

**Universidad Católica Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y  
Formales**  
**Programa Profesional de Ingeniería Industrial**

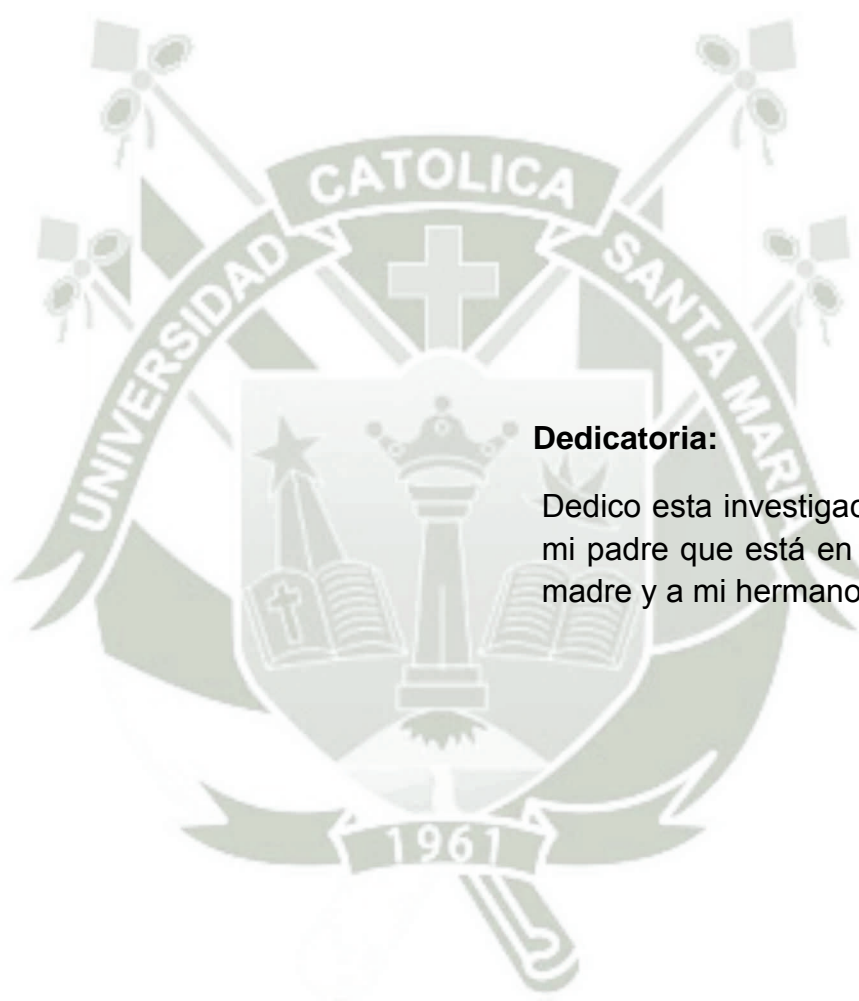


**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE  
MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD  
PARA REDUCIR LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO A  
UN SISTEMA DE MOLIENDA VERTICAL DE CEMENTO  
LM 56 2 + 2**

**Tesis presentada por el Bachiller  
Fernando Fernández Corrales  
Para optar el título profesional de  
Ingeniero Industrial**

**Arequipa – Perú**

**2013**



**Dedicatoria:**

Dedico esta investigación a Dios, a mi padre que está en el cielo, a mi madre y a mi hermano Diego.

## AGRADECIMIENTOS

A todas las personas e instituciones cuya ayuda directa o indirecta hicieron posible la realización de este trabajo.

Al señor Luis Ricardo Gardella Lanfranco por su apoyo incondicional.

A mis abuelos Javier Corrales y María de Corrales.

A los profesores orientadores de la tesis Ing. Rolardi Valencia e Ing. Efraín Murillo.

A los ingenieros cementeros Robert Sánchez Chaves y Carlos Rosado Díaz por el apoyo en la parte técnica de la investigación.

A mis compañeros de pre grado Brian Macedo Choque y Gilmar Lazo Valdivia.

A mi sobrino Mateo Fernández Lewis que ha llenado de felicidad a la familia.



## INDICE

### LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Máquinas que componen un molino vertical.	10
Figura 2.2: Molino vertical Loesche en 1929.	12
Figura 2.3: Diseño actual para un molino vertical.	13
Figura 2.4: Desarrollo de los tamaños de molinos verticales en el tiempo	14
Figura 2.5: Primera generación de reductores para molinos verticales	15
Figura 2.6: Segunda generación de reductores para molinos verticales	16
Figura 2.7: Última generación de reductores para molinos verticales	17
Figura 2.8: Clasificador dinámico de primera generación	18
Figura 2.9: Clasificador dinámico de segunda generación	19
Figura 2.10: Clasificador dinámico de tercera generación	20
Figura 2.11: Puntos de medición en un reductor FLENDER KMP	22
Figura 3.1: Proceso de producción del cemento por vía seca	32
Figura 3.2: Molino vertical de rodillos	40
Figura 3.3: Rodillos Hidroneumáticos	41
Figura 3.4: Sistema Hidroneumático	41
Figura 3.5: Molienda con los cuerpos moledores	43
Figura 3.6: Flujo de material dentro del molino	45
Figura 3.7: Alabes de un clasificador dinámico	46
Figura 3.8: Proceso típico de un molino vertical	47
Figura 3.9: Molino vertical PETERS	53
Figura 3.10: Molino vertical PFEIFFER	56
Figura 3.11: Molino vertical POLYSIUS	59
Figura 3.12: Molino vertical ATOX	62
Figura 3.13: Molino vertical LOESCHE	65
Figura 3.14: Equipos auxiliares de un molino vertical	66
Figura 3.15: Componentes estructurales de una faja transportadora	67
Figura 3.16: Componentes estructurales de un elevador de cangilones	68
Figura 3.17: Componentes estructurales de un aerodeslizador	69

Figura 3.18: Componentes estructurales de una balanza dosificadora	70
Figura 3.19: Componentes estructurales de una válvula rotativa	71
Figura 3.20: Componentes estructurales de un ventilador centrífugo	73
Figura 3.21: Componentes estructurales de un filtro de mangas pulse jet	75
Figura 3.22: Sistema de un compresor de tornillo de dos etapas	76
Figura 4.1: Relación entre el proceso de producción y el mantenimiento	79
Figura 4.2: Evolución de las técnicas de mantenimiento	84
Figura 4.3: Costos de mantenimiento en relación al tiempo	92
Figura 4.4: Evolución de las estrategias de mantenimiento	94
Figura 4.5: Sistema de control a retroalimentación del proceso de Calidad	115
Figura 4.6: Modelo básico de criticidad	122
Figura 4.7: Diagrama de proceso	124
Figura 4.8: Perspectiva tradicional de la falla	134
Figura 4.9: Patrones de fallas actuales	135
Figura 4.10: Curva P – F	141
Figura 4.11: Intervalo P – F	142
Figura 4.12: Intervalo P – F neto	142
Figura 4.13: Árbol lógico de decisión	144
Figura 4.14: Representación gráfica de proyectos equilibrados y Desequilibrados	146
Figura 4.15: Curva idealizada de la bañera de la confiabilidad	147
Figura 4.16: Costo total del producto vs confiabilidad del producto	148
Figura 4.17: Representación del parámetro de localización	155
Figura 4.18: Diferentes velocidades de falla	161
Figura 4.19: Distancia de las desviaciones x e y	164
Figura 4.20: Gama de p	167
Figura 4.21: Valores $\beta$ en la curva de la bañera	170
Figura 5.1: Flow sheet del Molino Loesche 56 2 + 2	177
Figura 5.2: Molienda de cemento	180
Figura 5.3: Transporte de materia prima	181

Figura 5.4: Sistema de lubricación del reductor	182
Figura 5.5: Sistemas hidráulicos de los rodillos	183
Figura 5.6: Reductor RENK	194
Figura 5.7: Cámara de rechazo	196
Figura 5.8: Componentes estructurales del rodillo Master	197
Figura 5.9: Componentes estructurales del rodillo esclavo	198
Figura 5.10: Mesa de molienda, armor ring, dam ring y nozzle ring	200
Figura 5.11: Plano hidráulico del sistema de inyección de agua	201
Figura 5.12: Componentes del sistema hidráulico de rodillos Master	203
Figura 5.13: Sistema hidráulico de rodillos Master	203
Figura 5.14: Sistema de lubricación de rodillos Master	206
Figura 5.15: Puntos de engrase del rocker arm de los rodillos Master	208
Figura 5.16: Componentes del sistema hidráulico de rodillos Esclavos	210
Figura 5.17: Sistemas de lubricación del reductor RENK	211
Figura 5.18: Sistema de baja presión del reductor RENK	212
Figura 5.19: Sistema de alta presión del reductor RENK parte 1	214
Figura 5.20: Sistema de alta presión del reductor RENK parte 2	215
Figura 5.21: Circuito de filtración fina de aceite	216
Figura 5.22: Sistema de enfriamiento por agua	218
Figura 5.23: Componentes estructurales del clasificador dinámico	219
Figura 5.24: Puntos de medición de vibraciones en el reductor RENK	238
Figura 5.25: Tendencia del envolvente de aceleración de la pista exterior Del rodamiento del piñón de ataque	239
Figura 6.1: Diagrama EPS del proceso: Molienda	258
Figura 6.2: Diagrama EPS del proceso: Reductor	259
Figura 6.3: Diagrama EPS del proceso: Rodillos Master	259
Figura 6.4: Diagrama EPS del proceso: Rodillos Esclavos	260
Figura 6.5: Diagrama EPS del proceso: Sistema de alta presión del Reductor	260
Figura 6.6: Intervalo P-F de monitoreo a condición	298

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Diferencias entre un molino vertical y un molino de bolas.	3
Tabla 1.2: Identificación de variables	7
Tabla 3.1: Clases de resistencias según DIN 1164	31
Tabla 4.1: Tiempos de diagnóstico y reparación según su naturaleza	82
Tabla 4.2: Evolución del concepto de calidad	89
Tabla 4.3: Criterios de evaluación de severidad	131
Tabla 4.4: Criterios de evaluación de ocurrencia	132
Tabla 4.5: Criterios de evaluación de detección	133
Tabla 5.1: Equipos auxiliares del molino	185
Tabla 5.2: Producción del molino Loesche desde el 2008 hasta el 2010	220
Tabla 5.3: Producción de tipos de cemento en el molino Loesche	222
Tabla 5.4: Calidad del cemento en el molino Loesche	223
Tabla 5.5: Paradas del molino en 1 mes	230
Tabla 6.1: Sistemas o subsistemas a analizar	242
Tabla 6.2: Resumen de sistemas o subsistemas a analizar	246
Tabla 6.3: Criterios para el análisis de criticidad	248
Tabla 6.4: Matriz de criticidad	250
Tabla 6.5: Nivel de criticidad para cada sistema o subsistema	251
Tabla 6.6: Resultados del análisis de criticidad	254
Tabla 6.7: Contexto operacional	255
Tabla 6.8: Unidades de proceso, sistema y subsistemas	257
Tabla 6.9: Funciones y fallas funcionales	262
Tabla 6.10: Modos de falla	266
Tabla 6.11: Análisis de criticidad de los modos de falla	274
Tabla 6.12: Resumen de la criticidad de los modos de falla	281
Tabla 6.13: Efectos y consecuencias de los modos de falla	287
Tabla 6.14: Análisis y selección de las estrategias de mantenimiento	296
Tabla 6.15: Frecuencia y costo del mantenimiento predictivo De los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3	299
Tabla 6.16: Costo total del mantenimiento predictivo de los modos	304

De falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3	
Tabla 6.17: Viabilidad técnica de los modos de falla críticos	305
Tabla 6.18: Tiempos de operación del reductor modos de falla 1A3 y 1B2	307
Tabla 6.19: Parámetros de Weibull modos de falla 1A3 y 1B2	308
Tabla 6.20: Coeficiente de correlación de los modos de falla 1A3 y 1B2	309
Tabla 6.21: MTBF modos de falla 1A3 y 1B2	310
Tabla 6.22: Funciones de la confiabilidad modos de falla 1A3 y 1B2	311
Tabla 6.23: Datos para el cálculo del tiempo óptimo modos de falla 1A3 y 1B2	317
Tabla 6.24: Tiempo óptimo para el cambio de rodamientos del reductor	318
Tabla 6.25: Tiempos de operación del reductor falla 1A4 y 1B3	321
Tabla 6.26: Parámetros de Weibull modos de falla 1A4 y 1B3	322
Tabla 6.27: Coeficiente de correlación modos de falla 1A4 y 1B3	323
Tabla 6.28: MTBF modos de falla 1A4 y 1B3	324
Tabla 6.29: Funciones de la confiabilidad modos de falla 1A4 y 1B3	325
Tabla 6.30: Datos para el cálculo del tiempo óptimo modos de falla 1A4 y 1B3	331
Tabla 6.31: Tiempo óptimo para el cambio de piñones desgastados	332
Tabla 6.32: Plan de mantenimiento preventivo y predictivo de los Equipos semi críticos	336
Tabla 6.33: Plan de mantenimiento preventivo y predictivo de los Equipos críticos	354
Tabla 6.34: Fecha aproximada del mantenimiento preventivo de Los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3	360
Tabla 7.1: Comparación de costos en el cambio de sistema de Mantenimiento	362
Tabla 7.2: Calculo del costo de capital propio	366
Tabla 7.3: Costos de implementación	367
Tabla 7.4: Valor de recupero de los equipos para realizar el monitoreo A condición	368

Tabla 7.5: Planteamiento de los datos	369
Tabla 7.6: Calculo del VAC y del CAE	370

### LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 4.1: Función de densidad de la probabilidad	156
Gráfico 4.2: Relación entre pdf y cdf	158
Gráfico 4.3: Confiabilidad y probabilidad de falla	160
Gráfico 5.1: Producción comparativa del molino Loesche	221
Gráfico 5.2: Calidad de cemento en el molino Loesche	228
Gráfico 5.3: Incremento de la calidad del cemento tipo 1P	229
Gráfico 5.4: Cantidad de fallas del molino en 1 mes	236
Gráfico 6.1: Nivel de criticidad para cada sistema o subsistema	253
Gráfico 6.2: Criticidad de los modos de falla	285
Gráfico 6.3: Función de densidad modos de falla 1A3 y 1B2	312
Gráfico 6.4: Función de distribución modos de falla 1A3 y 1B2	313
Gráfico 6.5: Función de supervivencia modos de falla 1A3 y 1B2	314
Gráfico 6.6: Función de riesgo o probabilidad de falla modos de falla 1A3 y 1B2	315
Gráfico 6.7: Tiempo óptimo para el cambio de rodamientos del reductor	320
Gráfico 6.8: Función de densidad modos de falla 1A4 y 1B3	326
Gráfico 6.9: Función de distribución modos de falla 1A4 y 1B3	327
Gráfico 6.10: Función de supervivencia modos de falla 1A4 y 1B3	328
Gráfico 6.11: Función de riesgo o probabilidad de falla modos de falla 1A4 y 1B3	329
Gráfico 6.12: Tiempo óptimo para el cambio de piñonería del reductor	334

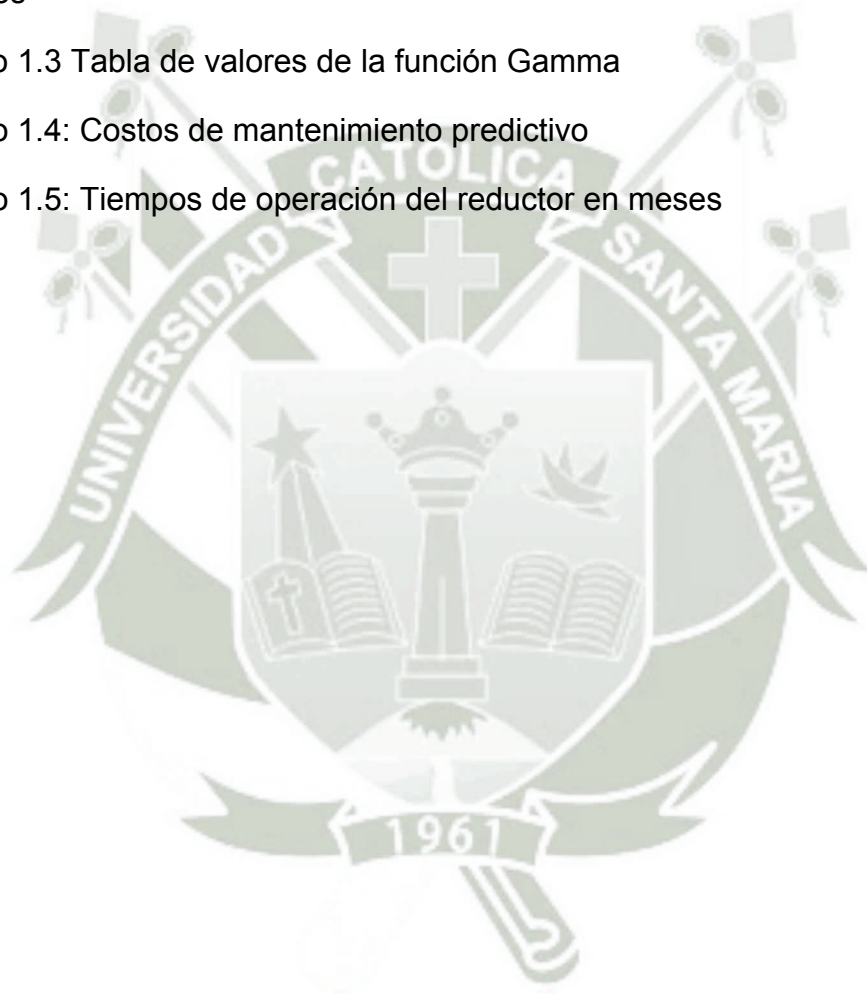
## LISTA DE FORMULAS

Fórmula 4.1: Criticidad	121
Fórmula 4.2: Consecuencia	121
Fórmula 4.3: Numero de prioridad de riesgo	134
Fórmula 4.4: Función densidad de probabilidad para una variable Aleatoria continua	157
Fórmula 4.5: Función de distribución acumulada para una variable Aleatoria	157
Fórmula 4.6: Relación matemática entre la cdf y la pdf	158
Fórmula 4.7: Relación matemática inversa entre la cdf y la pdf	158
Fórmula 4.8: Área total debajo de la pdf	159
Fórmula 4.9: Función de confiabilidad o supervivencia	159
Fórmula 4.10: Función riesgo o probabilidad de falla	160
Fórmula 4.11: Tiempo medio entre fallas (MTBF)	162
Fórmula 4.12: Método de los mínimos cuadrados lineal	165
Fórmula 4.13: Punto de intersección o coordenada de origen	165
Fórmula 4.14: Pendiente de la recta o parámetro de la forma	165
Fórmula 4.15: Numero de los puntos de datos o parámetro de escala	166
Fórmula 4.16: Coeficiente de correlación	166
Fórmula 4.17: Estimador de $\rho$	167
Fórmula 4.18: Distribución Weibull de 3 parámetros	168
Fórmula 4.19: Función de distribución acumulada para una Distribución Weibull	168
Fórmula 4.20: Costo optimo por unidad de tiempo	172
Fórmula 4.21: Valor actual neto (VPN)	172
Fórmula 4.22: Valor actual de costos (CAE)	173

Fórmula 4.23: Costo de capital propio según el modelo de valuación De activos CAPM	174
---	-----

### **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1.1 Impacto en la producción durante 7 días de paro	378
Anexo 1.2 Costos de mantenimiento correctivo de los modos de falla Críticos	380
Anexo 1.3 Tabla de valores de la función Gamma	383
Anexo 1.4: Costos de mantenimiento predictivo	384
Anexo 1.5: Tiempos de operación del reductor en meses	385



## RESUMEN

El objetivo de esta tesis es aplicar una metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para reducir los costos de mantenimiento a un sistema de molienda vertical de cemento LM (Molino Loesche) 56 2 + 2. Con la globalización, los molinos verticales se han introducido en la industria cementera masivamente desde hace 20 años siendo máquinas con capacidades de producción altas por lo que son valiosas para lograr buena rentabilidad. El principio de funcionamiento de estos molinos demanda una gran tecnología tanto mecánica como de automatización de última generación y mejoras en comparación con la molienda tradicional en molinos de bolas. Por tal motivo el mantenimiento es más complejo que los sistemas tradicionales.

