5. COSTOS DE MANO DE OBRA, DE REPUESTOS Y DE MONITOREO DE CONDICIÓN**

Debido a la importancia de cuantificar el costo que tienen los rubros de mano de obra, de repuestos cuando se requiere intervenir un conjunto motor-bomba y de monitoreo por condición, fue necesario recopilar información que permitiera estimar estos gastos. Dicho monto junto con la probabilidad de falla de cada ubicación técnica permite identificar cuales conjuntos son los que más recursos demandan para su mantenimiento.

##### **7.5.1. Costos de mano de obra**

Para el cálculo del costo de mano de obra se emplearon los valores de servicio por horas negociados para el año 2011 con firmas contratistas que brindan servicios de mantenimiento mecánico a la Empresa XYZ S.A., dichas tarifas se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Tarifas de presentación de servicios de mantenimiento mecánico para el año de 2011 (COP).

Tarifas	Personal Contratado	
	Mecánico Soldador	Ayudante Practico
Hora normal diurna	\$13.970	\$7,480
Hora extra diurna	\$17.463	\$9,350
Hora normal nocturna	\$18.860	\$10.098
Hora extra nocturna	\$24.448	\$13.090
Hora festiva diurna	\$24.448	\$13.090
Hora extra festiva diurna	\$27.940	\$14.960
Hora festiva nocturna	\$29.337	\$15.708
Hora extra festiva nocturna	\$34.925	\$18.700

Fuente: Empresa XYZ S.A. – Contrato de prestación de servicios mecánicos con la Empresa A&Z (2011).

Teniendo en cuenta el valor total pagado a la firma contratista y las horas laboradas se obtuvo un valor promedio de COP \$675.000 al emplear una pareja de contratistas compuesta de un mecánico soldador y un ayudante practico por el lapso de 1 día (24 horas).

### 7.5.2. Costos de repuestos

El costo de repuestos para cada ubicación técnica se tomó del sistema de información al extraer las cantidades totales de cada material que había sido cargado a cada ubicación técnica por el mismo periodo de tiempo en el que se tomó la muestra para clasificar las fallas de las mismas (01/01/2005 - 31/12/2011) y asociarlo con el valor unitario de cada repuesto. Posteriormente debido a que dentro del listado obtenido se encontraban materiales que no se consideran repuestos, se hizo una evaluación de dichos ítems para retirarlos de la muestra. Luego con el fin de estimar el costo de materiales de cada evento, se dividió el valor total conseguido de cada ubicación técnica por el número de eventos en el mismo periodo de tiempo; esta información se puede consultar en la Tabla 8.

Tabla 8. Costo de materiales por evento para las ubicaciones técnicas estudiadas (COP).

Ubicación Técnica	Nombre del Equipo	Costo (COP)
PR70BL11	Bomba de Lodos del Clarificador de Licor Blanco	\$ 2.754.223
PR70LL10	Bomba de Lodos – 2nda Etapa	\$ 2.043.644
PR70LV10	Bomba de Licor Verde al Pasto-ducto	\$ 1.702.208
PR70LL15	Bomba de Lodos – 1ra Etapa	\$ 1.657.760
PR70BL03	Bomba 2 del Colector Maestro	\$ 1.113.678
PR70BL08	Bomba 1 del Clarificador de Licor Blanco	\$ 669.612
PR70LV08	Bomba 1 del Tanque de Licor Verde	\$ 564.760
PR70LV09	Bomba 2 del Tanque de Licor Verde	\$ 507.938
PR70LV05	Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde	\$ 496.651
PR70CA10	Bomba del Pasto-ducto	\$ 449.294
PR70LL23	Bomba 1 del Tanque de Lodos	\$ 410.906
PR70BL02	Bomba 1 del Colector Maestro	\$ 288.933
PR70LV06	Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde	\$ 266.330
PR70BL09	Bomba 2 del Clarificador de Licor Blanco	\$ 212.834
PR70LL24	Bomba 2 del Tanque de Lodos	\$ 135.984

Fuente: El autor.

### 7.5.3. Costos de monitoreo por condición

Se emplearon las tarifas de monitoreo y diagnóstico por medio de la toma de vibraciones a maquinaria rotativa, la cual se encuentra en COP \$7.000 por punto inspeccionado y teniendo en cuenta que cada ubicación técnica posee cuatro puntos, los costos mensuales por cada conjunto motor-bomba inspeccionado son de COP \$24.000.

### 7.6. DISPONIBILIDAD Y COSTOS ANUALES POR UBICACIÓN TÉCNICA

Teniendo en cuenta las funciones de probabilidad de falla, tiempos de reparación y costos de mantenimiento, se calcula el costo total anual para cada una de las ubicaciones técnicas; dichos valores se pueden consultar en el Anexo D págs. 157 a 164.

En la Tabla 9 se presenta un extracto de los principales valores de interés que se encuentran en el Anexo D págs. 157 a 164.

Tabla 9. Resultados de la modelación para cada ubicación técnica en un periodo de 365 días.

Ubicación Técnica	Costo Total Anual (COP)	Disponibilidad Promedio	Tiempo Promedio para la Primera Falla (Días)
PR70LL10	\$ 12.228.344	0,9972	73,5
PR70BL11	\$ 8.685.042	0,9985	120,7
PR70LV10	\$ 8.549.935	0,9977	84,5
PR70CA10	\$ 7.485.854	0,9936	29,4
PR70LV09	\$ 6.915.577	0,9947	35,7
PR70LL15	\$ 6.700.461	0,9982	102,1
PR70LV08	\$ 6.334.903	0,9956	41,9
PR70BL03	\$ 5.282.218	0,9980	91,6
PR70LL23	\$ 4.341.020	0,9962	47,8
PR70LV05	\$ 3.789.290	0,9971	67,8
PR70BL08	\$ 3.711.735	0,9978	88,3
PR70BL02	\$ 2.933.831	0,9968	61,3
PR70LV06	\$ 2.909.799	0,9966	55,5
PR70LL24	\$ 1.820.834	0,9970	63,4
PR70BL09	\$ 1.365.452	0,9984	121,8

Fuente: El autor.

De los valores presentados en la Tabla 9 se puede observar que a pesar de que constructivamente los equipos instalados en las ubicaciones técnicas estudiadas son similares, existe una gran variabilidad respecto al costo total anual de cada una de ellas. Igualmente, se aprecia que el costo total de mantenimiento de cada ubicación técnica no presenta una relación proporcional con el tiempo promedio para la primera falla.

#### **7.6.1. Evaluación comparativa del tiempo promedio entre falla con estadísticas internacionales**

Con el fin de establecer como es la confiabilidad respecto a estadísticas internacionales, se comparan los valores de tiempo promedio entre fallas con diferentes tipos de bombas y aplicaciones. Para esto se emplean los valores de la

Tabla 10, los cuales fueron recopilados en un periodo aproximado de diez años iniciando a finales de los años noventa.

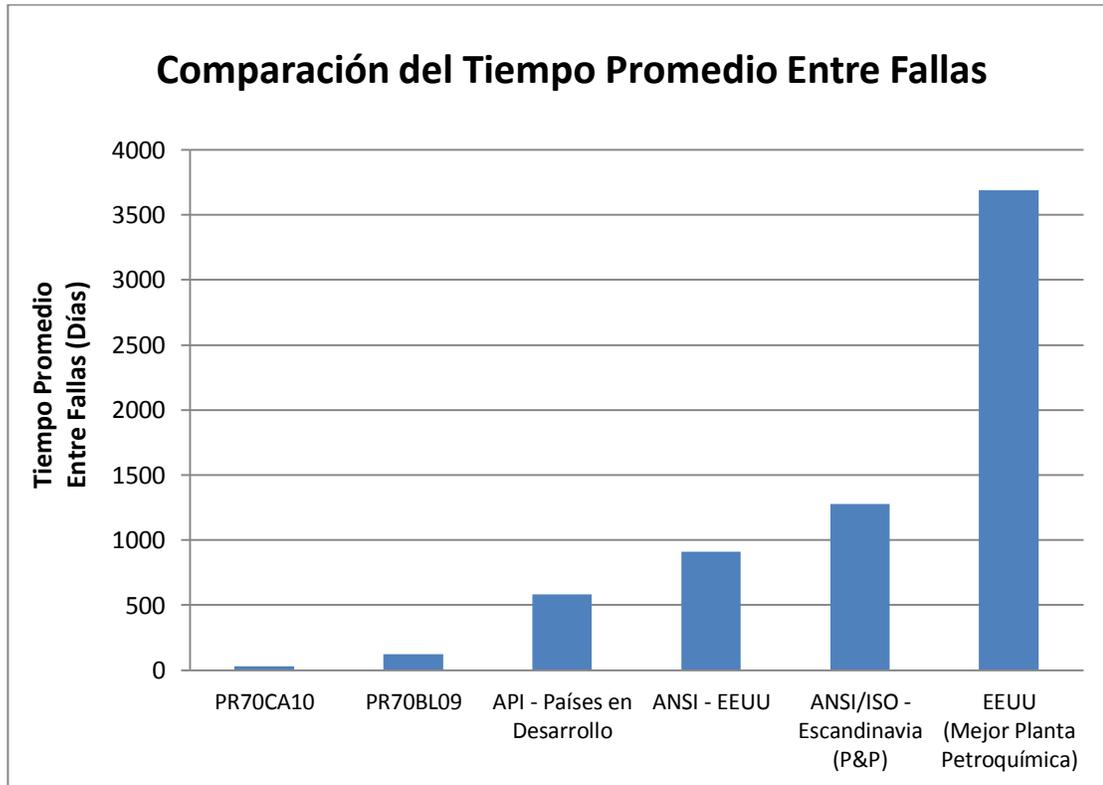
Tabla 10. Tiempo promedio entre fallas para bombas.

<b>Tipo de Bomba</b>	<b>Ubicación Geográfica</b>	<b>Tiempo Promedio Entre Fallas (Días)</b>
API	Países en Desarrollo	584
ANSI	Estados Unidos	913
ANSI/ISO	Países Escandinavos (Plantas de Pulpa & Papel)	1.278
API	Caribe	1.424
API	Estados Unidos	2.008
API	Europa Occidental	2.227
API	Estados Unidos (Mejor Refinería)	3.358
Todas	Estados Unidos (Mejor Planta Petroquímica)	3.687

Fuente: BLOCH, Heinz. Pump statistics should shape strategies. Process Machinery Consulting, 2008. p. 1-4.

En la Figura 7 se grafican los valores del tiempo promedio ente fallas para las ubicaciones técnicas PR70CA10 y PR70BL09, las cuales presentan el valor más bajo y más alto, respectivamente. También se puede observar que al comprar los valores para las ubicaciones técnicas estudiadas con los índices más representativos de acuerdo al estado del mantenimiento en Colombia, el tipo de bombas instaladas en la planta de caustificación y al hecho de pertenecer a la industria petroquímica, se tiene un gran potencial de mejora.

Figura 7. Fallas dominantes en el sistema de bombeo.



Fuente: El autor.

Esto debido a que es notable la gran diferencia que existe entre los valores de tiempo promedio entre fallas de las ubicaciones técnicas de la planta de caustificación respecto a los valores de las estadísticas mundiales, inclusive al ser comparados los valores promedio de otros países en vía de desarrollo.

## 8. MODELACIÓN DE CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD

Con el fin de establecer la disponibilidad de las líneas de bombeo bajo estudio se debe elegir el método de estimación más adecuado. Para esto, a continuación se hace una descripción de los métodos más conocidos y empleados junto con sus ventajas y desventajas, con el fin de ampliar la información presentada en los capítulos 3 y 4, para finalmente elegir el método más adecuado de acuerdo con las necesidades del modelo.

### 8.1. DIAGRAMAS DE BLOQUES

Los diagramas de bloques son ampliamente conocidos como metodología en la ingeniería de confiabilidad. Como se mencionó anteriormente, pertenecen a los modelos no dinámicos y usualmente se resuelven por medio de métodos de combinación. Debido a que representan de manera intuitiva el sistema a evaluar, son fáciles de implementar y analizar.

En los diagramas de bloque, cada componente del sistema está representado por un bloque. Dichos bloques están conectados siguiendo dos tipos de configuración: en paralelo o en serie, a la vez que se permite la combinación de cualquiera de las dos estructuras dentro del mismo sistema.

- En la configuración en serie, la falla de un componente causa la falla del sistema.
- Y en la configuración en paralelo, todos los N componentes que pertenecen a la estructura en paralelo deben estar en un estado de falla para que el sistema falle.

En los diagramas de bloque, cada bloque se puede interpretar como un interruptor que está cerrado cuando el bloque está operando y que está abierto cuando el bloque ha fallado. De hecho, solamente dos estados (en operación y en falla) se emplean para describir el estado de cada componente. Y el sistema se encuentra en estado operativo si existe un camino de interruptores cerrados desde el inicio hasta la salida del diagrama.<sup>14</sup>

Para solucionar un diagrama de bloques empleando métodos de combinación u órdenes estadísticas, se deben tener presentes los siguientes supuestos:

---

<sup>14</sup> FIGIEL, Kerry; SULE, Dileep. A generalized reliability block diagram (RBD) simulation. Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference, 1990. p. 551-556.

- La falla de cada componente se considera independiente del resto de bloques.
- En el tiempo inicial, todos los componentes se asumen que están en un estado operativo.
- Cualquier bloque puede estar en operación o en falla.
- Solo se permiten redundancias activas.

### **8.1.1. Ventajas y desventajas de los diagramas de bloque**

Las principales ventajas de los diagramas de bloque es la facilidad de implementarlos y de solución, al igual que la capacidad de representar la estructura de confiabilidad del sistema; sin embargo, cuando se consideran estructuras más complejas, se deben emplear técnicas como tablas Booleanas, diagramas de decisión binaria, etc.

La desventaja más grande de los diagramas de bloques es que no pueden resolver dependencias entre los elementos modelados. Tal como se ha dicho, el supuesto de independencia de la funciones de falla de cada componente debe ser respetado en los modelos a ser estudiados. A pesar de esto, estas limitaciones no están presentes en modelos de diagramas de bloques dinámicos.<sup>15</sup>

## **8.2. ÁRBOLES DE FALLAS**

Los árboles de falla están basados en un evento no deseado (falla del sistema) que al combinar la probabilidad de ocurrencia de eventos básicos (probabilidad de falla de cada componente) darán como resultado la probabilidad de ocurrencia del evento no deseado. Los eventos básicos representan las causas para que el evento no deseado sea posible, como lo son: fallas de componentes, errores humanos, condiciones de operación, etc.

Un árbol de falla es una representación gráfica de las relaciones lógicas entre el evento no deseado y los eventos básicos. Y con el fin de construirlo, se debe comenzar con el escenario de falla y posteriormente descomponer el síntoma de falla en sus posibles causas. Cada posible causa se debe investigar y posteriormente debe ser refinada hasta que las causas básicas de la falla sean comprendidas. Normalmente el escenario de falla se le da el nombre de evento de interés y se ubica en la parte superior del árbol de fallas, posteriormente el árbol debe construirse por niveles y se debe hacer desde la parte superior hasta la

---

<sup>15</sup> DISTEFANO, Salvatore; PULIAFITO, Antonio. Dynamic reliability block diagrams vs. dynamic fault trees. Reliability and Maintainability Symposium, 2007. p. 71-76.

inferior. Sin embargo, varias ramas del árbol de fallas pueden ser construidas con el fin de obtener diferentes grados de detalle.<sup>16</sup>

### **8.2.1. Comparación entre los árboles de fallas y los diagramas de bloques**

La diferencia principal entre los árboles de fallas y los diagramas de bloques es que estos últimos están orientados hacia el éxito, mientras que los árboles de falla hacia la falla del sistema. De manera específica, con los diagramas de bloques, se opera enfocado hacia el éxito y por lo tanto se analiza el sistema para encontrar combinaciones que lo permitan, mientras que en los árboles de fallas, se está enfocado hacia la falla, por lo que se orienta a hallar combinaciones para que el sistema falle. En muchos casos, se puede convertir un árbol de fallas en un diagrama de bloques y también en sentido contrario.

En la conversión de un árbol de fallas en un diagrama de bloques, se debe iniciar por el evento superior del árbol y de manera sucesiva se remplazan las puertas lógicas del mismo. Una puerta lógica “Y” se remplaza por una estructura en paralelo y una puerta lógica “O” por una estructura en serie. Este mismo raciocinio aplica para la conversión de un diagrama de bloques a un árbol de fallas, pero de manera opuesta.<sup>17</sup>

### **8.2.2. Ventajas y desventajas de los árboles de fallas**

Las ventajas de los árboles de falla se basan en la representación gráfica de las causas de ocurrencia del evento superior, la posibilidad de investigar la debilidad del sistema y el uso de la metodología en la fase de diseño con el fin de dar soporte a la toma de decisiones respecto al mejor arreglo del sistema.

Al igual que los diagramas de bloques, los árboles de falla tampoco pueden modelar dependencias entre los elementos que los constituyen, recursos finitos de mantenimiento, etc. Lo cual impide que no sea posible calcular la confiabilidad de sistemas a los cuales se les puede hacer mantenimiento. Para estos casos se deben emplear modelos dinámicos de espacios de estados.

---

<sup>16</sup> Op cit. .ROBERTS, Norman; VESELY, et al. Fault tree handbook.

<sup>17</sup> Op cit. DISTEFANO, Salvatore; PULIAFITO, Antonio. Dynamic reliability block diagrams vs. dynamic fault trees.

### **8.3. MODELOS DINÁMICOS**

Los métodos dinámicos están basados en procesos estocásticos que definen el comportamiento del sistema. Un proceso estocástico es una familia de variables aleatorias que están definidas en un espacio de probabilidad. El conjunto de todos los posibles valores que pueden tomar las variables aleatorias se llama el espacio de estados. Si el espacio de estados de un proceso estocástico es discreto, este se denomina como un proceso discreto de estados, de lo contrario es un espacio de estados continuo.

Teniendo en cuenta lo anterior, los procesos reales tienen dependencias entre las variables aleatorias y la más común es una dependencia de primer orden que se denota como dependencia de Markov; dicha dependencia implica que el siguiente estado de un proceso de Markov solamente puede depender del estado actual. Igualmente, si el espacio de estados es discreto, el proceso estocástico se llama cadena de Markov. En el caso que el parámetro tiempo sea continuo, se denomina cadena de Markov en tiempo continuo, si es discreto es llamada cadena de Markov en tiempo discreto.<sup>18</sup>

#### **8.3.1. Ventajas y desventajas de los modelos dinámicos**

Los métodos dinámicos superan las limitaciones de la modelación a través de diagramas de bloques y árboles de fallas, permitiendo modelar sistemas complejos y evaluar diferentes indicadores de interés.

Sin embargo, las cadenas de Markov son difíciles de diseñar y entender, en especial si los sistemas a modelar son complejos, en cuyo caso pueden tener múltiples estados y por lo tanto se hace imposible de escribir la cadena a mano.

Para dar solución a esta limitación, se han diseñado modelos híbridos derivados de los modelos no dinámicos, para mejorar sus capacidades de modelación dando como resultado los métodos de diagramas de bloques y árboles de fallas dinámicos, que emplean espacio de estados simples para la solución del modelo.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> NOWLAN, F. Stanley; HEAP, Howard. Reliability centered maintenance. San Francisco: Dolby Access Press, 1978. 476 p.

<sup>19</sup> Op cit. RAUSAND, Marvin; et al. System reliability theory – Models, statistical methods and applications.

#### **8.4. MÉTODO EMPLEADO**

Debido a la necesidad de obtener resultados de las siguientes variables:

- Disponibilidad.
- Costos de mano de obra.
- Costos de repuestos.

El modelo a emplear debe ser capaz de manejar las siguientes entradas para cada componente:

- Probabilidad de falla.
- Probabilidad de tiempo de reparación.
- Costo de mano de obra.
- Costo de inspecciones.

E igualmente permitir la modelación de estructuras en serie y en paralelo, definiendo equipos en estado de standby y en estado operativo.

De acuerdo a los requisitos mencionados se concluye que los métodos adecuados para obtener resultados más cercanos al proceso real son los diagramas de bloques y árboles de fallas dinámicos. Y debido a la ventaja gráfica de los diagramas de bloques que permite el uso de planos de tuberías e instrumentación, se establece como el método a emplear en la modelación del sistema.

#### **8.5. SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE MODELACIÓN**

Con el fin de simplificar la creación del modelo, se debe elegir que programa es el más adecuado para la modelación. Esta elección debe estar basada en los objetivos (resultados) del modelo, la capacidad del programa para cumplirlos y la facilidad de consecución del mismo. Teniendo esto en cuenta se hace un estudio de los programas disponibles en el mercado y se les da una puntuación de acuerdo con los siguientes criterios:

- Modelación con diagramas de bloques dinámicos. (1)
- Asignación de la probabilidad de falla a cada componente. (2)
- Asignación de la probabilidad de tiempo de reparación a cada equipo. (3)
- Costeo de mano de obra. (3)
- Costeo de inspecciones. (4)
- Asignación de recursos. (5)
- Identificación de equipos críticos. (6)
- Manejo de estructuras de equipos en serie y en paralelo. (7)

- Capacidad de establecer equipos en estado de standby y en estado operativo. (8)
- Facilidad de uso. (9)
- Facilidad de consecución. (10)
- Visualización de resultados. (11)

Los resultados se pueden ver en la Tabla 11:

Tabla 11. Evaluación de los programas de modelación.

Programa	Modelos Disponibles	Motor de Simulación	Parámetro											Total	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
BlockSim 7	AF – DB	Analítico/ Montecarlo	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11
AvSim+	AF – DB – Markov	Montecarlo	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	10
ITEM ToolKit	AF – DB	Montecarlo	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	10
Windchill RBD	DB	Montecarlo	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	10
CARE – RBD	AF – DB – Markov	Montecarlo	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	9
MEADEP	DB – Markov	Montecarlo	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	9
SPAR	DB	Montecarlo	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	8

Fuente: Van LUIJK, J. A. Availability simulation modeling in a chemical manufacturing company. Master of Science thesis. Delft: Delft University of Technology. Faculty of Technology, Policy and Management. Systems Engineering and Policy Analysis. 143 p., 2003.

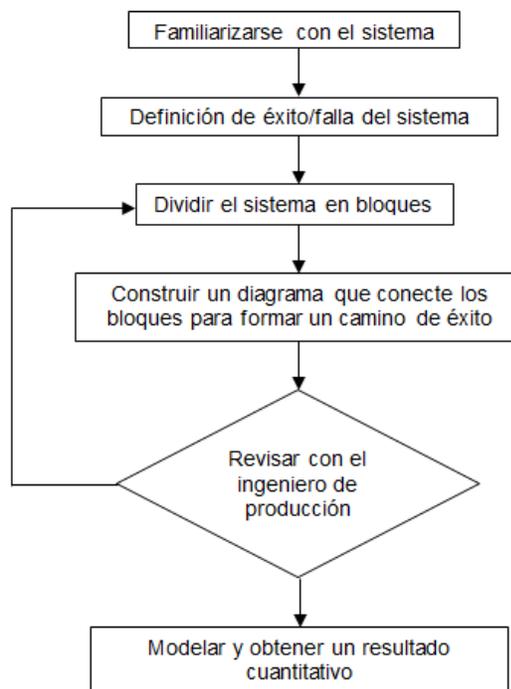
De acuerdo a la evaluación de criterios en la Tabla 11, se decide emplear el programa BlockSim 7 para el desarrollo del modelo.

## 9. CONDICIÓN ACTUAL DE LA PLANTA

### 9.1. PROCEDIMIENTO PARA DESARROLLAR EL MODELO

El diagrama esquemático del procedimiento para construir el modelo basado en diagramas de bloques se presenta en la Figura 8. Como pre-requisito a la modelación de confiabilidad y disponibilidad, se debe tener un conocimiento detallado del funcionamiento del sistema, para lo cual se obtuvo el plano de tuberías e instrumentación del mismo, se consultó a los ingenieros de proceso y a los operarios de la planta de caustificación para mejor entendimiento.

Figura 8. Procedimiento para construir el modelo.



Fuente: VERMA, Ajit; AJIT; Srividya; KARANKI, Durga. Reliability and safety engineering. London: Speinger-Verlag London Limited, 2010. 535 p.

Posteriormente, se debe decidir sobre la definición de éxito del modelo; en el caso que el modelo tenga más de una definición, es posible que se deba desarrollar un diagrama de bloques independiente para cada definición. Luego, se divide el

sistema en bloques que representan los componentes del sistema y que permitan reflejar el comportamiento lógico del mismo.

El siguiente paso es construir un diagrama que conecte los bloques teniendo en cuenta la definición de éxito del sistema, hasta tener un camino de éxito que conecte el primer bloque con el último.

Siguiendo este procedimiento, se desarrollaron los dos diagramas de bloques que se encuentran en el Anexo E págs. 165 a 167.

### **9.1.1. Datos de entrada**

Los datos de entrada para el modelo son los siguientes:

- Probabilidad de falla – esta se puede observar en el Anexo B págs. 141 a 155.
- Probabilidad de tiempo de reparación – esta se encontró en la sección 7.4.
- Costo de mano de obra para las actividades de reparación – esta se encontró en la sección 7.5.1.
- Costo de repuestos – esta se encontró en la sección 7.5.2.
- Costo de inspecciones – esta se encontró en la sección 7.5.3.

Igualmente se definió que para el modelo del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco, las siguientes ubicaciones técnicas tienen equipos standby:

- PR70LV05 - Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde (Activa)
- PR70LV06 - Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde (Standby)
  
- PR70LV08 - Bomba 1 del Tanque de Licor Verde (Activa)
- PR70LV09 - Bomba 2 del Tanque de Licor Verde (Standby)
  
- PR70BL02 - Bomba 1 del Colector Maestro (Activa)
- PR70BL03 - Bomba 2 del Colector Maestro (Standby)
  
- PR70BL08 - Bomba 1 del Clarificador de Licor Blanco (Activa)
- PR70BL09 - Bomba 2 del Clarificador de Licor Blanco (Standby)

Y para el modelo del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal, las siguientes ubicaciones técnicas tienen equipos standby:

- PR70LV05 - Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde (Activa)
- PR70LV06 - Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde (Standby)

- PR70LV08 - Bomba 1 del Tanque de Licor Verde (Activa)
- PR70LV09 - Bomba 2 del Tanque de Licor Verde (Standby)
  
- PR70BL02 - Bomba 1 del Colector Maestro (Activa)
- PR70BL03 - Bomba 2 del Colector Maestro (Standby)

Con el fin de garantizar un valor de convergencia en cada simulación, se fijó el número de iteraciones de cada simulación a 10.000.

## **9.2. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN**

### **9.2.1. Resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco**

Los resultados de la modelación se pueden observar en la Tabla 12, de la cual se puede deducir que el costo total anual es de COP \$ 35'149.746 y que la disponibilidad promedio durante un año es del 100%.

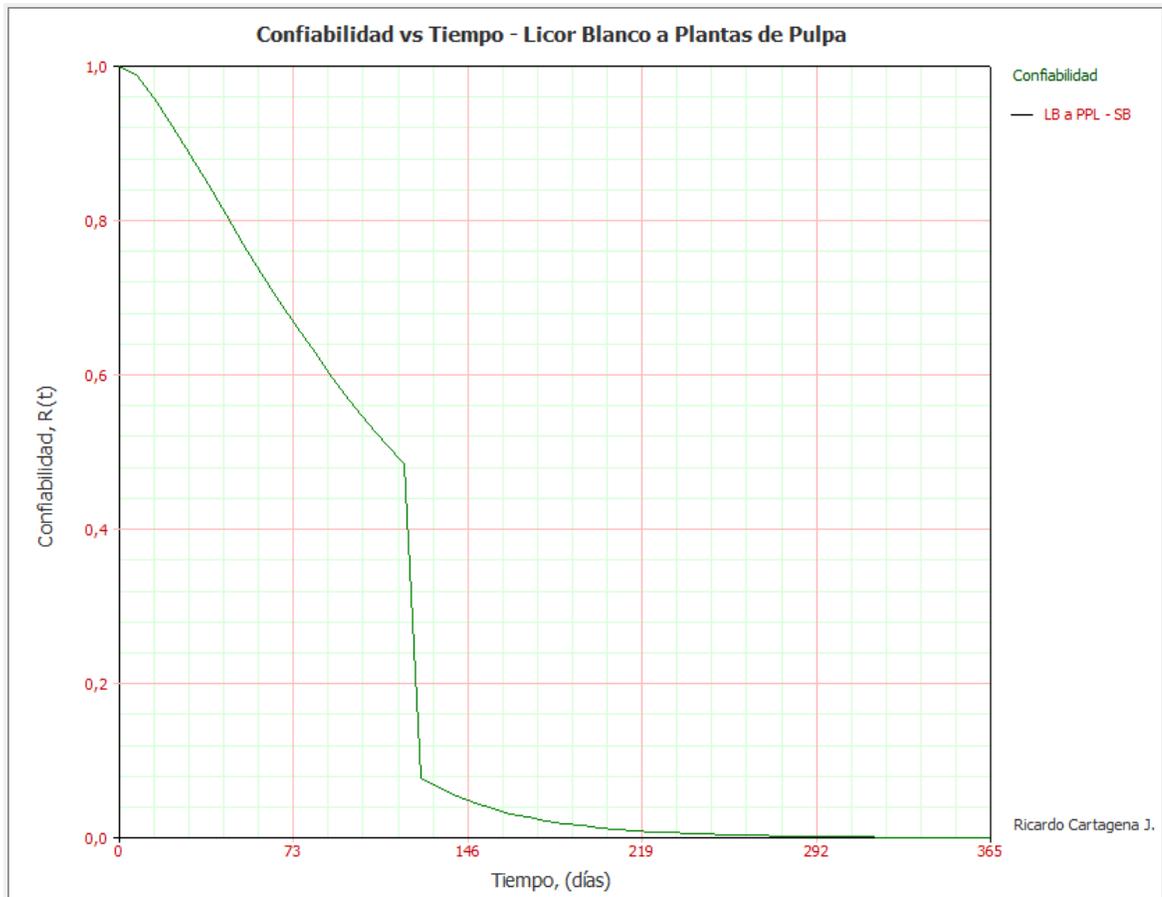
En la Figura 9 se puede apreciar el comportamiento de la confiabilidad del sistema cuando se tiene una solución analítica por un periodo de 365 días. En donde se puede observar que en el caso de una solución analítica en la que no se considera la posibilidad de reparar los equipos, la confiabilidad cae a un nivel de cero aproximadamente en el día 316 después de haber iniciado su operación con todos sus equipos en estado operativo.

Tabla 12. Resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

<b>Resultados para el Sistema de Bombeo de Licor Blanco a Plantas de Pulpa</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	1
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0002
Confiabilidad (@ 365 días):	0,9517
Número Esperado de Fallas:	0,0496
Desv. Estándar (Número de Fallas):	0,223
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	7373,6864
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	364,9889
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	0,0111
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	0,0111
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	0,0496
Número de Mantenimientos Correctivos:	0,0496
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	0,0496
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 35.149.746

Fuente: El autor.

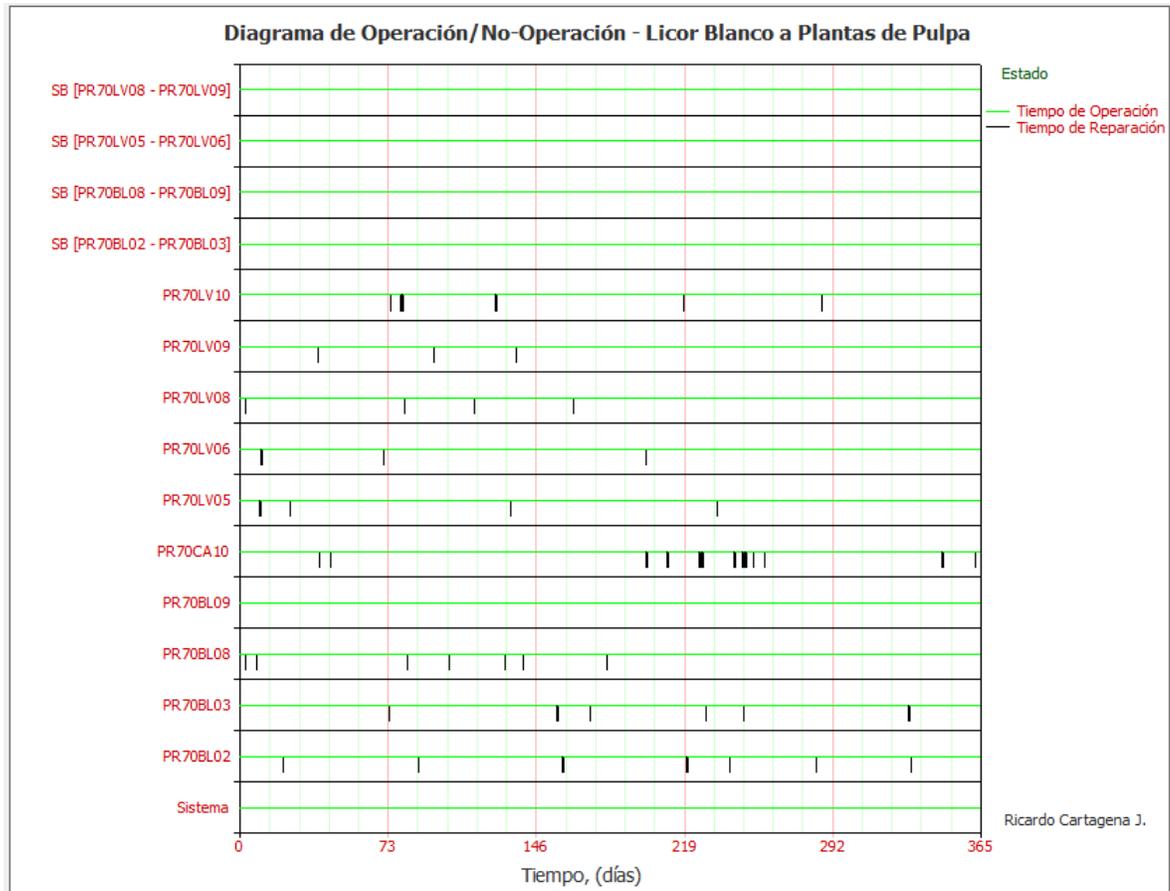
Figura 9. Comportamiento de la confiabilidad en el tiempo del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.