El mantenimiento industrial tiene una gran importancia para la continuidad de la producción en las grandes plantas de cemento, una de las técnicas más usadas es el mantenimiento RCM o mantenimiento centrado en la confiabilidad desarrollada para la industria de la aviación por John Moubray.

Es una metodología que se desarrolla en siete etapas, las cuales son la determinación de las funciones del equipo, las fallas funcionales, los modos de falla, los efectos, consecuencias de las fallas y las tareas proactivas y de búsqueda de fallas. Con estas etapas de análisis se puede llegar a saber cuáles son las fallas más críticas de un proceso o equipamiento y que tareas de mantenimiento son las más adecuadas con costos óptimos, de esta manera se puede tener un ahorro significativo de recursos en las operaciones de la empresa.

## ABSTRACT

The objective of this thesis is to apply a methodology of reliability-centered maintenance (RCM) to reduce the maintenance costs of a vertical mill system LM (Loesche Mill) 56 2 + 2. With globalization, vertical mills have been introduced in the cement industry for 20 years massively being machines with high production capacity and are therefore valuable for achieving good returns. The operation principle of these mills demands great technology both mechanical and automation art and improvements compared with traditional ball milling systems. Therefore maintenance is more complex than the traditional systems.

The industrial maintenance is very important for the continuity of production in large cement plants; one of the most used techniques is the RCM maintenance or reliability-centered maintenance developed for the aviation industry by John Moubray.

It is a methodology that develops in seven steps, which are determining the equipment functions, functional failures, failure modes, effects, consequences of failures and proactive tasks and trouble-shooting. These stages of analysis can get to know what the most critical faults of a process or equipment are, and what maintenance tasks are best suited with optimal costs, so it is possible to have a significant resource savings in the company operations.

## DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

<b>CAPITULO I: INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1 Identificación del problema	1
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Objetivos de la investigación	5
1.3.1 Objetivo principal	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Hipótesis	5
1.5 Variables	6
1.5.1 Variable independiente	6
1.5.2 Variable dependiente	6
1.6 Justificación	8
1.7 Alcances	8
<b>CAPITULO II: ANTECEDENTES E INVESTIGACIONES SOBRE MANTENIMIENTO EN MOLINOS VERTICALES</b>	<b>9</b>
2.1 Antecedentes de los molinos verticales	9
2.1.1 Molino vertical	10
2.1.2 Reductor	13
2.1.3 Clasificador dinámico	17
2.1.4 Ventilador de tiro inducido	20
2.2 Investigaciones de aplicación en molinos verticales	21
2.2.1 Mantenimiento al reductor	21
2.2.2 Mantenimiento a elementos de la cámara de molienda y clasificador dinámico	23
2.2.3 Mantenimiento a sistemas hidráulicos y de lubricación	27
<b>CAPITULO III: MOLINOS VERTICALES EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO</b>	<b>29</b>
3.1 Cemento	29
3.1.1 Determinación del residuo sobre tamiz	30
3.1.2 Determinación de la superficie específica	30
3.1.3 Determinación de la resistencia	30
3.2 Proceso productivo del cemento	31
3.2.1 Extracción de materias primas en canteras	32
3.2.2 Triturado	33
3.2.3 Pre – Homogenización de caliza	33
3.2.4 Molienda de crudos y homogenización	34
3.2.5 Producción de Clinker	34
3.2.6 Obtención del cemento	36

3.2.7 Envase y despacho del cemento	36
3.3 Molienda	37
3.4 Molinos verticales de rodillos	39
3.5 Principio de funcionamiento	39
3.6 Clasificación de molinos verticales	50
3.6.1 Molino de anillos de bolas: Molino PETERS	50
3.6.2 Molino con rodillos abombados: Molino MPS o PFEIFFER	53
3.6.3 Molino vertical POLYSIUS	56
3.6.4 Molino vertical ATOX: FLS	60
3.6.5 Molino vertical LOESCHE	62
3.7 Equipos auxiliares de un molino vertical	65
3.7.1 Fajas transportadoras	66
3.7.2 Elevador de cangilones	68
3.7.3 Canaletas aerodeslizantes	69
3.7.4 Balanzas dosificadoras	70
3.7.5 Válvulas rotativas	70
3.7.6 Ventilador de tiro inducido	71
3.7.7 Filtros de mangas pulse jet	73
3.7.8 Compresor de tornillo de dos etapas	75

#### **CAPITULO IV: MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD**

<b>RCM</b>	<b>77</b>
4.1 Definiciones de mantenimiento de sistemas	77
4.2 Generaciones del mantenimiento	79
4.3 La calidad y su relación con el mantenimiento	85
4.4 Impacto del mantenimiento en la productividad y los costos	89
4.5 Estrategias de mantenimiento	93
4.5.1 Mantenimiento correctivo	95
4.5.2 Mantenimiento preventivo	96
4.5.3 Mantenimiento predictivo	97
4.6 Filosofías de mantenimiento	100
4.6.1 Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)	100
4.6.2 Mantenimiento productivo total (TPM)	101
4.6.3 Sistema de gestión de calidad	103
4.6.4 Estrategia de las cinco S	104
4.6.4.1 Seiri	105
4.6.4.2 Seiton	106
4.6.4.3 Seiso	109
4.6.4.4 Seiketsu	110
4.6.4.5 Shitsuke	112
4.6.5 Estrategia del proceso de Deming	114

4.6.5.1	Planear	115
4.6.5.2	Hacer o ejecutar	116
4.6.5.3	Verificar o controlar	116
4.6.5.4	Actuar	117
4.6.6	Dirección por políticas (Hoshin Kanri)	117
4.7	Mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM	119
4.7.1	Definición	119
4.7.2	Ventajas	119
4.7.3	Desventajas	120
4.7.4	Jerarquización de activos, análisis de criticidad	120
4.7.5	Contexto Operacional	123
4.7.5.1	Unidades de proceso	123
4.7.5.2	Sistemas y subsistemas	123
4.7.5.3	Diagrama EPS	123
4.7.6	Las siete preguntas del RCM	124
4.7.6.1	Funciones	125
4.7.6.2	Fallas funcionales	126
4.7.6.3	Modos de falla	127
4.7.6.4	Efectos de falla	128
4.7.6.5	Consecuencias de falla	128
4.7.6.6	Análisis de criticidad de los modos de falla basado en el riesgo	130
4.7.7	Tareas proactivas del mantenimiento	134
4.7.7.1	Generalidades, teoría del envejecimiento de maquinaria Y equipos	134
4.7.7.2	Tareas de reacondicionamiento o sustitución cíclicas	138
4.7.7.2.1	Tareas de reacondicionamiento cíclico	139
4.7.7.2.2	Tareas de sustitución cíclicas	139
4.7.7.2.3	Tareas a condición	140
4.7.7.3	Árbol lógico de decisión	143
4.8	Ingeniería de confiabilidad	145
4.8.1	La curva de la bañera de la confiabilidad	146
4.8.2	Quemado	148
4.8.3	Reducción al mínimo del coste del fabricante	148
4.8.4	Ventajas de un programa de ingeniería de confiabilidad	149
4.8.5	Confiabilidad y control de calidad	151
4.8.6	Variables aleatorias	152
4.8.7	Distribuciones	153
4.8.8	Parámetros de las distribuciones	154
4.8.8.1	Parámetro de escala	154
4.8.8.2	Parámetro de forma	154
4.8.8.3	Parámetro de localización	155

4.8.9	Las funciones de densidad de probabilidad y función de distribución acumulada	156
4.8.9.1	La función de confiabilidad o supervivencia	159
4.8.9.2	Función de riesgo o probabilidad de falla	160
4.8.9.3	Tiempo medio entre fallas (MTBF)	162
4.8.10	La distribución Weibull	163
4.8.10.1	Datos para el análisis Weibull	163
4.8.10.2	Estimación de los parámetros Weibull mediante el método De los mínimos cuadrados	164
4.8.10.2.1	Regresión de rangos en y	165
4.8.10.2.2	Coefficiente de correlación	166
4.8.10.3	Funciones de la confiabilidad Weibull	168
4.8.10.4	Factibilidad técnica	169
4.8.10.4.1	$\beta < 1$ implica mortalidad infantil	170
4.8.10.4.2	$\beta = 1$ implica fallas aleatorias	170
4.8.10.4.3	$\beta > 1$ implica falla por deterioro	171
4.8.10.5	Factibilidad económica	171
4.9	VAN	172
4.9.1	Tasa libre de riesgo	175
4.9.2	Beta del mercado	175
4.9.3	Prima por riesgo de mercado	175
4.9.4	Prima por riesgo país	175
<b>CAPITULO V: DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMAN EL MOLINO Y DIAGNOSTICO DE LA SITUACION ACTUAL</b>		<b>176</b>
5.1	Flow sheet del molino Loesche 56 2 + 2	177
5.2	Descripción del proceso	178
5.3	Pantallas de operación del sistema SCADA	180
5.4	Partes del molino	184
5.4.1	Equipos auxiliares	184
5.4.2	Equipos principales	192
5.4.2.1	Reductor	192
5.4.2.2	Cámara de rechazo	195
5.4.2.3	Cámara de molienda	196
5.4.2.3.1	Rodillos Master	196
5.4.2.3.2	Rodillos Esclavos	198
5.4.2.3.3	Mesa de molienda	198
5.4.2.3.4	Dam Ring	199
5.4.2.3.5	Nozzle (Louvre ring)	199
5.4.2.3.6	Armor ring	200
5.4.2.3.7	Sistema de inyección de agua	201
5.4.2.4	Sistemas de lubricación e hidráulicos	202

5.4.2.4.1	Sistema hidráulico Rodillos Master	202
5.4.2.4.2	Sistema de lubricación de los Rodillos Master	205
5.4.2.4.3	Sistema de engrase del rocker arm de los rodillos Master	207
5.4.2.4.4	Sistema hidráulico de los rodillos esclavos	209
5.4.2.4.5	Sistema de lubricación del reductor RENK	210
5.4.2.4.6	Sistema de alta presión del reductor RENK	213
5.4.2.4.7	Circuito de filtración fina de aceite	216
5.4.2.4.8	Sistema de enfriamiento por agua	217
5.4.2.5	Clasificador dinámico	218
5.5	Producción, calidad y mantenimiento del molino	220
5.5.1	Producción del molino	220
5.5.2	Calidad del cemento en el molino	222
5.5.3	Estrategia de mantenimiento actual	230
5.5.4	Fallas críticas durante el periodo de operación del molino	237
5.5.4.1	Daño en la piñonera del reductor	237
5.5.4.2	Daño en los rodamientos del reductor	238
5.5.4.3	Daño en el sistema de baja presión del reductor	239

## **CAPITULO VI: APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA RCM EN EL SISTEMA**

<b>DE MOLIENDA VERTICAL LM 56 2 + 2</b>	<b>241</b>	
6.1	Sistemas o subsistemas a analizar	241
6.2	Análisis de criticidad	247
6.3	Contexto operacional	255
6.4	Análisis de modos, efectos y criticidad de la falla: AMECF	261
6.5	Calculo del tiempo óptimo de cambio de pieza: Modos de Falla 1A3 y 1B2: Rodamientos del reductor agarrotados	307
6.5.1	Obtención de los datos	307
6.5.2	Calculo de los parámetros de Weibull: Método de los mínimos Cuadrados	308
6.5.3	Calculo del coeficiente de correlación	309
6.5.4	Calculo de la vida media o tiempo medio entre fallas	310
6.5.5	Calculo de las 4 funciones de la confiabilidad	311
6.5.6	Factibilidad técnica	316
6.5.7	Factibilidad económica	316
6.6	Cálculo del tiempo óptimo de cambio de pieza: Modos de falla 1A4 Y 1B3: Rotura de dientes de la piñonera del Reductor	321
6.6.1	Obtención de los datos	321
6.6.2	Calculo de los parámetros de Weibull: Método de los mínimos Cuadrados	322
6.6.3	Calculo del coeficiente de correlación	323

6.6.4	Calculo de la vida media o tiempo medio entre fallas	324
6.6.5	Calculo de las 4 funciones de la confiabilidad	325
6.6.6	Factibilidad técnica	330
6.6.7	Factibilidad económica	330
6.7	Plan de mantenimiento preventivo y predictivo	335
<b>CAPITULO VII: EVALUACION ECONOMICA DE LA METODOLOGIA</b>		
<b>RCM EN EL SISTEMA DE MOLIENDA VERTICAL LM 56 2 + 2</b>		<b>361</b>
7.1	Comparación de los costos de los dos sistemas de mantenimiento	362
7.2	Calculo del VAN	366
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>371</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>		<b>373</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>374</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>378</b>



## CAPITULO I

### INTRODUCCION

#### 1.1 Identificación del problema

La molienda de cemento se realiza en equipos mecánicos en los que la mezcla de materiales es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas, para ello se utilizan molinos de bolas, prensas de rodillos, molinos horizontales y molinos verticales.

Actualmente la empresa cementera de Arequipa cuenta con seis molinos de cemento, cinco molinos de bolas y un molino vertical. Los cinco molinos de bolas juntos pueden producir un máximo de 210 TM/h mientras que el molino vertical LM 56 2 + 2 Loesche produce 180 TM/h.

El consumo de energía eléctrica por tonelada de cemento producida es más alto en los molinos de bolas que en el molino vertical, así como la calidad del cemento, adicionalmente las paradas no programadas por fallas son más ocurrentes en los molinos de bolas debido a su antigüedad y a su diseño obteniendo rendimientos muy inferiores a su nominal, es por eso que se opta por trabajar la mayor parte del tiempo posible solo con el molino vertical.

En la actualidad hay constantes paradas no programadas del molino vertical por fallas mecánicas principalmente, esto trae como resultado pérdidas

económicas significativas para la empresa ya que el molino produce aproximadamente el 70% de sus ventas.

Es por eso que surge la necesidad de garantizar el correcto funcionamiento del molino en sus horas programadas de operación, para alcanzar ese objetivo se plantea aplicar la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), el cual tiene como resultado las estrategias de mantenimiento pertinentes para los modos de falla críticos; y así en consecuencia se reducirán costos de mantenimiento, pudiendo alcanzar la confiabilidad deseada del molino.

## **1.2 Descripción del problema**

Los molinos verticales están siendo cada vez más usados especialmente en la producción mundial de cemento, el molino vertical fue desarrollado en 1895 y ha sido constantemente mejorado a través del siglo pasado hasta llegar a la molienda mediante rodillos hidráulicos y mesa giratoria.

Jung (2000), menciona que el alto grado de utilización de estos molinos es debido, principalmente, a la realización combinada de varias etapas del proceso dentro de la misma máquina, al reducido consumo de energía eléctrica y al aprovechamiento de grandes cantidades de gases del proceso.

Brugan (2009), indica que los molinos Verticales de Rodillos ofrecen ahorros significativos de energía por tonelada de producción comparado con los molinos de bolas. La siguiente tabla muestra las diferencias fundamentales entre los dos tipos de molinos:

Tabla 1.1: Diferencias entre un molino vertical y un molino de bolas

	<b>Molino Vertical</b>	<b>Molino de Bolas</b>
<b>Capacidad de Producción</b>	De 160 a 300 TM/h	De 20 a 70 TM/h
<b>Desgaste</b>	2 gr/TM	20 gr/TM
<b>Blaine (calidad)</b>	De 4000 a 5000 cm <sup>2</sup> /gr	De 3000 a 4200 cm <sup>2</sup> /gr
<b>Consumo de energía</b>	De 25 a 35 KW/TM	De 45 a 65 KW/TM
<b>Diseño</b>	Compacto, Muele, seca, separa y transporta en una misma unidad.	No compacto, muele, separa y transporta en diferentes unidades.
<b>Mantenimiento</b>	Mantenimiento complejo	Mantenimiento simplificado

Fuente: Elaboración Propia.

Babu (2006), indica que los molinos verticales ofrecen economías de escala, muchas veces el precio que se paga es el prematuro desgaste de los elementos de molienda y sus sistemas son más complejos que los molinos de bolas, es por eso que normalmente las fallas son difíciles de reparar y a veces hasta difíciles de detectar con un sistema de mantenimiento tradicional, por lo tanto la industria del cemento necesita un mecanismo de tratamiento efectivo de las fallas para proteger su rentabilidad.

El mantenimiento industrial es uno de los ejes fundamentales dentro de la industria, el mismo que ha estado sujeto a diferentes cambios al paso del tiempo; en la actualidad el mantenimiento se ve como una inversión que permite la confiabilidad de los equipos y por lo tanto asegurar la continuidad de los procesos productivos.

Según Duffuaa, Raouf, Dixon (2009), para alcanzar las tasas de rendimiento de las inversiones grandes de la automatización, el equipo tiene que ser confiable y capaz de mantenerse en ese estado sin que se den paros en trabajo y reparaciones costosas. El mantenimiento está considerado como un sistema con un conjunto de actividades que se realizan en paralelo con los sistemas de producción.

Existen diversas metodologías y enfoques para la gestión del mantenimiento como el mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM), el mantenimiento basado en el riesgo (MBR), el mantenimiento productivo total (TPM) y la optimización de mantenimiento preventivo (PMO).

El mantenimiento centrado en Confiabilidad (RCM), ha sido desarrollado para la industria 30 años atrás. El proceso permite determinar cuáles son las tareas de mantenimiento adecuadas para cualquier activo físico. El RCM ha sido utilizado en miles de empresas de todo el mundo: desde grandes empresas petroquímicas hasta las principales fuerzas armadas del mundo utilizan RCM para determinar las tareas de mantenimiento de sus equipos, incluyendo la gran minería, generación eléctrica, petróleo y derivados, metal-mecánica, etc.

La norma SAE JA1011 especifica los requerimientos que debe cumplir un proceso para poder ser denominado un proceso RCM.

Según Bernardo (1993), la gran ventaja del RCM reside en que usando un método lógico, estructurado y sistemático con representantes de los diferentes departamentos de la empresa, el conocimiento se comparte y el plan de

mantenimiento saldrá de un consenso de los responsables de la gestión de los equipos.

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 Objetivo principal**

- Aplicar la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad para reducir los costos de mantenimiento a un sistema de molienda vertical de cemento LM 56 2 + 2.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar los equipos críticos y semi críticos del sistema de molienda.
- Determinar los modos de falla, efectos y consecuencias de los equipos críticos del sistema de molienda.
- Establecer la frecuencia y tipo de mantenimiento para los modos de falla críticos.
- Proponer un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para los equipos críticos y semi críticos del sistema de molienda.
- Determinar el VAN resultante de la aplicación de la metodología.

### **1.4 Hipótesis**

Es factible aplicar la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad para reducir los costos de mantenimiento a sistema de molienda vertical de cemento LM 56 2 + 2.

## 1.5 Variables

### 1.5.1 Variables independientes

- Metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM.
- Sistema de molienda vertical de cemento LM 56 2 + 2.

### 1.5.2 Variable dependiente

- Reducción de costos de mantenimiento.



Tabla 1.2: Identificación de variables

<b>Variabes</b>	<b>Clase</b>	<b>Definición Conceptual</b>	<b>Definición Operacional</b>	<b>Indicadores</b>
Metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM	Independiente	Metodología lógica que hace uso de la herramienta de análisis de modo de falla, efecto y consecuencia (FMECA).	Metodología que define los criterios para determinar las estrategias de mantenimiento adecuadas para modos de falla críticos de un sistema.	Efectos y consecuencias de los modos de falla.  Estrategias y frecuencias de mantenimiento.  Plan de mantenimiento predictivo y preventivo.
Sistema de molienda vertical de cemento LM 56 2 + 2	Independiente	Maquina con pista de molienda circular, sobre esta se mueven los cuerpos moledores los cuales ejercen presión mediante diversos sistemas a la pista moledora.	Máquina que produce cemento en las horas de trabajo programadas.	Criticidad de los equipos principales y auxiliares.  Funciones.  Fallas funcionales.  Modos de falla críticos.
Reducción de costos de mantenimiento	Dependiente	Valor monetario de los factores que suponen el ejercicio de una actividad económica destinada al mantenimiento.	Ahorro en los costos de mantenimiento aplicando metodología RCM.	Costo de mantenimiento aplicando la metodología RCM.  VAC  CAE

Fuente: Elaboración Propia

### 1.6 Justificación

La investigación quedaría justificada en la medida en que se permita establecer si es factible técnica y económicamente la aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM para reducir los costos de mantenimiento a un sistema de molienda vertical de cemento LM 56 2 + 2, los resultados obtenidos serían útiles para poder aplicar la metodología en otros sistemas de molienda de la industria cementera y minera.

### 1.7 Alcances

Para la presente investigación se aplicará la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad en el sistema de molienda vertical de cemento LM 56 2 + 2 de la planta de cemento de Arequipa, se realizará en los equipos principales y auxiliares mecánicos del molino; para efectos del análisis se mencionarán los equipos eléctricos principales como los motores de media tensión, pero no serán objeto de estudio.

La investigación está hecha en un contexto de un proceso productivo del cemento por vía seca, por lo que los otros procesos solo se mencionarán para conseguir un orden lógico. No se harán apartados detallados en cuanto a la química y a los procesos del cemento ya que es un tópico amplio y se perderían los objetivos de la investigación.

## CAPITULO II

### ANTECEDENTES E INVESTIGACIONES SOBRE MANTENIMIENTO EN MOLINOS VERTICALES

#### 2.1 Antecedentes de los molinos verticales

Según Mischorr, Delgado (2009), un molino vertical es una combinación de 4 partes:

El accionamiento motor reductor, la mesa de molienda y los rodillos hidráulicos, el clasificador dinámico y el ventilador principal.

El accionamiento suministrado básicamente por el reductor tiene las funciones de transmitir la potencia entregada por el motor hacia la mesa de molienda y absorber las fuerzas de molienda y el peso de la mesa.

La mesa de molienda tiene la función de recibir el material fresco, mientras que los rodillos hidráulicos funcionan como cuerpos moledores triturando el material contra la mesa.

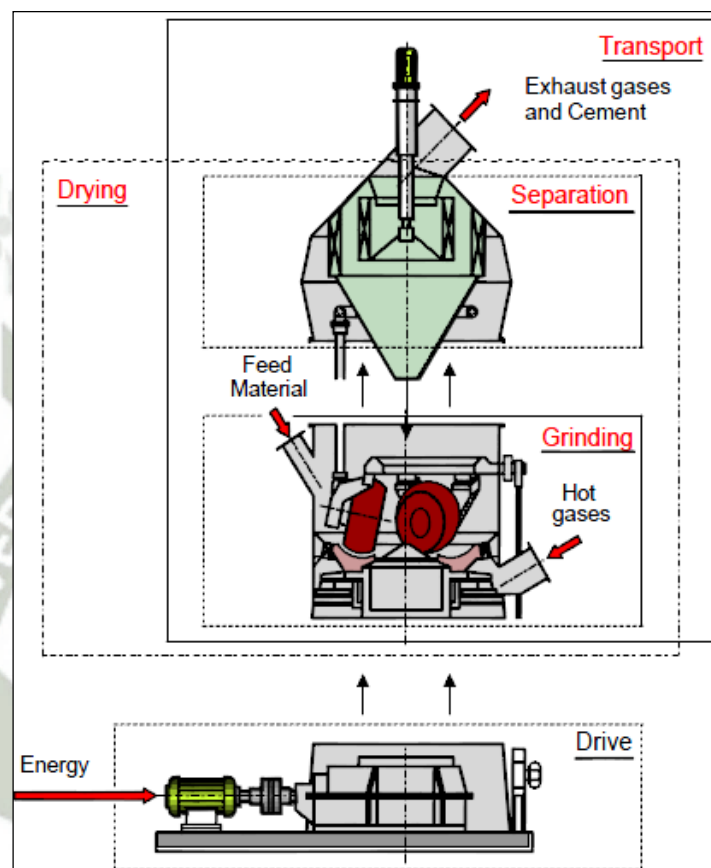
La función del clasificador dinámico es separar las partículas gruesas de las finas.

El ventilador de tiro inducido del sistema tiene como función generar un flujo de gases con la finalidad de transportar y secar el material desde el interior del molino hasta el filtro de mangas tipo pulse jet.

El mantenimiento debe ser hecho periódicamente a los elementos que conforman las partes mencionadas para evitar las fallas, en especial la

protección para elementos de desgaste, los sistemas hidráulicos, de lubricación y el ajuste de piezas.

Figura 2.1: Maquinas que componen un molino vertical



Fuente: Mischorr, Delgado; 2009

### 2.1.1 Molino Vertical

Según el artículo VII Coloquios (2009), en 1824 el británico Joseph Aspdin patentó la fórmula del cemento al quemar polvo fino de caliza con arcilla en un horno de cal hasta que perdía todo el dióxido de carbono. El producto obtenido fue denominado cemento portland ya que su color le recordaba a la piedra de la región de Portland (Inglaterra).

Posteriormente se crearon los primeros molinos horizontales para moler el crudo, cemento y carbón. Dicho molino tiene su origen en los molinos TUMBLING de la década de 1860.

En la década de 1880 se desarrollaron los molinos horizontales SACHSENBERGIAN-BRUCKNER en la compañía alemana KRUPP y los molinos de la compañía danesa FLSMIDTH. Estos molinos tenían bolas y una vez molido el material era tamizado en un cedazo y el material grueso era devuelto a la cámara de molienda.

Otro tipo de molino muy utilizado en la industria del cemento es el molino de rodillos. Tiene su origen en diversos tipos de molinos: arrastras y el molino EDGE; el primero de origen hispano y el segundo de origen chino, ambos arrastrados por asnos.

A principios del siglo XIX las piedras fueron sustituidas por acero y se llamaron molinos CHILEAN. De aquellos surgieron infinidad de modelos utilizados en el siglo XIX. El HUNGTONG (1883), MAXECON (1989), RAIMOND y FULLER. Consistían fundamentalmente en una mesa circular fija y uno o varios rodillos móviles. Todos ellos fueron la inspiración de las actuales compañías suministradoras de equipos para fabricar los actuales molinos verticales.

Según Mischorr, Delgado (2009), en 1895 aparece el primer molino vertical desarrollado por Loesche usado para la molienda de carbón en plantas de energía en Berlín.

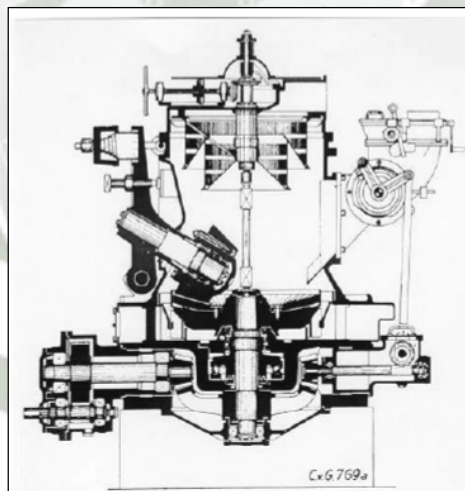
En 1925 Loesche hizo la innovación más importante al dejar los rodillos fijos y la mesa móvil; muy apropiada para la industria cementera por la facilidad de secar las materias primas y su bajo coste energético.

En 1935 se pone en funcionamiento el primer molino Loesche LM 11 para la molienda de Clinker en Brasil, en 1985 se instalaron molinos en Asia para la molienda de Clinker y escoria de alto horno.

En 1994 se aplica por primera vez la tecnología 2 + 2 en un LM 46 2 + 2 para la molienda de Clinker en Taiwán.

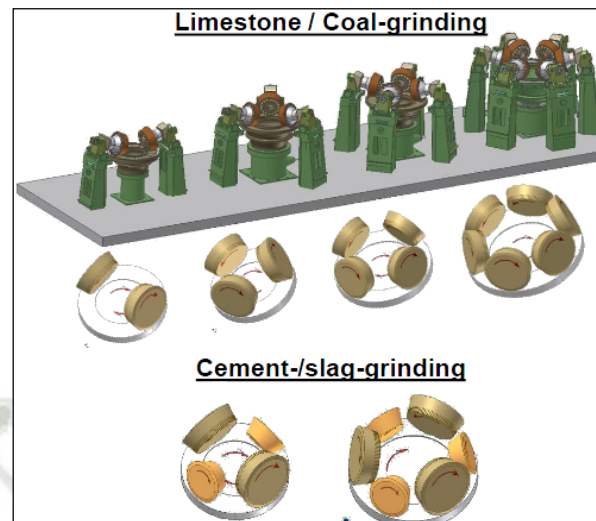
En 2005 se pone en funcionamiento el primer molino con tecnología 3 + 3 en un LM 56 3 + 3 para la molienda de Clinker en India.

Figura 2.2: Molino vertical Loesche de 1929



Fuente: Mischorr, Delgado; 2009.

Figura 2.3: Diseño actual para un molino vertical

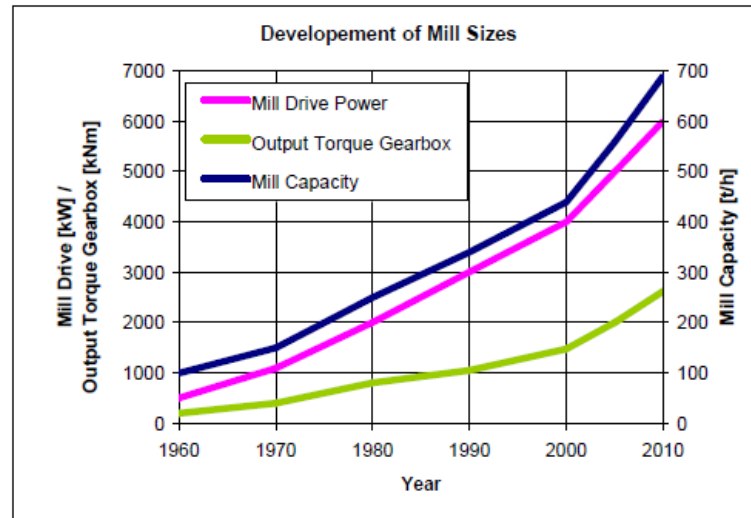


Fuente: Mischorr, Delgado; 2009.

### 2.1.2 Reductor

Con el aumento de la capacidad de las plantas, la potencia de los reductores, también tuvo que ser aumentada (Figura 2.4). Por esa razón los reductores han pasado por una evolución de conceptos hasta llegar a los nuevos diseños para satisfacer las necesidades de producción de los molinos verticales.

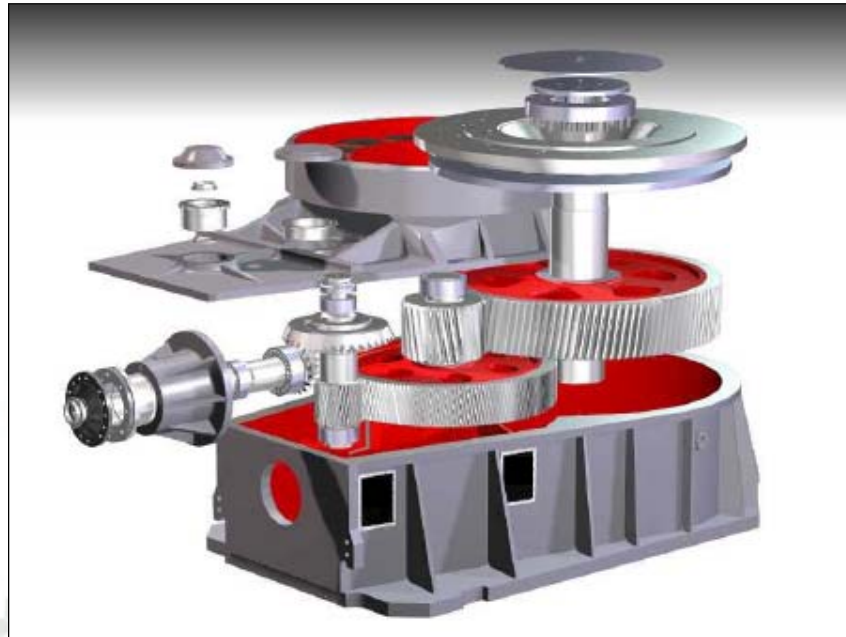
Figura 2.4: Desarrollo de los tamaños de molinos verticales en el tiempo



Fuente: Raeber, Weller, Amato; 2010.

Raeber, Weller, Amato (2010), mencionan que la primera generación de reductores para los molinos de rodillos verticales consistió en dos etapas de engranajes helicoidales en combinación con un engranaje cónico, como se muestra en la figura. 2.5. Este concepto fue utilizado a partir de 50 KW a 3900 KW. Hoy en día, este concepto normalmente se utiliza con una potencia de aprox. 1000 KW, mientras que los grandes reductores se diseñan generalmente con un planetario y un engranaje cónico. Las desventajas de este diseño de reductor de más de 1000 KW son el diseño muy pesado y las ruedas dentadas de gran tamaño. La baja potencia de 3900 KW tiene un diámetro de aprox. 3,7 m y un peso de 23 toneladas.

Figura 2.5: Primera generación de reductores para molinos verticales



Fuente: Raeber, Weller, Amato; 2010.

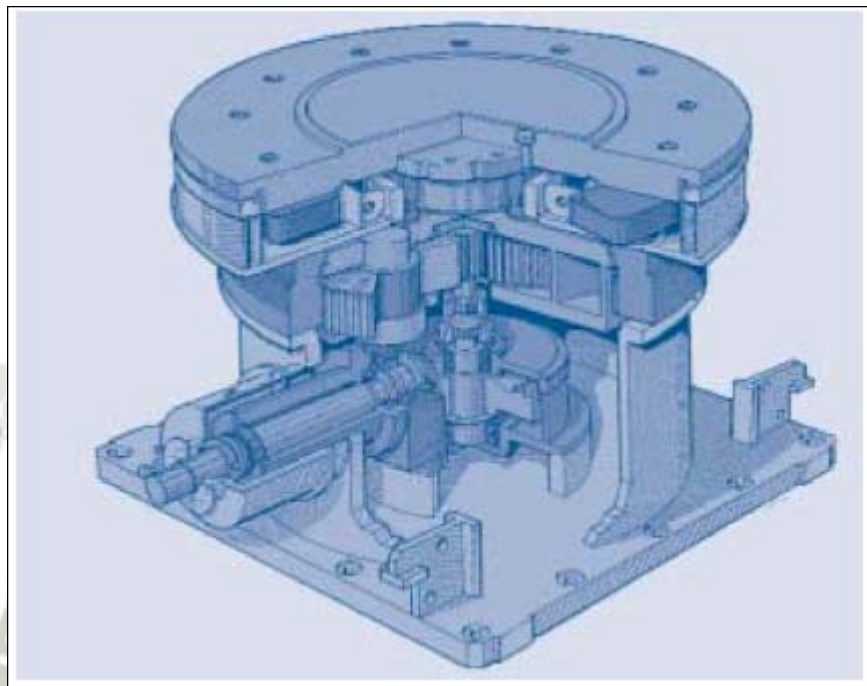
Después de alcanzar los límites de la primera generación de reductores, el siguiente paso lógico era introducir un planetario en lugar de las dos etapas del engranaje helicoidal. Así se obtuvo la ventaja de tener menos material en el reductor entregando la misma potencia. Este diseño reduce el peso total de tamaño, y los costos de manera significativa en comparación con la etapa de engranaje helicoidal de dos etapas.

La Figura 2.6 proporciona un ejemplo de este concepto en un corte transversal de un reductor con un engranaje cónico y un planetario.

La potencia del motor se transmite a través del engranaje cónico y un acoplamiento de dientes al piñón de la etapa planetaria y luego se transmite la potencia a la salida del reductor.

Este tipo reductor suministra potencias de hasta 5600 KW y el diámetro de engranajes de hasta 2 metros.

Figura 2.6: Segunda generación de reductores para molinos verticales

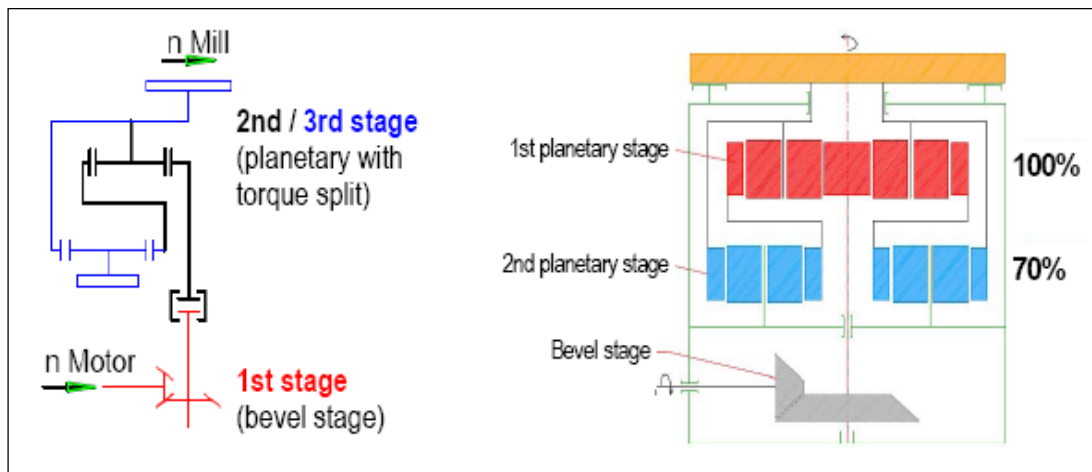


Fuente: Raeber, Weller, Amato; 2010.

Posteriormente se implementó un nuevo planetario a los reductores para molinos verticales. El piñón de la primera etapa es accionado por el motor mediante la etapa de engranajes y distribuye la potencia a las tres etapas. En este punto el torque se distribuye y mientras que un 100% del torque es direccionado a través de la porta - planetario de la primera etapa hacia el eje de salida, otra porción del torque es guiada a través del segundo planetario hacia el eje de salida. En este diseño el número de dientes de los componentes ha sido seleccionado con la finalidad que

el segundo planetario reciba aproximadamente el 70% de la carga transmitida.

Figura 2.7: Última generación de reductores para molinos verticales



Fuente: Raeber, Weller, Amato; 2010.

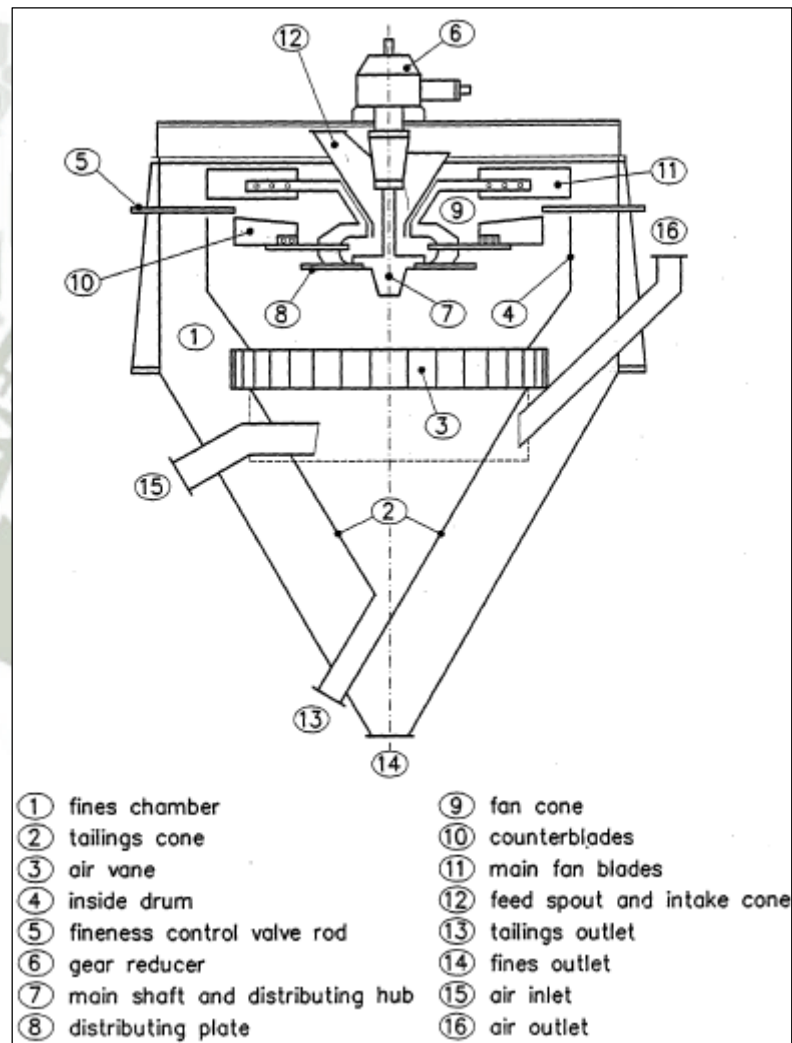
### 2.1.3 Clasificador dinámico

En el seminario del cemento HOLDERBANK (1995), se menciona que entre los diseños de clasificadores dinámicos se han desarrollado 3 generaciones bien distinguidas desde 1889 donde se construyó el primer clasificador de aire estático.