Fuente: El autor.

En la Figura 10 se observa una simulación puntual en donde se puede apreciar la disponibilidad de cada equipo y su relación con la disponibilidad del sistema. Se indica que debido a las redundancias del sistema y a la confiabilidad de los equipos de esta línea, a pesar de algunos componentes fallen durante el año, se tiene una disponibilidad del 100%.

Figura 10. Simulación puntual de la disponibilidad de equipos y del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.



Fuente: El autor.

### 9.2.2. Resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal

Los resultados de la modelación se pueden observar en la Tabla 13, de la cual se puede observar que el costo total anual es de COP \$ 64'075.313 y que la disponibilidad promedio durante un año es del 98.7%.

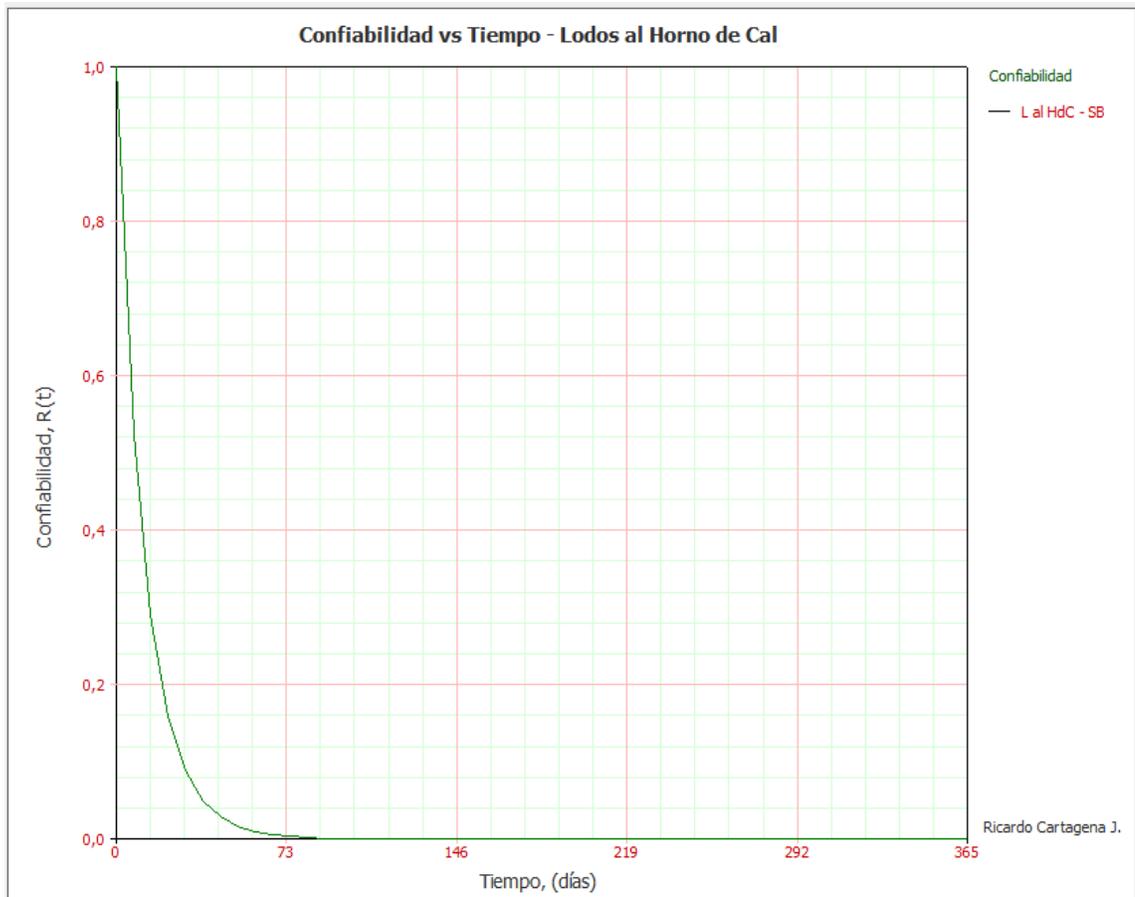
Tabla 13. Resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resultados para el Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0041
Confiabilidad (@ 365 días):	0
Número Esperado de Fallas:	25,1713
Desv. Estándar (Número de Fallas):	5,4622
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	360,2481
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	4,7519
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	25,1713
Número de Mantenimientos Correctivos:	25,1713
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	25,1713
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 64.075.313

Fuente: El autor.

En la Figura 11 se puede apreciar el comportamiento de la confiabilidad del sistema cuando se tiene una solución analítica por un periodo de 365 días. En donde se puede apreciar que en el caso de una solución analítica; en donde no se considera la posibilidad de reparar los equipos, la confiabilidad cae a un nivel de cero aproximadamente en el día 88 después de haber iniciado su operación con todos sus equipos en estado operativo.

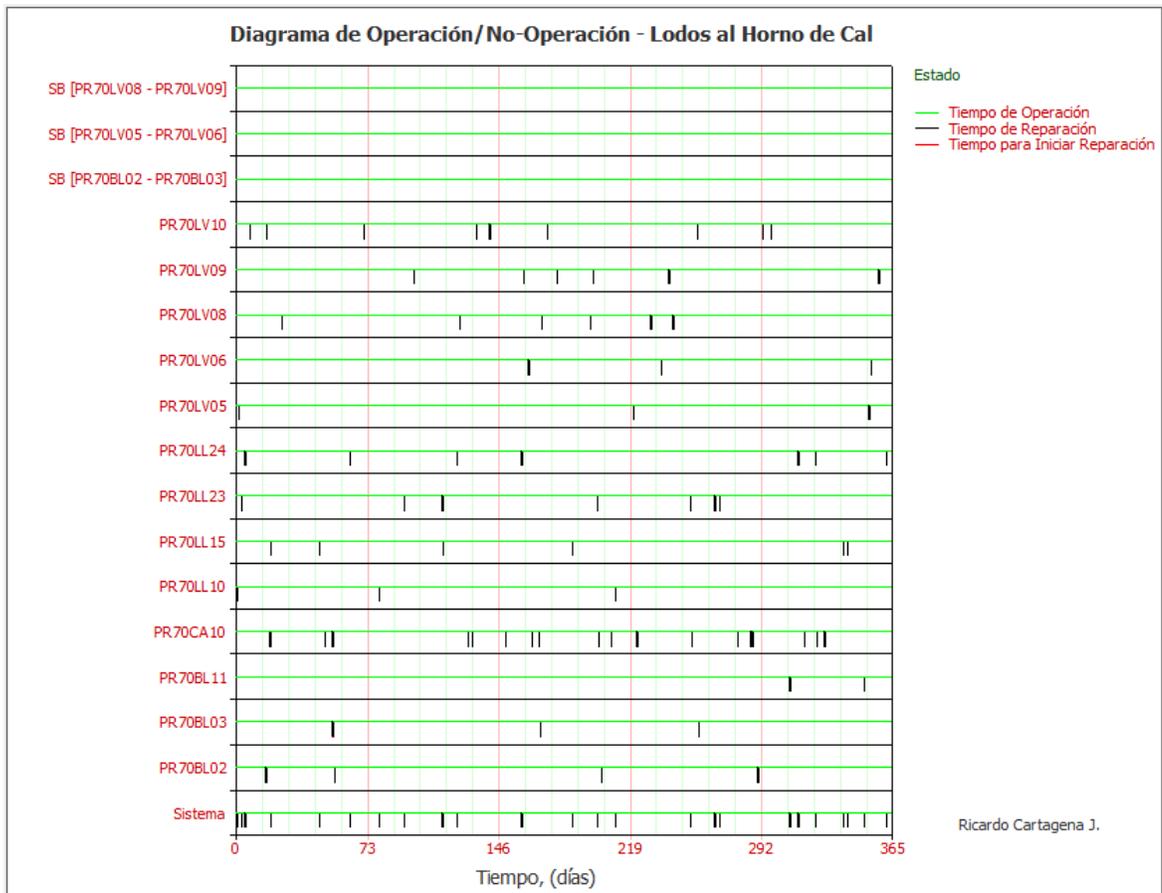
Figura 11. Comportamiento de la confiabilidad en el tiempo del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.



Fuente: El autor.

En la Figura 12 se observa una simulación puntual en donde se puede apreciar la disponibilidad de cada equipo y su relación con la disponibilidad del sistema. Se nota que a pesar de las redundancias en el sistema y la operación del sistema se ve afectada aproximadamente 25 veces en el año y que no se bombean lodos al Horno de Cal por un periodo total de 4.75 días de los 365 días que debió haber operado.

Figura 12. Simulación puntual de la disponibilidad de equipos y del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.



Fuente: El autor.

### 9.3. ESTIMACIÓN DEL ERROR

Los resultados obtenidos deben ser validados con datos reales de disponibilidad, para lo cual se obtuvieron los valores de tiempos perdidos para los años 2009, 2010 y 2011 (Tablas 14 y 15). De esta comparación se puede ver que los errores de las modelaciones están por debajo de 2.5%, por lo que los resultados de las modelaciones se pueden considerar válidas.

Tabla 14. Comparación de resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

Periodo	Tiempo Perdido (días)	Tiempo Promedio (días)	Desviación Estándar (días)
2009	0	0	0
2010	0		
2011	0		
No-Disponibilidad Simulada		0,0111	0,0001
Diferencia		-0,0111	-0,0001
Error		1,1100%	0,0073%

Fuente: El autor.

Tabla 15. Comparación de resultados para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

Periodo	Tiempo Perdido (días)	Tiempo Promedio (días)	Desviación Estándar (días)
2009	4,7533	4,8065	1,4605
2010	3,3733		
2011	6,2929		
No-Disponibilidad Simulada		4,7519	1,4965
Diferencia		0,0546	-0,0359
Error		1,1365%	2,4636%

Fuente: El autor.

#### 9.4. COSTO DEL TIEMPO PERDIDO POR LÍNEA DE BOMBEO

Para establecer cuál es la condición actual de la planta de caustificación se debe calcular el costo de material que se deja de producir cuando cada una de las líneas se detiene. Para esto, las siguientes ecuaciones describen la cantidad equivalente de materia prima en términos de las variables que se miden en el proceso.

Para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco, se tiene:

$$Y \frac{\text{gal licor}}{\text{min}} \times 3.785 \frac{\text{litros}}{\text{gal licor}} \times 1.13 \frac{\text{kg litro}}{1 \text{ litro}} \times \% \text{Contenido} \frac{\text{kg}}{\text{kg litro}} \quad [1]$$

Debido a que el contenido de Licor Blanco es en promedio 10% hidróxido de sodio (NaOH) y 3% sulfuro de sodio (Na<sub>2</sub>S), se tiene:

$$Y \frac{\text{gal licor}}{\text{min}} \times 3.785 \frac{\text{litros}}{\text{gal licor}} \times 1.13 \frac{\text{kg litro}}{1 \text{ litro}} \times 0.1 \frac{\text{NaOH kg}}{\text{kg litro}} \quad [2]$$

$$Y \frac{\text{gal licor}}{\text{min}} \times 3.785 \frac{\text{litros}}{\text{gal licor}} \times 1.13 \frac{\text{kg litro}}{1 \text{ litro}} \times 0.03 \frac{\text{Na}_2\text{S kg}}{\text{kg litro}} \quad [3]$$

Y para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal, se tiene:

$$Z \frac{\text{kg sln}}{\text{min}} \times (1 - \% \text{humedad}) \frac{\text{kg CaCO}_3}{1 \text{ kg sln}} \quad [4]$$

El porcentaje de humedad en promedio es de 38%, por lo que:

$$Z \frac{\text{kg sln}}{\text{min}} \times (1 - 0.38) \frac{\text{kg CaCO}_3}{1 \text{ kg sln}} \quad [5]$$

Siendo el flujo de Licor Blanco promedio (Y) aproximadamente 300 gal/min y remplazando en [2 y 3], se tiene que el flujo de NaOH es de 128.3 kg/min y el de sulfuro de sodio de 38.5 kg/min.

De manera similar, el flujo de lodos promedio ( $Z$ ) es de 280 kg/min y reemplazando en [5], se tiene que el flujo para el  $\text{CaCO}_3$  es de 173.6 kg/min.

Dicho carbonato de calcio es alimentado al Horno de Cal y se convierte en cal activa; dicha conversión tiene una eficiencia del 65.88% en promedio, por lo que el flujo de cal es de 114.37 kg/min.

Tabla 16. Precios de materias primas.

Materia Prima	Precio (COP/ton)
Hidróxido de sodio (NaOH)	\$ 330.000
Sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ )	\$ 383.800
Cal (CaO)	\$ 330.000

Fuente: Empresa XYZ S.A. – Sistema de Información (2011)

Teniendo en cuenta los valores de las materias primas de la Tabla 16 y los flujos de los mismos, se calculan los costos de la materia prima por día de no disponibilidad (Tabla 17).

Tabla 17. Costo de materias primas por día de no disponibilidad.

Materia Prima	Costo (COP/día)
Hidróxido de sodio (NaOH)	\$ 60.968.160
Sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ )	\$ 21.277.872
Cal (CaO)	\$ 54.348.624

Fuente: El autor.

## 9.5. ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS

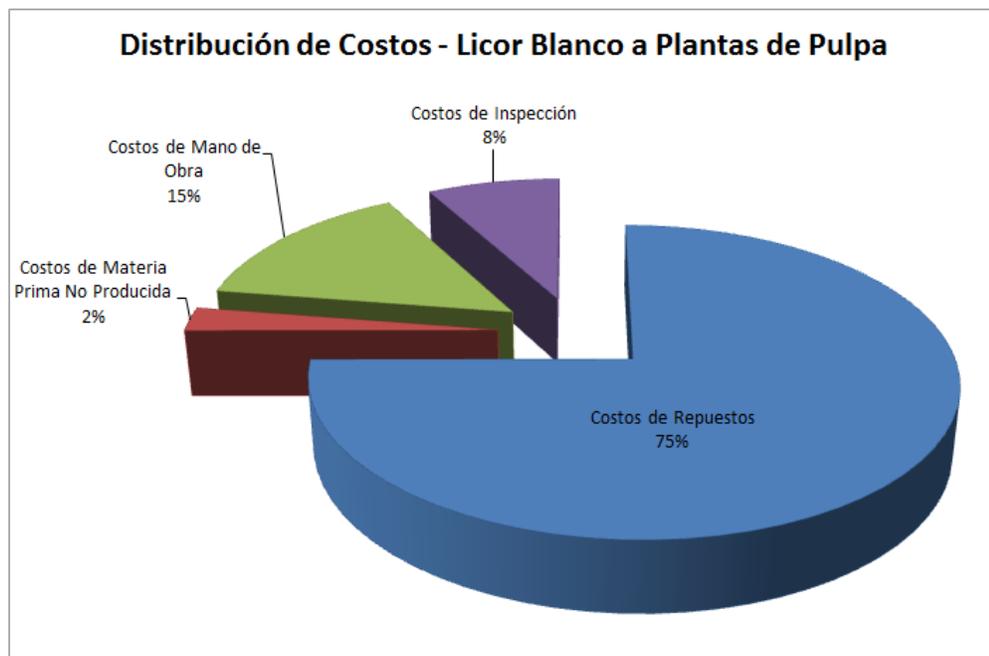
A continuación se presenta el estado actual de los sistemas teniendo en cuenta el costo de las materias primas que se dejaron de producir.

Tabla 18. Estado actual del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Licor Blanco a Plantas de Pulpa</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	1
Confiabilidad (@ 365 días):	0,9517
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	7373,6864
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	364,9889
No-disponibilidad Total (Días):	0,0111
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	0,0496
<b>Costos</b>	
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 35.149.746
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 912.931
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 36.062.677

Fuente: El autor.

Figura 13. Distribución de costos del estado actual en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.



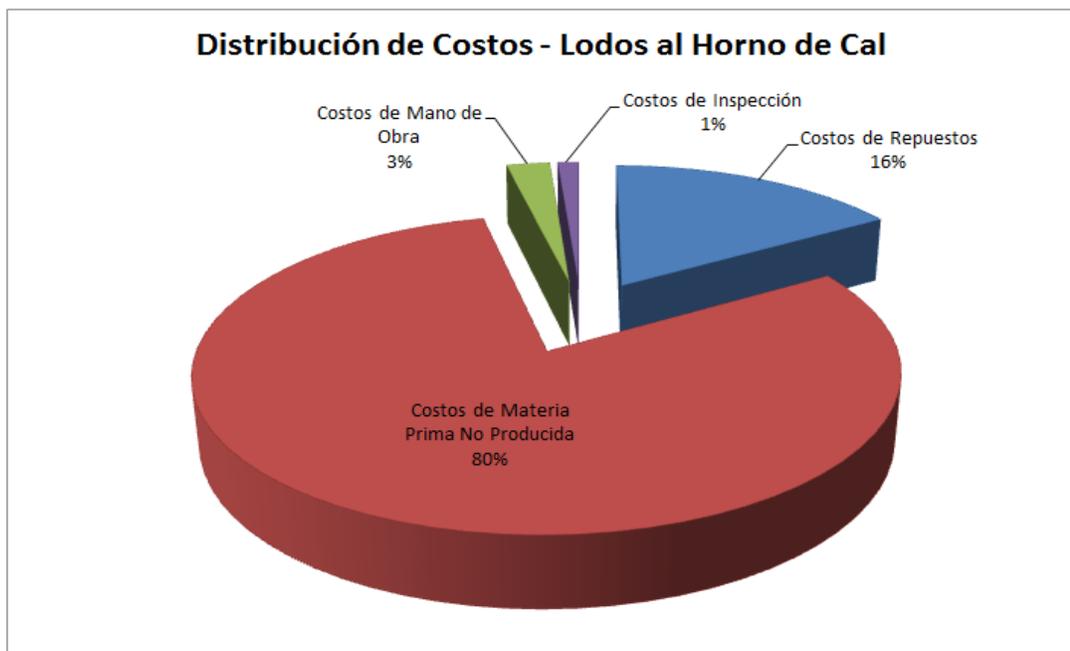
Fuente: El autor.

Tabla 19. Estado actual del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987
Confiabilidad (@ 365 días):	0
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	360,2481
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	25,1713
<b>Costos</b>	
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539

Fuente: El autor.

Figura 14. Distribución de costos del estado actual en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.



Fuente: El autor.

## 10. PROPUESTAS DE MEJORA PARA CADA BLOQUE

Con base en la condición actual de los sistemas, se generan propuestas de mejora que reduzcan los costos totales de los dos sistemas. Para lo cual se emplean diferentes técnicas de diagnóstico, políticas de mantenimiento y remplazo de equipos.

### 10.1. CRITICIDAD DE LOS EQUIPOS

La modelación de confiabilidad y disponibilidad de los sistemas permite identificar los puntos débiles de los mismos y cuantificar el impacto de cada componente en el desempeño del sistema. Para esto existen indicadores de criticidad de los equipos dentro del sistema, que dan una medida respecto a cuales componentes son más importantes para la confiabilidad y disponibilidad del sistema. De manera general, la importancia de cada componente es función del tiempo de operación, de la tasa de falla y de las características de reparación de todos los componentes del sistema y de la estructura del mismo.

Debido a que el objetivo de la planta es mantener operativa las dos líneas de bombeo, se decide emplear el índice de criticidad de cada equipo respecto a la operación del sistema para identificar en que componentes deben concentrarse las mejoras y de esta manera obtener resultados más asertivos.<sup>20,21</sup>

Este índice se define como el porcentaje de veces que un evento de falla en un componente particular causa que el sistema falle en un periodo de tiempo definido. Dicha relación se puede expresar de la siguiente manera:

$$IC = \frac{\text{Número de Eventos que Causan una Falla del Sistema Debido a la Falla de un Componente } i \text{ en } (0,t)}{\text{Número de Eventos que Causaron una Falla del Sistema es } (0,t)} \quad [6]$$

Este indicador tiene en cuenta todos los eventos que impliquen no-operación del componente, como lo son: fallas, mantenimiento preventivo e inspecciones (que impliquen detener el equipo), e incidan en la falla del sistema.

---

<sup>20</sup> GUO, Lijie; GAO, Jinji; YANG, Jianfeng; KANG, Jianxin. Criticality evaluation of petrochemical equipment based on fuzzy comprehensive evaluation and a BP neural network. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, vol. 22. p. 469-476.

<sup>21</sup> ZHAO, Y. On preventive maintenance policy of a critical reliability level for system subject to degradation. Reliability Engineering and System Safety.2003, vol. 79. p. 301-308.

### 10.1.1. Ubicaciones técnicas críticas en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco

De acuerdo a lo descrito, se establecen como ubicaciones técnicas críticas dentro del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco las listadas en la Tabla 20.

Tabla 20. Índice de criticidad para las ubicaciones técnicas del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

Ubicación Técnica	Nombre del Equipo	Índice de Criticidad
PR70BL02	Bomba 1 del Colector Maestro	68,34 %
PR70BL03	Bomba 2 del Colector Maestro	
PR70LV05	Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde	30,84 %
PR70LV06	Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde	

Fuente: Ver Anexo F pág. 168.

### 10.1.2. Ubicaciones técnicas críticas en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal

Se establecen como ubicaciones técnicas críticas dentro del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal las listadas en la Tabla 21.

Tabla 21. Índice de criticidad para las ubicaciones técnicas del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

Ubicación Técnica	Nombre del Equipo	Índice de Criticidad
PR70LL23	Bomba 1 del Tanque de Lodos	29.6 %
PR70LL24	Bomba 2 del Tanque de Lodos	23.0 %
PR70LL10	Bomba de Lodos – 2nda Etapa	21.7 %
PR70LL15	Bomba de Lodos – 1ra Etapa	14.0 %
PR70BL11	Bomba de Lodos del Clarificador de Licor Blanco	11,3 %

Fuente: Ver Anexo F pág. 167.

## 10.2. ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PERIÓDICO

Se tiene como premisa dentro de las estrategias de mantenimiento que al realizar un mantenimiento periódico se mejora la disponibilidad de los equipos de un sistema, por lo que la primera propuesta de mejora es la de hacer mantenimiento periódico a las ubicaciones técnicas de las Tablas 20 y 21.

Para esto se indica en la modelación, que se realice mantenimiento periódico a una tasa de 30 o 60 días; de acuerdo al tiempo promedio para la primera falla de cada componente (ver Anexo D págs. 157 a 164) y con la premisa de no ejecutar el mantenimiento si este detiene el bombeo de la línea (MP1). También se modeló otra estrategia en la cual se efectúa el mantenimiento preventivo independiente de sus efectos en la operación del sistema (MP2).

### 10.2.1. Resultados de la estrategia de mantenimiento periódico en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco

Los resultados de las modelaciones se pueden ver en la Tabla 22.

Tabla 22. Resultados de la implementación de la estrategia de mantenimiento periódico (MP1-2) al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Licor Blanco a Plantas de Pulpa</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Estrategia de MP1-2</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	1	1	0
Confiabilidad (@ 365 días):	0,9517	0,9517	0
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	7373,6864	7373,6864	0
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	364,9889	364,9889	0
No-disponibilidad Total (Días):	0,0111	0,0111	0
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	0,0496	0,0496	0
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 35.149.746	\$ 35.149.746	\$ 0
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 912.931	\$ 912.931	\$ 0
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 36.062.677	\$ 35.848.604	\$ 0

Fuente: El autor.

### 10.2.2. Resultados de la estrategia de mantenimiento periódico en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco

Los resultados de las modelaciones se pueden ver en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados de la implementación de la estrategia de mantenimiento periódico (MP1-2) al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Estrategia de MP1-2</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,987	0
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0	0
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	12,5281	0
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	360,2481	0
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	4,7519	0
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	25,1713	0
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 64.075.313	\$ 0
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 258.259.226	\$ 0
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 322.334.539	\$ 0

Fuente: El autor.

### 10.2.3. Análisis de resultados

Al observar los resultados de la estrategia de mantenimiento periódico (MP1), se tiene que la diferencia entre el estado actual y la propuesta de mejora es nula en los dos sistemas de bombeo, esto se debe a la limitación de no intervenir los equipos si dicha intervención genera una detención en el bombeo de las líneas.

Para la estrategia de mantenimiento periódico interviniendo los equipos así esto implicara detener el sistema (MP2), igualmente se tiene una diferencia nula entre el estado actual y la propuesta de mejora. Este hallazgo se debe a que a pesar de intervenir los equipos, las funciones de probabilidad de falla de los mismos, son características de mortandad infantil y no se deben a un proceso de desgaste. Esta característica es propia de funciones gamma (y sus variaciones), exponencial y weibull (con  $\beta < 1$ ).

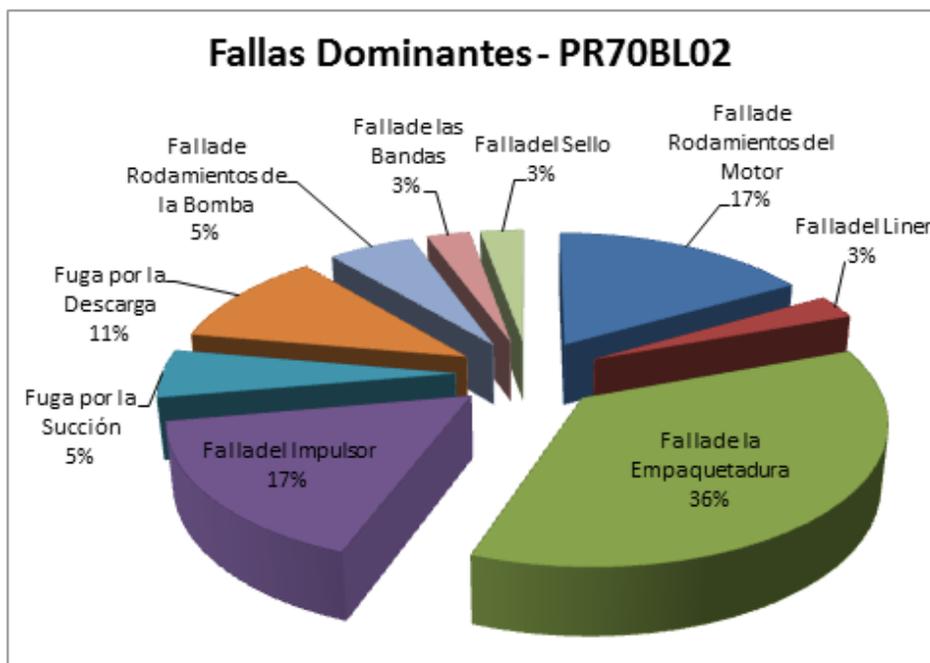
### 10.3. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA Y EFECTOS

Teniendo en cuenta que las estrategias de mantenimiento preventivo no dieron resultados que mejoraran la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas, se decide emplear la metodología de análisis de modos de falla y efectos, para identificar que partes de los componentes deben ser mejorados.

#### 10.3.1. Modos de falla dominantes en las ubicaciones técnicas de mayor criticidad

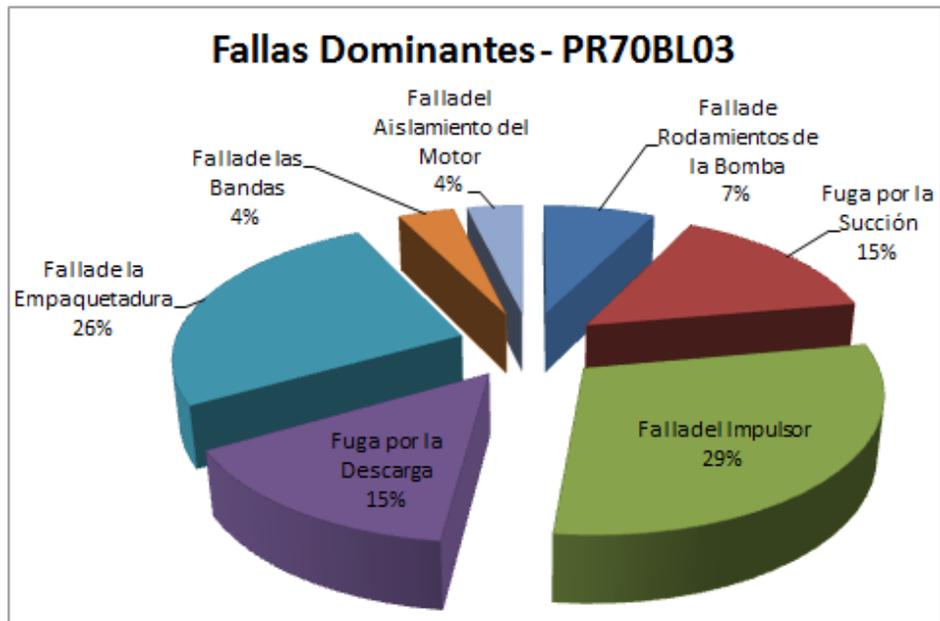
Del Anexo A págs. 125 a 140 se obtienen los datos para generar las Figuras 15 a la 23.

Figura 15. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70BL02.



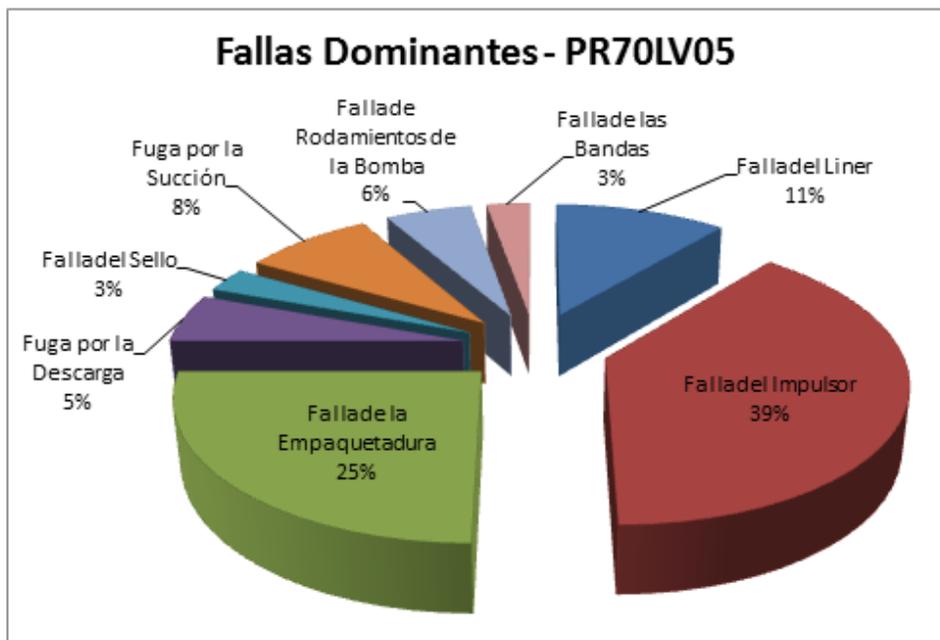
Fuente: El autor.

Figura 16. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70BL03.