El clasificador dinámico de primera generación posee álabes móviles y ventilador interno. El material es introducido a través de un chute hasta una placa distribuidora que dispersa las partículas en el flujo de gas, éste con las partículas de material pasa por los alabes móviles del rotor. Las partículas gruesas son centrifugadas hacia los costados y caen por el cono de gruesos. El flujo de gas con el material fino se direcciona

hacia la cámara de finos, en este punto el material es separado y se dirige hacia la salida de finos, material con aire que hayan podido quedar son devueltos a la zona de separación a través de las paletas de retorno.

Figura 2.8: Clasificador dinámico de primera generación

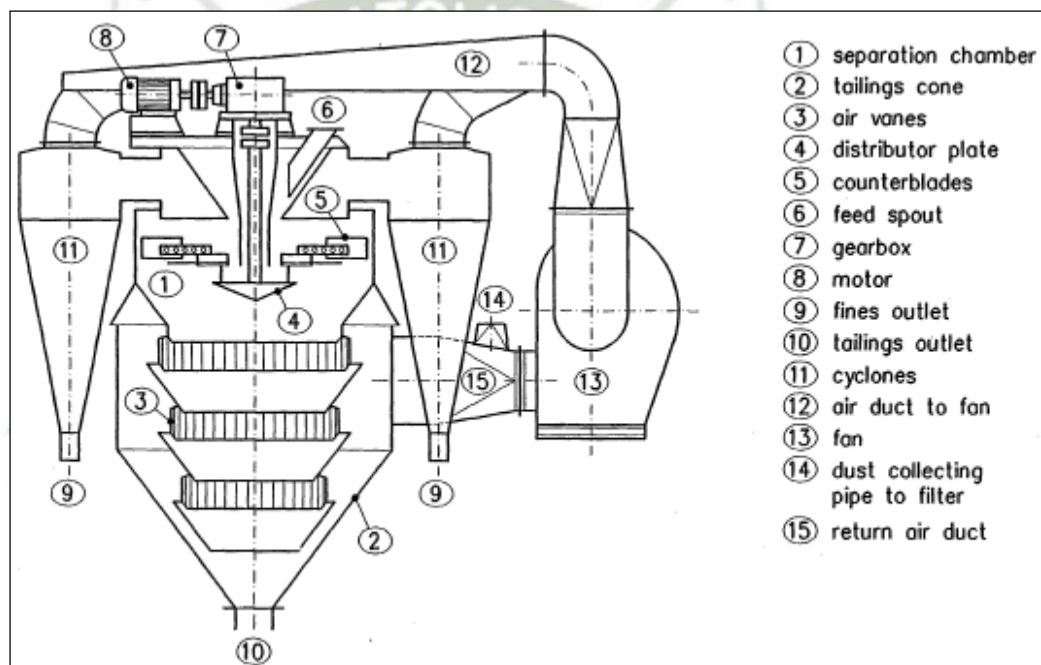


Fuente: HOLDERBANK; 1995.

El clasificador dinámico de segunda generación posee un ventilador externo a diferencia del primero. El material ingresa por el canal de

alimentación y se dispersa en la corriente de aire por la placa distribuidora rotativa. Las partículas lo suficientemente finas para pasar por los álabes móviles son transportadas por el aire a través de ciclones externos donde son precipitadas y descargadas. Las partículas gruesas caen hacia el cono de gruesos, el aire es recirculado por el separador vía ventilador y paletas de retorno.

Figura 2.9: Clasificador dinámico de segunda generación

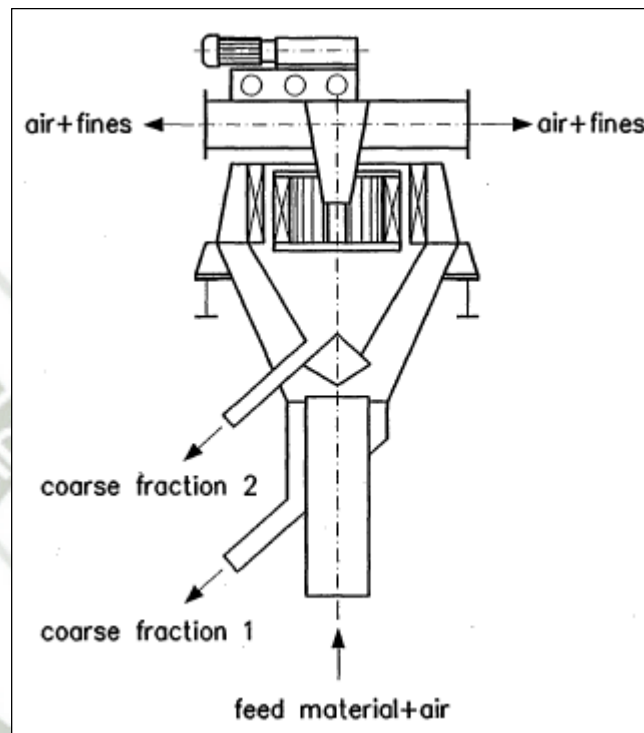


Fuente: HOLDERBANK; 1995.

Los clasificadores dinámicos de tercera generación o clasificadores de alta eficiencia proveen mayor obtención de producto fino al poseer álabes fijos por los cuales el aire con las partículas llegan tangencialmente y pasan luego por la zona giratoria de álabes móviles.

Los diseños varían según el fabricante, la figura 2.10 muestra un clasificador LSKS de la empresa alemana KHD HUMBOLDT WEDAG.

Figura 2.10: Clasificador dinámico de tercera generación



Fuente: HOLDERBANK; 1995.

#### 2.1.4 Ventilador de tiro inducido

Estos son equipos muy utilizados en la industria del cemento. Los diseños varían según el fabricante pero el principio es el mismo; el efecto del tiro inducido consiste en reducir la presión de los gases en el sistema de molienda por debajo de la presión atmosférica y descargar los gases limpios a la chimenea con una presión positiva. Compañías como Robinson fabrican estos equipos desde finales del siglo XIX.

## 2.2 Investigaciones de aplicación en molinos verticales

El mantenimiento a los molinos verticales comprende especialmente en el reductor, los elementos de la cámara de molienda, el clasificador dinámico y los sistemas hidráulicos y de lubricación.

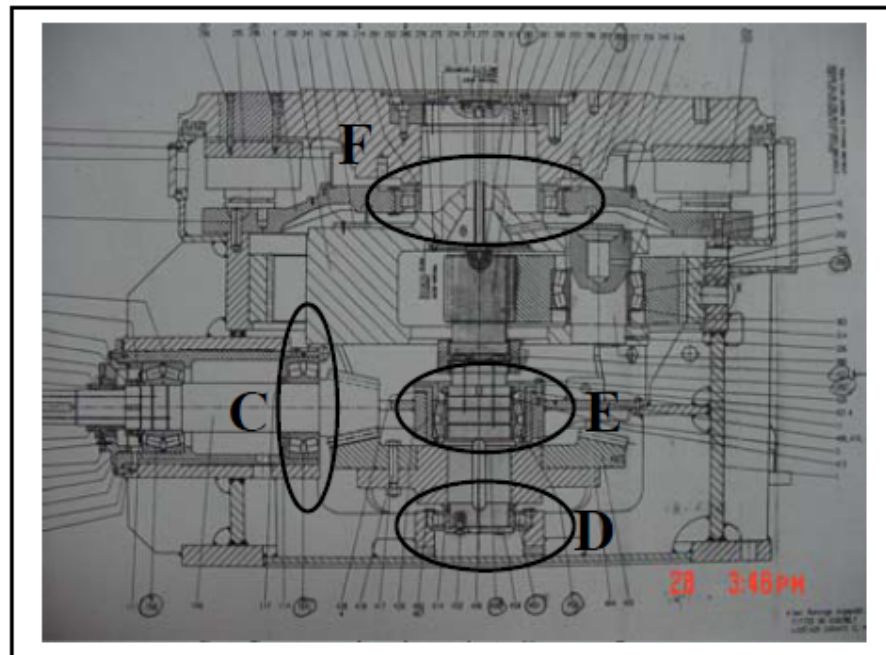
### 2.2.1 Mantenimiento al reductor

Buezo (2007), menciona que para monitorear los puntos más sensibles de un reductor FLENDER KMP se deben instalar sensores que midan el envolvente de aceleración.

Estos deben estar lo más cerca posible de los rodamientos. Se deben ubicar dentro de la zona de carga. De lo contrario, es muy probable que la cantidad de ruido afecte la calidad de la información. Instalar los sensores muy cerca de los rodamientos es importante para la medida de la aceleración y/o energía de impulsos en bandas de alta frecuencia, las cuales son información vital para la detección de las primeras fases de falla en los cojinetes. Se recomienda instalar los sensores en posición horizontal paralela al horizonte terrestre, tanto porque en esta posición se recolecta la mayor parte de las vibraciones y por el espacio disponible dentro de los reductores.

Los puntos de medición propuestos fueron los rodamientos del piñón (C), de piso (D), del acople (E) y de la mesa (F); como se muestra en la siguiente figura:

Figura 2.11: Puntos de medición en un reductor FLENDER KMP



Fuente: Buezo, 2007.

Ayala (2010), indica que se debe monitorear la temperatura del aceite de un reductor y esta puede ser alta debido a fallas en el sistema de enfriamiento o en el sistema de bombeo.

La temperatura de los rodamientos del reductor puede incrementar debido a insuficiente flujo de aceite al componente o falla del rodamiento.

Plantea una rutina de inspección de mantenimiento al reductor que incluye:

- Inspección de fugas de aceite por la coraza.
- Revisar si existen grietas, desgaste o picaduras en los dientes.

- Siempre que sea posible revisar los rodillos y las pistas de los rodamientos para identificar cambios en el patrón de desgaste, picaduras o corrosión.
- Revisar el sistema de circulación de aceite y sacar muestras periódicas.
- Revisar el sistema de bombeo del aceite asegurando el correcto trabajo de la bomba, nivel de aceite y mantenimiento a los filtros.

### **2.2.2 Mantenimiento a elementos de la cámara de molienda y clasificador dinámico.**

Bujosa (2009), indica que para determinar la frecuencia de las tareas de mantenimiento e inspección de un molino vertical para la molienda de carbón y para poderlas programar adecuadamente, deberán tenerse en cuenta la calidad del carbón, las horas de operación del molino de acuerdo con la capacidad de planta y el número de personas disponibles para mantenimiento.

Es muy importante hacer un preciso registro diario de trabajo desde el principio sobre la horas de operación específicas del molino, su eficiencia, programa de operación de la planta, incluyendo algunos aspectos relacionados con la carga de la planta, su parada, informes de inspección y similar.

Entre los componentes del molino aquellos que tendrán mayor tendencia a desgastarse son:

- Forro de la plataforma y Rodillo: si se desgastan considerablemente, la producción del molino disminuirá y los rechazos aumentarán.
- Forro del cuerpo del separador y tapa del rodillo: el grado de desgaste varía en muchos casos de acuerdo con la localización de dicho desgaste.
- Paleta de deflexión: se debe mantener una separación de aproximadamente 6 mm con respecto al borde de la plataforma de molienda.
- Forro del fondo de la carcasa media: se debe mantener una separación radial de entre 3 y 6 mm aproximadamente entre este forro y el borde de la plataforma de molienda.
- Anillo de cierre de la plataforma de molienda: debe ser sustituido cuando haya experimentado un desgaste considerable.
- Placa cubierta de aislamiento de carcasa inferior: si el soporte del rascador es bueno, el desgaste de esta placa puede hacerse mínimo.
- Forro de la carcasa inferior y paleta de la entrada de aire: un exceso de materias extrañas dará lugar al desgaste de las caras finales del forro y paleta.
- Rascador: la parte final inferior tiende a desgastarse más, siendo recomendable soldar de nuevo para reparar.
- Separador giratorio: medir el desgaste de una paleta y si el espesor residual es de 3 mm o menos, renovarla.

- Válvula de salida: si se observa que la holgura es grande al cerrar esta válvula significa que esta desgastada.

Para Angulo (2002), por sus características de funcionamiento, el mantenimiento regular a un molino vertical pendular para trituración de arcillas, resulta esencial para asegurar una vida prolongada de sus mecanismos y evitar averías que por las dimensiones de los elementos podrían ser muy graves; así como para garantizar que el rendimiento durante la operación es el óptimo. Se debe pues aplicar a conciencia un mantenimiento preventivo que incluya los siguientes puntos:

- Las rejas, el reemplazamiento de las piezas, dependerá de cada caso concreto (dureza del material a moler y producción deseada). Como norma general, se debe proceder al reemplazamiento cuando el desgaste sea tal que la longitud de la reja se haya visto disminuida en unos 20-25 milímetros.
- Los rodillos deberán reemplazarse cuando presenten ondulaciones bastante pronunciadas, o bien cuando el diámetro de los mismos se haya visto reducido sensiblemente (orientativamente, en unos 100 mm). Estos factores se comprobarán además por el hecho de que la productividad del molino se reducirá, hecho que será indicador de la necesidad de reemplazamiento.
- El aro ha de presentar siempre una superficie regularmente lisa. Cuando se presenten ondulaciones más o menos grandes en la

superficie interior del aro que afecten al correcto trabajar de la máquina, se debe proceder a la reposición por uno nuevo.

- Se deben inspeccionar, por lo menos una vez a la semana, todos los pernos y tuercas utilizados en el molino y volverlos a ajustar en caso de necesidad. Esta precaución es particularmente importante en lo que respecta a los pernos que sujetan los rodillos, así como los que unen las rejillas con los porta-rejillas.

Reichardt (2005), menciona que se puede realizar un relleno con soldadura a los rodillos sin tener que desmontarlos del molino. Para este fin los rodillos de molienda se levantan, y se adapta un motor reductor con variador de velocidad para controlar el giro de los rodillos mientras que el dispositivo va soldando en el área de desgaste de los rodillos. Después de los rodillos se bajan de nuevo. El tiempo para el recubrimiento se mantiene entre 72 y 120 horas si el trabajo se organiza. Los elementos de molienda de algunos de las fábricas funcionando hoy en día han sido rellenados más de diez veces.

Zapata, Luddey, Molina (2007), indican que se puede incrementar el rendimiento de las placas del armor ring de un molino ATOX 32.5 de 2 a 5 meses rellenándolas con soldadura que contiene carburos complejos.

Babu, (2005) indica que los molinos MPS se blindan con diferentes materiales de desgaste de acuerdo con la abrasión de los materiales a moler y las zonas de desgaste:

Las herramientas de molienda están fabricadas, primordialmente, a base de hierro fundido aleado según DIN 1695, hierro fundido soldado por recargue o materiales compuestos con suplementos de elevado contenido de cromo en materiales básicos resistentes. Los blindajes de la carcasa y demás elementos del molino expuestos al desgaste por radiación se protegen contra el desgaste mediante chapas de acero de alta resistencia al desgaste o chapas compuestas soldadas con recargue de metal duro. En el caso de elementos especialmente expuestos al desgaste por radiación, como por ejemplo los tubos de salida de gases, se protegen con revestimiento de cerámica.

### **2.2.3 Mantenimiento a sistemas hidráulicos y de lubricación**

En el caso de los sistemas de lubricación, Angulo (2002), señala que es importante controlar que el nivel de aceite del cárter de engranajes esté en el nivel correspondiente, visible en el exterior del molino. En caso contrario, se rellenará hasta el nivel adecuado. Para ello, se revisará semanalmente dicho nivel. Además, cada 500 horas de funcionamiento, aproximadamente, se deberá vaciar el cárter por completo y llenarlo de aceite nuevo.

En cuanto a los péndulos, semanalmente se debe revisar que el nivel de aceite en el interior de cada péndulo se mantiene por encima del nivel mínimo marcado por la varilla. En caso contrario, se rellenará con el aceite necesario.

Semanalmente se deberán engrasar mediante bomba manual los cojinetes de suspensión de los péndulos, con una cantidad suficiente de grasa, a fin de que ésta pueda correr ligeramente por todo el interior del cojinete, entre éste y el eje de suspensión.

Por último, se deberá rellenar antes de que se vacíe por completo el depósito de la bomba automática de engrase de los cojinetes del árbol vertical. Una revisión semanal al respecto es más que suficiente.

Como se observa, se ha impuesto una periodicidad semanal de revisión de la lubricación. En la mayoría de los casos esta frecuencia es superior a la necesaria (el consumo de aceite se reduce al mínimo merced a los dispositivos de retención que se emplean), pero es una buena estrategia la de establecer una revisión semanal del conjunto de elementos de mantenimiento que se deben controlar y que se acaban de explicar: tornillería, elementos de desgaste (revisión ocular) y lubricación. Así se tiene un control fiable del correcto estado de la máquina.

Mischorr, Delgado (2009), mencionan que para el mantenimiento de los sistemas hidráulicos de los rodillos se debe verificar las líneas de aceite diariamente, revisar filtros cada semana, realizar muestreos de aceite cada 3500 horas, revisar la presión de los acumuladores de nitrógeno cada semana y cambiar sellos de los cilindros si se detectan fugas.

## CAPITULO III

### MOLINOS VERTICALES EN LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

#### 3.1 Cemento

Según la norma DIN 1164-10 se llaman cementos aquellos materiales que se endurecen tanto en el aire como en el agua y que después de su endurecimiento son aglomerantes resistentes a la acción del agua, que están compuestos principalmente por combinaciones de óxido de calcio con sílice, alúmina y óxido de hierro, y que además cumplen con las normas dictadas para tales materiales, especialmente en lo relativo a resistencias y a estabilidad de volumen. El material crudo o por lo menos los componentes principales de los materiales de partida, tienen que ser calentados como mínimo hasta clinkerización (principio de fusión).

Un cemento que cumpla con esta norma no debe dejar un residuo superior a 3% en masa, sobre el tamiz de 0.2 mm de luz de malla de acuerdo con el ensayo DIN 4188. La superficie específica determinada por el método de permeabilidad al aire (Superficie específica según Blaine) no debe ser inferior a 2200 cm<sup>2</sup>/gr.

La calidad del cemento se puede medir mediante varios ensayos, los que se detallan a continuación son los más usados.

### **3.1.1 Determinación del residuo sobre tamiz**

Se determina el contenido de partículas gruesas como residuo sobre el tamiz de ensayo de 0.2 mm de luz de malla, bien sea tamizado a mano o tamizado mecánicamente. El residuo final se expresa en porcentaje de masa con respecto a la muestra inicial.

### **3.1.2 Determinación de la superficie específica**

Se calcula a partir de la permeabilidad al aire de un lecho de cemento, de su porosidad, de la densidad del cemento y de la viscosidad del aire. La medida de la permeabilidad viene dada por el tiempo durante el cual una determinada cantidad de aire atraviesa el lecho de cemento en condiciones bien especificadas por la norma.

### **3.1.3 Determinación de la resistencia**

Según su clase o categoría resistente, cada cemento debe alcanzar las resistencias a compresión indicadas en la tabla 3.1.

Se determina la resistencia a flexo tracción mediante la rotura en la sección central de un bloque de cemento, arena y agua. Luego se determina la resistencia a compresión sobre los prismas resultantes de la rotura a flexo tracción. La prensa utilizada debe cumplir estrictamente con los requisitos de la norma.

Tabla 3.1: Clases de resistencias según DIN 1164

clase de resistencia	resistencia a compresión en N/mm <sup>2</sup> a			
	2 días mín.	7 días mín.	28 días	
			mín.	máx.
25 <sup>1</sup>	—	10	25	45
35	L <sup>u</sup>	—	35	55
	F <sup>2</sup>	10	—	—
45	L <sup>2</sup>	10	45	65
	F <sup>2</sup>	20	45	65
55		30	55	—

Fuente: Labahn, 1985.

1: Solo para cementos de bajo calor de hidratación y/o alta resistencia a los sulfatos.

2: Cemento portland, cemento portland siderúrgico, cemento de alto horno y cemento puzolánico de endurecimiento inicial lento; llevan la designación adicional L; los mismos cementos de alta resistencia inicial llevan la designación adicional F.

### 3.2 Proceso productivo del cemento

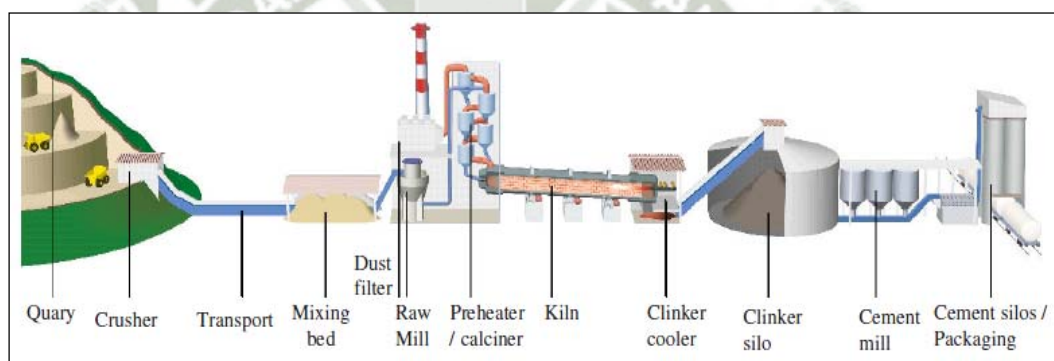
Existen 4 procesos de cemento diseñados para las plantas y se escogen en base a la humedad relativa de las materias primas. Se tienen los procesos vía seca, vía semi seca, vía húmeda y vía semi húmeda.

El proceso vía húmeda se utiliza en el caso de materias primas con alto contenido de humedad, previamente al ingreso al horno el material se prepara mediante una molienda conjunta con agua resultando en una pasta con 30 a 40% de contenido de agua.

En los procesos por vía semi húmeda y semi seca el material de alimentación se consigue añadiendo o eliminando agua respectivamente, al material obtenido en la molienda de crudo. Se obtienen pellets o gránulos con 15 a 20% de humedad que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular gases calientes provenientes del horno. Cuando el material alcanza la entrada del horno el agua se evapora y la cocción empieza.

Según Prasath, Recke, Chidambaram, Jorgensen (2010), el proceso de producción por vía seca típicamente presenta siete etapas:

Figura 3.1: Proceso de producción del cemento por vía seca



Fuente: Prasath, Recke, Chidambaram, Jorgensen; 2010.

### 3.2.1 Extracción de materias primas en canteras

Se extraen las materias primas de las canteras de la planta, que generalmente es la caliza que es el componente principal del proceso, se utilizan técnicas de perforación y voladura para obtener rocas de granulometría alta hasta 2 metros.

### 3.2.2 Triturado

Luego de la extracción de estos materiales se procede al triturado para reducir la granulometría de las rocas de mineral de un tamaño de 2 metros hasta 6 pulgadas. La caliza triturada se transporta en dámperes hacia la planta.

Luego la caliza se vuelve a triturar hasta alcanzar un tamaño de partícula de 1 pulgada.

En esta etapa adicionalmente al triturado de caliza, se trituran el resto de materias primas como son el yeso y los correctores de la caliza (pizarra, fierro, arcillas, etc.), que pueden ser extraídos de la cantera de la planta o comprados a proveedores.

Las trituradoras en general presentan un sistema de fajas transportadoras para llevar el material hacia las canchas y un filtro de mangas colector de polvo tipo pulse jet ubicado de manera estratégica en la caída del material.

### 3.2.3 Pre – Homogenización de caliza

La caliza es depositada en capas sucesivas horizontales por medio de una faja telescópica apiladora que recorre un ángulo prefijado. Una vez conseguida la composición química adecuada y la altura necesaria de una ruma se pasa a preparar otra. Mientras tanto, la ruma anterior es recuperada en forma perpendicular a su apilamiento, originándose un

efecto de mezcla uniforme. De allí la caliza es trasladada mediante fajas subterráneas a las tolvas de alimentación de los molinos de crudos.

#### **3.2.4 Molienda de crudos y homogeneización**

En la molienda del crudo se realiza la última reducción del tamaño de la caliza a un estado polvoriento, para este proceso intervienen la caliza ( $\text{CaO}$ ) en una proporción de 95% aproximadamente, el fierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y una arcilla que contenga otro corrector como la sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Este proceso en la actualidad es realizado con molinos de bolas o verticales. El producto intermedio “harina de crudos” debe tener una fineza menor a 20% en malla N° 200. Luego se procede a la homogeneización en silos con sistemas de inyección de aire para mezclar continuamente el material.

#### **3.2.5 Producción de Clinker**

La harina cruda ingresa por medio de una balanza dosificadora y un elevador de cangilones hacia la parte superior del intercambiador de calor los cuales son edificios que cuentan con una Torre de Ciclones, ubicados uno encima del otro. El crudo homogeneizado se alimenta por el extremo superior de este pre-calentador, pasando a través de los ciclones donde se calienta por acción de los gases generados en el quemador del horno rotatorio por combustión de carbón, petróleo, gas, o algún combustible alternativo iniciándose de esta manera el proceso de descarbonatación y transformación termo – químico del crudo. Los gases calientes procedentes del horno son succionados hasta un filtro

de mangas donde se descarga el polvo nuevamente hacia el sistema y el aire caliente sale por las chimeneas del filtro.

El crudo descarbonatado ingresa al horno y por efecto del calor generado por la combustión en un quemador situado en el extremo de salida, sufre transformaciones físicas y químicas, llegando a obtenerse el producto llamado Clinker a temperaturas del orden de los 1400 a 1550 ° C.

El Clinker descargado por el horno pasa a la tercera parte del circuito de clinkerización, que se da en los enfriadores. Estos constan de varias superficies escalonadas compuestas por placas fijas y móviles alternadas, con unos pequeños orificios por donde pasa el aire que es insuflado por la parte inferior, por la acción de ventiladores con el doble objeto de recuperar el calor del Clinker producido y de enfriar el Clinker de aproximadamente 1,200°C hasta alrededor de 100°C. En la parte final de estas unidades se encuentran instaladas trituradoras de rodillos, accionadas por motores eléctricos, para reducir el tamaño del Clinker a un máximo de 5 centímetros. El Clinker es transportado por medio de elevadores hasta los silos de almacenamiento.

Las paredes de un horno están cubiertas por ladrillos refractarios con el fin de proteger el casco del horno ante ataques químicos y evitar pérdidas de calor.

### 3.2.6 Obtención del cemento

La molienda conjunta del Clinker con yeso constituye el Cemento Portland, y con un adicionado de puzolana el cemento portland puzolánico tipo 1P.

Las especificaciones para la finura del cemento portland se expresan como superficie específica en  $\text{cm}^2/\text{gr}$ .

El cemento al final del proceso debe tener una fineza de menos de 15% de retenido en malla N° 325 y una superficie específica según Blaine de 4000 a 5000  $\text{cm}^2/\text{gr}$  en el caso de cementos puzolánicos, en caso de cementos ordinarios esta parámetro debe estar entre 3800 y 4200  $\text{cm}^2/\text{gr}$ .

En la molienda de cemento se usan aditivos especiales a base de glicoles para hacer más eficiente la molienda y obtener mayor calidad del cemento.

### 3.2.7 Envase y despacho del cemento

El cemento extraído de los silos es despachado tanto en bolsas de papel como a granel. Para el despacho en bolsas se utilizan máquinas rotativas tanto automáticas como manuales.

En las rotativas automáticas, el operador coloca un paquete de bolsas en el magazín de la máquina y luego este magazín se encarga de alimentar automáticamente a la envasadora, bolsa por bolsa, los pitones de una tolva rotativa, que gira continuamente, y que las llena con el peso

de 42.5 kilogramos descargándolas sobre una faja transportadora. Las bolsas son transportadas a las plataformas de los camiones por un sistema de fajas, mientras que los cargadores se limitan a cogerlas y acomodarlas. En el despacho a granel se usan camiones especiales de hasta 36 toneladas que se cargan en 10 minutos. El peso de cada camión es controlado por balanzas de plataforma con controles electrónicos, lo que garantiza el peso correcto.

### **3.3 Molienda**

Según Lynch, Rowland (2005), la técnica de la molienda ha tomado en la industria, desde hace algunos años, una importancia cada vez más grande. Numerosos productos, que anteriormente podían ser utilizados en estado bruto o fragmentado, son hoy en día finamente pulverizados antes de ser tratados.

Además, la molienda se ha convertido en una fase cuyo control resulta esencial por el impacto tan favorable que puede tener sobre factores tan importantes en un proceso productivo como son la calidad del producto terminado, el aumento de la productividad y la disminución de los costos de producción.

Dentro de la gran diversidad de industrias que requieren para su funcionamiento tratar con productos molidos (industrias que abarcan desde el ramo de la construcción hasta el alimentario), la molienda toma una especial importancia en el ramo de la fabricación de materiales para la construcción.

La operación de molienda consiste esencialmente en producir unidades de masa inferior, a partir de trozos más grandes, del material que se desea moler. Moler es reducir un sólido a un estado de división avanzada. Esta operación es

generalmente necesaria bien sea para el caso de obtener polvos de una cierta finura, bien para homogeneizar productos de orígenes diferentes, o bien para acelerar una reacción química, dando presencia a una o varias sustancias minerales o químicas. Por imposición de la naturaleza de la propia materia y por los tratamientos físicos y químicos que puedan seguirse, la molienda o pulverización es a menudo una operación compleja, bajo su apariencia de simplicidad.

En la operación de molienda es importante el tamaño en que se presenta el material que se desea moler. Así, cuando la materia a tratar es de importante dimensión (bloques de cantera de 300 mm o más), se hace necesaria una operación previa de machaqueo, que consiste en reducir, en uno o dos pasos, la granulometría de los trozos a un tamaño medio de unos 15 mm, consistiendo a continuación la molienda propiamente dicha en reducir definitivamente los trozos obtenidos de la operación anterior a un polvo fino que pueda pasar en casi su totalidad por aberturas muy pequeñas: mallas de un tamiz cuya sección de paso sea sólo de algunas decenas de micras.

Adaptando la definición de Angulo (2002), se denomina molienda o pulverización al proceso de fraccionamiento al estado de polvo fino de los trozos que provienen del chancado. De entre los diversos tipos de molinos que existen para llevar a cabo tal acción, la elección se deberá fundamentar en la naturaleza o el estado físico (dureza, granulometría y humedad) del producto a tratar y del grado de finura que se quiera obtener, así como en base a la producción que se desee.

La molienda normalmente se realiza en prensas, molinos de bolas y molinos verticales de rodillos.

### **3.4 Molinos verticales de rodillos**

La definición que da la norma alemana DIN 24100-2 es la siguiente: "Máquina con pista de molienda circular. Sobre ella se mueven los cuerpos moledores (rodillos o bolas). Los cuerpos moledores presionan por su propio peso, por fuerza centrífuga, por resortes o por sistemas hidráulicos o neumáticos a la pista de molienda. Se pueden accionar tanto las pistas como los cuerpos moledores".

Los molinos de rodillos tradicionalmente suelen ser molinos de barrido por aire y normalmente tienen en su interior separadores de aire, por tanto son utilizados para moler muy fino en circuito cerrado secando simultáneamente el material (molinos secaderos).

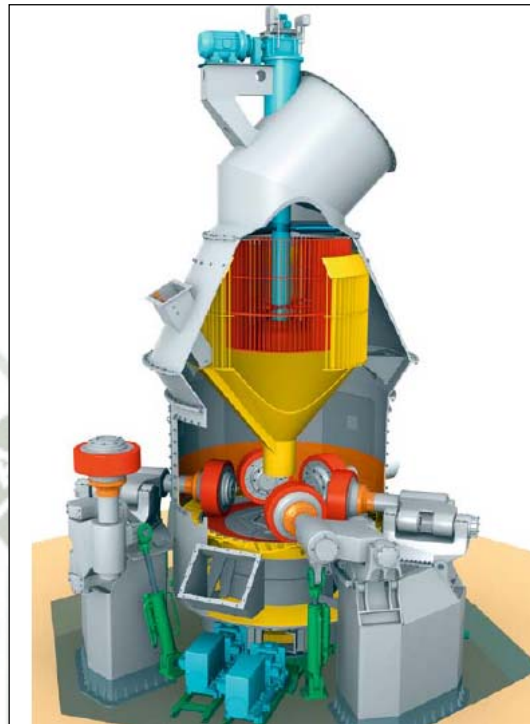
Entre los materiales que se pueden moler con este tipo de molinos pueden citarse los siguientes: caliza, cal calcinada, talco, bauxita, magnesita, fosfatos, feldespato, baritas y otros como carbón, grafito y hasta pellets de turba. Desde hace algunos años también se utilizan para la molienda de materiales muy duros y porosos y a la vez abrasivos, como son las escorias y el Clinker.

### **3.5 Principio de funcionamiento**

El principio de trabajo de este tipo de molinos se basa en unos rodillos (o bien otros cuerpos moledores comparables) que se mueven en una trayectoria circular y girando alrededor de su eje, sobre un lecho de material de

alimentación situado sobre una placa, pista o bandeja de molienda horizontal giratoria.

Figura 3.2: Molino vertical de rodillos

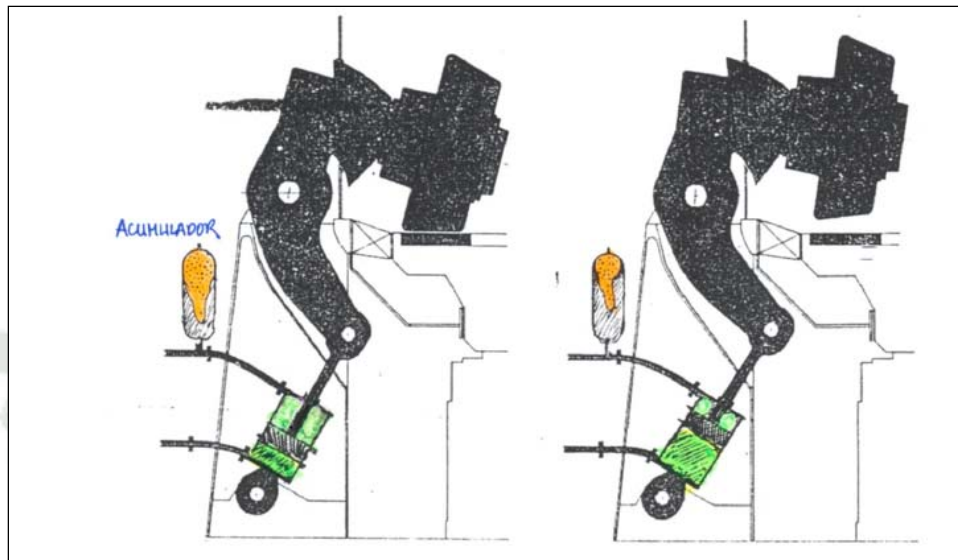


Fuente: Reichardt, 2010.

Según Duda (1977), los cuerpos moledores presionan contra el material a moler (esfuerzo de molienda) mediante su propio peso y por fuerza centrífuga, por muelles, por sistemas hidráulicos (Figuras 3.3 y 3.4) o neumáticos. Todos los grandes molinos utilizan hoy en día el sistema de presión hidroneumática, su disposición varía de unos fabricantes a otros, pero en principio todos coinciden en utilizar como muelle el gas comprimido en un acumulador, cuyo esfuerzo es transmitido a los pistones de presión por medio de aceite. Un conjunto de bombas proporciona la presión necesaria. El sistema tiene la ventaja de poder regular fácilmente las diferencias de presión.

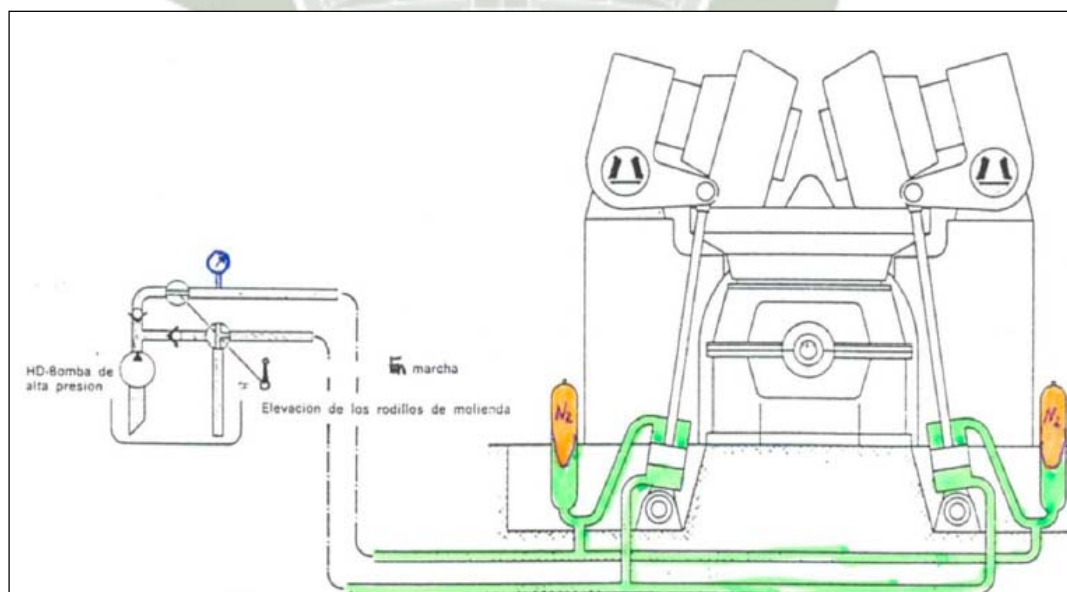
Modificando la presión del aceite pueden elevarse los rodillos sobre la pista, a fin de que el arranque se haga en vacío, con lo cual se facilita la utilización de motores de arranque directo.

Figura 3.3: Rodillos hidroneumáticos



Fuente: Adaptada de Duda; 1977.

Figura 3.4: Sistema hidroneumático



Fuente: Adaptada de Duda; 1977.

Mientras que en los molinos cargados por muelles, la presión de molienda aumenta considerablemente al crecer el lecho de molienda si las características de los muelles permanecen invariables, el sistema hidroneumático permite, por el contrario, conseguir una presión que no dependa de la altura del lecho.

Se usan cuerpos moledores de varias formas: rodillos cilíndricos, rodillos de sección troncocónica, de laterales planos y en la superficie circunferencial convexos o bolas esféricas.

La forma de los cuerpos moledores parte de consideraciones cinéticas y no depende del grado de eficacia de molienda. Cuando se empezaron a aplicar las fuerzas elásticas a los rodillos por medio de los sistemas de palancas en adición al propio peso de los rodillos, se hizo necesario estudiar bajo consideraciones cinéticas el sistema de palanca. El objetivo de todas las soluciones era hacer trabajar a los rodillos lo más vertical posible sobre la superficie de molienda.