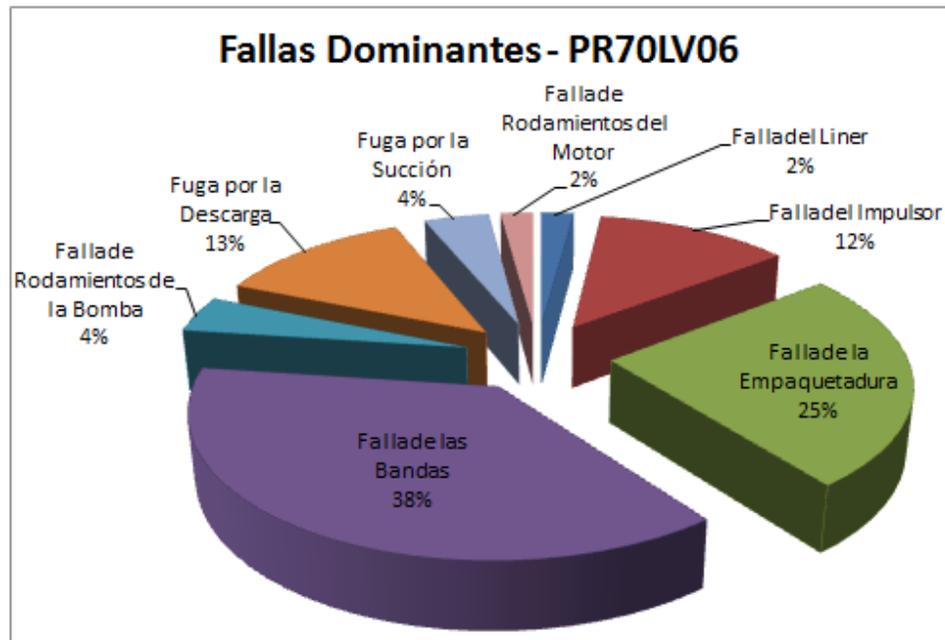
Fuente: El autor.

Figura 17. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LV05.



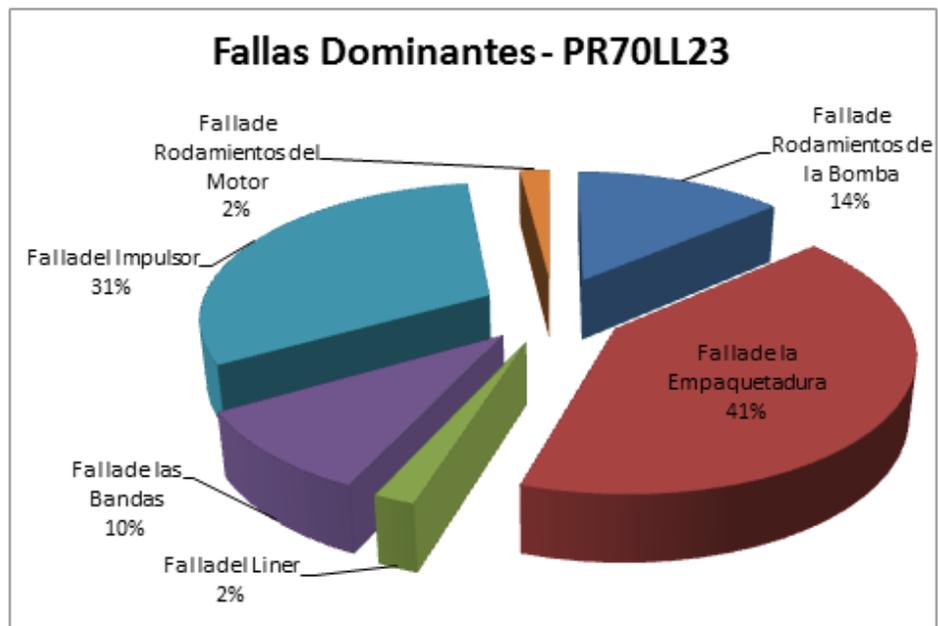
Fuente: El autor.

Figura 18. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LV06.



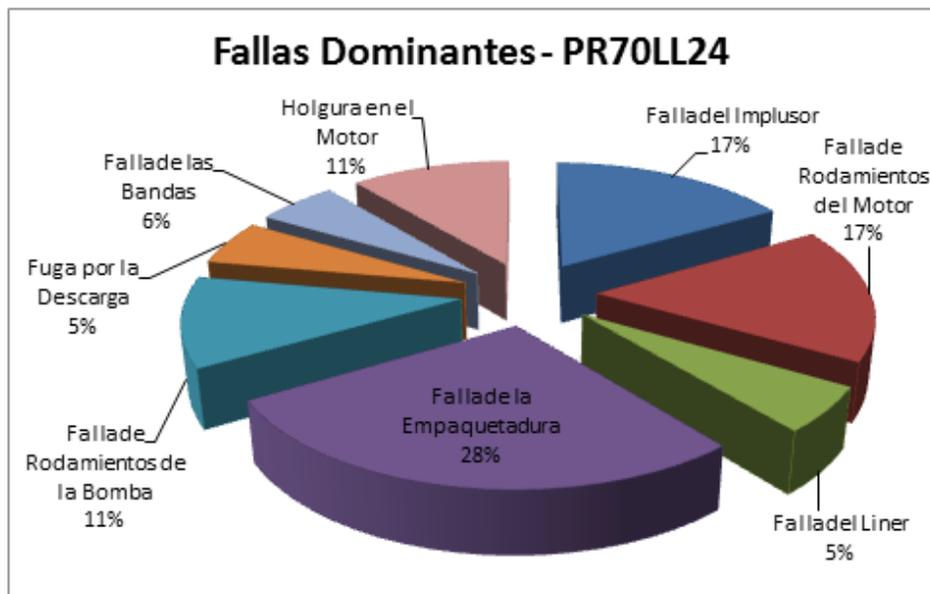
Fuente: El autor.

Figura 19. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LL23.



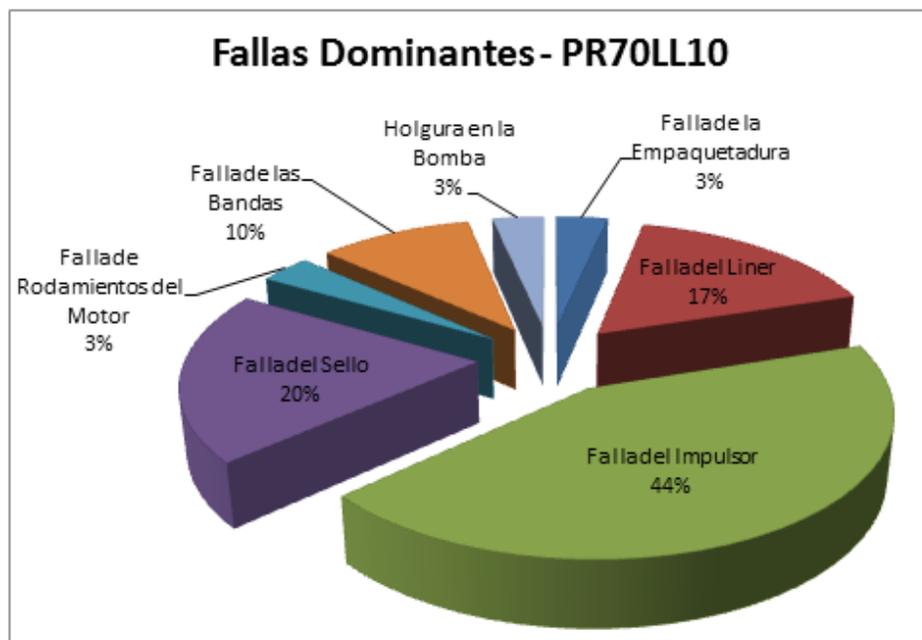
Fuente: El autor.

Figura 20. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LL24.



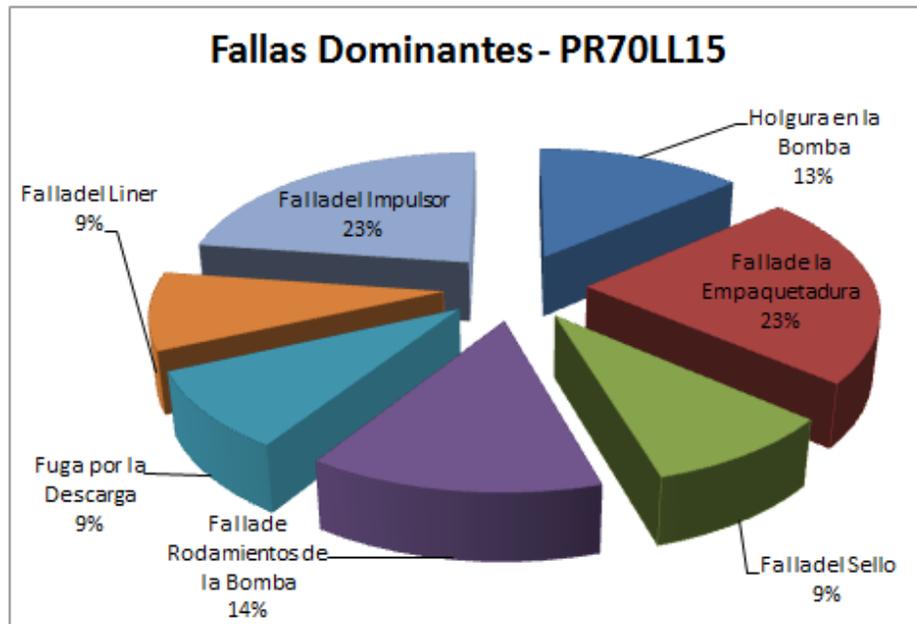
Fuente: El autor.

Figura 21. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LL10.



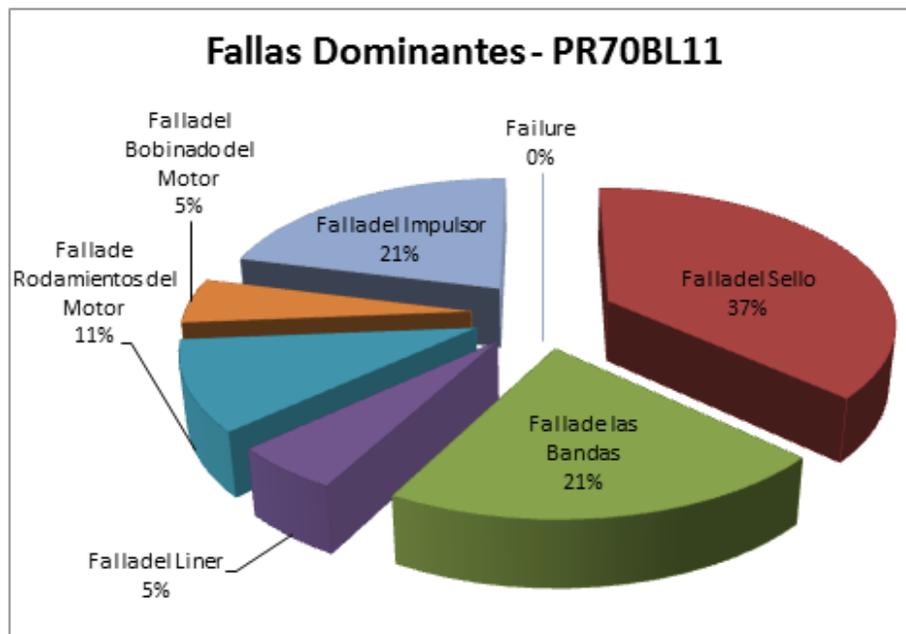
Fuente: El autor.

Figura 22. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70LL15.



Fuente: El autor.

Figura 23. Distribución de modos de falla para la ubicación técnica PR70BL11.



Fuente: El autor.

### 10.3.2. Número de Prioridad de Riesgo

Con el fin de establecer los modos de falla que generan más riesgo, se sigue la metodología del análisis de modos de falla y efectos, calculando el número de prioridad de riesgo. Para lo cual se le da una clasificación numérica a cada modo de falla, evaluando la probabilidad de ocurrencia, la severidad y la capacidad de detección de acuerdo a las tablas del Anexo G págs. 169 a 170.<sup>22</sup> El resultado se puede ver en la Tabla 24.

Tabla 24. Resultados para cálculo del número de prioridad de riesgo.

Modos de Falla	Probabilidad de ocurrencia	Severidad	Capacidad de Detección	NPR
Falla del liner	7	9	10	630
Falla del impulsor	6	9	10	540
Fugas de la bomba	8	4	10	320
Falla de la empaquetadura	7	4	6	168
Falla del sello	6	4	6	144
Falla de las bandas	7	5	3	105
Falla del aislamiento del motor	1	6	9	54
Falla de los rodamientos de la bomba	5	5	1	25
Falla de los rodamientos del motor	4	4	1	16
Holgura en la bomba	2	5	1	10
Holgura en el motor	1	5	1	5

Fuente: El autor.

En la Tabla 24 se observa cual es la prioridad en los modos de falla y de acuerdo a esto se deben enfocar las propuestas de mejora.

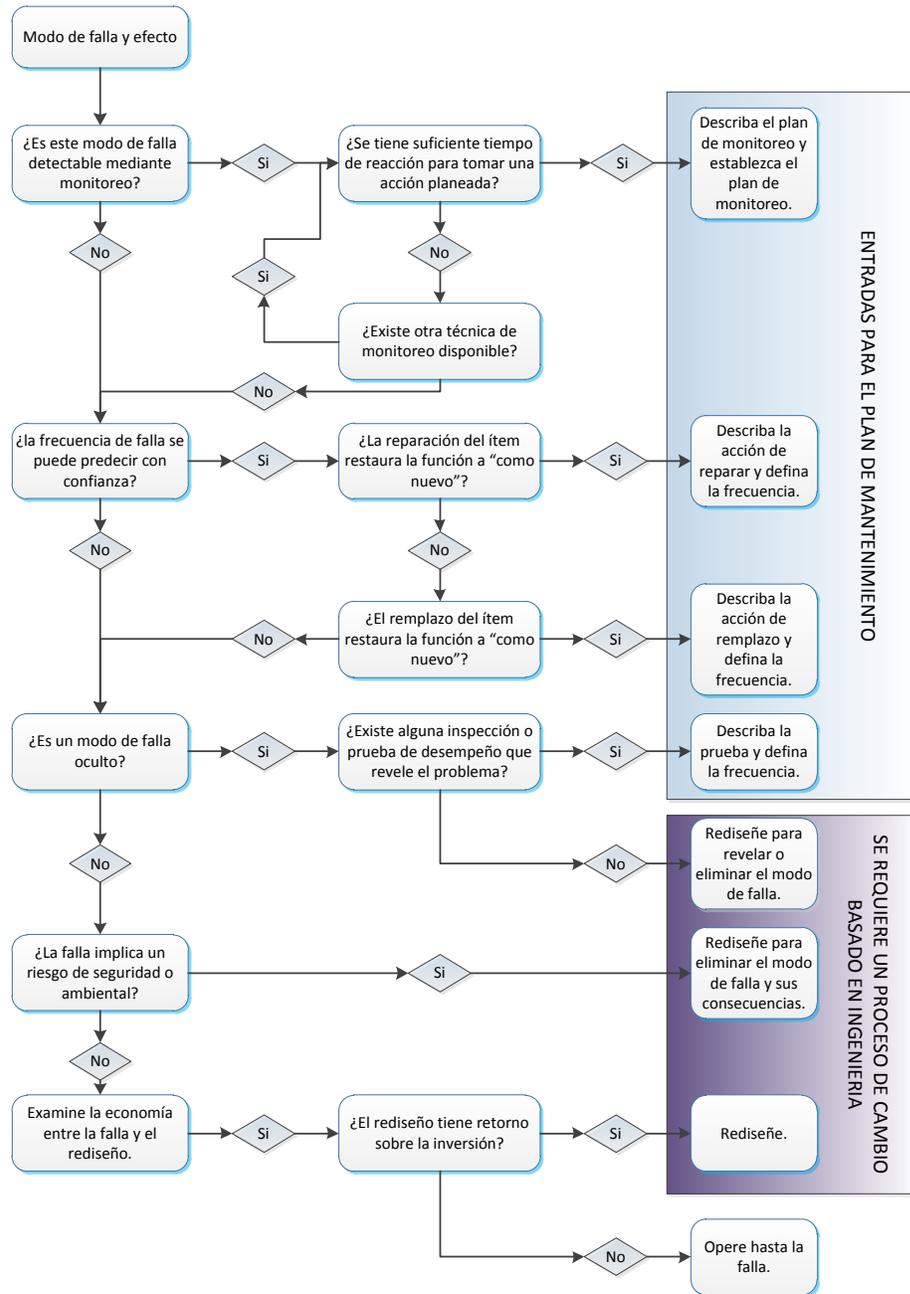
### 10.4. LÓGICA DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD

En la Figura 24 se puede observar la lógica de decisiones de acuerdo al mantenimiento basado en la confiabilidad. Empleando la secuencia lógica planteada en dicho diagrama, se analizan cada uno de los modos de falla que se

<sup>22</sup> MCDERMOTT, Robin; MIKULAK, Raymond; BEAUREGARD, Michael. The basics of FMEA. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 90 p.

encuentran con un número de prioridad de riesgo por encima de 100. De dicho análisis se llega a la conclusión de las decisiones que se muestran en la Tabla 24.

Figura 24. Diagrama lógico de decisiones del mantenimiento centrado en la confiabilidad.



Fuente: CAMPBELL, John. The reliability handbook – From downtime to uptime in no time! Plant Engineering and Maintenance, 1999, vol. 23, No. 6. 72 p.

Tabla 25. Decisiones basadas en la lógica del mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Modos de Falla	NPR	Decisión
Falla del liner	630	Rediseñar con el fin de eliminar el modo de falla
Falla del impulsor	540	Rediseñar con el fin de eliminar el modo de falla
Fugas de la bomba	320	Rediseñar con el fin de eliminar el modo de falla
Falla de la empaquetadura	168	Rediseñar con el fin de eliminar el modo de falla
Falla del sello	144	Rediseñar con el fin de eliminar el modo de falla
Falla de las bandas	105	Rediseñar con el fin de eliminar el modo de falla

Fuente: El autor.

De acuerdo con lo planteado en la Tabla 25, se requiere rediseñar y/o modificar las partes que inciden en los modos de falla que tienen mayor impacto en los sistemas de bombeo; con este fin se revisa la tecnología disponible para el bombeo de lodos.

## 10.5. CARACTERÍSTICAS DE LA PROPUESTA DE REDISEÑO

Para lograr el objetivo de eliminar o minimizar las fallas de los componentes a los cuales se les atribuye los modos de falla estudiados, se propone lo siguiente:

- Falla del liner: El liner es un recubrimiento de elastómero en la parte interior de la voluta que la protege de la corrosión del fluido a bombear y que debido a la degradación del mismo, se desprende de la voluta causando la falla del equipo. No obstante, existen otros materiales disponibles que son más resistentes a la corrosión del fluido y que no presentan este tipo de problema (Anexo H pág. 171).<sup>23</sup>
- Falla del impulsor: Esta parte presenta un comportamiento similar a la del liner y la propuesta es el cambio de material que lo recubre (Anexo H pág. 171).<sup>24,25</sup>
- Fugas de la bomba: Existen tres puntos por donde se reportan fugas en este equipo: en la succión, en la descarga y por la voluta. Las fugas de fluido por la voluta se deben a la degradación del liner o a la incorrecta instalación de este, por lo que al implementar un material que no se degrade estas fugas ya no se

<sup>23</sup> Slurry pump handbook. 5 ed. Weir Slurry Group, Inc., 2009. 56 p.

<sup>24</sup> Ibid

<sup>25</sup> BROSS, Stephan; ADDIE, Graeme. Prediction of impeller nose wear behavior in centrifugal slurry pumps. Experimental Thermal and Fluid Science. 2002, vol. 26. p. 841-849.

presentaran. Respecto a las fugas por la succión y por la descarga, se propone que las mejoras sean estudiadas en un trabajo futuro.

- Falla de la empaquetadura: La falla de este elemento se debe a que es un diseño viejo y que no es tan confiable como otros mecanismos de sellado modernos como lo son los sellos mecánicos.
- Falla del sello (retenedor): Este componente se ubica en el cuerpo de rodamientos de la bomba y su falla se debe al desgaste debido al contacto permanente de este con el eje, causando fricción y temperatura. Al respecto, existen otro tipos de elementos de sellado para estas aplicaciones que no tienen piezas en contacto, son más confiables y efectivos, como lo son los aisladores de rodamientos
- Falla de las bandas: La transmisión por bandas que tienen las bombas instaladas en la planta de caustificación se debió a la necesidad de fijar una velocidad de operación diferente a la del motor, ya que estos no tenían un controlador de velocidad. Sobre este aspecto, la necesidad de controlar de manera precisa el bombeo en la planta de caustificación ha llevado a la necesidad de instalar controladores de velocidad a los motores. Por esta razón, la transmisión por bandas no es necesaria y se propone instalar una transmisión de acople directo con mayor confiabilidad, como lo es un acople de laminillas.

#### **10.5.1. Confiabilidad estimada de la propuesta de mejora**

Para estimar la confiabilidad de la propuesta de mejora se eliminaron del listado de eventos (Anexo A págs. 125 a 140) las que corresponden a dichos modos de fallas y se remplazaron con los tiempos promedio entre fallas de los mismos componentes tomados de normas internacionales.<sup>26,27</sup>

El resultado de este estimado para cada bomba se presenta en la Tablas 26 a la 32. Para las ubicaciones técnicas PR70LV05 y PR70LV06, PR70BL02 y PR70BL03, que operan como bombas standby se decide analizar la bomba con menor confiabilidad del conjunto (que son las PR70LV06 y PR70BL02).

---

<sup>26</sup> Op cit. Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment.

<sup>27</sup> Offshore reliability data. Høvik: OREDA companies, 2002. 835 p.

Tabla 26. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70BL02.

<b>Resumen del Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70BL02</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta de Mejora</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9968	0,9989	0,0021
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0283	0,1555	0,1272
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	61,3069	172,2203	110,9134
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	363,818	364,5926	0,7746
No-disponibilidad Total (Días):	1,182	0,4074	(0,7746)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	6,3958	2,2098	(4,186)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 2.933.831	\$ 1.201.168	(\$ 1.732.663)

Fuente: El autor.

Tabla 27. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LV06.

<b>Resumen del Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LV06</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta de Mejora</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9966	0,9992	0,0026
Confiabilidad (@ 365 días):	0,008	0,011	0,003
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	55,5442	230,4803	174,9361
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	363,7638	364,6923	0,9285
No-disponibilidad Total (Días):	1,2362	0,3077	(0,9285)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	6,7111	1,6691	(5,042)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 2.909.799	\$ 940.001	(\$ 1.969.798)

Fuente: El autor.

Tabla 28. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LL23.

<b>Resumen del Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LL23</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta de Mejora</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9962	0,9997	0,0035
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0002	0,4321	0,4319
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	47,8169	505,9929	458,176
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	363,6029	364,8835	1,2806
No-disponibilidad Total (Días):	1,3971	0,1165	(1,2806)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	1,3971	0,6426	(0,7545)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 4.341.020	\$ 630.572	(\$ 3.710.448)

Fuente: El autor.

Tabla 29. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LL24.

<b>Resumen del Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LL24</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta de Mejora</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,997	0,999	0,002
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0101	0,2642	0,2541
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	63,3824	205,2219	141,8395
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	363,9144	364,6398	0,7254
No-disponibilidad Total (Días):	1,0856	0,3602	(0,7254)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	5,8833	1,9621	(3,9212)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 1.820.834	\$ 797.756	(\$ 1.023.078)

Fuente: El autor.

Tabla 30. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LL10.

<b>Resumen del Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LL10</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta de Mejora</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9972	0,9991	0,0019
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0392	0,2201	0,1809
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	73,4904	212,3847	138,8943
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	363,9834	364,6683	0,6849
No-disponibilidad Total (Días):	1,0166	0,3317	(0,6849)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	5,5069	1,8065	(3,7004)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 12.228.344	\$ 4.203.510	(\$ 8.024.834)

Fuente: El autor.

Tabla 31. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70LL15.

<b>Resumen del Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LL15</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta de Mejora</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9982	0,9992	0,001
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0362	0,2588	0,2226
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	102,0927	249,3304	147,2377
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	364,3363	364,7192	0,3829
No-disponibilidad Total (Días):	0,6637	0,2808	(0,3829)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	3,5979	1,5165	(2,0814)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 6.700.461	\$ 2.991.371	(\$ 3.709.090)

Fuente: El autor.

Tabla 32. Resultado y comparación de la propuesta de mejora para la ubicación técnica PR70BL11.

<b>Resumen del Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70BL11</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta de Mejora</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9985	0,9986	0,0001
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0375	0,0376	0,0001
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	120,6512	127,6055	6,9543
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	364,4597	364,4938	0,0341
No-disponibilidad Total (Días):	0,5403	0,5062	(0,0341)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	2,9185	2,7551	(0,1634)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 8.685.042	\$ 8.211.976	(\$ 473.066)

Fuente: El autor.

Como se puede observar, todas las ubicaciones técnicas mejoraron su disponibilidad, su confiabilidad y disminuyeron sus costos de mantenimiento.

Se debe tener en cuenta que los costos de cada intervención para reparar los equipos se consideraron iguales a las condiciones actuales.

## **11. PROPUESTAS DE MEJORA PARA CADA LÍNEA DE BOMBEO**

Con base en el índice de criticidad de las ubicaciones técnicas de cada línea de bombeo, se plantean las propuestas de mejora para dichos sistemas, con el objetivo de tener una mejor disponibilidad de los mismos.

### **11.1. PROPUESTAS DE MEJORA PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DESDE EL CLARIFICADOR DE LICOR VERDE AL TANQUE DE LICOR BLANCO**

#### **11.1.1. Propuesta 1 – Licor Blanco a plantas de pulpa**

De acuerdo al índice de criticidad de la Tabla 20, para tener un mayor impacto sobre la disponibilidad del sistema, se debe mejorar la confiabilidad del conjunto PR70BL02 - PR70BL03 y de acuerdo a la confiabilidad calculada (Anexo D págs. 160 a 161 - Tablas 80 y 81), la ubicación técnica PR70BL02 tiene un menor desempeño. Por lo que se decide remplazar este equipo por la propuesta mejorada que se estimó en la sección 10.5.1., manteniendo la característica de ser la ubicación técnica activa.

El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 33, mientras que en el Anexo I pág. 172 - Figura 63 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

#### **11.1.2. Propuesta 2 – Licor Blanco a plantas de pulpa**

El índice de criticidad del Anexo I pág. 172 - Figura 63 indica que para mejorar la disponibilidad del sistema luego de implementar la propuesta 1, se debe mejorar la confiabilidad del conjunto PR70LV05 - PR70LV06 y de acuerdo a la confiabilidad calculada (Anexos D págs. 157 a 158 - Tabla 74 y 75), la ubicación técnica PR70LV06 tiene un menor desempeño. Por lo que se decide remplazar este equipo por la propuesta mejorada que se estimó en la sección 10.5.1., manteniendo la ubicación técnica PR70LV05 como el equipo activo. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 34. Por otra parte en el Anexo I pág. 172 - Figura 64 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 33. Resultados de la implementación de la propuesta 1 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Licor Blanco a Plantas de Pulpa – Propuesta 1</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 1</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	1	1	0
Confiabilidad (@ 365 días):	0,9517	0,986	0,0343
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	7373,6864	25897,5227	18523,8363
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	364,9889	364,9967	0,0078
No-disponibilidad Total (Días):	0,0111	0,0033	(0,0078)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	0,0496	0,0143	(0,0353)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 35.149.746	\$ 33.364.812	(\$ 1.784.934)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 912.931	\$ 271.412	(\$ 641.519)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 36.062.677	\$ 33.636.224	(\$ 2.426.453)

Fuente: El autor.

Tabla 34. Resultados de la implementación de la propuesta 2 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Licor Blanco a Plantas de Pulpa – Propuesta 2</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 2</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	1	1	0
Confiabilidad (@ 365 días):	0,9517	0,991	0,0393
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	7373,6864	26840,97	19467,2836
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	364,9889	364,9984	0,0095
No-disponibilidad Total (Días):	0,0111	0,0016	(0,0095)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	0,0496	0,0101	(0,0395)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 35.149.746	\$ 31.808.014	(\$ 3.341.732)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 912.931	\$ 131.594	(\$ 781.337)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 36.062.677	\$ 31.939.608	(\$ 4.123.069)

Fuente: El autor.

## 11.2. PROPUESTAS DE MEJORA PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DESDE EL CLARIFICADOR DE LICOR VERDE HASTA EL HORNO DE CAL

### 11.2.1. Propuesta 1 – Lodos al Horno de Cal

Siguiendo el mismo enfoque y teniendo en cuenta que la ubicación técnica con mayor índice de criticidad en este sistema es la PR70LL23 (Tabla 21), se decide remplazar este equipo por la propuesta mejorada que se estimó en la sección 10.5.1. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 35. Así mismo en el Anexo I pág. 173 - Figura 65 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 35. Resultados de la implementación de la propuesta 1 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 1</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 1</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9904	0,0034
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0	0
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	17,0852	4,5571
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	361,5131	1,265
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	3,4869	(1,265)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	18,4214	(6,7499)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 60.724.988	(\$ 3.350.325)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 189.508.217	(\$ 68.751.009)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 250.233.205	(\$ 72.101.334)

Fuente: El autor.

### 11.2.2. Propuesta 2 – Lodos al Horno de Cal

El índice de criticidad del Anexo I pág. 173 - Figura 65 indica que para mejorar la disponibilidad del sistema luego de implementar la propuesta 2, se debe mejorar la confiabilidad de la ubicación técnica PR70LL24, por lo que se remplaza este equipo por la propuesta mejorada que se estimó en la sección 10.5.1. El resultado se puede ver en la Tabla 36. Igualmente en el Anexo I pág. 173 - Figura 66 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 36. Resultados de la implementación de la propuesta 2 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 2</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 2</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9925	0,0055
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0	0
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	18,736	6,2079
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	362,2462	1,9981
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	2,7538	(1,9981)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	14,502	(10,6693)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 59.740.293	(\$ 4.335.020)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 149.665.241	(\$ 108.593.985)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 209.405.534	(\$ 112.929.005)

Fuente: El autor.

### 11.2.3. Propuesta 3 – Lodos al Horno de Cal

El siguiente equipo que se debe mejorar para impactar positivamente la disponibilidad de acuerdo al Anexo I pág. 173 - Figura 66 es la ubicación técnica PR70LL10 y se implementa la mejora estimada en la sección 10.5.1. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 37. Además en el Anexo I pág. 174 - Figura 67 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

### 11.2.4. Propuesta 4 – Lodos al Horno de Cal

De acuerdo al Anexo I pág. 174 - Figura 67 el siguiente equipo que se debe cambiar para mejorar la disponibilidad es la ubicación técnica PR70LL15 y se implementa la mejora estimada en la sección 10.5.1. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 38. Del mismo modo en el Anexo I pág. 174 - Figura 68 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 37. Resultados de la implementación de la propuesta 3 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 3</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 3</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9944	0,0074
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0	0
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	26,846	14,3179
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	362,9617	2,7136
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	2,0383	(2,7136)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	10,8388	(14,3325)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 51.759.718	(\$ 12.315.595)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 110.778.800	(\$ 147.480.426)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 162.538.518	(\$ 159.796.021)

Fuente: El autor.

Tabla 38. Resultados de la implementación de la propuesta 4 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 4</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 4</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9954	0,0084
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0003	0,0003
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	31,7257	19,1976
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	363,3365	3,0884
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	1,6635	(3,0884)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	8,7768	(16,3945)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 48.158.448	(\$ 15.916.865)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 90.408.936	(\$ 167.850.290)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 138.567.384	(\$ 183.767.155)

Fuente: El autor.

### 11.2.5. Propuesta 5 – Lodos al Horno de Cal

Para continuar mejorando la disponibilidad del sistema, se cambia la ubicación técnica PR70BL11 y se implementa la mejora estimada en la sección 10.5.1. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 39. De igual forma en el Anexo I pág. 175 - Figura 69 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 39. Resultados de la implementación de la propuesta 5 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 5</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 5</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9956	0,0086
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0004	0,0004
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	32,7825	20,2544
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	363,3815	3,1334
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	1,6185	(3,1334)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	8,6051	(16,5662)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 47.708.459	(\$ 16.366.854)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 87.963.248	(\$ 170.295.978)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 135.671.707	(\$ 186.662.832)

Fuente: El autor.

### 11.2.6. Propuesta 6 – Lodos al Horno de Cal

Al observar el índice de criticidad del Anexo I pág. 175 - Figura 69 la ubicación técnica con el valor más alto sigue siendo la PR70BL11, por lo que se decide implementar una redundancia en esta ubicación con dos bombas. Una de ellas, la activa, se modela con la mejora estimada en la sección 10.5.1 y la de standby con las características de la bomba del estado actual. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 40. Por otra parte, en el Anexo I pág. 175 - Figura 70 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 40. Resultados de la implementación de la propuesta 6 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 6</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 6</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9969	0,0099
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0068	0,0068
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	48,6367	36,1086
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	363,8783	3,6302
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	1,1217	(3,6302)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	5,8741	(19,2972)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 48.184.962	(\$ 15.890.351)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 60.962.852	(\$ 197.296.374)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 109.147.814	(\$ 213.186.725)

Fuente: El autor.

### 11.2.7. Propuesta 7 – Lodos al Horno de Cal

Actualmente las ubicaciones técnicas PR70LL23 y PR70LL24 deben estar operando continuamente con el fin de suplir el flujo requerido; no obstante, en el caso de adquirir una bomba con mayor capacidad para una de las dos ubicaciones se pueden modelar como un arreglo en paralelo. Teniendo esto en cuenta, se plantea un nuevo modelo cuyo cambio respecto a la condición actual es la de instalar una bomba con la mejora estimada en la sección 10.5.1 como la bomba activa en la ubicación técnica PR70LL23. Y asignar la ubicación técnica PR70LL24 como standby; esto debido a que la ubicación técnica PR70LL23 presenta una menor disponibilidad que PR70LL24. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 41, mientras que en el Anexo I pág. 176 - Figura 71 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 41. Resultados de la implementación de la propuesta 7 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 7</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 7</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9938	0,0068
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0001	0,0001
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	26,7315	14,2034
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	362,7543	2,5062
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	2,2457	(2,5062)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	11,899	(13,2723)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$59.238.249	(\$ 4.837.064)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 122.050.705	(\$ 136.208.521)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 181.288.954	(\$ 141.045.585)

Fuente: El autor.

### 11.2.8. Propuesta 8 – Lodos al Horno de Cal

Para continuar mejorando a partir de la propuesta 7, se debe elevar el desempeño de la ubicación técnica PR70LL10. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 42. Así mismo, en el Anexo I pág. 176 - Figura 72 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 42. Resultados de la implementación de la propuesta 8 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 8</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 8</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9957	0,0087
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0007	0,0007
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	41,2144	28,6863
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	363,4195	3,1714
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	1,5805	(3,1714)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	8,3	(16,8713)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 51.416.679	(\$ 12.658.634)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 85.898.000	(\$ 172.361.226)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 137.314.679	(\$ 185.019.860)

Fuente: El autor.

### 11.2.9. Propuesta 9 – Lodos al Horno de Cal

Continuando con la implementación de estructuras redundantes, se modela la propuesta 9 con la ubicación técnica PR70LL10 con una bomba mejorada como el equipo activo y la bomba que ya se encontraba instalada como el equipo standby. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 43. Además, en el Anexo I pág. 177 - Figura 73 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

### 11.2.10. Propuesta 10 – Lodos al Horno de Cal

Del Anexo I pág. 177 - Figura 73 la siguiente ubicación técnica luego de la propuesta 8 es la PR70LL15. El resultado de esta opción se puede ver en la Tabla 44. Así mismo, en el Anexo I pág. 177 - Figura 74 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 43. Resultados de la implementación de la propuesta 9 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 9			
Estado	Actual	Propuesta 9	Diferencia
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9966	0,0096
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0013	0,0013
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	55,7591	43,231
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	363,75	3,5019
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	1,25	(3,5019)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	6,5619	(18,6094)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 53.414.166	(\$ 10.661.147)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 67.935.780	(\$ 190.323.446)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 121.349.946	(\$ 200.984.593)

Fuente: El autor.

Tabla 44. Resultados de la implementación de la propuesta 10 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 10</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 10</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9968	0,0098
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0022	0,0022
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	53,4892	40,9611
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	363,8201	3,572
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	1,1799	(3,572)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	6,1931	(18,9782)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 47.764.886	(\$ 16.310.427)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 64.125.941	(\$ 194.133.285)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 111.890.827	(\$ 210.443.712)

Fuente: El autor.

#### **11.2.11. Propuesta 11 – Lodos al Horno de Cal**

En esta propuesta se quiere evaluar la disponibilidad al implementar la propuesta 7, 9 y 10. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 45. Por otra parte, en el Anexo I pág. 178 - Figura 75 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

#### **11.2.12. Propuesta 12 – Lodos al Horno de Cal**

Esta propuesta consiste en modelar el sistema de la propuesta 7, cambiando la bomba de la ubicación técnica PR70LL10 e instalando una estructura redundante en la ubicación técnica PR70LL15. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 46, mientras que en el Anexo I pág. 178 - Figura 76 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 45. Resultados de la implementación de la propuesta 11 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 11</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 11</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9977	0,0107
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0128	0,0128
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	79,5019	66,9738
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	364,1533	3,9052
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	0,8467	(3,9052)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	4,448	(20,7233)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 49.806.289	(\$ 14.269.024)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 46.016.980	(\$ 212.242.246)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 95.823.269	(\$ 226.511.270)

Fuente: El autor.

Tabla 46. Resultados de la implementación de la propuesta 12 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 12</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 12</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9975	0,0105
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0082	0,0082
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	73,2352	60,7071
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	364,0989	3,8508
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	0,9011	(3,8508)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	4,7174	(20,4539)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 48.956.584	(\$ 15.118.729)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 48.973.545	(\$ 209.285.681)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 97.930.129	(\$ 224.404.410)

Fuente: El autor.

### 11.2.13. Propuesta 13 – Lodos al Horno de Cal

En esta propuesta se plantean tres estructuras redundantes que involucran las siguientes ubicaciones técnicas PR70LN23, PR70LN24, PR70LL10 y PR70LL15. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 47. Además en el Anexo I pág. 179 - Figura 77 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 47. Resultados de la implementación de la propuesta 13 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 13			
Estado	Actual	Propuesta 13	Diferencia
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9984	0,0114
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0382	0,0382
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	120,6258	108,0977
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	364,4307	4,1826
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	0,5693	(4,1826)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	2,9775	(22,1938)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 51.033.566	(\$ 13.041.747)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 30.940.672	(\$ 227.318.554)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 81.974.238	(\$ 240.360.301)

Fuente: El autor.

### 11.2.14. Propuesta 14 – Lodos al Horno de Cal

De manera similar, al observar el índice de criticidad del Anexo I pág. 179 - Figura 77 la siguiente ubicación técnica a mejorar es la PR70BL11. Y al realizar esta mejora se tienen los resultados de la Tabla 48 y del Anexo I pág. 179 - Figura 78.

### 11.2.15. Propuesta 15 – Lodos al Horno de Cal

Esta propuesta consiste en implementar la propuesta 7 e instalar equipos standby para las siguientes ubicaciones técnicas PR70LL10, PR70LL15 y PR70BL11. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 49. Del mismo modo, en el Anexo I pág. 180 - Figura 79 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 48. Resultados de la implementación de la propuesta 14 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 14</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 14</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	0,9985	0,0115
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,0345	0,0345
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	125,1218	112,5937
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	364,462	4,2139
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	0,538	(4,2139)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	2,8289	(22,3424)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 50.636.952	(\$ 13.438.361)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 29.239.560	(\$ 229.019.666)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 79.876.512	(\$ 242.458.027)

Fuente: El autor.

Tabla 49. Resultados de la implementación de la propuesta 15 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 15</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 15</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	1	0,013
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,927	0,927
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	4811,8024	4799,2743
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	364,983	4,7349
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	0,017	(4,7349)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	0,077	(25,0943)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 51.126.405	(\$ 12.948.908)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 29.239.560	(\$ 257.335.299)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 79.876.512	(\$ 270.284.207)

Fuente: El autor.

### 11.3. PROPUESTAS COMBINADAS

Debido a que las ubicaciones técnicas del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de Licor Blanco son equipos comunes con el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal, se desea cuantificar la disponibilidad y confiabilidad de este último sistema al implementar las mejoras sobre las ubicaciones técnicas PR70BL02 y PR70LV06.

#### 11.3.1. Propuesta 1C – Lodos al Horno de Cal (combinada)

Continuando con la mejora hecha en la propuesta 15, se implementa la mejora a la ubicación PR70BL02. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 50. En tanto que en el Anexo I pág. 180 - Figura 80 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 50. Resultados de la implementación de la propuesta 1C al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 1C</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 1C</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	1	0,013
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,986	0,986
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	25897,5227	25884,9946
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	364,9967	4,7486
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	0,0033	(4,7486)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	0,0143	(25,157)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 33.364.812	(\$ 30.710.501)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 179.350	(\$ 258.079.876)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 33.544.162	(\$ 288.790.377)

Fuente: El autor.

#### 11.3.2. Propuesta 2C – Lodos al Horno de Cal (combinada)

El siguiente paso es implementar la mejora a la ubicación PR70LV06. El resultado de esta propuesta se puede ver en la Tabla 51, mientras que en el Anexo I pág. 181 - Figura 81 se presenta el índice de criticidad para el sistema luego de implementar la propuesta.

Tabla 51. Resultados de la implementación de la propuesta 2C al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

<b>Resumen del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 2C</b>			
<b>Estado</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesta 2C</b>	<b>Diferencia</b>
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,987	1	0,013
Confiabilidad (@ 365 días):	0	0,9567	0,9567
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	12,5281	8191,1319	8178,6038
<b>Disponibilidad del Sistema</b>			
Disponibilidad (Días):	360,2481	364,9906	4,7425
No-disponibilidad Total (Días):	4,7519	0,0094	(4,7425)
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>			
Número de Fallas:	25,1713	0,0454	(25,1259)
<b>Costos</b>			
Costos de Mantenimiento (COP):	\$ 64.075.313	\$ 31.808.014	(\$ 32.267.299)
Costos de Materia Prima No Producida (COP):	\$ 258.259.226	\$ 510.877	(\$ 257.748.349)
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 322.334.539	\$ 32.318.891	(\$ 290.015.648)

Fuente: El autor.

## 12. EVALUACIÓN DE COSTOS

En la sección 11 se plantearon diferentes propuestas que mejoraron la disponibilidad y confiabilidad de los dos sistemas; no obstante, hacer funcionales dichas propuestas implica realizar inversiones en equipos nuevos. Dichas inversiones deben ser evaluadas con el fin de establecer si tienen un retorno de inversión que justifique implementarlas.

### 12.1. EVALUACIÓN DE COSTOS PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DESDE EL CLARIFICADOR DE LICOR VERDE AL TANQUE DE LICOR BLANCO

Con el fin de establecer el retorno de inversión de las propuestas para este sistema, se presentan los costos de implementación para cada una de las ubicaciones técnicas de este sistema en la Tabla 52.

Tabla 52. Costos de implementación para las ubicaciones técnicas mejoradas en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

Ubicación Técnica	Nombre del Equipo	Costo de Implementación (COP)
PR70BL02	Bomba 1 del Colector Maestro	\$ 135.000.000
PR70LV06	Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde	\$ 104.000.000

Fuente: Empresa XYZ S.A. – Cotización a Weir Minerals y a Goulds Pumps (2011).

#### 12.1.1. Evaluación de costos para la propuesta 2 del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de Licor Blanco

En la Tabla 53 se puede observar el resumen de la evaluación de la propuesta 2 de este sistema, en la que se aprecia que la inversión requerida es mayor a la inversión máxima permitida, por lo que no se debe hacer la inversión.

Tabla 53. Evaluación de costos de la propuesta 2 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

<b>Evaluación de Costos del Sistema de Bombeo de Licor Blanco a Plantas de Pulpa – Propuesta 2</b>	
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
WACC	12 %
Vida del Proyecto	20 años
Impuesto de Renta	33 %
Tasa de Retorno Requerida	25 %
Ahorro Total por Año	COP \$ 4.123.069
Inversión Requerida	COP \$ 239.000.000
Inversión Máxima Permitida	COP \$ \$ 11.679.000
Decisión de Inversión	Negativa

Fuente: El autor.

#### **12.1.1 Evaluación de costos para la propuesta 1 del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de Licor Blanco**

En la Tabla 54 se puede observar el resumen de la evaluación de la propuesta 1 de este sistema, en la que se evidencia que la inversión requerida es mayor a la inversión máxima permitida, por lo que no se debe hacer la inversión.

Tabla 54. Evaluación de costos de la propuesta 1 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

<b>Evaluación de Costos del Sistema de Bombeo de Licor Blanco a Plantas de Pulpa – Propuesta 1</b>	
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
WACC	12 %
Vida del Proyecto	20 años
Impuesto de Renta	33 %
Tasa de Retorno Requerida	25 %
Ahorro Total por Año	COP \$ 2.426.453
Inversión Requerida	COP \$ 135.000.000
Inversión Máxima Permitida	COP \$ 6.874.000
Decisión de Inversión	Negativa

Fuente: El autor.

## 12.2. EVALUACIÓN DE COSTOS PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DESDE EL CLARIFICADOR DE LICOR VERDE HASTA EL HORNO DE CAL

Los costos de implementación para cada una de las ubicaciones técnicas de este sistema se presentan en la Tabla 55.

Tabla 55. Costos de implementación para las ubicaciones técnicas mejoradas en el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.

Ubicación Técnica	Nombre del Equipo	Costo de Implementación (COP)
PR70LL23	Bomba 1 del Tanque de Lodos	\$ 135.000.000
PR70LL24	Bomba 2 del Tanque de Lodos	\$ 135.000.000
PR70LL10	Bomba de Lodos – 2nda Etapa	\$ 93.000.000
PR70LL15	Bomba de Lodos – 1ra Etapa	\$ 121.500.000
PR70BL11	Bomba de Lodos del Clarificador de Licor Blanco	\$ 93.000.000

Fuente: Empresa XYZ S.A. – Cotización a Weir Minerals y a Goulds Pumps (2011).

### 12.2.1. Evaluación de costos para la propuesta 15 del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal

En la Tabla 56 se puede observar el resumen de la evaluación de la propuesta 15 de este sistema, en la que se ve que la inversión requerida es menor a la inversión máxima permitida, por lo que es viable hacer la inversión.

Tabla 56. Evaluación de costos de la propuesta 15 al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

<b>Evaluación de Costos del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 15</b>	
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
WACC	12 %
Vida del Proyecto	20 años
Impuesto de Renta	33 %
Tasa de Retorno Requerida	25 %
Ahorro Total por Año	COP \$ 270.284.207
Inversión Requerida	COP \$ 442.500.000
Inversión Máxima Permitida	COP \$ 766.000.000
Decisión de Inversión	Positiva

Fuente: El autor.

### **12.3. EVALUACIÓN DE COSTOS PARA LA PROPUESTA COMBINADA**

#### **12.3.1. Evaluación de costos para la propuesta 2C del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal**

En la Tabla 57 se puede observar el resumen de la evaluación de la propuesta 2C de este sistema, en la que se nota que la inversión requerida es menor a la inversión máxima permitida, por lo que es viable hacer la inversión.

Esta propuesta permite elevar la disponibilidad del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal teniendo una tasa de retorno del 30%.

Tabla 57. Evaluación de costos de la propuesta combinada 2C al sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde al tanque de almacenamiento de Licor Blanco.

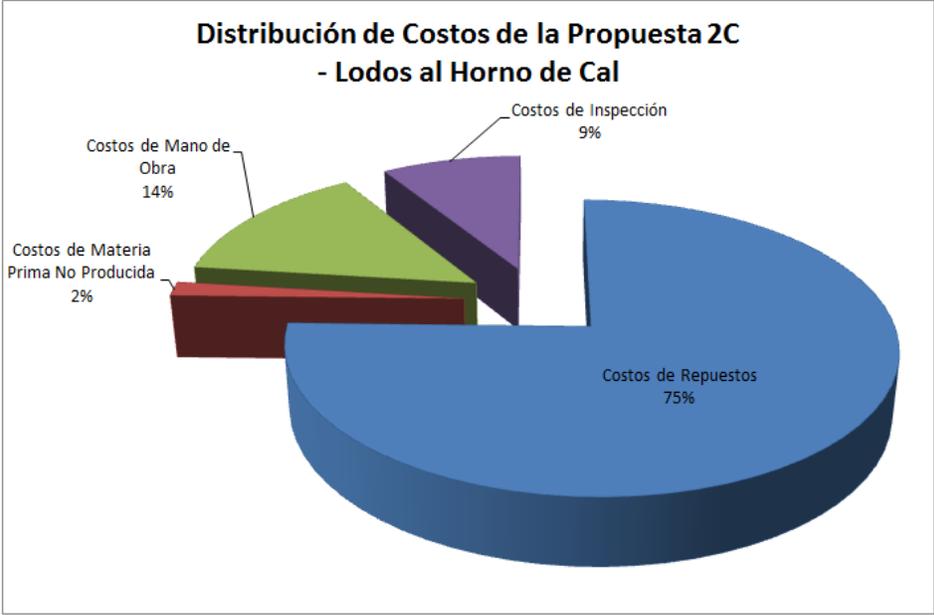
<b>Evaluación de Costos del Sistema de Bombeo de Lodos al Horno de Cal – Propuesta 2C</b>	
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
WACC	12 %
Vida del Proyecto	20 años
Impuesto de Renta	33 %
Tasa de Retorno Requerida	25 %
Ahorro Total por Año	COP \$ 290.015.648
Inversión Requerida	COP \$ 681.500.000
Inversión Máxima Permitida	COP \$ 822.000.000
Decisión de Inversión	Positiva

Fuente: El autor.

#### **12.4. PROPUESTA RECOMENDADA**

De acuerdo al resultado de la sección 12.3.1, la mejora a implementar en el sistema de bombeo es la propuesta combinada 2C. Debido a que aumenta la disponibilidad y confiabilidad en los dos sistemas de bombeo estudiados e igualmente es rentable, ya que los costos de mantenimiento se reducen en un 50% y los costos de materia prima no producida en un 99,8%. En la Figura 25 se presenta la distribución de costos de la propuesta 2C para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal. Igualmente en la Figura 26 se presenta el resultado de la simulación puntual en donde se puede observar la disponibilidad de cada equipo y su relación con la disponibilidad del sistema, para la propuesta 2C.

Figura 25. Distribución de costos de la propuesta 2C para el sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal.



Fuente: El autor.

Figura 26. Simulación puntual de la disponibilidad de equipos y del sistema de bombeo desde el clarificador de Licor Verde hasta el Horno de Cal para la propuesta 2C.



Fuente: El autor.

### 13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con este trabajo de grado queda demostrado que realizar estudios de disponibilidad y confiabilidad en la industria de la pulpa y el papel sí es viable e igualmente que se puede emplear como herramienta en la toma de decisiones financieras de la empresa. Esta herramienta integra conocimientos técnicos, de proceso y económicos, y es debido a esto que se recomienda integrar un grupo de trabajo en el cual estén representados todos los actores que pueden ser responsables o verse afectados al intervenir el sistema de estudio. Igualmente, con el fin de minimizar la resistencia al cambio de dichos actores; luego de obtener los resultados del estudio de disponibilidad y confiabilidad, refuerza la recomendación de trabajar en grupos interdisciplinarios.

Desde el punto de vista de la alta administración, el estudio permite evaluar cuáles son las acciones que tienen mayor impacto en la rentabilidad del negocio, ya que se pueden evaluar diferentes propuestas de mejora, cuantificar su ahorro y establecer su viabilidad financiera. Es de resaltar la importancia de cuantificar en términos monetarios los montos de inversión y de ahorro de cada una de las propuestas de mejora, ya que de esto depende el análisis financiero posterior al estudio de disponibilidad y confiabilidad.

Se debe tener en cuenta que cada uno de los equipos que integran el sistema estudiado tienen una distribución de falla particular y que a pesar de ser equipos con características similares y que integran el mismo sistema, son las pequeñas diferencias las que hacen necesario seleccionar correctamente los equipos para cada ubicación y de esta manera privilegiar el desempeño del sistema sobre el desempeño particular de cada componente.

Teniendo esto en cuenta, se observa que a pesar de tener equipos con altas tasas de falla, no necesariamente estos son los equipos que tienen mayor incidencia sobre la correcta operación del sistema y es aquí, donde se hace necesario tener una visión holística de la operación del sistema. De manera similar en la toma de decisión para el cambio de un equipo o en la instalación de una redundancia con el objetivo de alcanzar una disponibilidad y/o una confiabilidad establecida, no implica que dichas acciones tengan un retorno sobre la inversión. Es debido a esto que se deben generar diferentes propuestas de mejora cuyo impacto sea gradualmente descendente sobre el sistema y de manera paralela, evaluar la viabilidad financiera de cada una de ellas.

En este trabajo de grado, se tuvo como parámetro de viabilidad el indicador financiero del ahorro respecto a la inversión y este traducido en valor presente neto, pero existen otros factores bajo los cuales se pueden evaluar la viabilidad de

un sistema como lo son elementos de impacto ambiental, de seguridad, etc., los cuales permiten incorporar dentro de un mismo análisis diversos aspectos de interés para la alta administración. Esto permitiéndole tener información certera e integral que repercute en tener una ventaja competitiva respecto a las empresas del mismo sector que no afrontan las decisiones de inversión en proyectos de mejoramiento de esta manera.

### **13.1. TRABAJO POSTERIOR**

Existen pocas empresas en el sector de pulpa y papel que emplean las simulaciones de disponibilidad y confiabilidad como una herramienta de uso frecuente, por lo que no se encontró un modelo similar para el caso puntual de una planta de caustificación y poder comparar los resultados. A pesar de esto, existen otras industrias en las cuales la modelación de disponibilidad y confiabilidad hace parte de procedimientos estándares, como lo son la industria petroquímica, la generación de energía en centrales nucleares y los entes de defensa de países desarrollados. Sería de gran utilidad para la Empresa XYZ S.A. empezar a implementar una política de operación y mantenimiento enfocada a la disponibilidad y confiabilidad de sus equipos y plantas.

Actualmente las empresas que hacen uso de esta herramienta tienen en común el uso intenso de capital en activos para su operación y el impacto que tienen sobre la integridad de dichos activos, la seguridad de sus empleados y la incidencia sobre el medio ambiente. También se observa que dichas empresas hacen simulaciones de disponibilidad y confiabilidad sobre equipos y sistemas que se encuentran operando actualmente, pero esta iniciativa debe empezar desde la etapa conceptual de un proyecto y estar presente en las etapas de diseño, construcción y operación del mismo.

Para investigaciones futuras se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- Dentro del modelo desarrollado se asumió que los repuestos requeridos para reparar los equipos averiados siempre se encontraban disponibles en el almacén de repuestos; no obstante, existe la posibilidad que dichas piezas no se encontraran en el inventario. Por lo que se propone hacer un estudio de los equipos instalados en la planta de caustificación para identificar los repuestos necesarios y de acuerdo a las tasa de falla de los mismos, establecer los niveles de máximos y mínimos para cada uno de sus componentes.
- Debido a un proyecto de incremento en la capacidad de procesamiento de lodos, el cual implica la instalación de un horno de cal de mayores dimensiones, el flujo másico del circuito de recuperación se verá afectado. Por lo que se propone realizar un modelo en el cual se establezca la

capacidad actual de los equipos que componen el circuito y establecer de manera gradual cuales son los cuellos de botella una vez se instale el nuevo horno de cal.

- Durante el levantamiento de la información concerniente a las horas de operación, fechas de falla, causa de las mismas y tiempo de puesta en servicio, se encontró que no existe una manera amigable para llevar estos parámetros en el sistema de información y que esto implica que su recopilación sea intensiva en tiempo. Esto debido a que se deben consultar múltiples fuentes para su compilación y validación, por lo que se plantea realizar un estudio con el fin de identificar de qué manera se pueden implementar los sistemas de información en las empresas pensando en los indicadores y métricas requeridas para realizar estudios de disponibilidad y confiabilidad.
- En la modelación realizada solo se tuvo en cuenta como ahorro la diferencia en tiempo de disponibilidad de las diferentes propuestas planteadas respecto al estado inicial del sistema y calculando el ahorro teniendo en cuenta el costo del material procesado. A pesar de esto el ahorro total es mucho mayor, ya que no se tuvo en cuenta uno de los rubros que tiene más impacto en el costo de operación de los activos como lo es el precio de la energía. Este ahorro se debe a que al seleccionar y operar correctamente las bombas a ser cambiadas, su punto de operación se ubica más cerca al punto de mayor eficiencia del equipo y de esta manera se genera un ahorro en la energía consumida. Teniendo esto en cuenta, se plantea la necesidad de cuantificar cuanto puede ser este ahorro al comparar el consumo energético del estado inicial con el del estado mejorado.

## **14. GRAN RESUMEN**

Este trabajo de grado se desarrolló en una industria de pulpa y papel cuyos resultados están enfocados a una aplicación práctica de las herramientas para el cálculo y modelación de disponibilidad y confiabilidad tanto de equipos como de sistemas. A pesar que otras industrias; como la petroquímica, han implementado desde hace años estas herramientas y a la vez se han beneficiado de ellas, el resto de industrias no son conscientes del beneficio que provee la simulación de disponibilidad y confiabilidad. Este trabajo de grado es un intento para demostrar su aplicación en una industria diferente a la petroquímica y a la vez de contribuir a acortar la distancia que existe entre los modelos matemáticos y la decisión de inversión en un proyecto de mejora.

Existen dos grupos de conclusiones y recomendaciones que se derivan de los resultados de esta tesis, el primer grupo es la condición particular de la Empresa XYZ S.A. respecto a la modelación de disponibilidad y confiabilidad en los sistemas de bombeo en la planta de caustificación y el segundo grupo está enfocado a la modelación en el campo industrial de manera general.

### **14.1. SISTEMAS DE BOMBEO EN LA PLANTA DE CAUSTIFICACIÓN DE LA EMPRESA XYZ S.A.**

- La información requerida para la modelación, como lo son los eventos de falla, los modos de falla, los periodos de operación, el tiempo de reparación y puesta en servicio, etc. no se encuentran disponibles de manera explícita en una base de datos, por lo que dicha información se debe extraer de las órdenes de trabajo en el sistema de información. Esta actividad hace que el proceso de recopilación de datos sea complejo e intenso en tiempo.
- La estructura jerárquica que esta implementada en el sistema de información de la Empresa XYZ S.A. facilita el análisis de eventos de falla por componentes, sistemas y sub-sistemas.
- El equipo al cual se le atribuyen la mayor cantidad de fallas en las ubicaciones técnicas estudiadas son las bombas y dentro de sus componentes están los liners y el impulsor.
- Debido a la característica aleatoria en los modos de falla de los liners, impulsores y fugas, las distribuciones de falla para la mayoría de las

ubicaciones técnicas reflejan una tendencia a la de mortandad infantil, lo cual hace que el mantenimiento preventivo (cambio de componentes de acuerdo a tiempo y/o ciclos de operación) no sea efectivo para mejorar su confiabilidad.

- Debido a que las tasas de falla de cada una de las ubicaciones técnicas no es constante, se requiere emplear modelos dinámicos para la simulación de disponibilidad y confiabilidad.
- Se encontró que el material empleado para los liners e impulsores no es el adecuado para las características de los fluidos que se manejan en la planta de caustificación.
- Para mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas de bombeo se requiere hacer cambios en el diseño de los equipos instalados.
- El monitoreo de condición que actualmente se hace a las ubicaciones técnicas estudiadas en la planta de caustificación no es capaz de detectar los modos de falla que causan mayor impacto en la disponibilidad del sistema.
- Los niveles de tiempo promedio entre fallas de las ubicaciones técnicas estudiadas en la planta de caustificación se encuentran por debajo de los valores mundiales para equipos similares.
- Una fuente de error en el modelo es el supuesto de tomar el tiempo de puesta en servicio igual para todas las ubicaciones técnicas basado en la similitud de construcción y disposición de las mismas. Este error se debe a que no existe una base de datos en el cual se registre este tiempo para cada una de las ubicaciones técnicas.
- El error de la modelación es suficientemente bajo para considerar válido el modelo y bajo esta premisa se plantean las propuestas de mejora.
- Se requiere hacer una modelación de disponibilidad y confiabilidad de un sistema con el fin de identificar de manera precisa que equipo y/o componente impacta más el sistema.
- La instalación de estructuras en paralelo brindan una mayor confiabilidad al sistema de bombeo en la planta de caustificación.
- La propuesta 2C requiere una inversión aproximada de 682 millones de pesos, la cual permite un ahorro anual de 290 millones de pesos que principalmente se deben al ahorro en materia prima no producida. Igualmente, dicho ahorro

permite recuperar la inversión en un periodo no superior a 2.5 años y tener una tasa de retorno del 30% en un periodo de 20 años.

- En la selección de equipos y componentes se debe conocer plenamente las condiciones de operación e incluir como criterio la confiabilidad de los mismos.
- En un escenario en el que se deba implementar la propuesta 2C por fases, se debe seguir el siguiente orden en cuanto a la criticidad e impacto en la disponibilidad y confiabilidad del sistema:
  - PR70LL23 - Bomba 1 del Tanque de Lodos
  - PR70LL10 - Bomba de Lodos – 2nda Etapa
  - PR70LL15 - Bomba de Lodos – 1ra Etapa
  - PR70BL11 - Bomba de Lodos del Clarificador de Licor Blanco
  - PR70BL02 - Bomba 1 del Colector Maestro
  - PR70LV06 - Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde

#### **14.2. MODELACIÓN DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD EN LA INDUSTRIA**

De este trabajo de grado se hacen las siguientes conclusiones respecto a la modelación de disponibilidad y confiabilidad:

- La modelación de disponibilidad y confiabilidad no es una práctica común en la mayoría de las industrias y de manera específica tampoco lo es en la industria de pulpa y papel.
- La modelación de disponibilidad y confiabilidad es desarrollada actualmente por consultores, ya que es una labor que demanda un conocimiento específico y a la vez es una actividad que demanda gran cantidad de tiempo y análisis.
- Es de esperarse que de manera similar a como se ha dado el desarrollo y el aumento de la modelación de procesos y de fenómenos físicos (mecánica de sólidos y de fluidos, termodinámica, etc.) se dé un incremento en la modelación de disponibilidad y confiabilidad de equipos y sistemas.
- Es técnicamente viable implementar la simulación de disponibilidad y confiabilidad en una empresa cuando se cumplen los siguientes requisitos:
  - Existe un sistema de información que brinda información precisa y acertada con la cual se puede construir el modelo.

- Existe una base de datos independientes con el fin de validar el modelo desarrollado con los datos del sistema de información.
- Se tiene un software adecuado y disponible.
- Es viable implementar la simulación de disponibilidad y confiabilidad desde el punto de vista organizacional cuando una empresa tiene en cuenta los siguientes aspectos:
  - La confiabilidad debe ser considerada estratégica para la sostenibilidad de la empresa a largo plazo.
  - Los sistemas a modelar deben ser críticos para la operación del proceso.
  - Se debe entrenar a las personas.
  - Se debe desarrollar un proceso para implementar las herramientas, en el cual se estipulen guías para establecer la selección de sistemas a modelar, para la implementación de las recomendaciones y el cómo evaluar el cumplimiento de objetivos de los proyectos.

## BIBLIOGRAFÍA

AHLUWALIA, Rashpal. A software tool for reliability estimation. *Quality Engineering*. Vol. 15, No. 4 (2003); p. 593-608.

ALEXANDER, Dennis. Application of Monte Carlo simulations to system reliability analysis. *Proceedings of the Twentieth International Pump Users Symposium*. (2003); p. 91-94.

ANDERSEN, Bjørn; FAGERHAUND, Tom. *Root cause analysis – Simplified tools and techniques*. 2 ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2006. 223 p.

ANDERSON-COOK, Christine. Evaluating the series or parallel structure assumption for system reliability. *Quality Engineering*. Vol. 21, No. 1 (2008); p. 88-95.

BARBERA, Fran; SCHNEIDER, Helmut; KELLE, Peter. A condition based maintenance model with exponential failures and fixed inspection intervals. *The Journal of the Operational Research Society*. Vol. 47, No. 8 (1996); p. 1037-1045.

BARTLETT, L.M.; HURDLE, E.E.; KELLY, E.M. Integrated system fault diagnostics utilizing and fault tree-based approaches. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 94 (2009); p. 1107-1115.

BAZOVSKY, Igor. *Reliability theory and practice*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1961. 292 p.

BENBOW, Donald; BROOME, Hugh. *The certified reliability engineer handbook*. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2009. 305 p.

BLOCH, Heinz. Pump statistics should shape strategies. *Process Machinery Consulting*. (2008); p. 1-4.

BRALL, Aron; HAGEN, William; TRAN, Hung. Reliability block diagram modeling – comparisons of three software packages. *Reliability and Maintainability Symposium*. (2007); p. 119-124.

BROSS, Stephan; ADDIE, Graeme. Prediction of impeller nose wear behavior in centrifugal slurry pumps. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 26 (2002); p. 841-849.

CAMPBELL, John. The reliability handbook – From downtime to uptime in no time! Plant Engineering and Maintenance. Vol. 23, No. 6 (1999); 72 p.

COOLEN, F. Parametric probability distributions in reliability. Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment. (2008); p. 1-10.

CHAMBAL, Stephen; KEATS, Bert. Evaluating complex system reliability using reliability block diagram simulation when little or no failure data are available. Quality Engineering. Vol. 13, No. 2 (2000); p. 169-177.

COIT, David; JIN, Tongdan. Gamma distribution parameter estimation for field reliability data with missing failure times. IIE Transactions. Vol. 32 (2000); p. 1161-1166.

DALEY, Daniel. Failure mapping – A new and powerful tool for improving reliability and maintenance. New York: Industrial Press Inc., 2009. 161 p.

DALEY, Daniel. The little black book of maintenance excellence. New York: Industrial Press Inc., 2008. 272 p.

DISTEFANO, Salvatore; PULIAFITO, Antonio. Dynamic reliability block diagrams vs. dynamic fault trees. Reliability and Maintainability Symposium. (2007); p. 71-76.

DODSON, Bryan. The weibull analysis handbook. 2 ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2006. 167 p.

ETI, M., OGAJI, S., ROBERT, S. Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture. Applied Energy. Vol. 83 (2006); p. 1235-1248.