El material que llega al molino desde la dosificación cae a través de una resbaladera sobre la pista, que se asienta sobre el plato y este, a su vez, sobre el reductor girando con él. La alimentación del material a moler cae centralmente sobre el plato. Debido al rozamiento, el material gira más o menos conjuntamente con el plato, con lo que se ve sometido a la acción de la fuerza centrífuga, lo que hace que se mueva hacia afuera en dirección a la pista de molienda.

Al pasar el material entre los rodillos y la pista se produce la molienda por un doble efecto de presión y rozamiento. Los trozos mayores de material,

sobresaliendo sobre los demás, son los primeros en ser desmenuzados, por una combinación de esfuerzos de compresión y corte (como en una trituradora de cilindros). Se concentra encima de ellos la presión ejercida por el rodillo, que excede con mucho su resistencia a la rotura. Luego los cuerpos moledores van actuando sobre las partículas que siguen en tamaño y así sucesivamente. Este proceso continúa hasta que el material alcanza la parte más estrecha de la separación entre el elemento moledor y la pista de molienda.

Figura 3.5: Molienda con los cuerpos moledores



Fuente: Mischorr, Delgado; 2009.

Conjuntamente con la reducción de tamaño se produce una compactación del lecho del material, cuyas fuerzas de compresión y corte asociadas dan lugar a un nuevo efecto de reducción de tamaño, sobre todo por rozamiento de las partículas entre sí, ayudado por un cierto movimiento relativo entre los cuerpos moledores y la pista de molienda. Este movimiento relativo también contribuye

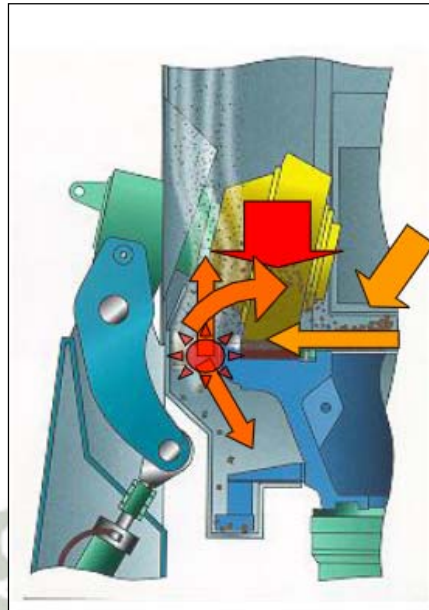
a prevenir las adherencias en la pista de molienda, si el molino se alimenta con material húmedo o pegajoso.

La reducción final se realiza, sustancialmente, por rozamiento, que es el factor clave de la pulverización fina.

El material pulverizado, luego de pasar por debajo de los rodillos, por efecto de la fuerza centrífuga es lanzado hacia la periferia de la pista de molienda por donde se derrama. A continuación el material es recogido por la corriente ascendente de gas es (aire), que penetra en la cámara de molienda por una corona de álabes y que circula a gran velocidad, de modo que las partículas finas son arrastradas hacia el clasificador. La aspiración se realiza mediante un ventilador de forma que todo el circuito trabaja en depresión.

Las partículas gruesas, que no son capaces de ser arrastradas por la corriente de gas, caen a través del anillo de toberas a un anillo de descarga, que gira con el plato de molienda y llega por una resbaladera de evacuación lateral a un medio de transporte, por ejemplo, un elevador de cangilones, que lo devuelve al molino con o sin separación intermedia. La velocidad del gas en el anillo de toberas se ajusta de manera que no todo el material que cae del plato sea arrastrado por la corriente de gas al separador. Este es el efecto de clasificación preliminar, que se distingue de la separación final que se cumple en el clasificador situado en lo alto de la caja del molino.

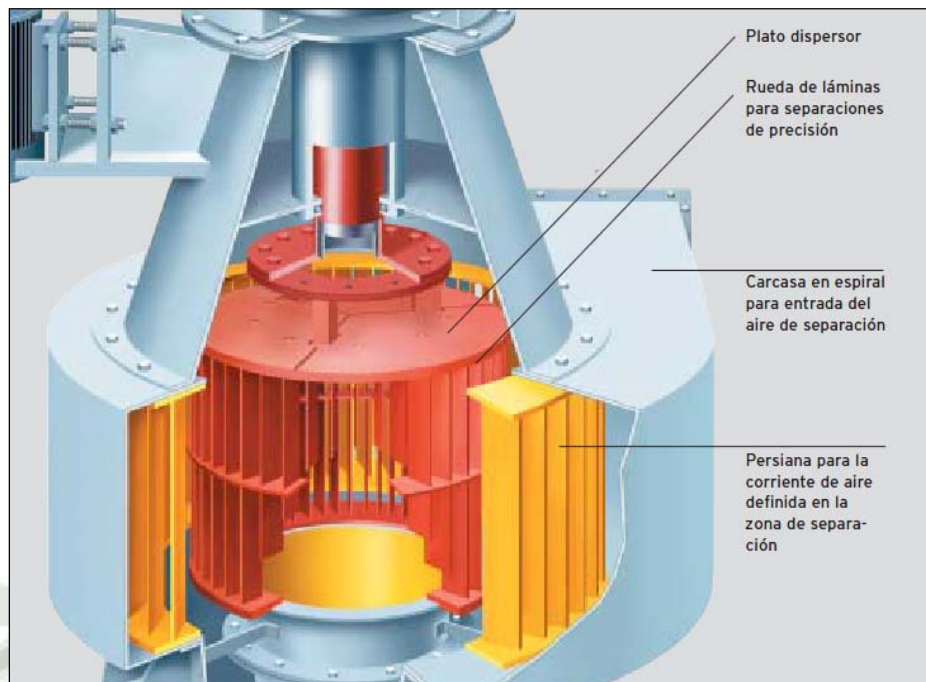
Figura 3.6: Flujo de material dentro del molino



Fuente: Mischorr, Delgado; 2009.

El material que es arrastrado por la corriente de gas va hacia el separador situado directamente encima del recinto de molienda, donde se clasifica. La clasificación que se produce en el separador consta en dos etapas, el flujo de material llega a los álabes fijos del separador, los cuales guían el flujo y a su vez rechazan las partículas gruesas, eso dependerá de la velocidad del flujo de gases y de la masa de las partículas. Seguidamente las partículas finas ingresan a los álabes del rotor donde se produce la última clasificación, allí las partículas medianas son más lentas que las partículas pequeñas y toman más tiempo para pasar los álabes del rotor que está girando a una velocidad determinada, por lo tanto las partículas medianas serán expulsadas por el golpe directo con los álabes. En la figura 3.7 se observa en amarillo los álabes fijos y en rojo el rotor con su juego de álabes móviles.

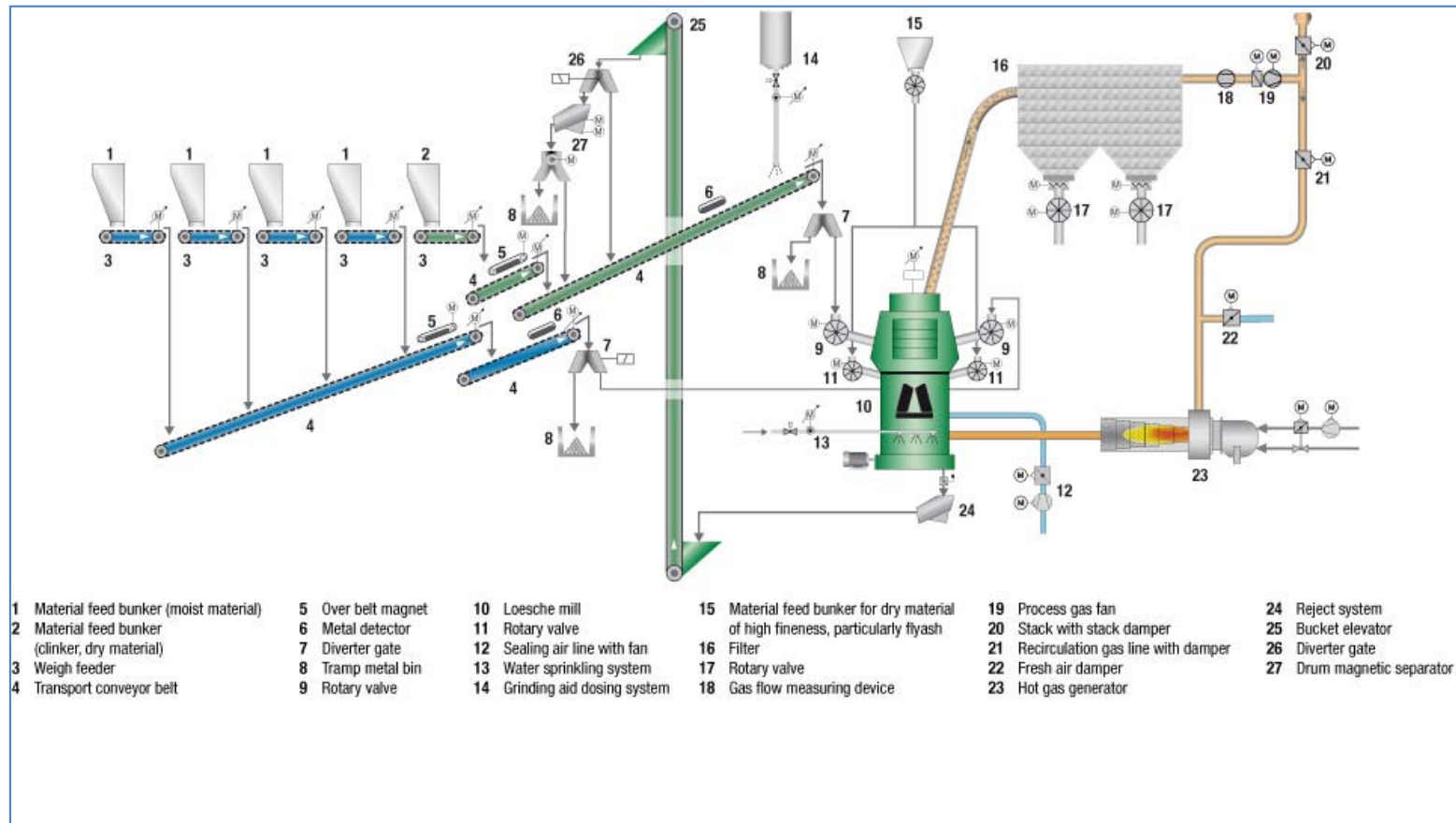
Figura 3.7: Álabes de un clasificador dinámico



Fuente: Pfeiffer; 2005.

Las partículas mayores separadas por el clasificador vuelven a la pista de molienda y las finas van con la corriente de aire de donde son separadas mediante ciclones o filtros.

Figura 3.8: Proceso típico de un molino vertical



Fuente: Keyssner, Abraham; 2005.

Como el transporte neumático exige una cantidad considerable de gases y como además estos están en íntimo contacto con el material pulverizado, los molinos verticales de rodillos resultan especialmente adecuados para la molienda conjunta con el secado.

Debido al corto tiempo de permanencia del material de alimentación en la cámara de molienda, comparado con el que se da en los molinos tubulares, el lecho de material se mantiene sustancialmente libre de partículas finas que no exigen una molienda posterior, cargando sin necesidad el molino y con tendencia a la formación de aglomeraciones indeseables.

El lecho de material debe poseer una estabilidad suficiente para no ser desplazado por los cuerpos moledores (adecuado rozamiento entre el material y la pista), con lo cual la acción desmenuzadora sería muy pequeña, además es necesario que se desarrolle una fuerza de rozamiento suficiente entre el lecho de material y los cuerpos moledores, para que estos rueden sobre el lecho y no tan solo deslicen.

Puede suceder que funcionando el molino en condiciones estables, cambie bruscamente la distribución granulométrica del material de alimentación, por ejemplo, por efecto de la segregación del material contenido en la tolva de alimentación durante su vaciado, recibiendo entonces el molino tan solo material fino, con lo cual se altera temporalmente el lecho de material, con perjuicio de su estabilidad.

Parte del material es rechazado y por ello se reduce el espesor del lecho y si no se varía la presión que ejercen los elementos moledores, aumenta la

presión específica sobre el material, pudiendo suceder que los elementos moledores "pinchen al lecho" y de ello resulta un traqueteo en su rodadura.

El anillo de contención que bordea el perímetro de la pista de molienda sirve para mantener el espesor del lecho de material dándole la estabilidad necesaria. En las máquinas grandes la presión sobre los elementos moledores se aplica reumáticamente, variando según las condiciones que presente el material.

Para lograr una adecuada capacidad de agarre por parte de los rodillos, con el mayor margen que sea posible, dentro de la variabilidad que puede presentar la alimentación (distribución granulométrica, contenido de humedad, molturabilidad, etc.), las medidas que han propuesto los constructores incluyen la utilización de rodillos y pistas de molienda con perfiles salientes a modo de crestas, o bien utilizar las juntas de los segmentos, que forman las pistas, para intercalarles dichos salientes. Otra posibilidad ensayada es la de emplear segmentos alternados con diferencias en sus resistencias al desgaste o dar a los rodillos una superficie corrugada aplicando líneas de electrodos especiales de alta resistencia a la abrasión.

En la molienda de materiales blandos, como por ejemplo, la marga, la adición de caliza dura, alta en cal, no tan solo sirve para corregir la composición del crudo, sino que se ha probado que mejora la marcha de los molinos de rodillos en lo que se refiere a su rendimiento y normalidad de funcionamiento. Es preferible que las partículas de caliza sean lo mayores posibles dentro de los límites que pueda aceptar el molino.

Su efecto beneficioso, en un lecho formado por gran cantidad de partículas finas y blandas, estriba en su actuación como "manchas duras" puntuales con mayor resistencia al paso de los rodillos, provocando un ligero levantamiento de los mismos. Los rodillos cuando se enfrentan con un lecho de partículas muy finas, que les exige un mayor trabajo para el desmenuzamiento, retroceden sobre el lecho de molienda. Entonces la presencia de las "manchas duras" facilita una extensiva redistribución espacial de las partículas del lecho de material, facilita una mayor eficacia en la pulverización fina.

### **3.6 Clasificación de molinos verticales**

El principio de funcionamiento y las partes de los molinos verticales varían de acuerdo al fabricante, se van a describir los más importantes y usados en la industria del cemento.

#### **3.6.1 Molino de anillos de bolas: Molino PETERS**

Según Duda, (1977), la industria del cemento utiliza los molinos Peters (también denominados molinos Fuller-Peters) principalmente para la molienda de carbón, en donde éste no se ha sustituido por petróleo.

Este molino se parece en su estructura a un rodamiento axial. El material a moler se encuentra en una pista en forma de artesa horizontal donde se muele mediante bolas. Las bolas son presionadas por un anillo de presión accionado por un muelle, sobre el material. Después de caducar la licencia de Fuller, Claudius Peters siguió desarrollando el molino y lo introdujo en el mercado bajo el nombre de Molino PETERS.

En esencia, este molino consta del recinto de molienda, separador por aire y reductor del accionamiento. En el recinto de molienda gira el anillo

de molienda inferior, mientras que el superior es estacionario. Mediante muelles regulables, el anillo superior comprime las bolas de molienda que ruedan unas en contacto con las otras, dispuestas entre ambos anillos, como en un cojinete de bolas.

El material se introduce o desde arriba y por el centro, atravesando el separador de aire del molino o lateralmente a través de la carcasa del recinto de molienda y llega por acción centrífuga a las bolas de molienda. El material molido sale a la periferia del dispositivo moledor y una corriente de aire vertical lo capta y transporta al separador por aire. Las partes gruesas separadas retornan, por su peso, a la zona de molienda, mientras que los finos abandonan el molino con el aire.

El material de alimentación húmedo puede secarse intensivamente dentro del molino por medio de aire o gases inertes a alta temperatura. Según los datos de los fabricantes del molino es posible utilizar gases con temperaturas, a la entrada del molino, de 600 °C.

El molino Peters tipo EM está dotado con bolas de molienda huecas, de acero fundido de muy alta resistencia al desgaste. El diámetro de las bolas llega hasta los 500 mm, según el tamaño del molino.

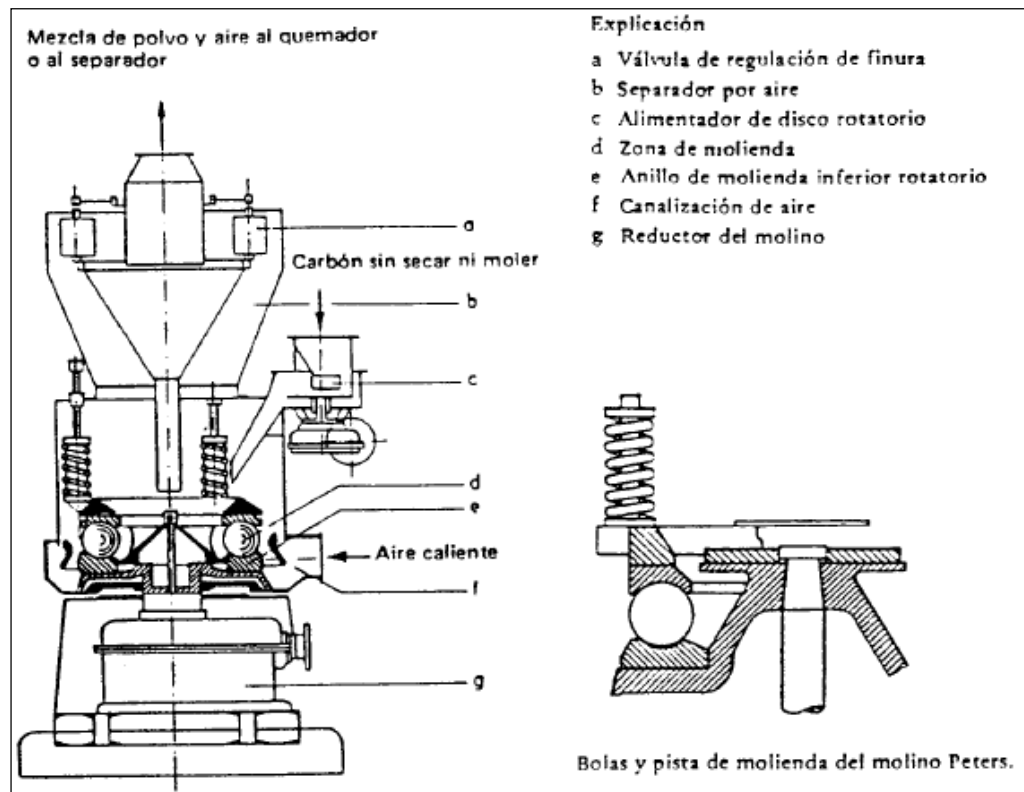
El molino no tiene rodamientos antifricción. Esta ventaja conlleva otra desventaja, la de una marcha un poco brusca. Mientras las bolas suelen trabajar de forma amortiguada en el lecho, teniendo por arriba siempre el contacto con el anillo de presión. Las bolas que trabajan sin jaula se topan entre ellas esporádicamente en su trayecto horizontal (por tener el mismo sentido de giro) y tienden subirse entre ellas. Como

consecuencia se presentan vibraciones que aumentan con la masa de las bolas. Esto es una razón de la limitación del tamaño del molino.

Sin aumentar la velocidad de molienda se puede aumentar la productividad al aumentar el diámetro del molino (plato y carcasa) para aumentar consecuentemente la cantidad de cuerpos de molienda. Pero también este método tiene sus límites, porque al hacerse muy grande el diámetro de la carcasa, el gas que ayuda normalmente a elevar el material ya no le dará flotabilidad. Se puede conseguir mejor quizás con carbón, ya que el carbón tiene menos peso específico que la mayoría de los otros minerales a ser molidos.

Cuando los elementos de molienda se desgastan se pueden abrir unas puertas grandes en el molino, cambiando las partes (bolas y anillo o plato de molienda) mediante unos dispositivos auxiliares sin tomar ninguna otra medida especial. El tiempo de servicio de las partes de molienda (horas de servicio) es muy largo.