FIGIEL, Kerry; SULE, Dileep. A generalized reliability block diagram (RBD) simulation. Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference. (1990); p. 551-556.

FORCHÉ; Robert. Analysis of reliability block diagrams with multiple blocks per container. IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. (1990); p. 145-148.

FUQUA, Norman. The applicability of Markov analysis methods to reliability, maintainability and safety. Selected Topics in Assurance Related Technologies. Vol. 10, No. 2 (2003); p. 1-8.

GALLEY, Mark. Basic elements of a comprehensive root cause analysis program. Reliability World Conference Proceedings. (2007); p. 225-228.

GANO, Dean. Apollo root cause analysis: effective problem solving defined. Apollo Associated Services, Inc., 2000. 12 p.

GIBSON, Martin. Measuring the reliability improvement process in advanced quality planning. Total Quality Management. Vol. 8, No. 2-3 (1997); p. 161-164.

GUO, Lijie; GAO, Jinji; YANG, Jianfeng; KANG, Jianxin. Criticality evaluation of petrochemical equipment based on fuzzy comprehensive evaluation and a BP neural network. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 22 (2009); p. 469-476.

GOUGH, William; RILEY, Jeff; KOREN, James. A new approach to the analysis of reliability block diagrams. IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. (1990); p. 456-464.

Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment. West Bethesda: Naval Surface Warfare Centre, 2011. 522 p.

HANNENMAN, Ralph. Understanding the basic of failure and event coding for EAM and CMMS. Meridium. (2009); p. 1-13.

HERNANDEZ, Juan. Impact of the pump systems availability in the plant maintenance: model development. Manchester, 2006. 204 p. Master of Science dissertation. The University of Manchester. Faculty of Engineering and Physical Sciences.

Impact of maintenance strategy on reliability. IEEE/PES task force on impact of maintenance strategy on reliability of the reliability, risk and probability applications subcommittee, 1999. 31 p.

ISO 14224:2006 Petroleum and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.

JUAN, Ángel; VILA, Alicia. SREMS: System reliability using Monte Carlo simulation with VBA and Excel. Quality Engineering. Vol. 15, No. 2 (2002); p. 333-340.

KECECIOGLU, Dimitri. Reliability engineering handbook, Volume 1. Lancaster: DEStech Publications, Inc., 2002. 691 p.

KECECIOGLU, Dimitri. Reliability engineering handbook, Volume 2. Lancaster: DEStech Publications, Inc., 2002. 550 p.

KNIGHT, John; NAKANO, Luís. Software test techniques for system fault-tree analysis. The 16th International Conference on Computer Safety, Reliability and Security. (1997); p.1-13.

LIPOL, Lefayet; HAQ, Jahirul. Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations. International Journal of Basic and Applied Sciences. Vol. 11, No. 5 (2011); p. 74-82.

LOBANOFF, Val; ROSS, Robert. Centrifugal pumps – Design and application. 2 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1992. 577 p.

MANNO, Gabriele. Reliability modeling of complex systems: an adaptive transition system approach to match accuracy and efficiency. Catania, 2011. 189 p. Tesi di dottorato (Dottorato di Ricerca in Matematica Applicata all'Ingegneria). Università degli studi di Catania.

MANZINI, Riccardo; REGATTIERI, Alberto; PHAM, Hoang; FERRARI, Emilio. Maintenance for industrial systems. London: Springer-Verlag London Limited, 2010. 479 p.

MARQUEZ, Crespo; IUNG, Benoît. A structured approach for the assessment of system availability and reliability using Monte Carlo simulation. Journal of Quality in Maintenance Engineering. Vol. 13, No. 2 (2007); p. 125-136.

MCDERMOTT, Robin; MIKULAK, Raymond; BEAUREGARD, Michael. The basics of FMEA. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 90 p.

MELO, R.; LARA, C.; JACOBO, J. Estimación de la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad mediante una simulación tipo Monte Carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería. Tecnol. Ciencia Ed. Vol. 24, No. 2 (2009); p. 93-104.

MURTHY, D.N. Prabhakar; RAUSAND, Marvin; Østerås. Product reliability – Specification and performance. London: Springer-Verlag London Limited, 2008. 284 p.

NESBITT, Brian. Handbook of pumps and pumping. Burlington: Elsevier Inc., 2006. 470 p.

NOWLAN, F. Stanley; HEAP, Howard. Reliability centered maintenance. San Francisco: Dolby Access Press, 1978. 476 p.

Offshore reliability data. Høvik: OREDA companies, 2002. 835 p.

Pumping principles. Payson: Technical Learning College, 2005. 252 p.

RAUSAND, Marvin; HØYLAND, Arnljot. System reliability theory – Models, statistical methods and applications. 2 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 636 p.

ROBERTS, Norman; VESELY, William; HAASL, David; GOLDBERG, Francine. Fault tree handbook. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981.

SANCHEZ, Dale. Reausticizing – principles and practice. TAPPI Kraft Recovery Course. (2012); p. 1-30.

SHALEV, Dan; TIRAN, Joseph. Condition-based fault tree analysis (CBFTA): A new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations. Reliability Engineering and System Safety. Vol. 92 (2007); p. 1231-1241.

SHARMA, Rajiv; SHARMA, Pooja. System failure behavior and maintenance decision making using, RCA, FMEA and FM. Journal of Quality in Maintenance Engineering. Vol. 16, No. 1 (2010); p. 64-88.

Slurry pump handbook. 5 ed. Weir Slurry Group, Inc., 2009. 56 p.

SMITH, Ricky; HAWKINS, Bruce. Lean maintenance. Burlington: Elsevier Inc., 2004. 287 p.

SUNAVALA, Kaizad. The value of RAM. ABB Special Report – Process Automation Services and Capabilities. (2008); p. 74-78.

TAN, Cher; RAGHAVAN, Nagarajan. Root cause analysis based maintenance policy. International Journal of Quality and Reliability Management. Vol. 24, No. 2 (2007); p. 203-228

TASAMA, Julián; GÓMEZ, Santiago; HOLGUÍN, Mauricio. Análisis de confiabilidad aplicado a una conformadora de rollos empleando la técnica de modos de fallo. Scientia et Technia. Año XV, No. 41 (2009); p. 7-12.

TORRELL, Wendy; AVELAR, Victor. Mean time between failures: explanation and standards. APC by Schneider Electric, white paper 78, rev 1, 2010. 10 p.

TRAN, Honghi; VAKKILAINNEN, Esa. The kraft chemical recovery process. TAPPI Kraft Recovery Course. (2012); p. 1-8.

TSAI, Yuo-Tern; WANG, Kuo-Shong; TSAI, Lin-Chang. A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems. Reliability Engineering and System Safety. Vol. 84 (2004); p. 261-270.

Van LUIJK, J. A. Availability simulation modeling in a chemical manufacturing company. 143 p. Delft, 2003. Master of Science thesis (Systems Engineering and

Policy Analysis). Delft University of Technology. Faculty of Technology, Policy and Management.

VERMA, Ajit; AJIT; Srividya; KARANKI, Durga. Reliability and safety engineering. London: Speinger-Verlag London Limited, 2010. 535 p.

VLOK, P.J.; COETZEE, J.L.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A.; MAKIS, V. Optimal component replacement decisions using vibration monitoring and the proportional-hazards model. The Journal of the Operational Research Society. Vol. 53, No. 2 (2002); p. 193-202.

WANG, Hongzhou; PHAM, Hoang. Reliability and optimal maintenance. London: Speinger-Verlag London Limited, 2006. 345 p.

WANG, Wendai; LOMAN, James; VASSILLIOU, Pantelis. Reliability importance of components in a complex system. IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. (2004); p. 1-6.

WILSON, K.C.; ADDIE, G.R.; SELLGREN, A.; CLIFT, R. Slurry transport using centrifugal pumps. 3 ed. New York: Springer Science + Business Media, Inc., 2006. 432 p.

WON, J.K.; MODARRES, M. Improved Bayesian method for diagnosing equipment partial failures in process plants. Computers Chem. Engng. Vol. 22, No. 10 (1998); p. 1483-1502.

ZHAO, Y. On preventive maintenance policy of a critical reliability level for system subject to degradation. Reliability Engineering and System Safety. Vol. 79 (2003); p. 301-308.

# ANEXOS

## Anexo A. Tiempos de Operación y Clasificación de los Eventos de Acuerdo a los Modos de Falla para cada Ubicación Técnica

**Tabla 58. Datos para la ubicación técnica PR70LV05 - Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde.**

Ubicación Técnica: PR70LV05		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	10/03/2005	Falla del Liner		68	68
2	12/06/2005	Falla del Impulsor	Falla del Liner	162	94
3	15/07/2005	Falla de la Empaquetadura		195	33
4	21/07/2005	Falla del Impulsor	Falla del Liner	201	6
5	10/08/2005	Falla del Impulsor		221	20
6	08/09/2005	Fuga por la Descarga		250	29
7	15/09/2005	Falla del Sello		257	7
8	16/09/2005	Falla de la Empaquetadura		258	1
9	18/01/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	382	124
10	20/09/2006	Falla del Liner		627	245
11	05/12/2006	Falla del Impulsor		703	76
12	07/12/2006	Falla de la Empaquetadura		705	2
13	07/02/2007	Falla del Liner		767	62
14	13/03/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	801	34
15	23/04/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	842	41
16	14/05/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	863	21
17	07/07/2007	Fuga por la Succión		917	54
18	18/07/2007	Fuga por la Succión		928	11
19	14/12/2007	Falla de Rodamientos de la Bomba		1077	149
20	06/02/2008	Falla de la Empaquetadura		1131	54
21	09/02/2008	Falla de la Empaquetadura		1134	3
22	08/03/2008	Falla de la Empaquetadura		1162	28
23	11/03/2008	Falla de Rodamientos de la Bomba		1165	3
24	20/03/2008	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1174	9
25	15/09/2008	Falla de la Empaquetadura		1353	179
26	28/09/2008	Falla de las Bandas		1366	13
27	17/11/2008	Falla de la Empaquetadura		1416	50
28	31/12/2008	Falla del Impulsor		1460	44
29	12/01/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1472	12
30	16/12/2009	Fuga por la Descarga		1810	338
31	21/04/2010	Fuga por la Succión		1936	126
32	05/05/2010	Falla del Impulsor		1950	14
33	05/07/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2011	61
34	11/10/2010	Falla del Liner		2109	98
35	23/11/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2152	43
36	22/05/2011	Falla de la Empaquetadura		2332	180

Fuente: El autor.

**Tabla 59. Datos para la ubicación técnica PR70LV06 - Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde.**

Ubicación Técnica: PR70LV06		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	08/02/2005	Falla del Liner		38	38
2	27/02/2005	Falla del Impulsor	Falla del Liner	57	19
3	09/05/2005	Falla de la Empaquetadura		128	71
4	20/05/2005	Falla de las Bandas		139	11
5	13/07/2005	Falla de las Bandas		193	54
6	18/09/2005	Falla del Impulsor		260	67
7	27/02/2006	Falla de la Empaquetadura		422	162
8	12/04/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		466	44
9	13/05/2006	Falla de la Empaquetadura		497	31
10	02/07/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	547	50
11	05/07/2006	Fuga por la Descarga		550	3
12	06/07/2006	Fuga por la Descarga		551	1
13	12/07/2006	Falla de las Bandas		557	6
14	21/09/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	628	71
15	12/02/2007	Fuga por la Descarga		772	144
16	16/02/2007	Fuga por la Succión		776	4
17	27/04/2007	Falla de la Empaquetadura		846	70
18	15/06/2007	Falla de las Bandas		895	49
19	20/06/2007	Falla de las Bandas		900	5
20	27/07/2007	Fuga por la Descarga		937	37
21	05/08/2007	Falla de la Empaquetadura		946	9
22	16/08/2007	Falla de la Empaquetadura		957	11
23	10/09/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	982	25
24	08/03/2008	Falla de la Empaquetadura		1162	180
25	26/08/2008	Falla de las Bandas		1333	171
26	28/08/2008	Falla de las Bandas		1335	2
27	03/09/2008	Falla de la Empaquetadura		1341	6
28	10/11/2008	Falla de la Empaquetadura		1409	68
29	01/02/2009	Falla de las Bandas		1492	83
30	23/04/2009	Falla de Rodamientos del Motor		1573	81
31	05/11/2009	Fuga por la Succión		1769	196
32	21/11/2009	Fuga por la Descarga		1785	16
33	21/01/2010	Falla de las Bandas		1846	61
34	06/04/2010	Falla de Rodamientos de la Bomba		1921	75
35	09/04/2010	Falla de las Bandas		1924	3
36	07/05/2010	Falla de las Bandas		1952	28
37	15/05/2010	Falla de las Bandas		1960	8
38	16/08/2010	Falla de las Bandas		2053	93
39	11/11/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2140	87
40	22/11/2010	Falla de la Empaquetadura		2151	11
41	23/11/2010	Falla de la Empaquetadura		2152	1
42	09/01/2011	Falla de las Bandas		2199	47
43	10/01/2011	Falla de las Bandas		2200	1
44	06/03/2011	Falla de las Bandas		2255	55
45	29/05/2011	Fuga por la Descarga		2339	84
46	20/06/2011	Falla de las Bandas		2361	22
47	15/09/2011	Falla de las Bandas		2448	87
48	24/11/2011	Falla de la Empaquetadura		2518	70

Fuente: El autor.

**Tabla 60. Datos para la ubicación técnica PR70LV08 - Bomba 1 del Tanque de Licor Verde.**

Ubicación Técnica: PR70LV08		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	25/03/2005	Falla de las Bandas		83	83
2	13/05/2005	Fuga por la Descarga		132	49
3	12/07/2005	Fuga por la Descarga		192	60
4	27/07/2005	Falla de Rodamientos de la Bomba		207	15
5	21/08/2005	Falla de la Empaquetadura		232	25
6	12/09/2005	Falla de la Empaquetadura		254	22
7	27/09/2005	Falla de la Empaquetadura		269	15
8	12/11/2005	Falla de Rodamientos del Motor		315	46
9	1/03/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		424	109
10	13/03/2006	Falla de la Empaquetadura		436	12
11	31/03/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	454	18
12	30/04/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	484	30
13	7/06/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	522	38
14	12/06/2006	Falla de las Bandas		527	5
15	15/06/2006	Falla de la Empaquetadura		530	3
16	21/06/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		536	6
17	26/08/2006	Falla de las Bandas		602	66
18	27/08/2006	Fuga por la Descarga		603	1
19	18/09/2006	Falla de las Bandas		625	22
20	1/11/2006	Falla de las Bandas		669	44
21	3/12/2006	Falla de las Bandas		701	32
22	30/01/2007	Falla de las Bandas		759	58
23	2/02/2007	Falla de las Bandas		762	3
24	9/02/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	769	7
25	6/04/2007	Falla de las Bandas		825	56
26	11/07/2007	Falla de las Bandas		921	96
27	6/09/2007	Falla de las Bandas		978	57
28	9/10/2007	Fuga por la Succión		1011	33
29	25/10/2007	Falla de las Bandas		1027	16
30	8/11/2007	Falla de Rodamientos de la Bomba		1041	14
31	14/02/2008	Falla de Rodamientos de la Bomba		1139	98
32	19/02/2008	Falla de las Bandas		1144	5
33	23/04/2008	Fuga por la Descarga		1208	64
34	19/07/2008	Falla de las Bandas		1295	87
35	9/08/2008	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1316	21
36	11/09/2008	Fuga por la Succión		1349	33
37	28/10/2008	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1396	47
38	25/11/2008	Falla de las Bandas		1424	28
39	28/11/2008	Falla de la Empaquetadura		1427	3
40	16/01/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1476	49
41	30/04/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1580	104
42	28/05/2009	Fuga por la Descarga		1608	28
43	10/12/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1804	196
44	22/01/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1847	43
45	21/02/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1877	30
46	15/04/2010	Falla de las Bandas		1930	53
47	19/04/2010	Falla de las Bandas		1934	4
48	4/05/2010	Falla de las Bandas		1949	15
49	14/04/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2294	345
50	27/04/2011	Falla de las Bandas		2307	13
51	22/06/2011	Falla de las Bandas		2363	56
52	7/07/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2378	15
53	11/07/2011	Falla de las Bandas		2382	4
54	14/07/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2385	3
55	10/11/2011	Falla de las Bandas		2504	119

Fuente: El autor.

**Tabla 61. Datos para la ubicación técnica PR70LV09 - Bomba 2 del Tanque de Licor Verde.**

Ubicación Técnica: PR70LV09		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	19/01/2005	Fuga por el Tapon		18	18
2	07/02/2005	Fuga por el Tapon		37	19
3	20/04/2005	Falla de la Empaquetadura		109	72
4	21/04/2005	Fuga por el Tapon		110	1
5	11/05/2005	Falla de las Bandas		130	20
6	16/05/2005	Fuga por el Tapon		135	5
7	01/07/2005	Falla de Rodamientos de la Bomba		181	46
8	15/12/2005	Falla de la Empaquetadura		348	167
9	11/01/2006	Eje de la Boma Fracturado		375	27
10	16/01/2006	Falla de las Bandas		380	5
11	21/01/2006	Falla de la Empaquetadura		385	5
12	10/02/2006	Fuga por la Descarga		405	20
13	21/02/2006	Falla de la Empaquetadura		416	11
14	12/04/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		466	50
15	12/06/2006	Falla de las Bandas		527	61
16	21/06/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		536	9
17	05/07/2006	Falla de las Bandas		550	14
18	12/09/2006	Falla de la Empaquetadura		619	69
19	22/05/2007	Fuga por la Descarga		871	252
20	22/07/2007	Falla de las Bandas		932	61
21	06/09/2007	Fuga por el Caracol		978	46
22	21/12/2007	Falla de la Empaquetadura		1084	106
23	13/01/2008	Fuga por el Tapon		1107	23
24	19/01/2008	Falla de la Empaquetadura		1113	6
25	23/01/2008	Falla de las Bandas		1117	4
26	25/01/2008	Falla de la Empaquetadura		1119	2
27	11/02/2008	Falla de Rodamientos de la Bomba		1136	17
28	19/02/2008	Falla de la Empaquetadura		1144	8
29	08/03/2008	Fuga por la Descarga		1162	18
30	11/03/2008	Falla de la Empaquetadura		1165	3
31	08/04/2008	Fuga por la Descarga		1193	28
32	07/05/2008	Holgura en la Bomba		1222	29
33	12/06/2008	Holgura en la Bomba		1258	36
34	08/07/2008	Holgura en la Bomba		1284	26
35	24/07/2008	Fuga por el Caracol		1300	16
36	25/07/2008	Falla de la Empaquetadura		1301	1
37	05/08/2008	Holgura en la Bomba		1312	11
38	17/08/2008	Falla de la Empaquetadura		1324	12
39	13/09/2008	Falla de la Empaquetadura		1351	27
40	14/11/2008	Falla de la Empaquetadura		1413	62
41	17/02/2009	Fuga por el Tapon		1508	95
42	27/05/2009	Falla de la Empaquetadura		1607	99
43	14/06/2009	Falla de las Bandas		1625	18
44	30/06/2009	Falla de la Empaquetadura		1641	16
45	08/07/2009	Eje de la Boma Fracturado		1649	8
46	11/08/2009	Falla del Liner		1683	34
47	30/06/2010	Falla de la Empaquetadura		2006	323
48	28/07/2010	Falla de la Empaquetadura		2034	28
49	30/07/2010	Falla de Rodamientos de Motor		2036	2
50	11/09/2010	Falla de la Polea del Motor		2079	43
51	10/06/2011	Falla de la Empaquetadura		2351	272
52	07/07/2011	Falla de la Empaquetadura		2378	27
53	18/07/2011	Falla de la Empaquetadura		2389	11
54	04/08/2011	Falla de la Empaquetadura		2406	17
55	10/09/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2443	37
56	01/11/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2495	52

Fuente: El autor.

**Tabla 62. Datos para la ubicación técnica PR70LV10 – Bomba de Licor Verde al Pasto-ducto.**

Ubicación Técnica: PR70LV10		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	02/09/2005	Falla de las Bandas		244	244
2	09/12/2005	Falla de las Bandas		342	98
3	25/05/2006	Falla del Sello		509	167
4	31/05/2006	Fuga por la Descarga		515	6
5	03/06/2006	Falla del Sello		518	3
6	21/07/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		566	48
7	17/07/2007	Falla de las Bandas		927	361
8	06/09/2007	Falla de las Bandas		978	51
9	14/09/2007	Falla de Rodamientos de la Bomba		986	8
10	08/11/2007	Falla de las Bandas		1041	55
11	02/03/2008	Falla de las Bandas		1156	115
12	12/06/2008	Falla de Rodamientos de la Bomba		1258	102
13	12/07/2008	Falla de Rodamientos de la Bomba	Falla de las Bandas	1288	30
14	22/11/2008	Falla de la Empaquetadura		1421	133
15	29/11/2008	Falla de la Empaquetadura		1428	7
16	12/02/2010	Falla de Rodamientos de la Bomba		1868	440
17	16/03/2010	Falla del Liner		1900	32
18	17/06/2010	Falla de la Empaquetadura		1993	93
19	30/06/2010	Falla de la Empaquetadura		2006	13
20	12/07/2010	Falla de la Empaquetadura		2018	12
21	29/12/2010	Falla de la Empaquetadura		2188	170
22	16/01/2011	Falla de la Empaquetadura		2206	18
23	22/01/2011	Falla de las Bandas		2212	6
24	11/04/2011	Falla de la Empaquetadura		2291	79
25	07/05/2011	Falla de la Empaquetadura		2317	26
26	15/08/2011	Falla de las Bandas		2417	100
27	16/08/2011	Falla de Rodamientos de la Bomba		2418	1
28	17/11/2011	Falla de las Bandas		2511	93
29	01/12/2011	Falla de las Bandas		2525	14

Fuente: El autor.

**Tabla 63. Datos para la ubicación técnica PR70CA10 – Bomba del Pasto-ducto.**

Ubicación Técnica: PR70CA10		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	13/01/2005	Falla de Rodamientos de la Bomba		12	12
2	22/03/2005	Falla de la Empaquetadura		80	68
3	13/04/2005	Falla de la Empaquetadura		102	22
4	20/04/2005	Falla de la Empaquetadura		109	7
5	27/04/2005	Falla de Rodamientos de la Bomba		116	7
6	24/05/2005	Falla de la Empaquetadura		143	27
7	26/05/2005	Falla de la Empaquetadura		145	2
8	22/06/2005	Falla de las Bandas		172	27
9	22/07/2005	Falla de las Bandas		202	30
10	21/08/2005	Falla de la Empaquetadura		232	30
11	25/09/2005	Falla del Impulsor	Falla del Liner	267	35
12	09/11/2005	Falla de la Empaquetadura		312	45
13	12/11/2005	Falla de la Empaquetadura		315	3
14	09/12/2005	Falla de la Empaquetadura		342	27
15	10/02/2006	Falla de la Empaquetadura		405	63
16	11/02/2006	Falla de la Empaquetadura		406	1
17	02/03/2006	Falla de la Empaquetadura		425	19
18	23/03/2006	Falla de la Empaquetadura		446	21
19	15/04/2006	Falla de la Empaquetadura		469	23
20	13/05/2006	Falla de la Empaquetadura		497	28
21	12/06/2006	Falla de las Bandas		527	30
22	21/08/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	597	70
23	28/08/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		604	7
24	10/09/2006	Falla de la Empaquetadura		617	13
25	19/09/2006	Fuga por la Descarga		626	9
26	01/10/2006	Falla de la Empaquetadura		638	12
27	24/10/2006	Falla de las Bandas		661	23
28	26/10/2006	Falla de las Bandas		663	2
29	08/01/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	737	74
30	05/02/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	765	28
31	30/03/2007	Falla de la Empaquetadura		818	53
32	08/04/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	827	9
33	11/04/2007	Falla de las Bandas		830	3
34	12/04/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	831	1
35	24/05/2007	Falla de la Empaquetadura		873	42
36	10/08/2007	Falla de las Bandas		951	78
37	14/08/2007	Falla de las Bandas		955	4
38	15/01/2008	Falla de las Bandas		1109	154
39	14/03/2008	Falla de las Bandas		1168	59
40	30/04/2008	Falla de Rodamientos de la Bomba		1215	47
41	02/07/2008	Falla de las Bandas		1278	63
42	04/07/2008	Falla de la Empaquetadura		1280	2
43	30/07/2008	Falla de la Empaquetadura		1306	26
44	15/12/2008	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1444	138
45	27/01/2009	Falla de Rodamientos de la Bomba		1487	43
46	20/02/2009	Falla de Rodamientos de la Bomba		1511	24
47	30/04/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1580	69
48	09/05/2009	Falla de la Empaquetadura		1589	9
49	10/05/2009	Falla de la Empaquetadura		1590	1
50	28/05/2009	Falla de la Empaquetadura		1608	18
51	14/06/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1625	17
52	16/06/2009	Falla de Rodamientos de la Bomba		1627	2
53	19/06/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1630	3
54	29/06/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1640	10
55	15/07/2009	Falla de Rodamientos de la Bomba		1656	16
56	21/08/2009	Falla de la Empaquetadura		1693	37
57	30/08/2009	Falla de la Empaquetadura		1702	9
58	21/09/2009	Falla de Rodamientos de la Bomba		1724	22
59	11/12/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1805	81
60	30/12/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1824	19

**Tabla 63. (Continuación)**

Ubicación Técnica: PR70CA10		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
61	13/01/2010	Fuga por la Descarga		1838	14
62	01/02/2010	Fuga por la Succión		1857	19
63	01/04/2010	Fuga por la Succión		1916	59
64	21/04/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1936	20
65	05/05/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1950	14
66	24/10/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2122	172
67	17/11/2010	Fuga por la Succión		2146	24
68	17/12/2010	Falla de la Empaquetadura		2176	30
69	18/12/2010	Falla de las Bandas		2177	1
70	20/12/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2179	2
71	17/01/2011	Falla de la Empaquetadura		2207	28
72	26/01/2011	Fuga por la Descarga		2216	9
73	28/03/2011	Falla de la Empaquetadura		2277	61
74	01/04/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2281	4
75	23/05/2011	Fuga por la Succión		2333	52
76	05/06/2011	Falla de la Empaquetadura		2346	13
77	08/06/2011	Fuga por la Descarga		2349	3
78	07/07/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2378	29
79	11/07/2011	Falla de las Bandas		2382	4
80	18/07/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2389	7
81	06/08/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2408	19
82	09/08/2011	Falla de la Empaquetadura		2411	3
83	22/08/2011	Falla de las Bandas		2424	13
84	15/09/2011	Falla de las Poleas		2448	24
85	15/10/2011	Falla de las Bandas		2478	30
86	10/11/2011	Falla de la Empaquetadura		2504	26

Fuente: El autor.

**Tabla 64. Datos para la ubicación técnica PR70BL02 – Bomba 1 del Colector Maestro.**

Ubicación Técnica: PR70BL02		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	19/01/2005	Falla de Rodamientos del Motor		18	18
2	21/01/2005	Falla del Liner		20	2
3	28/12/2005	Falla de Rodamientos del Motor		361	341
4	04/01/2006	Falla de la Empaquetadura		368	7
5	18/01/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	382	14
6	20/03/2006	Fuga por la Succión		443	61
7	02/05/2006	Fuga por la Succión		486	43
8	07/05/2006	Fuga por la Descarga		491	5
9	05/06/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		520	29
10	05/07/2006	Fuga por la Descarga		550	30
11	11/12/2006	Falla de la Empaquetadura		709	159
12	12/12/2006	Falla de la Empaquetadura		710	1
13	02/05/2007	Falla de Rodamientos del Motor		851	141
14	19/07/2007	Fuga por la Descarga		929	78
15	09/08/2007	Falla de la Empaquetadura		950	21
16	17/09/2007	Falla de la Empaquetadura		989	39
17	03/11/2007	Falla de la Empaquetadura		1036	47
18	10/11/2007	Falla de la Empaquetadura		1043	7
19	16/11/2007	Falla de la Empaquetadura		1049	6
20	29/04/2008	Falla de la Empaquetadura		1214	165
21	12/06/2008	Falla de Rodamientos de la Bomba		1258	44
22	16/09/2008	Fuga por la Descarga		1354	96
23	19/03/2009	Falla de Rodamientos del Motor		1538	184
24	31/05/2009	Falla de la Empaquetadura		1611	73
25	17/06/2009	Falla de Rodamientos del Motor		1628	17
26	28/07/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1669	41
27	03/11/2010	Falla de Rodamientos del Motor		2132	463
28	07/11/2010	Falla de la Empaquetadura		2136	4
29	27/01/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2217	81
30	28/06/2011	Falla de la Empaquetadura		2369	152
31	04/08/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2406	37
32	17/08/2011	Falla de la Empaquetadura		2419	13
33	11/09/2011	Falla de las Bandas		2444	25
34	12/09/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2445	1
35	13/09/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2446	1
36	21/09/2011	Falla del Sello		2454	8

Fuente: El autor.

**Tabla 65. Datos para la ubicación técnica PR70BL03 – Bomba 2 del Colector Maestro.**

Ubicación Técnica: PR70BL03		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	24/11/2005	Falla de Rodamientos de la Bomba		327	327
2	01/02/2006	Fuga por la Succión		396	69
3	22/04/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	476	80
4	16/07/2006	Fuga por la Descarga		561	85
5	26/07/2007	Falla de la Empaquetadura		936	375
6	14/09/2007	Fuga por la Descarga		986	50
7	19/10/2007	Falla de la Empaquetadura		1021	35
8	28/02/2008	Falla de la Empaquetadura		1153	132
9	08/07/2008	Fuga por la Succión		1284	131
10	26/08/2008	Falla de las Bandas		1333	49
11	03/05/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1583	250
12	30/05/2009	Fuga por la Succión		1610	27
13	10/06/2009	Fuga por la Descarga		1621	11
14	26/01/2010	Falla de la Empaquetadura		1851	230
15	24/03/2010	Falla de la Empaquetadura		1908	57
16	08/09/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2076	168
17	11/09/2010	Falla del Aislamiento del Motor		2079	3
18	20/09/2010	Falla de la Empaquetadura		2088	9
19	27/09/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2095	7
20	11/10/2010	Fuga por la Descarga		2109	14
21	02/03/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2251	142
22	06/04/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2286	35
23	27/04/2011	Falla de Rodamientos de la Bomba		2307	21
24	14/06/2011	Fuga por la Succión		2355	48
25	10/09/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2443	88
26	21/09/2011	Falla de la Empaquetadura		2454	11
27	26/10/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2489	35

Fuente: El autor.

**Tabla 66. Datos para la ubicación técnica PR70BL08 – Bomba 1 del Clarificador de Licor Blanco.**

Ubicación Técnica: PR70BL08		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	30/01/2005	Falla de la Empaquetadura		29	29
2	07/03/2005	Falla del Liner		65	36
3	30/06/2005	Falla de la Empaquetadura		180	115
4	01/09/2005	Falla de la Empaquetadura		243	63
5	18/09/2005	Falla del Impulsor		260	17
6	21/09/2005	Falla de la Empaquetadura		263	3
7	12/03/2006	Falla de la Empaquetadura		435	172
8	23/03/2006	Falla de la Empaquetadura		446	11
9	10/09/2006	Falla de la Empaquetadura		617	171
10	24/01/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	753	136
11	02/02/2007	Falla de las Bandas		762	9
12	12/04/2007	Falla de la Empaquetadura		831	69
13	27/04/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	846	15
14	14/09/2007	Falla de Rodamientos de la Bomba		986	140
15	15/09/2007	Fuga por la Descarga		987	1
16	13/12/2007	Falla de la Empaquetadura		1076	89
17	13/02/2008	Fuga por la Descarga		1138	62
18	13/08/2008	Falla de las Bandas		1320	182
19	14/09/2008	Falla de las Bandas		1352	32
20	03/04/2009	Falla de la Empaquetadura		1553	201
21	26/07/2009	Falla de las Bandas		1667	114
22	07/01/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1832	165
23	03/06/2010	Falla de las Bandas		1979	147
24	05/07/2010	Fuga por la Descarga		2011	32
25	08/08/2010	Falla de la Empaquetadura		2045	34
26	12/08/2010	Falla de la Empaquetadura		2049	4
27	21/05/2011	Fuga por la Descarga		2331	282
28	05/09/2011	Falla de las Bandas		2438	107
29	29/09/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2462	24
30	03/10/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2466	4
31	06/10/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2469	3

Fuente: El autor.