Figura 3.9: Molino Vertical PETERS



Fuente: Duda, 1977.

### 3.6.2 Molinos con rodillos abombados: MOLINOS MPS o PFEIFFER

Reichardt (2010), indica que la estructura del molino MPS es, esencialmente, igual a los otros molinos de rodadura o de rodillos. Sin embargo, el molino MPS tiene tres rodillos fijos, con la ranura guía en la pista de molienda, en lugar de dos que giran sobre una solera rotatoria. La presión de los rodillos se hace mediante un bastidor de presión, indirectamente por medio de unidades de presión que se encuentran móviles debajo del bastidor. De este modo se evitan los puntos críticos de desgaste

En molinos pequeños se obtiene la fuerza de molienda por un anillo de presión y muelles, que están instalados en un bastidor de presión

acoplado directamente con tensores que producen la fuerza de molienda. El pretensado y la amortiguación son hidroneumáticos. El bastidor de presión es guiado en la parte superior de la carcasa del molino que tiene forma hexagonal o cilíndrica. Estas guías permiten el movimiento vertical. Para fijar localmente el sistema de tres rodillos del molino, se crea una sección de giro amortiguado mediante tensores de inclinaciones variables.

Para el cambio de los rodillos se utiliza el sistema «lift and swing». El bastidor de presión se eleva con los tensores para mantener el asiento estable en los tres puntos. Los rodillos pueden desmontarse mediante brazos pivotantes. En el caso de tratarse de rodillos grandes se fabrican las camisas en segmentos. Los segmentos pueden hacerse de una fundición resistente sin que las tensiones por temperaturas puedan causar roturas.

Para el arranque del molino se utiliza un accionamiento auxiliar. Con su ayuda y velocidades muy bajas del plato de molienda se suaviza el lecho de molienda, antes de poner en marcha el motor principal, acelerando el plato hasta llegar a las revoluciones nominales.

El molino en la práctica no suele vaciarse por completo. Por tanto para el arranque siempre existe ya un colchón de molienda. Además puede reducirse el pretensado de los muelles de los rodillos durante el arranque del molino. El motor auxiliar se utilizará para la inspección de los rodillos y la pista.

El movimiento vertical del rodillo tiene poco efecto en los otros rodillos, ya que todos los rodillos están trabajando sobre la pista de molienda por medio del mismo bastidor de presión.

En este molino el secado del producto que se está moliendo se basa en el principio de la corriente de aire.

Los gases de secado entran en la carcasa que envuelve al molino a través de un anillo de toberas, secan el material y lo transportan simultáneamente hacia arriba, hasta el separador por aire. Los cuerpos extraños tienen la posibilidad de caer por el anillo de toberas y de ser retirados de allí.

La aplicación más extensa del molino MPS es en la molienda de carbón tanto para la industria del cemento como para las centrales térmicas.

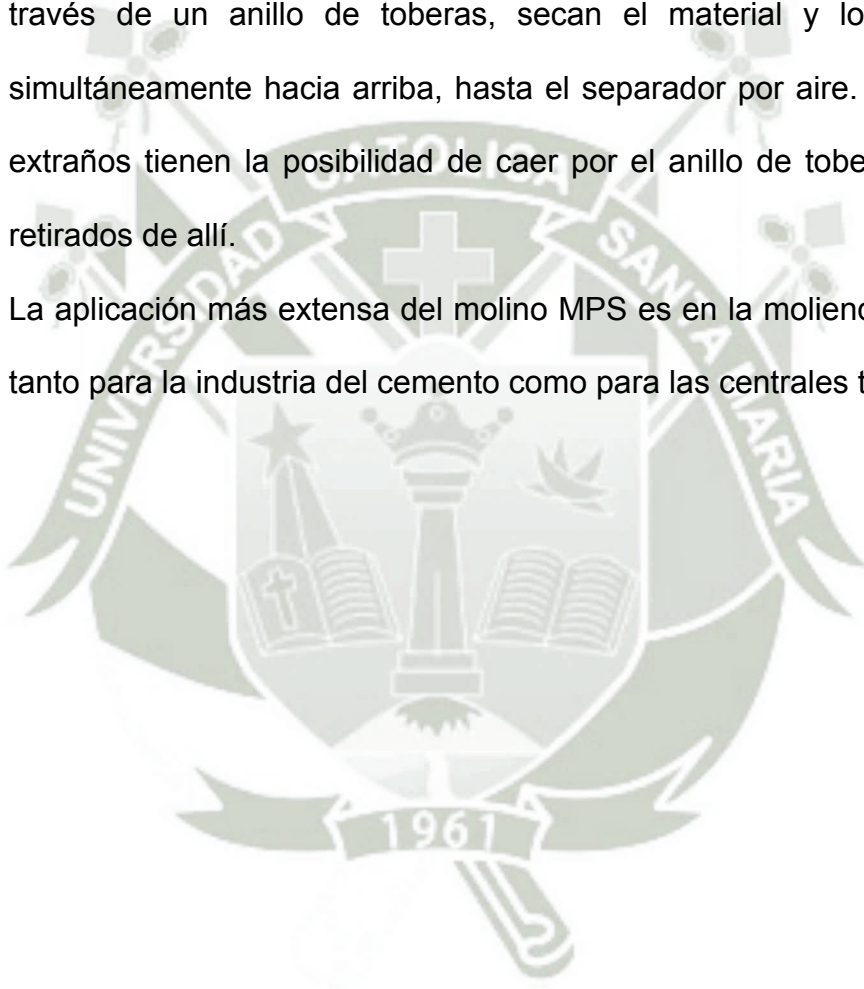
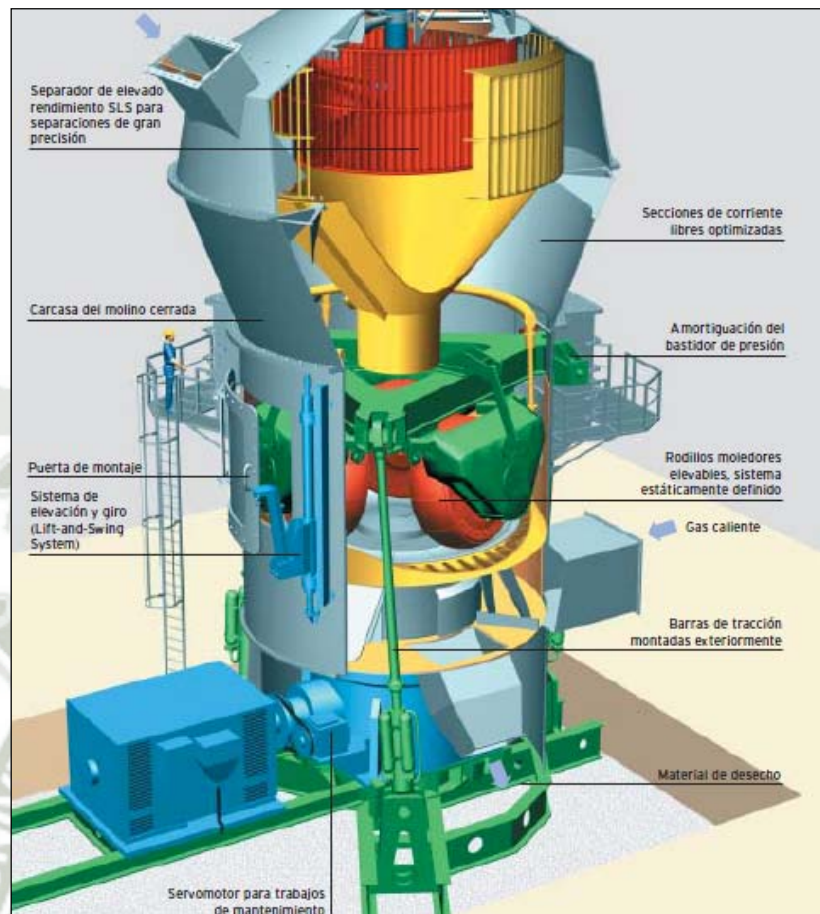


Figura 3.10: Molino Vertical PFEIFFER



Fuente: Pfeiffer; 2005.

### 3.6.3 Molino vertical POLYSIUS

Duda, (1977) menciona que el molino consta de cuatro rodillos. El diseño mecánico está caracterizado por las dos parejas de rodillos y cada par está asignado a un soporte de rodillos fijo. Los ejes en los que van montado los rodillos sobre rodamientos son fijados a los soportes de rodillos.

Los rodillos de molienda tienen una forma semiesférica, que en unión con las dos ranuras de molienda en la pista permiten crear un lecho de

molienda estable, garantizando de este modo una marcha tranquila del molino, siendo esto muy importante.

Dos de estas unidades se encuentran paralelas una a otra en el plato de molienda. Los pernos en ambos lados del soporte de rodillos guían las parejas de rodillos en la carcasa de las consolas de guía. La guía permite los movimientos verticales y el volteo de la unidad por su eje de rodillo horizontal. De este modo se compensan los distintos espesores del lecho de molienda del rodillo interior al exterior y ambos rodillos se encuentran siempre en contacto. Por los pernos se limita el juego tangencial en la carcasa por medio de las consolas de guía.

La carcasa soporta el empuje tangencial, el cual hace efecto sobre las parejas de rodillos por medio del giro del plato. La unidad de soportes de rodillos y pareja de rodillos se saca del lecho de molienda mediante vástagos hidráulicos.

Cuando un molino gira en vacío, por ejemplo para hacer mantenimiento, puede haber un contacto metálico entre los rodillos y el plato de molienda. En el arranque el molino trabaja con menos carga al reducir la presión de trabajo en el sistema hidráulico. En el caso de molinos grandes de crudo se suele trabajar con accionamientos auxiliares, los cuales son usados para iniciar suavemente el lecho de molienda con pequeñas velocidades de molienda, antes de arrancar con el motor principal. Además, suelen ser útiles para los trabajos de mantenimiento.

Durante la regulación del sistema hidráulico o sea, el ajuste del empuje vertical de los rodillos, los rodillos (por pares) se apoyan entre sí, ya que

la unidad se puede voltear para adaptarse al lecho de molienda. No hay influencia de los pares entre si y cada par de rodillos se ajusta por sí solo.

El rodillo interior o sea, el que se encuentra más cerca del centro del molino, se mueve mucho más lento que el rodillo exterior. Por tanto el rodillo interior se desgasta menos que el exterior. La velocidad relativa de ambos rodillos en comparación a la pista es muy poca.

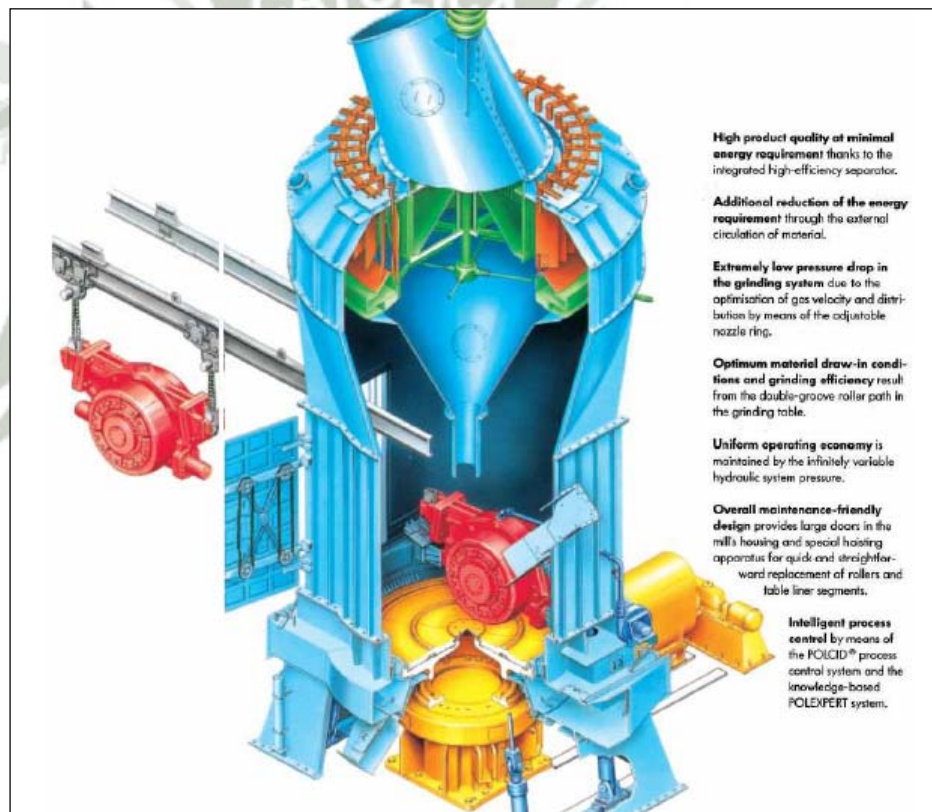
Para cambiar el rodillo se tiene que evacuar completamente, de la carcasa del molino la unidad de soporte de rodillo y pareja de rodillos mediante un polipasto suspendido. Esto requiere aparte del molino un área de montaje de casi la base del molino, para el caso de realizar los trabajos de mantenimiento.

El material corre por un dispositivo de entrada dispuesto sobre el disco de molienda. El plato o disco rotatorio pone en movimiento dos rodillos dobles o cilindros dobles, es decir cuatro rodillos. Los pares de rodillos tienen libre movimiento y se acomodan individualmente a la velocidad de la solera de molienda, así como a la altura del lecho del material que se está moliendo. Esto produce un contacto permanente de los rodillos con el material. La presión de molienda se transmite a los rodillos por un dispositivo hidroneumático. El material molido rebosa por los bordes del plato de molienda, de donde es conducido hacia arriba mediante un anillo de toberas para gases, hasta el separador por aire.

El material que éste ha separado cae por el centro sobre el disco rotatorio de molienda, mientras que los finos quedan depositados en un

filtro electrostático dispuesto a continuación. Si no hay suficiente cantidad de gas, las partes gruesas no son arrastradas y caen a través del anillo de toberas, en donde las recoge un elevador y las incorpora al material de alimentación. Esto tiene la ventaja de que, dado el tipo de construcción del molino de rodadura, también se puede trabajar con pequeñas cantidades de gases y con velocidades correspondientemente pequeñas en las toberas.

Figura 3.11: Molino Vertical POLYSIUS



Fuente: Mischorr, Delgado; 2009.

### 3.6.4 Molino vertical ATOX: FLS

Brugan (2009), indica que en términos generales este molino es una variante del molino MPS. El soporte triangular del molino ATOX no tiene un pivote giratorio, al contrario que los molinos MPS. Solamente fija los ejes de los rodillos que se encuentran horizontales, pero girados  $120^\circ$  y guía los tres rodillos cilíndricos. Los ejes atraviesan a los rodillos en ambos lados, terminando en un manguito. Esta unidad fija de tres rodillos en forma de estrella, descansa sobre un apoyo estáticamente definido sobre tres puntos, sobre la pista horizontal del plato.

La pista horizontal permite, igual que en el molino LOESCHE, usar rodillos muy grandes sobre el plato de molienda. En el molino ATOX no fue necesaria una forma esférica de los rodillos, como lo pide el molino MPS por su apriete articulado superior hacia la ranura guía en la ranura de la pista de molienda. El sistema rígido de tres puntos permite más bien la realización de un contacto lineal de cada rodillo con la pista de molienda.

La unidad de tres rodillos está fijada en el cubículo de la molienda. Los rodillos giran sobre su propio eje, pero no alrededor del centro del plato. Para el soporte del par de giro contra la carcasa del molino se utilizan unas barras de soporte horizontales que se encuentran ancladas tangencialmente a ella. Se encuentran además fijados a las piezas de conexión de los ejes de los rodillos que sobrepasan la carcasa.

En los tres muñones del eje se fijan también las barras de tracción apuntando hacia abajo, diagonalmente, formando parte del sistema

hidráulico, con cuya ayuda se guía la unidad de tres rodillos hacia el lecho de molienda.

Para el arranque del molino puede elevarse unos centímetros, por su unión rígida del soporte central triangular con los tres rodillos, toda la unidad de rodillos al invertir la presión hidráulica en los cilindros del sistema hidroneumático. Por tanto, no hace falta el accionamiento auxiliar.

El movimiento vertical del rodillo cuando pasa sobre el lecho de molienda afecta a los dos restantes rodillos.

Al estar los tres rodillos unidos rígidamente entre sí, se vuelca la unidad de molienda sobre la línea de unión de los puntos de apoyo de dos de los rodillos, si se eleva el tercero.

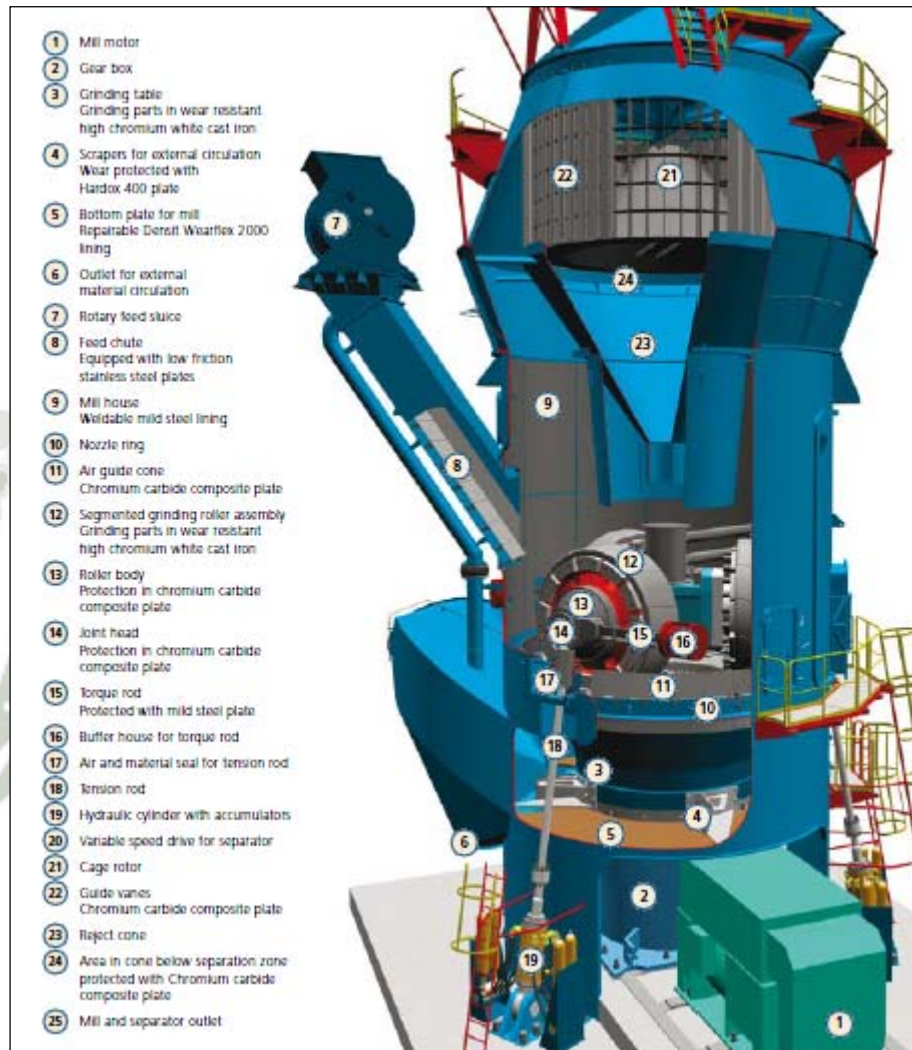
Los rodillos ATOX trabajan sin balancín ni piezas de presión, lo cual significa menos peso del molino y por tanto menos costos de producción del mismo. Los rodillos, sin embargo, no pueden ajustarse individualmente sobre el lecho de molienda. Por tanto, es difícil equilibrar el desgaste por todo el ancho del rodillo.

Al aumentar el tamaño del molino aumenta también la masa de los rodillos. Hay que observar que las fuerzas dinámicas resultantes del movimiento vertical no se originan por un solo rodillo, sino, debido al sistema rígido de los tres rodillos, como resultado de la masa combinada.