**Tabla 67. Datos para la ubicación técnica PR70BL09 – Bomba 2 del Clarificador de Licor Blanco.**

Ubicación Técnica: PR70BL09		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	10/03/2005	Fuga por la Succión		68	68
2	25/04/2005	Falla del Liner		114	46
3	12/05/2005	Fuga por la Succión		131	17
4	26/05/2005	Falla del Impulsor	Falla del Liner	145	14
5	14/07/2005	Falla de la Empaquetadura		194	49
6	27/09/2005	Falla de la Empaquetadura		269	75
7	09/10/2005	Falla del Impulsor		281	12
8	24/11/2005	Falla de las Bandas		327	46
9	17/09/2006	Falla del Impulsor		624	297
10	28/09/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	635	11
11	30/11/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	698	63
12	07/12/2006	Fuga por la Descarga		705	7
13	12/04/2007	Fuga por la Descarga		831	126
14	21/06/2008	Falla del Sello		1267	436
15	10/07/2008	Falla de la Empaquetadura		1286	19
16	22/01/2009	Falla de la Empaquetadura		1482	196
17	03/06/2010	Falla de las Bandas		1979	497
18	28/04/2011	Falla de la Empaquetadura		2308	329

Fuente: El autor.

**Tabla 68. Datos para la ubicación técnica PR70BL11 – Bomba de Lodos del Clarificador de Licor Blanco.**

Ubicación Técnica: PR70BL11		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	18/03/2005	Falla del Sello		76	76
2	02/06/2005	Falla de las Bandas		152	76
3	12/03/2006	Falla del Sello		435	283
4	18/04/2006	Falla del Liner		472	37
5	21/07/2006	Falla del Sello		566	94
6	02/02/2007	Falla del Sello		762	196
7	04/03/2007	Falla del Sello		792	30
8	15/03/2007	Falla del Sello		803	11
9	24/05/2007	Falla de las Bandas		873	70
10	06/09/2007	Falla de Rodamientos del Motor		978	105
11	28/12/2007	Falla del Bobinado del Motor		1091	113
12	07/10/2008	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1375	284
13	07/04/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1557	182
14	19/05/2009	Falla de las Bandas		1599	42
15	07/01/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1832	233
16	19/02/2010	Falla de las Bandas		1875	43
17	07/01/2011	Falla de Rodamientos del Motor		2197	322
18	08/02/2011	Falla del Sello		2229	32
19	11/04/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2291	62

Fuente: El autor.

**Tabla 69. Datos para la ubicación técnica PR70LL23 – Bomba 1 del Tanque de Lodos.**

Ubicación Técnica: PR70LL23		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	12/01/2005	Falla de Rodamientos de la Bomba		11	11
2	05/04/2005	Falla de la Empaquetadura		94	83
3	29/04/2005	Falla del Liner		118	24
4	16/05/2005	Falla de las Bandas		135	17
5	11/07/2005	Falla de Rodamientos de la Bomba		191	56
6	08/09/2005	Falla de la Empaquetadura		250	59
7	08/10/2005	Falla de la Empaquetadura		260	30
8	19/10/2005	Falla del Impulsor	Falla del Liner	291	11
9	09/01/2006	Falla de la Empaquetadura		373	82
10	10/01/2006	Falla de la Empaquetadura		374	1
11	13/03/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		436	62
12	13/05/2006	Falla de la Empaquetadura		497	61
13	12/06/2006	Falla de las Bandas		527	30
14	10/07/2006	Falla de la Empaquetadura		555	28
15	27/07/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	572	17
16	15/09/2006	Falla de la Empaquetadura		622	50
17	20/09/2006	Falla de la Empaquetadura		627	5
18	24/09/2006	Falla de la Empaquetadura		631	4
19	30/10/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	667	36
20	19/11/2006	Falla de la Empaquetadura		667	20
21	08/01/2007	Falla de la Empaquetadura		737	50
22	06/03/2007	Falla de la Empaquetadura		794	57
23	30/03/2007	Falla de la Empaquetadura		818	24
24	13/11/2007	Falla de Rodamientos de la Bomba		1046	228
25	12/02/2008	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1137	91
26	29/02/2008	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1154	17
27	07/03/2008	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1161	7
28	11/04/2008	Falla de Rodamientos del Motor		1196	35
29	30/01/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1490	294
30	13/03/2009	Falla de la Empaquetadura		1532	42
31	28/03/2009	Falla de las Bandas		1547	15
32	17/04/2009	Falla de Rodamientos de la Bomba		1567	20
33	29/04/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1579	12
34	10/05/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1590	11
35	11/06/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1622	32
36	12/06/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1623	1
37	01/08/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1673	50
38	20/10/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1753	80
39	07/01/2010	Falla de las Bandas		1832	79
40	08/03/2010	Falla de la Empaquetadura		1892	60
41	12/06/2010	Falla de la Empaquetadura		1988	96
42	06/07/2010	Falla de la Empaquetadura		2012	24
43	11/08/2010	Falla de Rodamientos de la Bomba		2048	36
44	16/11/2010	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2145	97
45	23/11/2010	Falla de la Empaquetadura		2152	7
46	17/12/2010	Falla de la Empaquetadura		2176	24
47	21/02/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2242	66
48	21/05/2011	Falla de la Empaquetadura		2331	89
49	16/08/2011	Falla de las Bandas		2418	87
50	30/09/2011	Falla de Rodamientos de la Bomba		2463	45
51	31/10/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2494	31

Fuente: El autor.

**Tabla 70. Datos para la ubicación técnica PR70LL24 – Bomba 2 del Tanque de Lodos.**

Ubicación Técnica: PR70LL24		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	18/01/2005	Falla del Implusor	Falla del Liner	17	17
2	27/01/2005	Falla de Rodamientos del Motor		26	9
3	31/05/2005	Falla del Liner		150	124
4	08/08/2006	Falla de la Empaquetadura		584	434
5	27/10/2006	Falla del Implusor	Falla del Liner	664	80
6	30/10/2006	Falla de Rodamientos del Motor		667	3
7	02/11/2006	Falla de Rodamientos de la Bomba		670	3
8	04/12/2006	Fuga por la Descarga		702	32
9	30/01/2009	Falla de la Empaquetadura		1490	788
10	04/02/2009	Falla de la Empaquetadura		1495	5
11	18/03/2009	Falla de la Empaquetadura		1537	42
12	21/04/2009	Falla de Rodamientos del Motor		1571	34
13	08/06/2009	Falla de las Bandas		1619	48
14	23/11/2010	Falla de la Empaquetadura		2152	533
15	21/02/2011	Falla del Implusor	Falla del Liner	2242	90
16	07/07/2011	Falla de Rodamientos de la Bomba		2378	136
17	22/07/2011	Holgura en el Motor		2393	15
18	12/09/2011	Holgura en el Motor		2445	52

Fuente: El autor.

**Tabla 71. Datos para la ubicación técnica PR70LL15 – Bomba de Lodos – 1ra Etapa.**

Ubicación Técnica: PR70LL15		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	09/02/2005	Holgura en la Bomba		39	39
2	06/03/2005	Falla de la Empaquetadura		64	25
3	10/08/2005	Falla del Sello		221	157
4	20/06/2007	Falla del Sello		900	679
5	22/06/2007	Falla de Rodamientos de la Bomba		902	2
6	02/12/2007	Fuga por la Descarga		1065	163
7	07/02/2008	Falla de Rodamientos de la Bomba		1132	67
8	26/09/2008	Falla de la Empaquetadura		1364	232
9	03/02/2009	Falla de la Empaquetadura		1494	130
10	01/03/2009	Falla de la Empaquetadura		1520	26
11	30/03/2009	Falla del Liner		1549	29
12	14/05/2009	Falla de la Empaquetadura		1594	45
13	20/05/2009	Holgura en la Bomba		1600	6
14	30/07/2009	Holgura en la Bomba		1671	71
15	19/02/2010	Falla de Rodamientos de la Bomba		1875	204
16	18/06/2010	Falla del Liner		1994	119
17	28/01/2011	Falla del Impulsor		2218	224
18	25/06/2011	Falla del Impulsor		2366	148
19	20/10/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2483	117
20	26/11/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2520	37
21	03/12/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2527	7

Fuente: El autor.

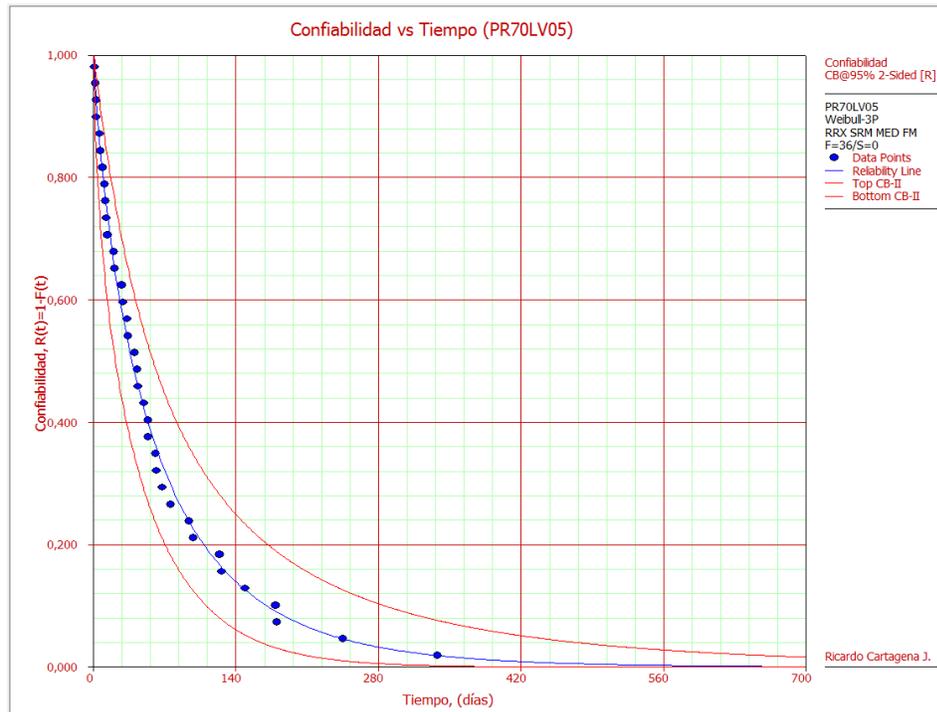
**Tabla 72. Datos para la ubicación técnica PR70LL10 – Bomba de Lodos – 2nda Etapa.**

Ubicación Técnica: PR70LL10		Modo de Falla		Fecha de Referencia:	01/01/2005
Evento	Fecha	Primario	Secundario	Tiempo Transcurrido (días)	Tiempo de Operación desde la
1	07/02/2005	Falla de la Empaquetadura		37	37
2	18/03/2006	Falla del Liner		441	404
3	01/08/2006	Falla del Impulsor	Falla del Liner	577	136
4	28/01/2007	Falla del Impulsor		757	180
5	08/02/2007	Falla del Impulsor		768	11
6	20/03/2007	Falla del Sello		808	40
7	03/04/2007	Falla del Sello		822	14
8	08/04/2007	Falla del Sello		827	5
9	24/05/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	873	46
10	02/06/2007	Falla del Sello		882	9
11	26/06/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	906	24
12	16/07/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	926	20
13	28/08/2007	Falla del Impulsor	Falla del Liner	969	43
14	27/01/2008	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1121	152
15	03/03/2008	Falla de Rodamientos del Motor		1157	36
16	10/03/2008	Falla de las Bandas		1164	7
17	01/10/2008	Falla del Liner		1369	205
18	02/10/2008	Falla del Sello		1370	1
19	07/06/2009	Falla del Sello		1618	248
20	16/09/2009	Falla del Impulsor	Falla del Liner	1719	101
21	13/10/2009	Falla del Impulsor		1746	27
22	02/11/2010	Falla de Liner	Falla de Bandas	2131	385
23	16/11/2010	Falla de las Bandas		2145	14
24	26/12/2010	Holgura en la Bomba		2185	40
25	27/12/2010	Falla del Impulsor	Falla de Bandas	2186	1
26	08/04/2011	Falla de las Bandas		2288	102
27	24/05/2011	Falla del Impulsor	Falla del Liner	2334	46
28	23/06/2011	Falla de Liner		2364	30
29	12/07/2011	Falla del Impulsor		2383	19

Fuente: El autor.

## Anexo B. Graficas de Confiabilidad y Resultados de las Pruebas KS, Chi-cuadrado y Coeficiente de Correlación para cada Ubicación Técnica

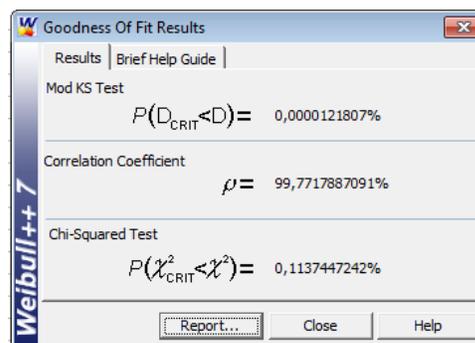
Figura 27. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70LV05 - Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde.



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

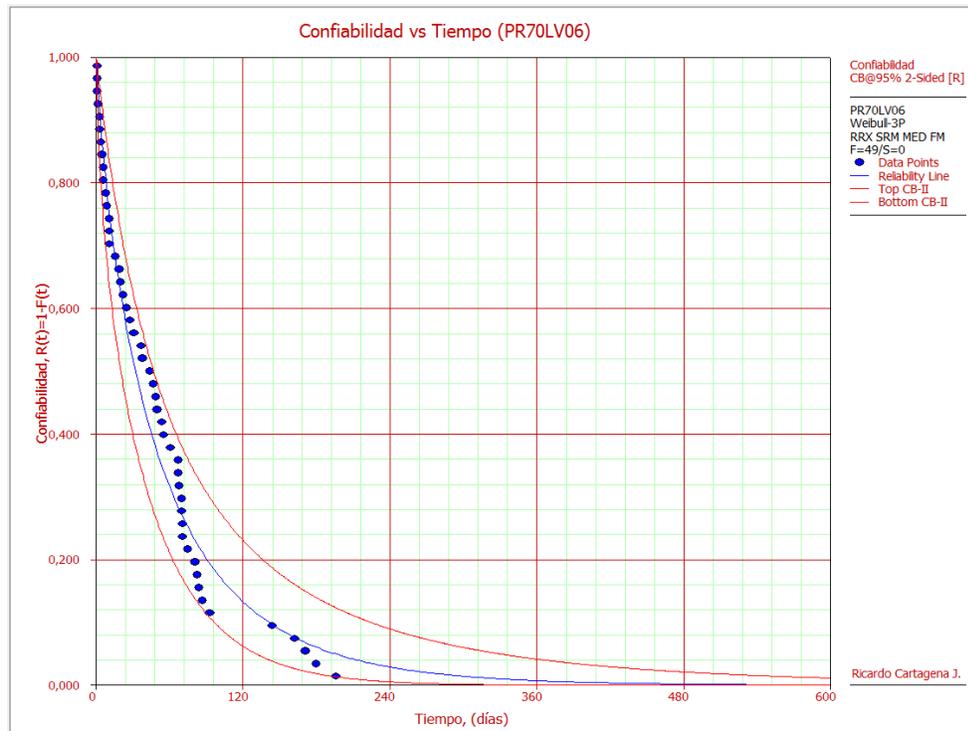
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,7932$ ,  $\eta = 59,2800$  y  $\gamma = 0,5925$

Figura 28. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70LV05 - Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde.



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

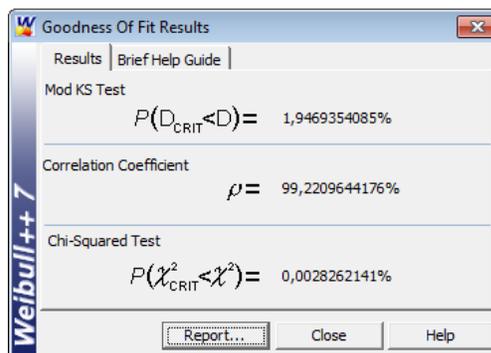
**Figura 29. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70LV06 - Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

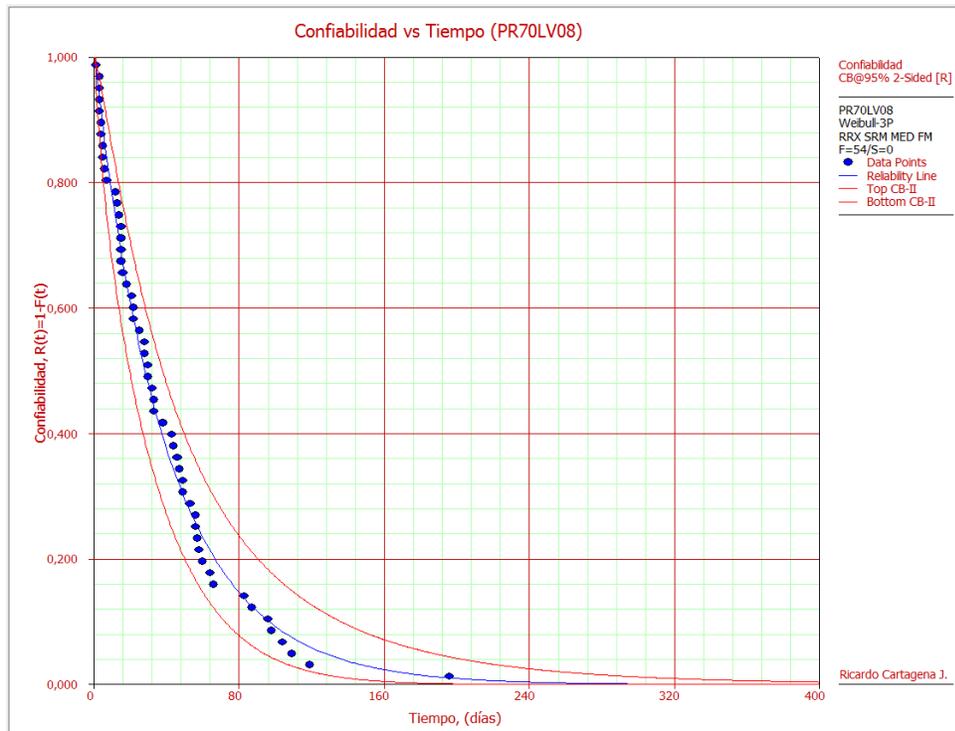
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,8096$ ,  $\eta = 50,3202$  y  $\gamma = 0,2100$

**Figura 30. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70LV06 - Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

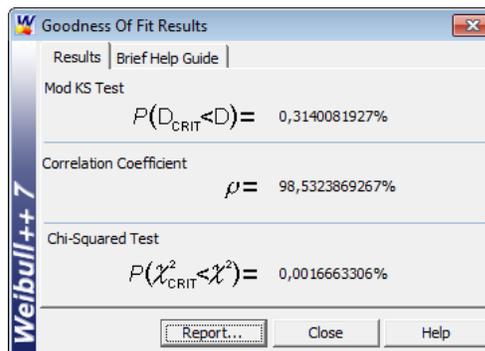
**Figura 31. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70LV08 - Bomba 1 del Tanque de Licor Verde.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

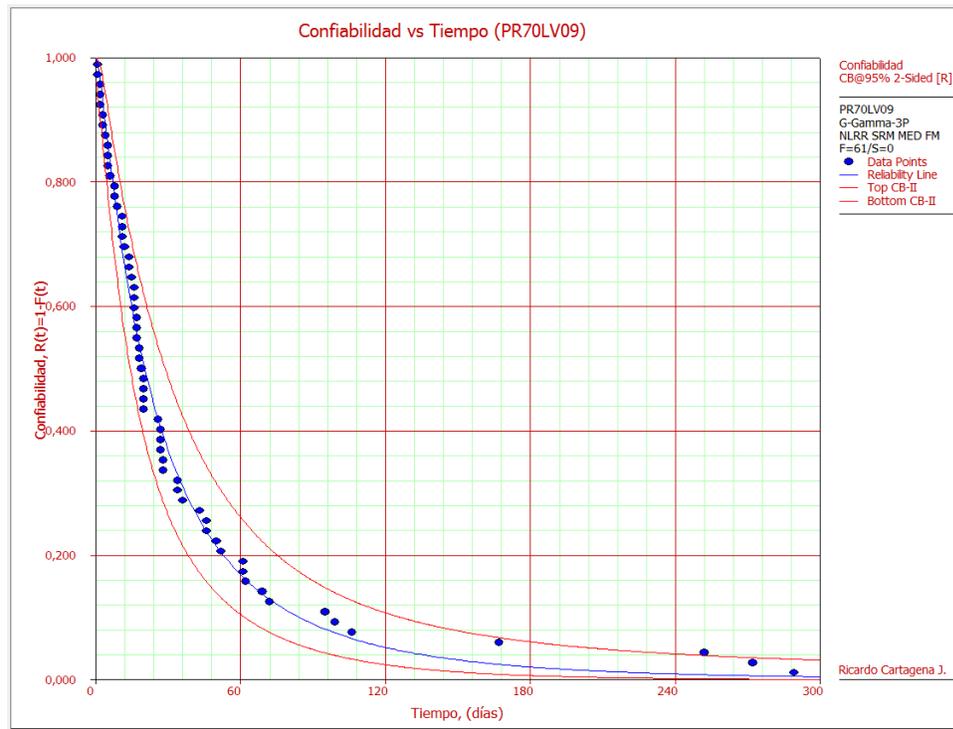
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,9626$ ,  $\eta = 40,3805$  y  $\gamma = 0,5625$

**Figura 32. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70LV08 - Bomba 1 del Tanque de Licor Verde.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

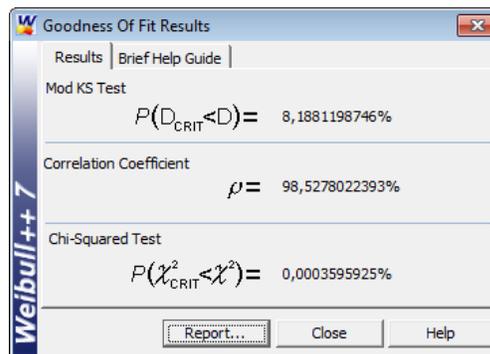
**Figura 33. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70LV09 - Bomba 2 del Tanque de Licor Verde.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

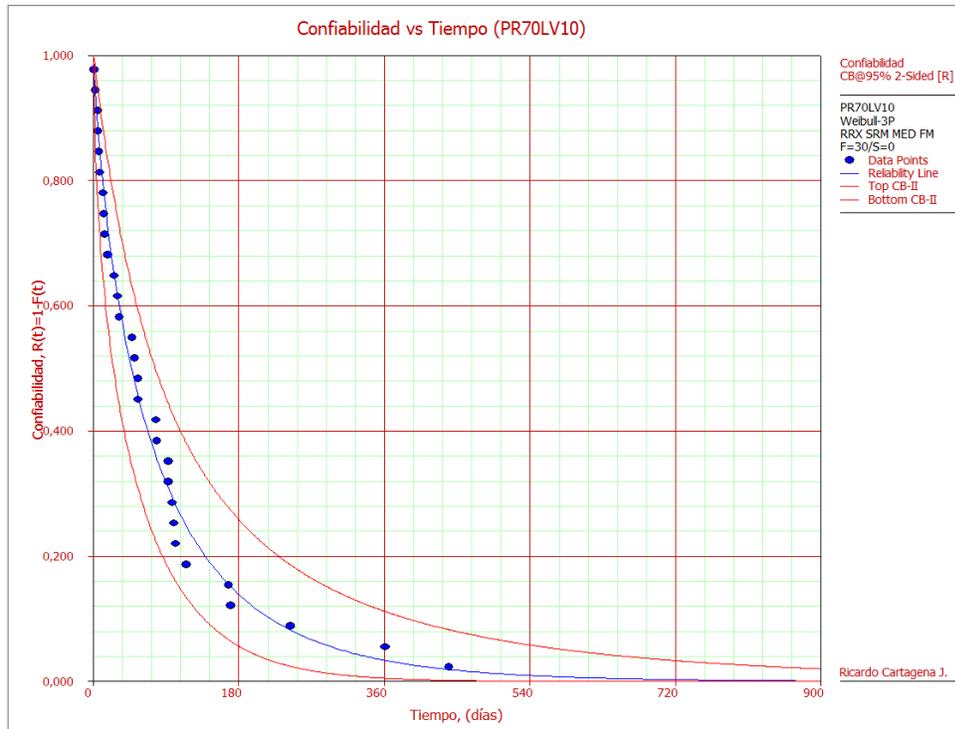
Distribución: G-Gamma; Parámetros:  $\mu = 3,1455$ ,  $\sigma = 1,1754$  y  $\lambda = 0,3429$

**Figura 34. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70LV09 - Bomba 2 del Tanque de Licor Verde.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

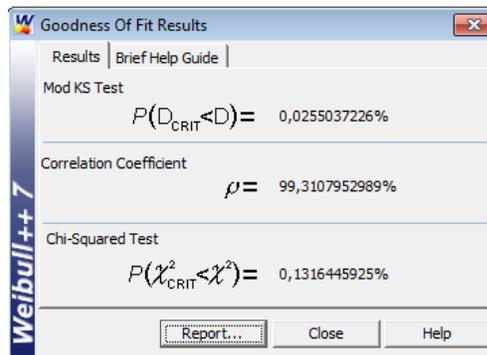
**Figura 35. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70LV10 – Bomba de Licor Verde al Pasto-ducto.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

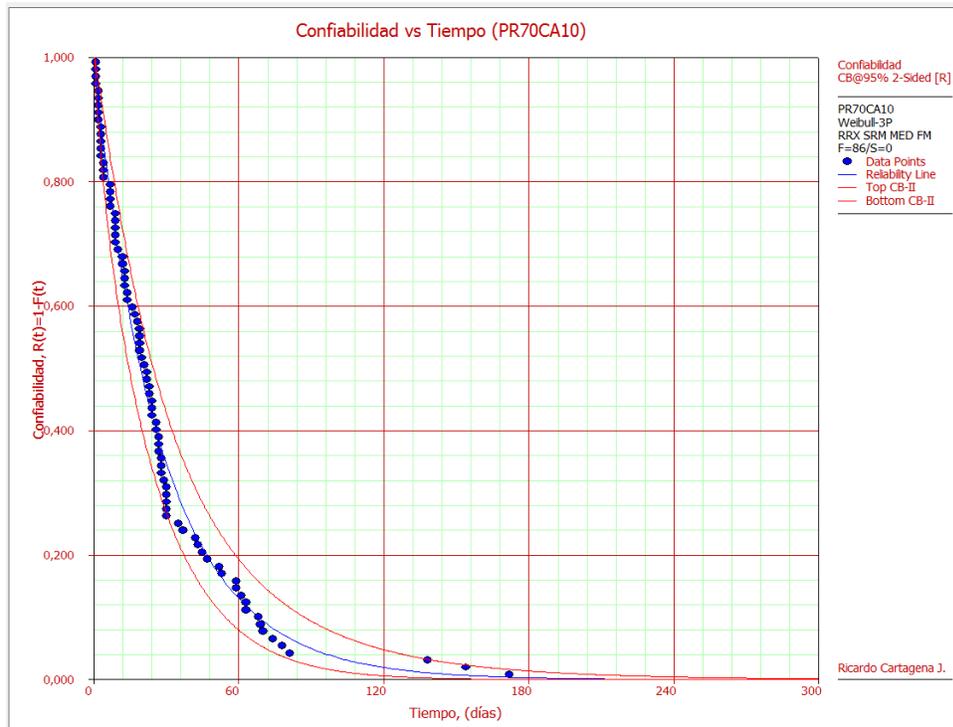
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,7782$ ,  $\eta = 74,9358$  y  $\gamma = 0,4100$

**Figura 36. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70LV10 – Bomba de Licor Verde al Pasto-ducto.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

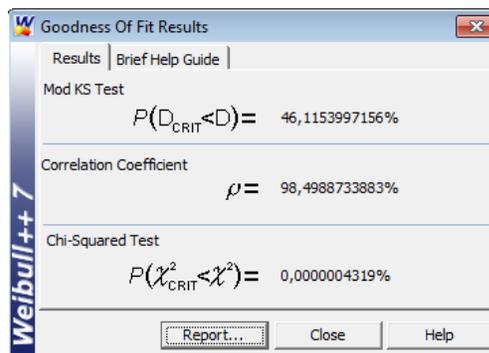
**Figura 37. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70CA10 – Bomba del Pasto-ducto.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

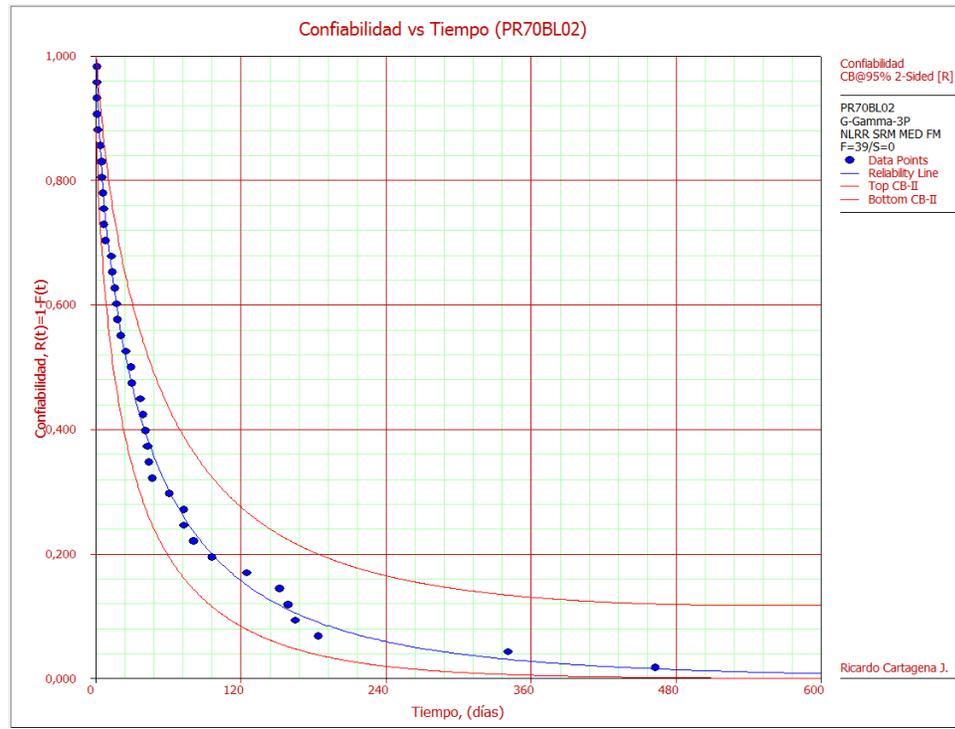
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,9453$ ,  $\eta = 28,0670$  y  $\gamma = 0,2775$

**Figura 38. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70CA10 – Bomba del Pasto-ducto.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

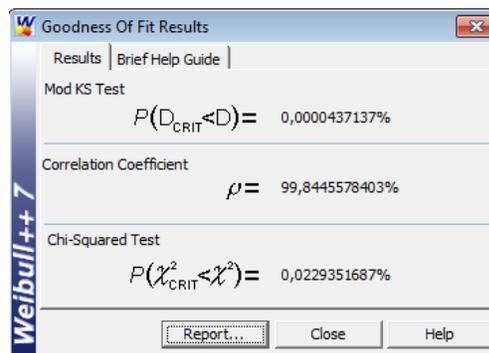
**Figura 39. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70BL02 – Bomba 1 del Colector Maestro.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

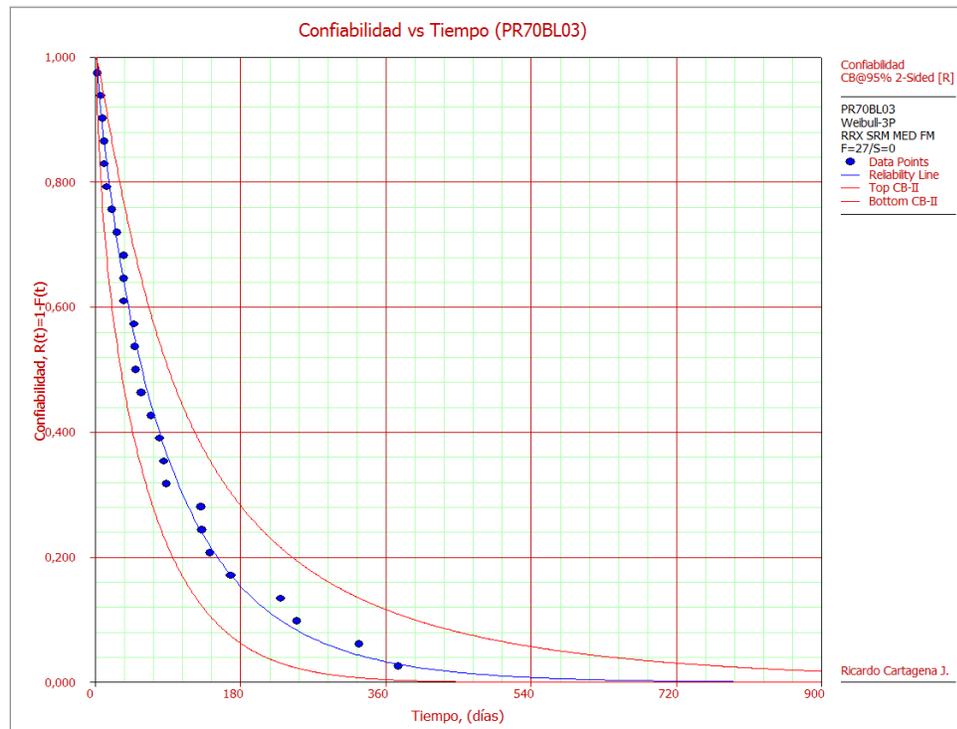
Distribución: G-Gamma; Parámetros:  $\mu = 3,6860$ ,  $\sigma = 1,5707$  y  $\lambda = 0,7407$

**Figura 40. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70BL02 – Bomba 1 del Colector Maestro.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

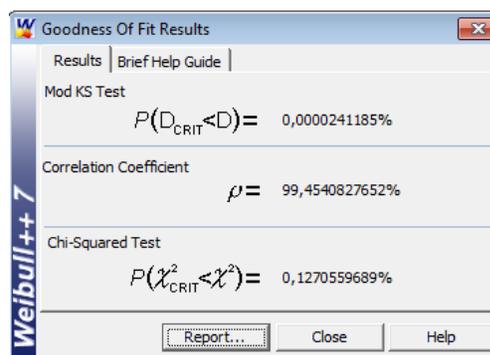
**Figura 41. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70BL03 – Bomba 2 del Colector Maestro.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,8598$ ,  $\eta = 85,9443$  y  $\gamma = 1,7875$

**Figura 42. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70BL03 – Bomba 2 del Colector Maestro.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

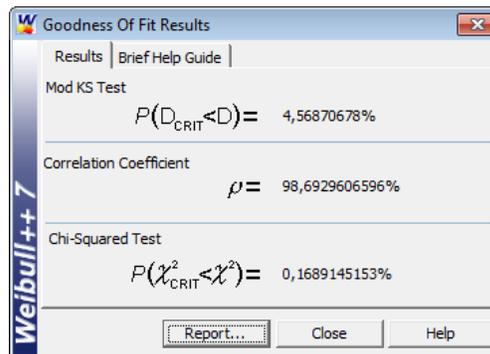
**Figura 43. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70BL08 – Bomba 1 del Clarificador de Licor Blanco.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

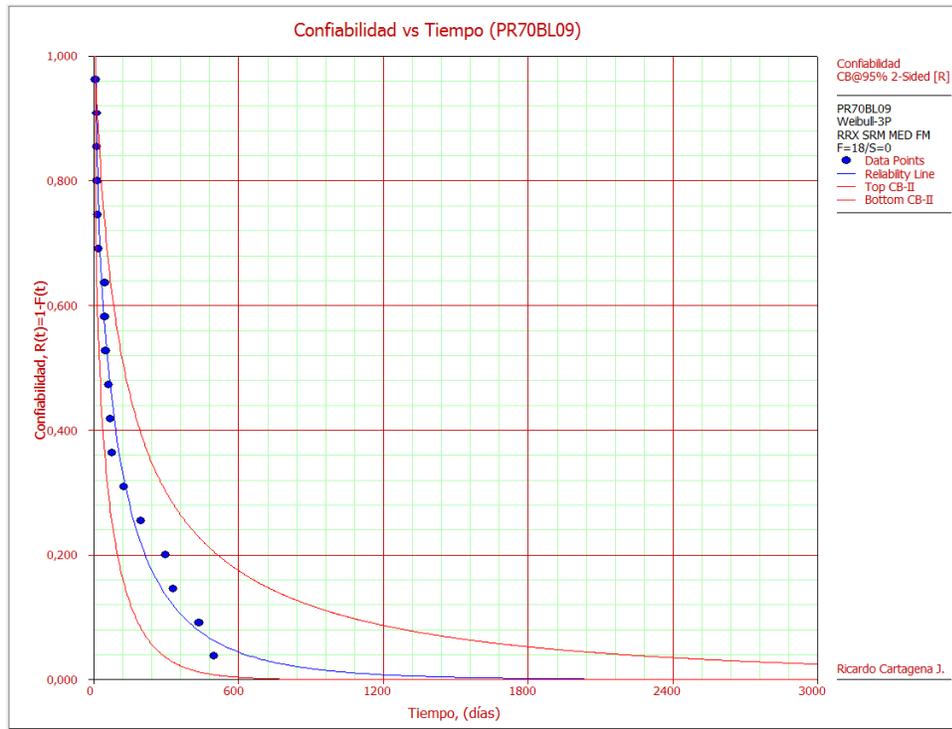
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,7324$ ,  $\eta = 77,2312$  y  $\gamma = 0,5700$

**Figura 44. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70BL08 – Bomba 1 del Clarificador de Licor Blanco.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

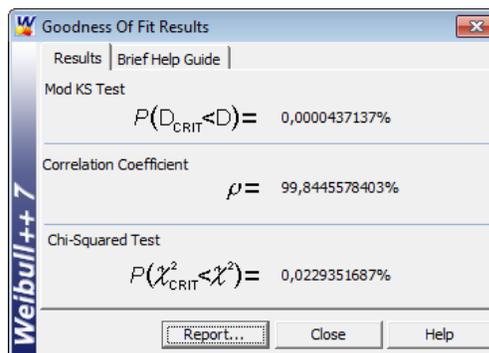
**Figura 45. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70BL09 – Bomba 2 del Clarificador de Licor Blanco.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

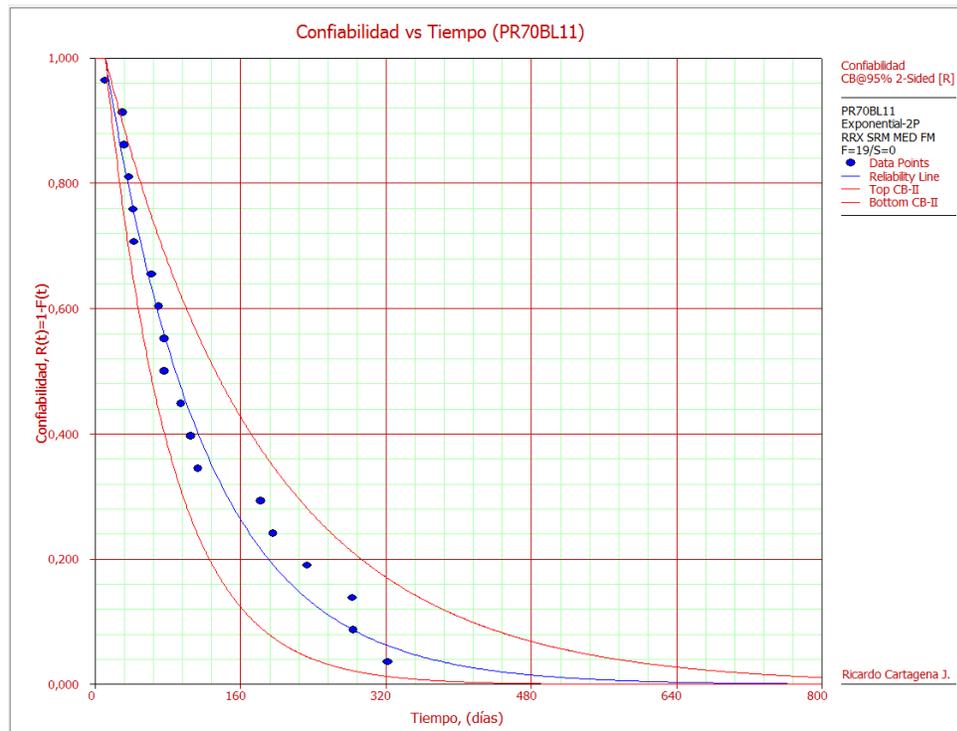
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,6269$ ,  $\eta = 96,7603$  y  $\gamma = 6,4675$

**Figura 46. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70BL09 – Bomba 2 del Clarificador de Licor Blanco.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

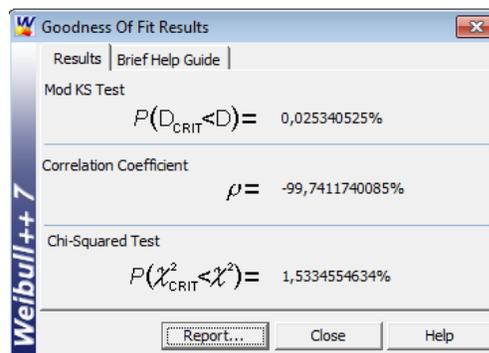
**Figura 47. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70BL11 – Bomba de Lodos del Clarificador de Licor Blanco.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

Distribución: Exponencial; Parámetros:  $\lambda = 0,0090$  y  $\gamma = 11,0000$

**Figura 48. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70BL11 – Bomba de Lodos del Clarificador de Licor Blanco.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

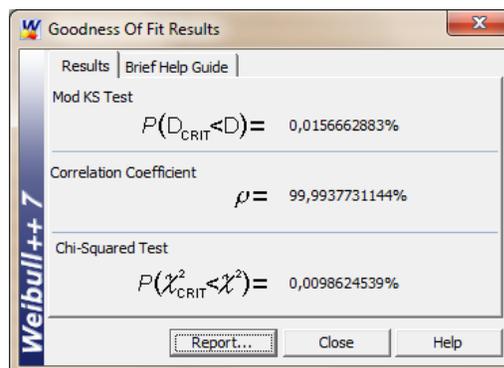
**Figura 49. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70LL23 – Bomba 1 del Tanque de Lodos.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

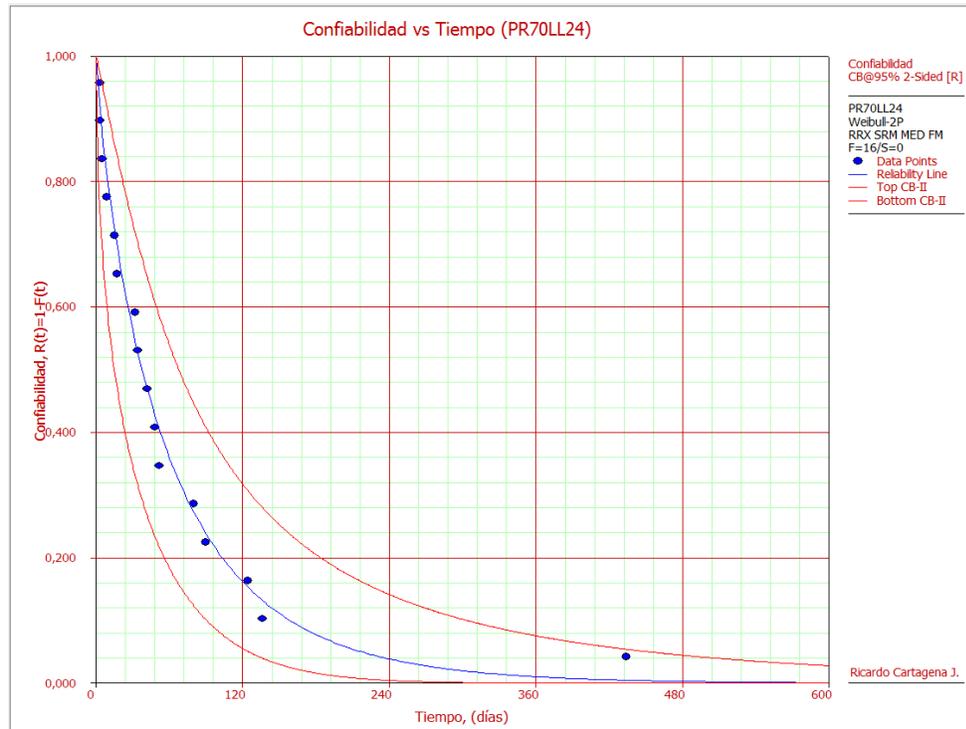
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 1,1105$  y  $\eta = 49,4618$

**Figura 50. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70LL23 – Bomba 1 del Tanque de Lodos.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

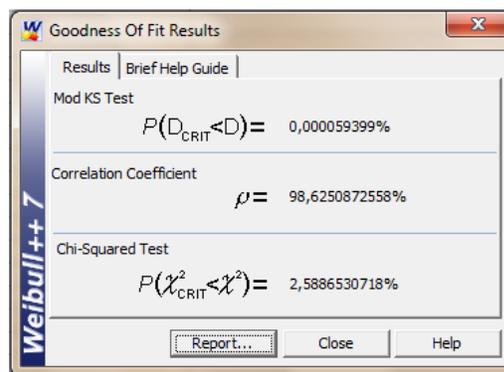
**Figura 51. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70LL24 – Bomba 2 del Tanque de Lodos.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

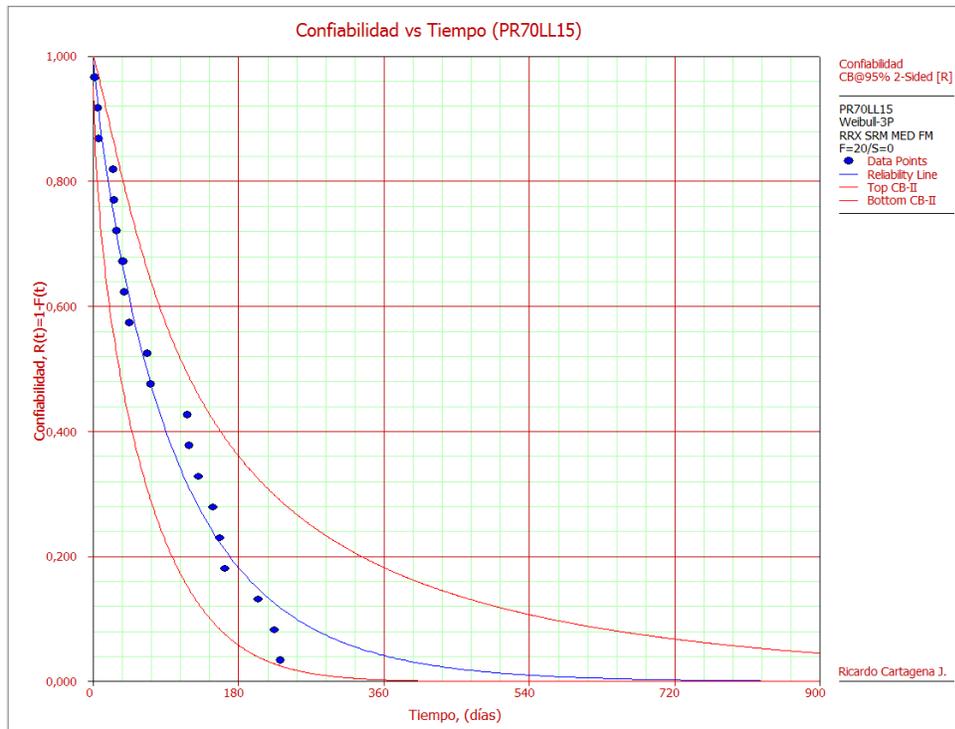
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,8359$  y  $\eta = 58,5374$

**Figura 52. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70LL24 – Bomba 2 del Tanque de Lodos.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

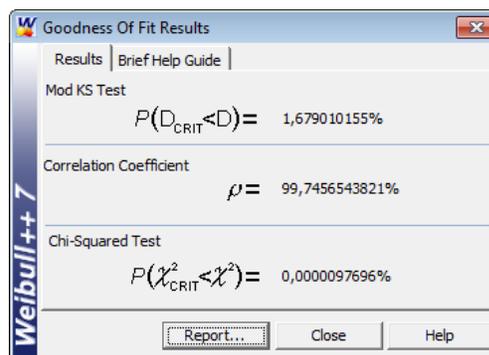
**Figura 53. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70LL15 – Bomba de Lodos – 1ra Etapa.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

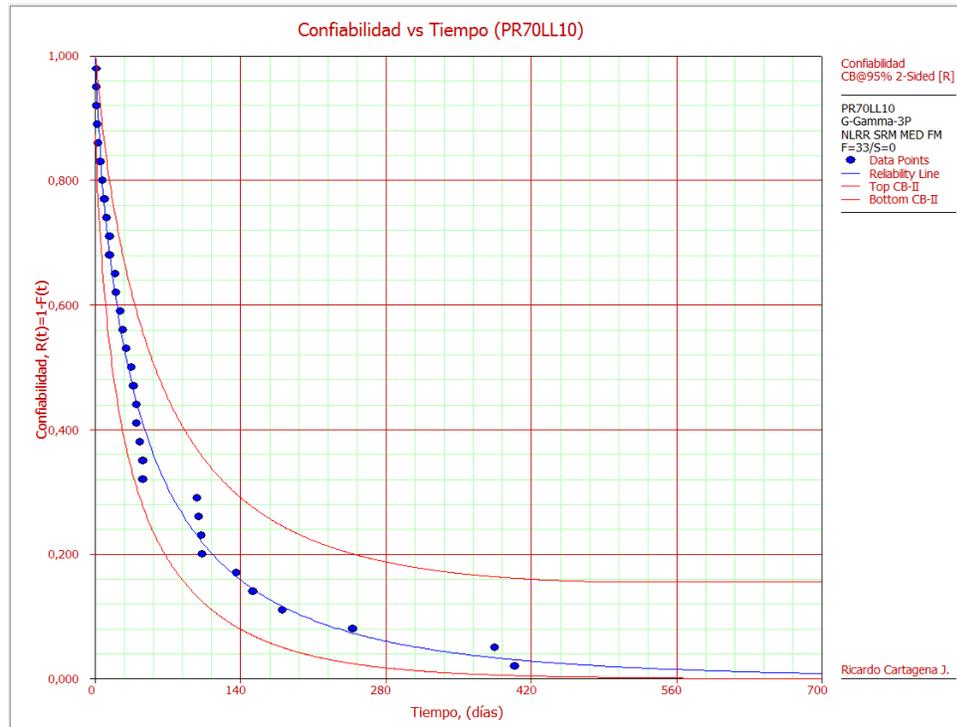
Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,9013$ ,  $\eta = 99,8226$  y  $\gamma = 0,3950$

**Figura 54. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70LL15 – Bomba de Lodos – 1ra Etapa.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

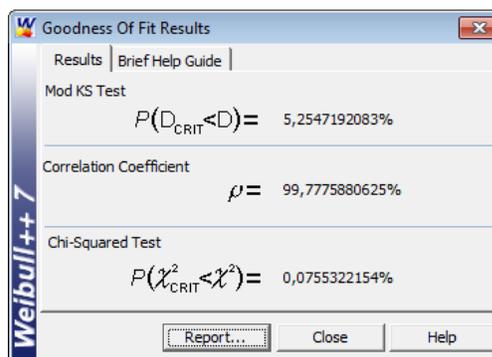
**Figura 55. Confiabilidad para la ubicación técnica PR70LL10 – Bomba de Lodos – 2nda Etapa.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

Distribución: G-Gamma; Parámetros:  $\mu = 3,8237$ ,  $\sigma = 1,5540$  y  $\lambda = 0,6760$

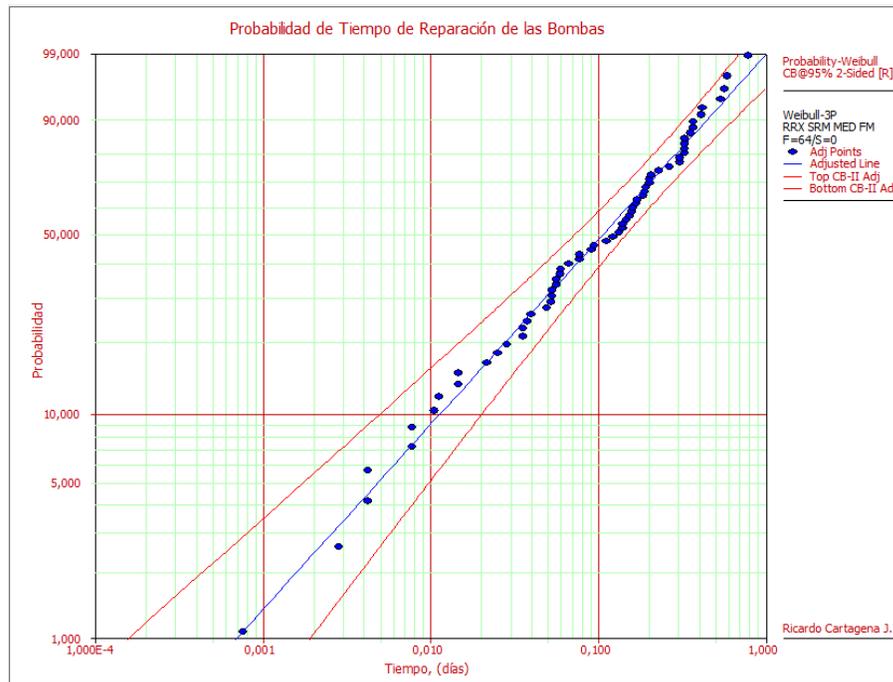
**Figura 56. Resultados de las pruebas de regresión para la ubicación técnica PR70LL10 – Bomba de Lodos – 2nda Etapa.**



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

## Anexo C. Grafica de Probabilidad y Resultados de las Pruebas KS, Chi-cuadrado y Coeficiente de Correlación para los Tiempos Perdidos

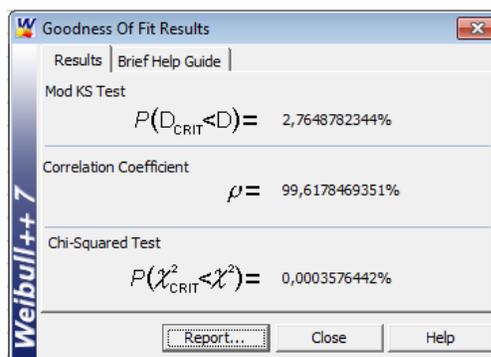
Figura 57. Probabilidad para los tiempos perdidos de las ubicaciones técnicas estudiadas.



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

Distribución: Weibull; Parámetros:  $\beta = 0,8410$ ,  $\eta = 0,163$  y  $\gamma = 0,0062$

Figura 58. Resultados de las pruebas de regresión para los tiempos perdidos de las ubicaciones técnicas estudiadas.



Fuente: Captura de pantalla del software Weibull ++ v.7.

## Anexo D. Resultados de la Modelación para Cada Ubicación Técnica

**Tabla 73. Resumen para la ubicación técnica PR70LV05 - Bomba 1 del Clarificador de Licor Verde.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LV05</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9971
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,002
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0172
Número Esperado de Fallas:	5,6355
Desv. Estándar (Número de Fallas):	2,7917
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	67,769
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	363,9594
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	1,0406
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	1,0406
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	5,6355
Número de Mantenimientos Correctivos:	5,6355
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	5,6355
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 3.789.290

Fuente: El autor.

**Tabla 74. Resumen para la ubicación técnica PR70LV06 - Bomba 2 del Clarificador de Licor Verde.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LV06</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9966
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0021
Confiabilidad (@ 365 días):	0,008
Número Esperado de Fallas:	6,7111
Desv. Estándar (Número de Fallas):	3,0491
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	55,5442
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	363,7638
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	1,2362
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	1,2362
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	6,7111
Número de Mantenimientos Correctivos:	6,7111
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	6,7111
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 2.909.799

Fuente: El autor.

**Tabla 75. Resumen para la ubicación técnica PR70LV08 - Bomba 1 del Tanque de Licor Verde.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LV08</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9956
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0023
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0002
Número Esperado de Fallas:	8,7664
Desv. Estándar (Número de Fallas):	2,9966
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	41,8763
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	363,3763
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	1,6237
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	1,6237
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	8,7664
Número de Mantenimientos Correctivos:	8,7664
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	8,7664
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 6.334.903

Fuente: El autor.

**Tabla 76. Resumen para la ubicación técnica PR70LV09 - Bomba 2 del Tanque de Licor Verde.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LV09</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9947
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0027
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0025
Número Esperado de Fallas:	10,4782
Desv. Estándar (Número de Fallas):	3,9358
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	35,7032
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	363,0662
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	1,9338
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	1,9338
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	10,4782
Número de Mantenimientos Correctivos:	10,4782
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	10,4782
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 6.915.577

Fuente: El autor.

**Tabla 77. Resumen para la ubicación técnica PR70LV10 – Bomba de Licor Verde al Pasto-ducto.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LV10</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9977
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0018
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0325
Número Esperado de Fallas:	4,5228
Desv. Estándar (Número de Fallas):	2,5286
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	84,5425
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	364,1656
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	0,8344
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	0,8344
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	4,5228
Número de Mantenimientos Correctivos:	4,5228
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	4,5228
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 8.549.935

Fuente: El autor.

**Tabla 78. Resumen para la ubicación técnica PR70CA10 – Bomba del Pasto-ducto.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70CA10</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9936
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0028
Confiabilidad (@ 365 días):	0
Número Esperado de Fallas:	12,5333
Desv. Estándar (Número de Fallas):	3,6668
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	29,4291
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	362,6789
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	2,3211
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	2,3211
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	12,5333
Número de Mantenimientos Correctivos:	12,5333
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	12,5333
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 7.485.854

Fuente: El autor.

**Tabla 79. Resumen para la ubicación técnica PR70BL02 – Bomba 1 del Colector Maestro.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70BL02</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9968
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0023
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0283
Número Esperado de Fallas:	6,3958
Desv. Estándar (Número de Fallas):	3,5978
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	61,3069
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	363,818
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	1,182
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	1,182
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	6,3958
Número de Mantenimientos Correctivos:	6,3958
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	6,3958
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 2.933.831

Fuente: El autor.

**Tabla 80. Resumen para la ubicación técnica PR70BL03 – Bomba 2 del Colector Maestro.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70BL03</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,998
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0016
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0301
Número Esperado de Fallas:	4,0333
Desv. Estándar (Número de Fallas):	2,162
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	91,6019
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	364,2557
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	0,7443
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	0,7443
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	4,0333
Número de Mantenimientos Correctivos:	4,0333
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	4,0333
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 5.282.218

Fuente: El autor.

**Tabla 81. Resumen para la ubicación técnica PR70BL08 – Bomba 1 del Clarificador de Licor Blanco.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70BL08</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9978
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0017
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0424
Número Esperado de Fallas:	4,3101
Desv. Estándar (Número de Fallas):	2,5292
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	88,282
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	364,2035
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	0,7965
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	0,7965
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	4,3101
Número de Mantenimientos Correctivos:	4,3101
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	4,3101
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 3.711.735

Fuente: El autor.

**Tabla 82. Resumen para la ubicación técnica PR70BL09 – Bomba 2 del Clarificador de Licor Blanco.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70BL09</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9984
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0015
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0965
Número Esperado de Fallas:	3,1948
Desv. Estándar (Número de Fallas):	2,1983
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	121,8464
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	364,4111
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	0,5889
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	0,5889
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	3,1948
Número de Mantenimientos Correctivos:	3,1948
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	3,1948
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 1.365.452

Fuente: El autor.

**Tabla 83. Resumen para la ubicación técnica PR70BL11 – Bomba de Lodos del Clarificador de Licor Blanco.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70BL11</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9985
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0012
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0375
Número Esperado de Fallas:	2,9185
Desv. Estándar (Número de Fallas):	1,5409
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	120,6512
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	364,4597
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	0,5403
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	0,5403
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	2,9185
Número de Mantenimientos Correctivos:	2,9185
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	2,9185
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 8.685.042

Fuente: El autor.

**Tabla 84. Resumen para la ubicación técnica PR70LL23 – Bomba 1 del Tanque de Lodos.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LL23</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9962
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,002
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0002
Número Esperado de Fallas:	7,5686
Desv. Estándar (Número de Fallas):	2,4955
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	47,8169
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	363,6029
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	1,3971
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	1,3971
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	7,5686
Número de Mantenimientos Correctivos:	7,5686
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	7,5686
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 4.341.020

Fuente: El autor.

**Tabla 85. Resumen para la ubicación técnica PR70LL24 – Bomba 2 del Tanque de Lodos.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LL24</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,997
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,002
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0101
Número Esperado de Fallas:	5,8833
Desv. Estándar (Número de Fallas):	2,765
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	63,3824
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	363,9144
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	1,0856
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	1,0856
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	5,8833
Número de Mantenimientos Correctivos:	5,8833
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	5,8833
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 1.820.834

Fuente: El autor.

**Tabla 86. Resumen para la ubicación técnica PR70LL15 – Bomba de Lodos – 1ra Etapa.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LL15</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9982
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0015
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0362
Número Esperado de Fallas:	3,5979
Desv. Estándar (Número de Fallas):	2,0026
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	102,0927
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	364,3363
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	0,6637
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	0,6637
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	3,5979
Número de Mantenimientos Correctivos:	3,5979
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	3,5979
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 6.700.461

Fuente: El autor.

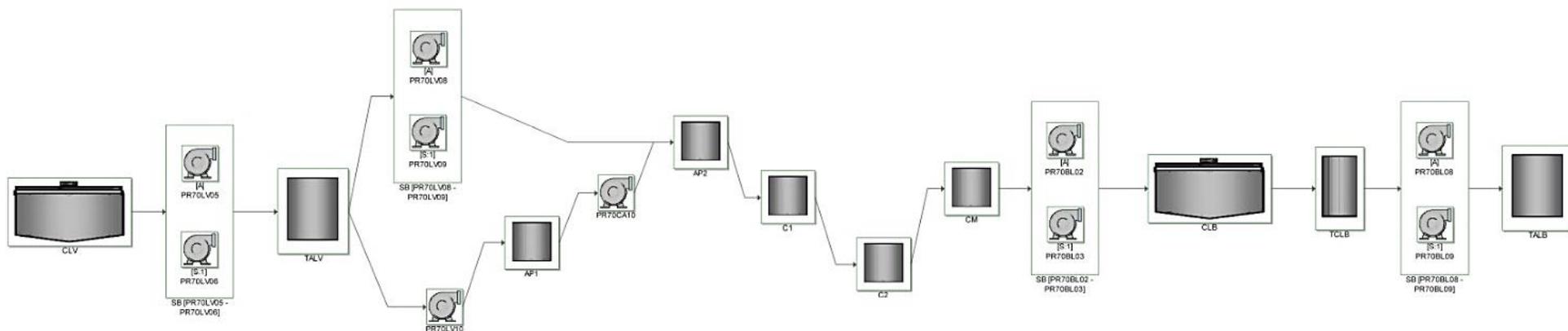
**Tabla 87. Resumen para la ubicación técnica PR70LL10 – Bomba de Lodos – 2nda Etapa.**

<b>Tabla Resumen de la Ubicación Técnica - PR70LL10</b>	
<b>General</b>	
Disponibilidad Promedio (Total de Eventos):	0,9972
Desv. Estándar (Disponibilidad Promedio):	0,0021
Confiabilidad (@ 365 días):	0,0392
Número Esperado de Fallas:	5,5069
Desv. Estándar (Número de Fallas):	3,2365
Tiempo Promedio Para la Primera Falla (Días):	73,4904
<b>Disponibilidad del Sistema</b>	
Disponibilidad (Días):	363,9834
No-disponibilidad por Mantenimiento Correctivo (Días):	1,0166
No-disponibilidad por Inspecciones (Días):	0
No-disponibilidad por Mantenimiento Preventivo (Días):	0
No-disponibilidad Total (Días):	1,0166
<b>Eventos de Falla en el Sistema</b>	
Número de Fallas:	5,5069
Número de Mantenimientos Correctivos:	5,5069
Número de Inspecciones:	0
Número de Mantenimientos Preventivos:	0
Número Total de Eventos:	5,5069
<b>Costos</b>	
Costos Totales Anuales (COP):	\$ 12.228.344

Fuente: El autor.

**Anexo E. Diagramas de Bloques Desarrollados para la Modelación de las Líneas de Bombeo en la Planta de Caustificación**

Figura 59. Diagrama de bloques para la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde a plantas de pulpa.

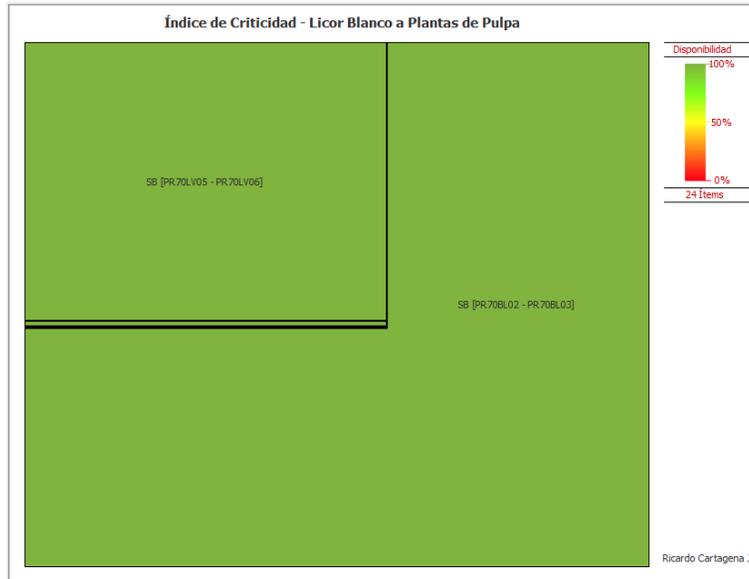


Fuente: El autor.



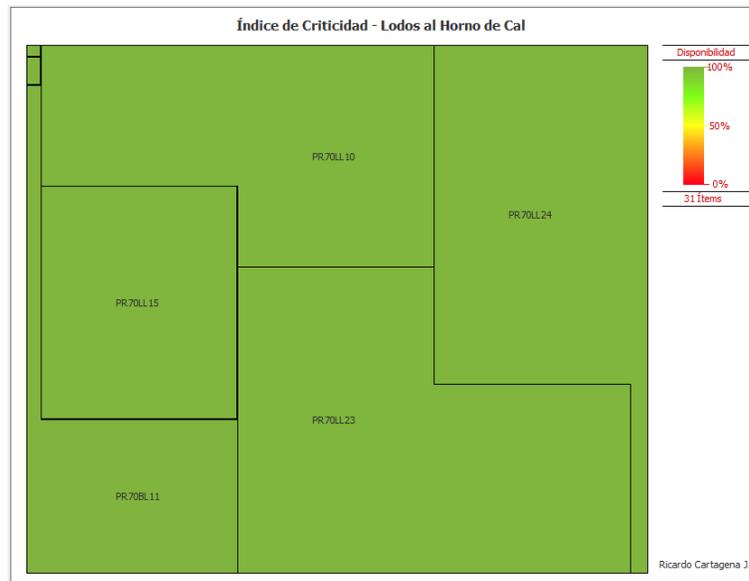
## Anexo F. Índice de Criticidad de la Ubicaciones Técnicas para la Modelación de las Líneas de Bombeo en la Planta de Caustificación

Figura 61. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde a plantas de pulpa.



Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

Figura 62. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde al horno de cal.



Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

## Anexo G. Tablas de Clasificación para Calcular el Número de Prioridad de Riesgo

**Tabla 88. Escala de severidad.**

Severidad	Índice
Inexistente	1
Baja	2
	3
Moderada	4
	5
	6
Alta	7
	8
Muy Alta	9
	10

Fuente: MCDERMOTT, Robin; MIKULAK, Raymond; BEAUREGARD, Michael. The basics of FMEA. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 90 p.

**Tabla 89. Escala de probabilidad de ocurrencia.**

Probabilidad de ocurrencia	Índice	Tasa Posible de Falla (días de Operación)
Remota	1	<1:20.000
Baja	2	1:20.000
	3	1:10.000
Moderada	4	1:2000
	5	1:1000
	6	1:200
Alta	7	1:100
	8	1:20
Muy Alta	9	1:10
	10	1:2

Fuente: MCDERMOTT, Robin; MIKULAK, Raymond; BEAUREGARD, Michael. The basics of FMEA. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 90 p.

**Tabla 90. Escala de capacidad de detección.**

Capacidad de Detección	Índice	Posibilidad (%) de Detección
Muy Alta	1	86 – 100
Alta	2	76 – 85
	3	66 – 75
Moderada	4	56 – 65
	5	46 – 55
	6	36 – 45
Baja	7	26 – 35
	8	16 – 25
Remota	9	6 – 15
	10	0 – 5

Fuente: MCDERMOTT, Robin; MIKULAK, Raymond; BEAUREGARD, Michael. The basics of FMEA. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 90 p

**Tabla 91. Interpretación de los términos de ponderación.**

Término	Probabilidad de ocurrencia	Severidad	Capacidad de Detección
Remoto	Es poco probable que estas fallas sucedan, al menos una vez	Una falla que no tiene efecto en el desempeño del sistema, el operario probablemente no lo perciba	El defecto permanece sin detectar hasta que el desempeño del sistema se degrada hasta el punto en que no cumple la función
Bajo	Es probable que ocurra una vez, pero poco probable que ocurra de manera frecuente	Una falla que puede que cause algo de molestia al operario, pero que no causara ningún deterioro del sistema	El defecto permanece sin detectar hasta que el desempeño del sistema se ve afectado de manera severa
Moderado	Es probable que ocurra más de una vez	Una falla que causaría gran insatisfacción al operario o que causa un deterioro notable pero leve en el desempeño del sistema	El defecto permanece sin detectar hasta que el desempeño del sistema es afectado
Alto	Es casi probable que ocurra por lo menos una vez	Una falla que causa un deterioro significativo en el desempeño del sistema y/o puede causar accidentes menores	El defecto permanece sin detectar hasta que se realizan inspecciones o pruebas
Muy Alto	Es casi probable que ocurra en repetidas ocasiones	Una falla que afectaría severamente la habilidad de cumplir la función o causar averías, accidentes graves o la muerte	El defecto casi por seguro será detectado durante una inspección o prueba

Fuente: MCDERMOTT, Robin; MIKULAK, Raymond; BEAUREGARD, Michael. The basics of FMEA. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009. 90 p

## Anexo H. Características de los Materiales de Liners e Impulsores

Actualmente se tienen instalados liners e impulsores recubiertos con neopreno, butyl y caucho natural con el fin de mitigar el desgaste y corrosión del lodo bombeado. Las propiedades máximas de trabajo para elastómeros empleados en estas aplicaciones son:

Elastómero	Dureza Shore (A)	Límite Máximo de Temperatura	Rango de pH	Abrasión	Resistencia a Químicos
Caucho Natural o Con Base Natural	40	130°F/55°C	5 - 12	E	G (1)
Neopreno	60	175°F/80°C	3 - 12	G	G(1)
Butyl	50	220°F/105°C	3 - 12	G	E
Poliuretano	81	149°F/65°C	3 - 12	E(2)	G(1)
Nitrilo	60	220°F/105°C	4 - 12	G	G(1)
Hypalon	55	230°F/110°C	1 - 14	G	E

E - Excelente

G - Bueno

(1) Pobre para químicos oxidantes y ácidos fuertes.

(2) Partículas finas únicamente (mesh 150 o menos).

Fuente: Slurry pump handbook. 5 ed. Weir Slurry Group, Inc., 2009. 56 p.

A continuación se presentan las condiciones de operación (pH y temperatura) de las bombas estudiadas:

Posición	Temperatura Promedio de Operación	Nivel pH
1	213°F/101°C	12
2	213°F/101°C	12
3	176°F/80°C	12
4	194°F/90°C	12
5	176°F/80°C	12
6	194°F/90°C	12
7	194°F/90°C	12
8	194°F/90°C	12
9	213°F/101°C	12

Fuente: El autor.

Al comparar los valores de operación de temperatura y nivel de pH, se observa que para algunas aplicaciones la temperatura de operación excede la temperatura máxima recomendada para operación continua e igualmente todos los materiales están en el límite del nivel de pH, por lo que se debe evaluar la selección de un material apropiado para las condiciones de operación y prevenir la falla de estos componentes. Las propiedades y aplicaciones de otros materiales están a continuación:

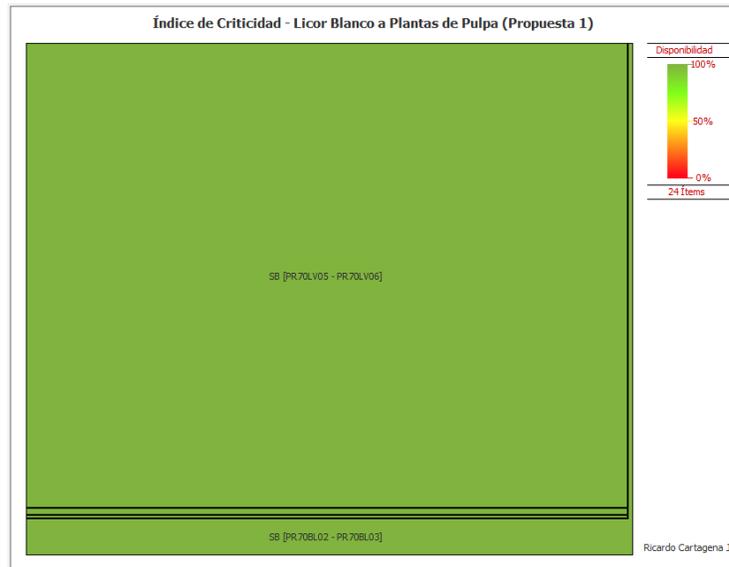
Material	Dureza Brinell	Rango de pH	Aplicación
Hierro Fundido	180	6 - 9	Liviana, No Corrosiva
Aleación de Hierro al 28% de Cromo	600 - 700	5 - 12	Abrasiva, Moderadamente Corrosiva
Aleación de Hierro al 30% de Cromo	500 - 550	4 - 13	Abrasiva, Corrosiva
Aleación de Hierro al 35% de Cromo	400 - 450	1 - 13	Abrasiva, Altamente Ácida
316 SS	160 - 200	3 - 11	Liviana, Corrosiva

Fuente: Slurry pump handbook. 5 ed. Weir Slurry Group, Inc., 2009. 56 p.

De la anterior tabla se observa que existen otros materiales con mejores propiedades para las ubicaciones técnicas de la planta de caustificación.

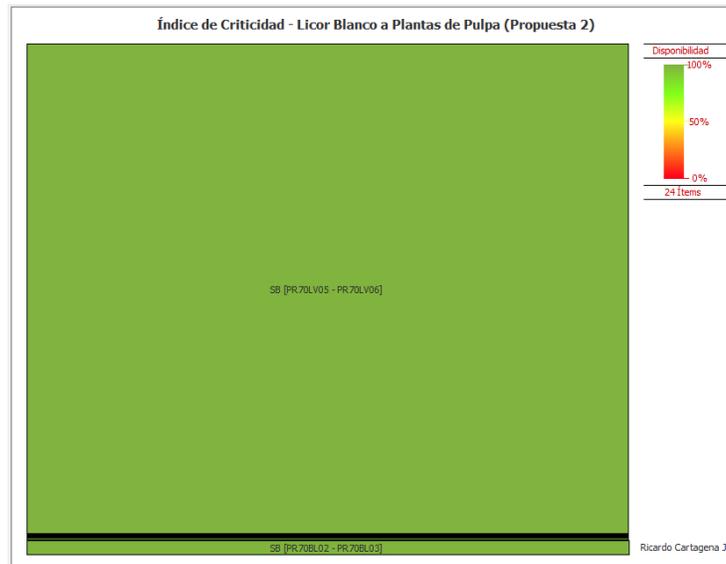
## Anexo I. Índice de Criticidad de la Ubicaciones Técnicas para la Modelación de las Líneas de Bombeo en la Planta de Caustificación Implementando las Propuestas de Mejora

Figura 63. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde a plantas de pulpa – Propuesta 1.



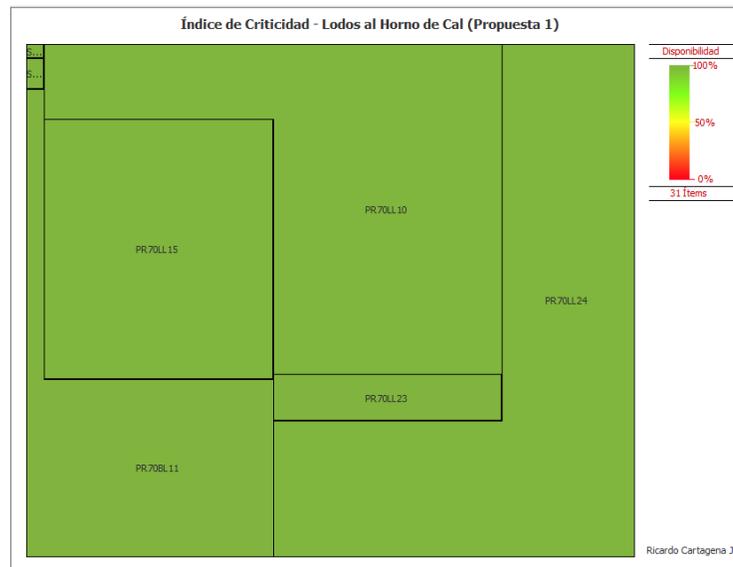
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

Figura 64. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde a plantas de pulpa – Propuesta 2.



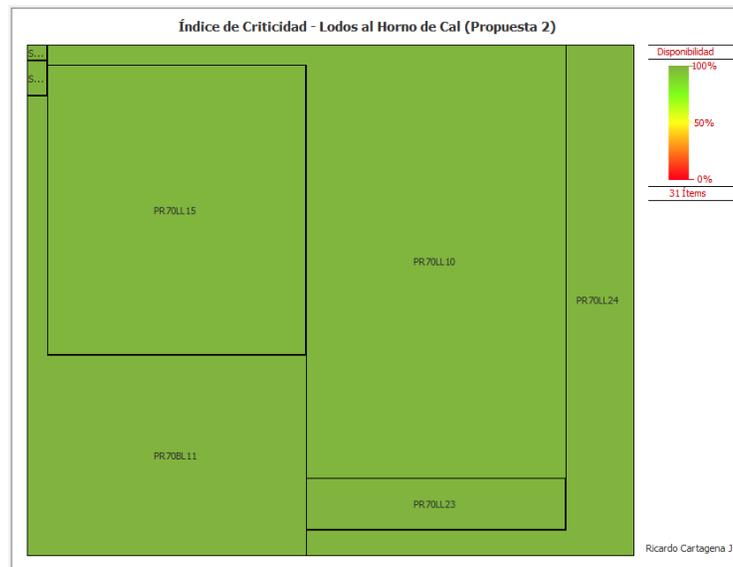
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 65. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 1.**



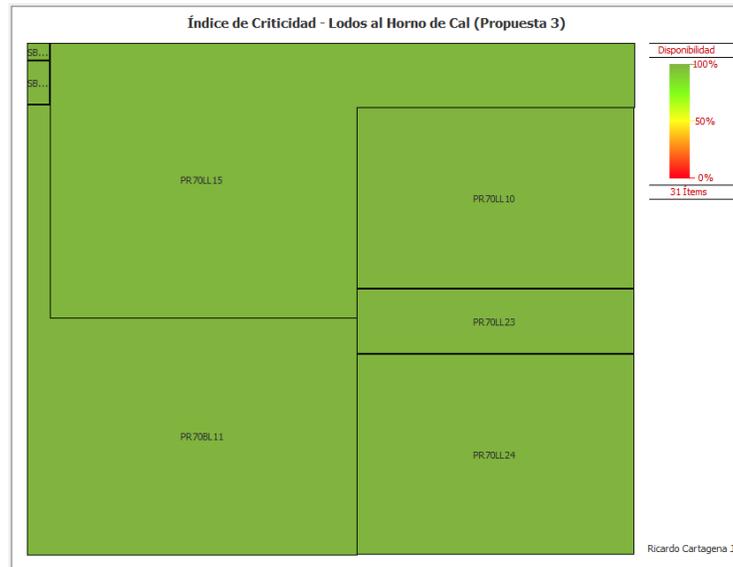
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 66. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 2.**



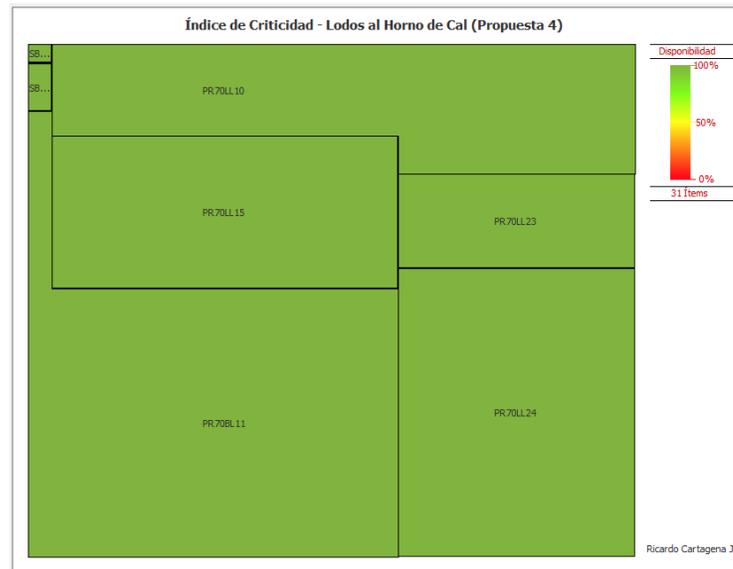
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 67. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 3.**



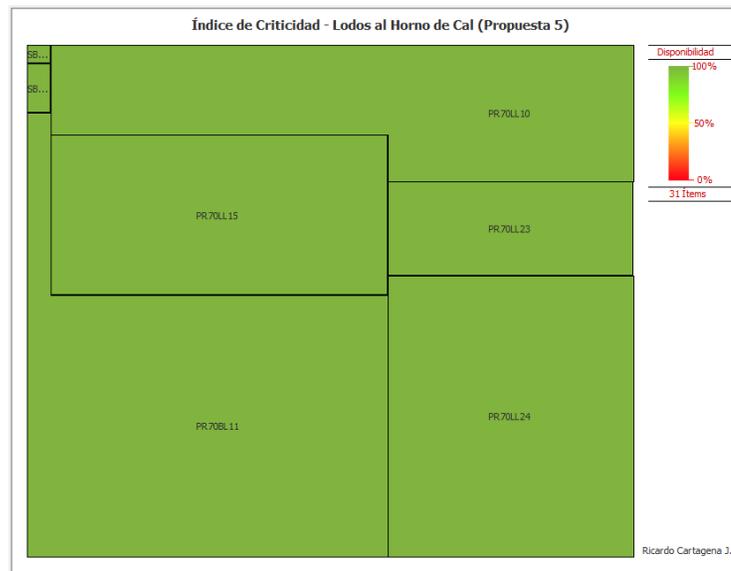
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 68. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 4.**



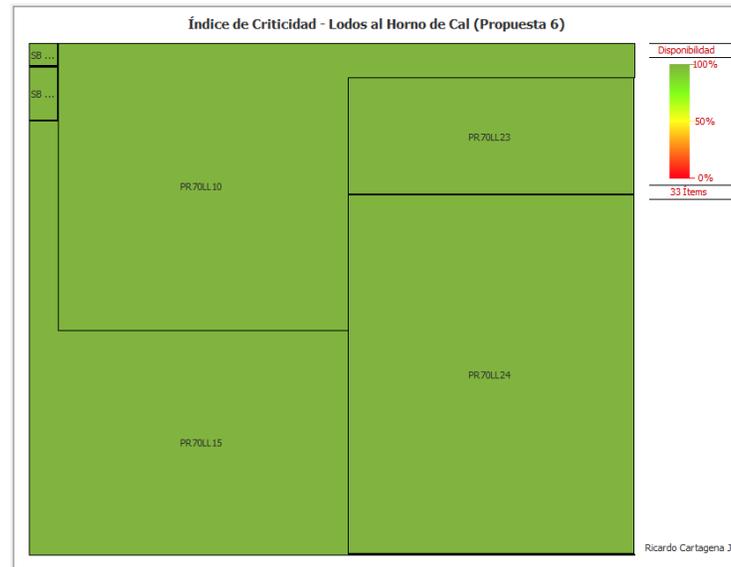
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 69. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 5.**



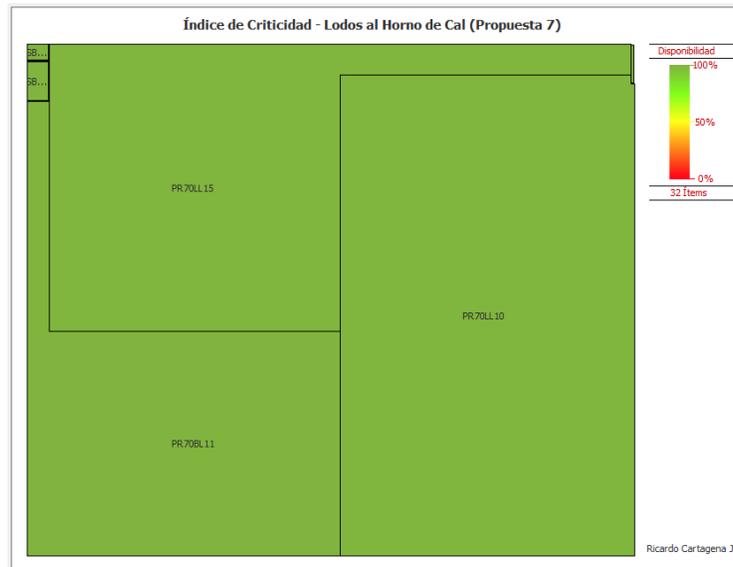
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 70. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 6.**



Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 71. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 7.**



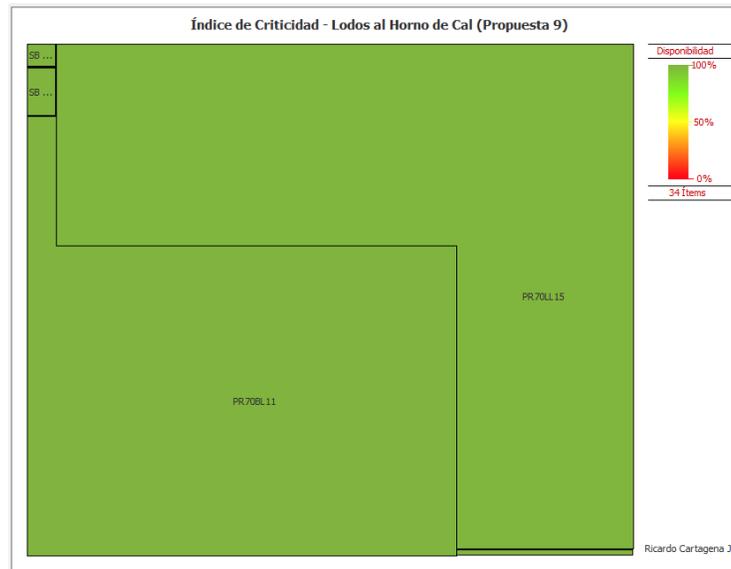
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 72. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 8.**



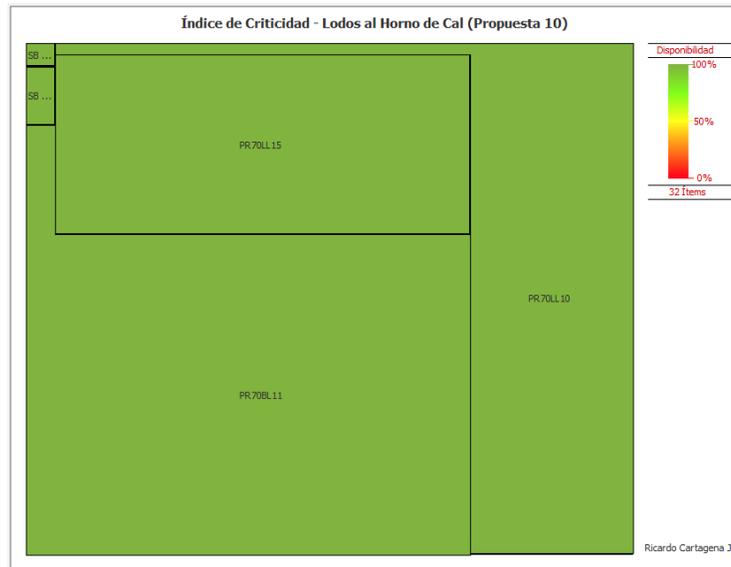
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 73. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 9.**



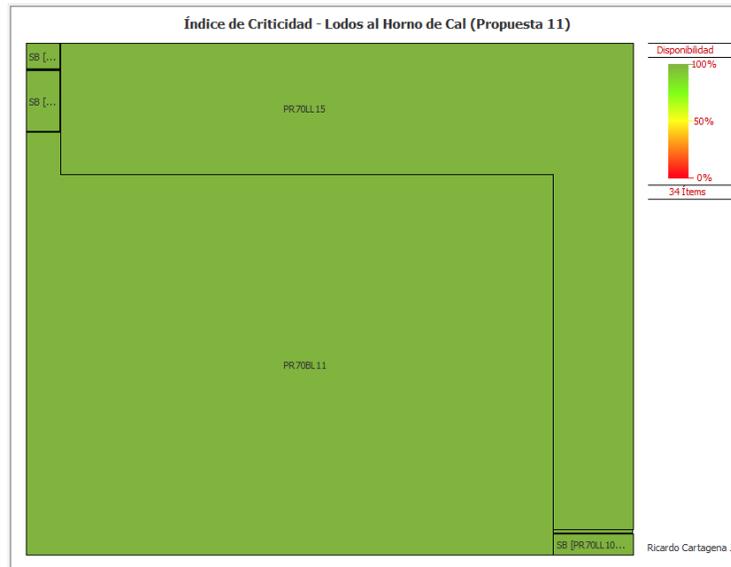
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 74. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 10.**



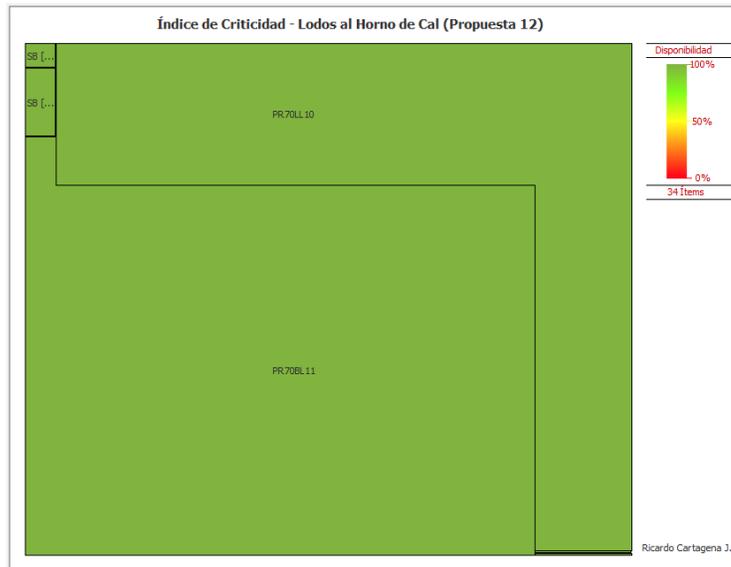
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 75. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 11.**



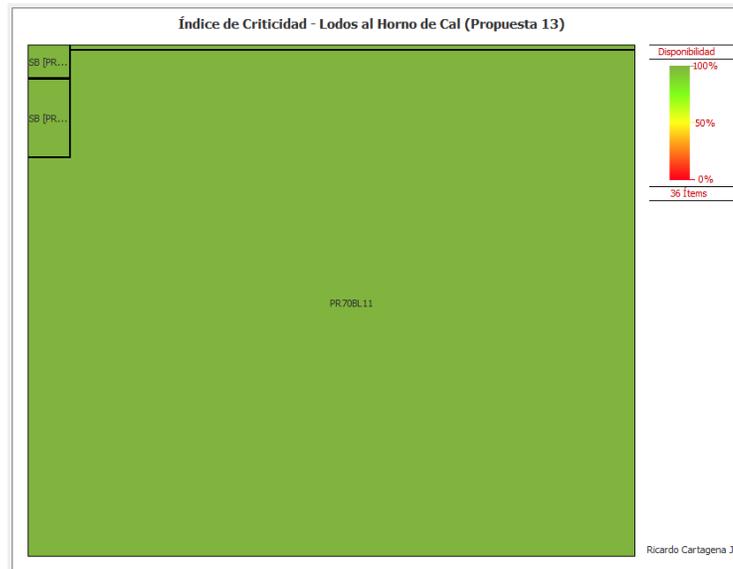
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 76. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 12.**



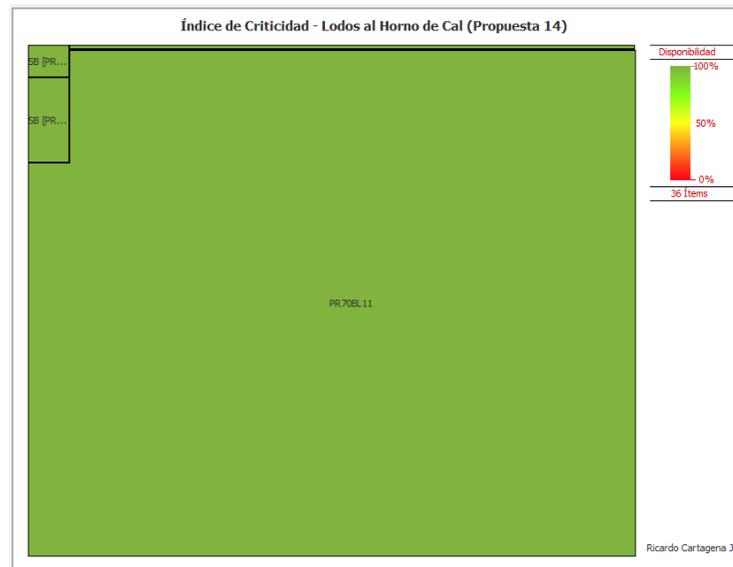
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 77. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 13.**



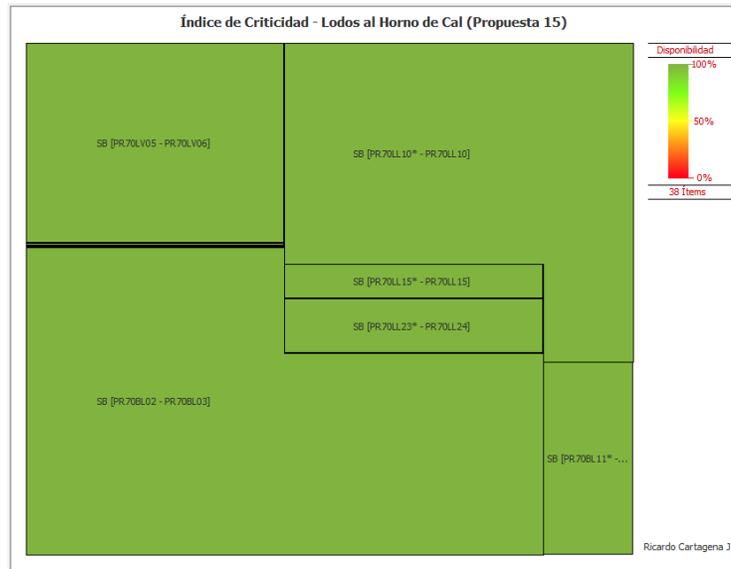
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 78. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 14.**



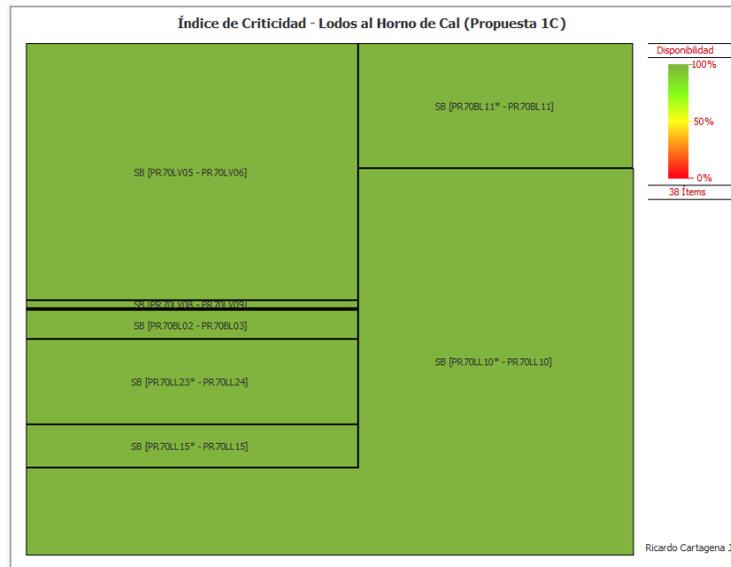
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 79. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 15.**



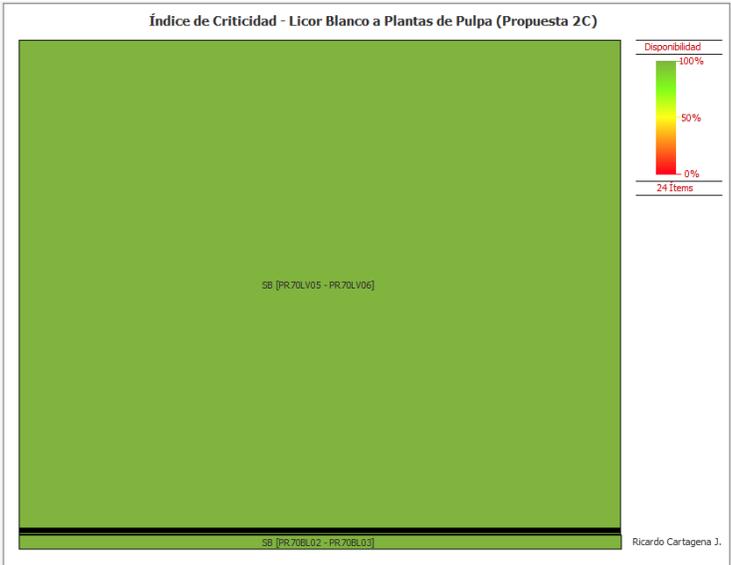
Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 80. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 1C.**



Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.

**Figura 81. Índice de criticidad para los componentes de la línea de bombeo desde el clarificador de licor verde hasta el horno de cal – Propuesta 2C.**



Fuente: Captura de pantalla del software BlockSim v.7.