Para mayor facilidad de desmontaje se segmentan las camisas de los rodillos. El dispositivo de elevación hidráulico para la unidad de rodillos

puede utilizarse también como ayuda, para soportar el sistema estático de los tres rodillos.

Figura 3.12: Molino Vertical ATOX



Fuente: Brugan, 2009.

### 3.6.5 Molino vertical LOESCHE

Keyssner, Abraham (2005), mencionan que en un molino Loesche el material a moler se alimenta centralmente por el separador que se encuentra sobre el molino o lateralmente, sobre el plato giratorio. El

material alimentado es triturado por los rodillos y mediante fuerzas provenientes del sistema hidroneumático. Al rozar los rodillos de molienda con el lecho sobre el plato, balancines y vástagos del sistema se elevan por acción de los cilindros hidráulicos. El aceite de los depósitos hidráulicos de la parte superior es eliminado en el acumulador hidráulico lleno de gas.

El material molido se transporta mediante las fuerzas centrífugas a la parte superior de la corona de álabes, que rodea el plato, donde es recogido por la corriente de gas caliente para ser transportado hasta el separador.

Por el íntimo contacto con el gas caliente, se evapora espontáneamente el agua del material, lo cual crea ya en la zona de molienda la temperatura de salida de 70 °C hasta 130 °C. Para casos especiales se han trabajado también con hasta 150° C de temperatura de salida.

El material grueso es rechazado por el separador según la finura programada y cae al circuito de rechazo para llegar nuevamente al plato de molienda y ser molido. El material molido pasa el separador.

El molino es accionado por un motor eléctrico con un reductor especial. Un cojinete axial segmentado en el reductor absorbe las fuerzas de los rodillos.

El cambio de las piezas de molienda es bastante simple. El soporte de los rodillos de los balancines está preparado para ello y permite la integración del dispositivo de volteo mediante el acoplamiento de un

cilindro auxiliar al balancín. Se puede voltear completamente la unidad balancín y rodillo de la carcasa del molino.

El arranque de un molino lleno puede realizarse con los rodillos hidráulicamente elevados del lecho. El molino suele arrancar con aprox. el 40 % de la capacidad nominal. No necesita ni motor de arranque con mayor momento de arranque ni accionamiento auxiliar.

El contacto metálico de los rodillos con la pista se elimina o por amortiguadores mecánicos o por programación electrónica. Una ventaja que es posible por el control de rodillos individual en balancines. El sistema de módulos permite la construcción de molinos con 2, 3 o 4 rodillos, manteniendo siempre la unidad ya descrita.

Los molinos Loesche normalmente tienen 4 rodillos para la producción de cemento y carbón y 6 rodillos para la producción de crudo, estos rodillos típicamente se denominan M y S según la función que van a cumplir, los rodillos S compactan el material y forman el lecho de molienda mientras que los rodillos M realizan la operación de molienda en sí; se denominan de esta forma:

LM XX Y + Z

Dónde:

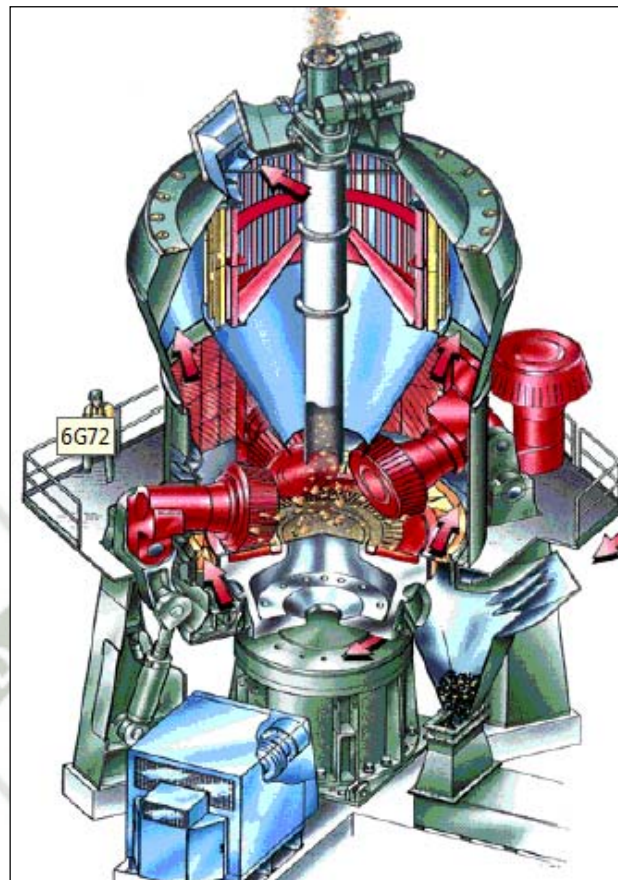
LM representa a las siglas en inglés para Molino Loesche.

XX representa el diámetro de la mesa de molienda expresado en decímetros.

Y representa el número de rodillos M.

Z representa el número de rodillos S.

Figura 3.13: Molino Vertical LOESCHE

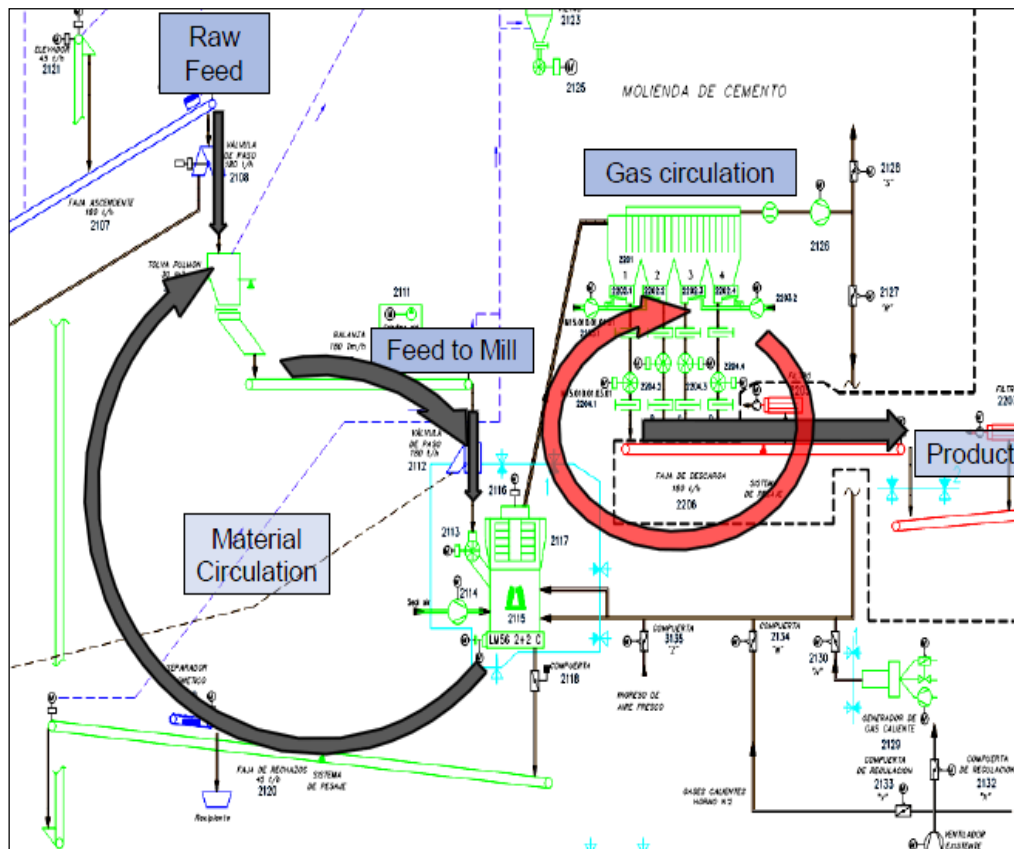


Fuente: Mischorr, Delgado, 2009.

### 3.7 Equipos auxiliares de un molino vertical

Se denominan equipos auxiliares a las máquinas que conforman el suministro de materias primas hacia el molino, la salida del producto terminado y la captación de polvos. La siguiente figura muestra los equipos en mención de un proceso de molienda vertical.

Figura 3.14: Equipos auxiliares de un molino vertical



Fuente: Mischorr, 2010.

### 3.7.1 Fajas transportadoras

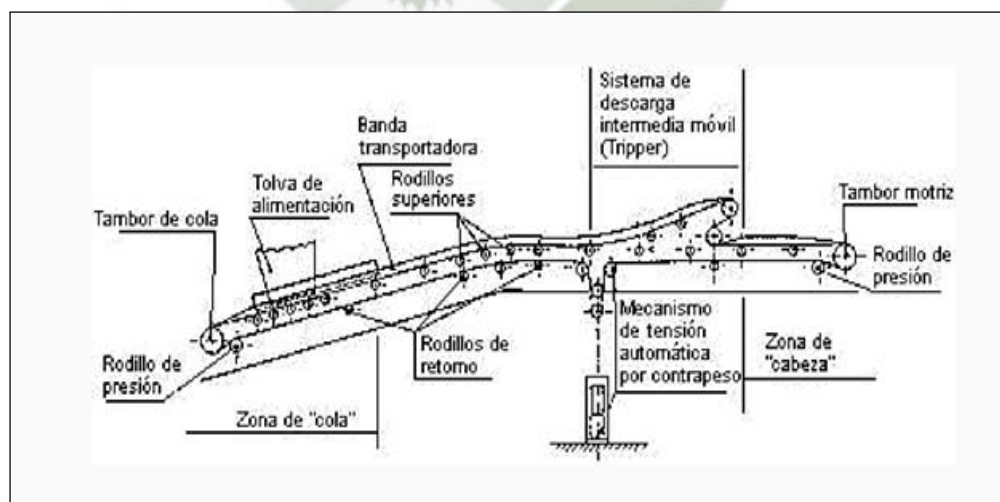
Según Labahn (1985), las cintas transportadoras sirven para el desplazamiento de materiales a granel cuando se hallan fragmentados o pulverizados, pudiéndose efectuar el transporte en sentido horizontal o inclinado, es decir en dirección ascendente o descendente según una rampa.

Como elementos para esta clase de transporte se utilizan cintas echas de caucho o de otros materiales flexibles.

La cinta transportadora va montada en forma de correa sin fin sobre dos tambores de cambio de dirección situados en los extremos; uno de ellos es motor y produce el accionamiento y el otro sirve únicamente como tensor. El ramal superior de la cinta puede ser guiado en forma plana o en forma cóncava; el inferior o de retorno es conducido en forma plana. Los rodillos de apoyo que conducen el ramal superior suelen estar separados a un metro de distancia unos de otros; los que guían el ramal inferior están más separados; por lo menos el doble.

La alimentación de las cintas transportadoras puede efectuarse en el punto que se desee y en cantidades limitadas únicamente por la capacidad de transporte de la cinta. El vertido del material puede hacerse por encima del rodillo terminal o en el punto que se desee por medio de deflectores u otro sistema. Los deflectores no pueden utilizarse con cintas cóncavas.

Figura 3.15: Componentes estructurales de una faja transportadora



Fuente: Labahn, 1985.

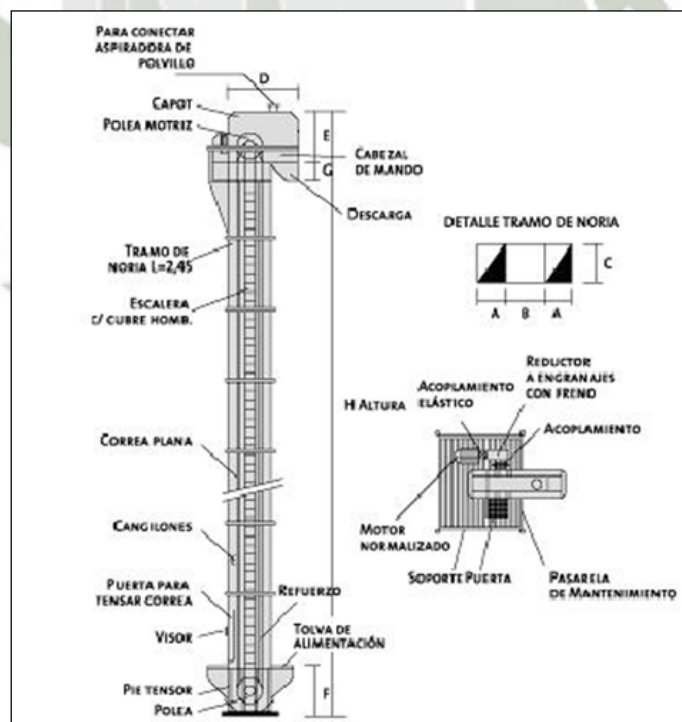
### 3.7.2 Elevadores de cangilones

Labahn (1985), indica que sirven para la elevación de materiales fragmentados o pulverizados que deban trasladarse verticalmente.

Los cangilones van fijos en las cadenas sin fin, conducidas por dos tambores, uno superior motor y otro inferior tensor.

El tambor inferior rueda en una tolva, de la cual los cangilones recogen el material a elevar. Estos últimos elevan el material y lo vuelcan al invertir su posición cuando pasan por encima del tambor superior, vertiéndolo en una tolva o canal. Este movimiento de volcado supone una determinada velocidad, que normalmente es de 1m/s. El conjunto del elevador de cangilones está suspendido y gira generalmente dentro de una carcasa, para evitar el polvo y las pérdidas de material.

Figura 3.16: Componentes estructurales de un elevador de cangilones

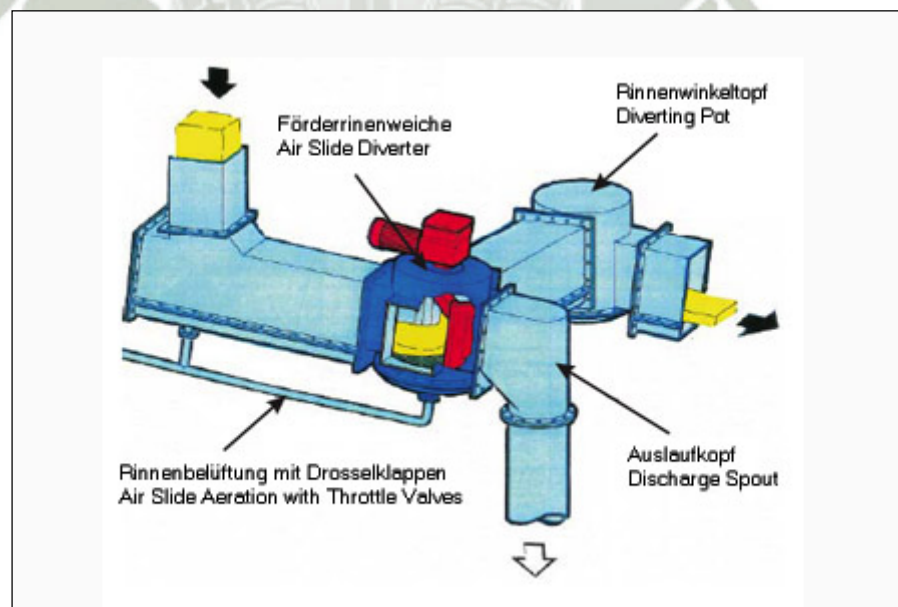


Fuente: Labahn, 1985.

### 3.7.3 Canaletas aerodeslizantes

Labahn (1985), menciona que el transportador aerodeslizador se compone de conductos rígidos de sección cuadrada, rectangular o circular, divididos en dos partes en el sentido de su longitud por un diafragma permeable de aire. La parte superior sirve para el transporte de los materiales y la parte inferior para insuflar aire. Generalmente la primera ocupa  $2/3$  de la sección total. Los aerodeslizadores sirven para transportar materiales reducidos al estado de polvo y al estado de arena hacia un cierto tamaño. El aire soplado bajo el diafragma permeable pasa a través de este a la parte superior, agita el material y lo transporta en la dirección de la corriente de aire. No es necesaria una sobrepresión en la canalización de transporte, y el aire soplado deberá ser aspirado a través de un captador de polvo.

Figura 3.17: Componentes estructurales de un aerodeslizador

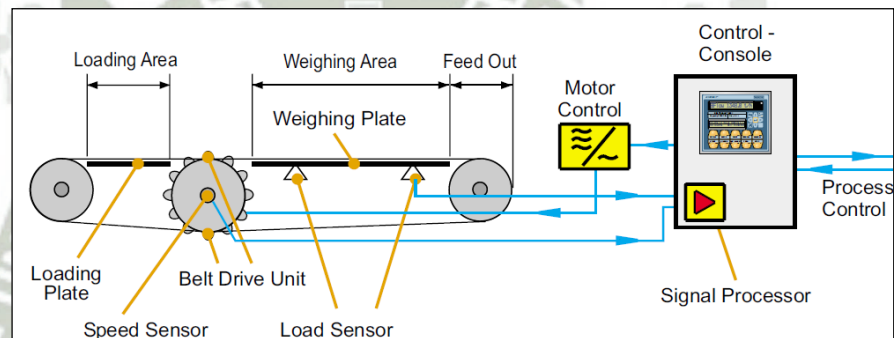


Fuente: Brugan, 2009.

### 3.7.4 Balanzas dosificadoras

Krist (2009), indica que una balanza dosificadora es una faja que recibe el material suministrado, lo pesa mediante unas celdas de carga y dosifica la cantidad de material que es requerida para el proceso mediante un controlador electrónico de manera constante. Los componentes mecánicos son los mismos instalados en una faja transportadora.

Figura 3.18: Componentes estructurales de una balanza dosificadora



Fuente: Krist, 2009.

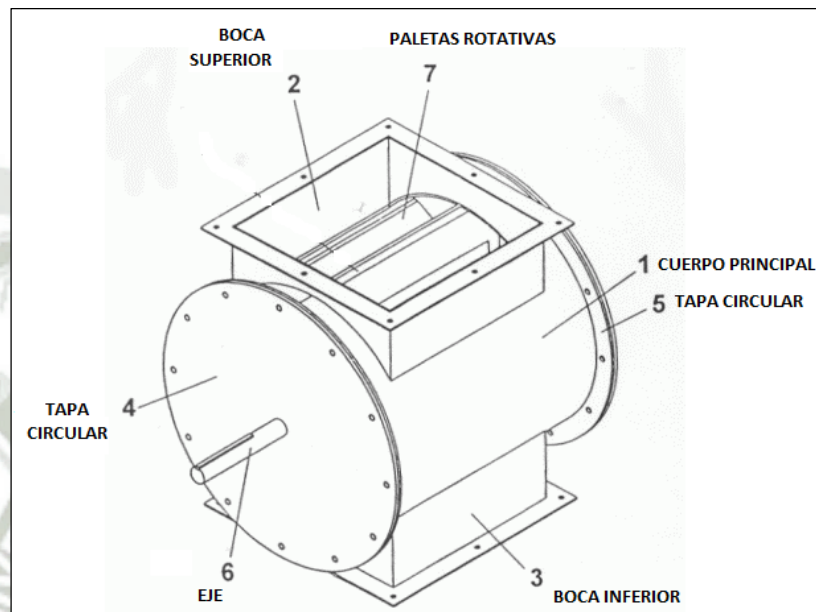
### 3.7.5 Válvulas rotativas

Labahn (1985), indica que una válvula rotativa es un equipo robusto, con el fin de descargar de forma dosificada el material partículas y/o granulados hacia un elemento de transporte.

El material que se descarga en el cuerpo y la válvula se mueve a través de un rotor en un movimiento cíclico de producción continua con paletas rotativas, proporcionando un flujo regular de material con un grado de

llenado máximo de alrededor del 30%. El rotor / eje es accionado por un motor reductor.

Figura 3.19: Componentes estructurales de una válvula rotativa



Fuente: Adaptado de Labahn, 1985.

### 3.7.6 Ventilador de tiro inducido

Labahn (1985), indica que se denomina tiro a la presión existente dentro de un recinto con respecto a la presión atmosférica, estos pueden ser tiros positivos, negativos y equilibrados.

Los ventiladores de tiro inducido están ubicados posteriores a los filtros de mangas, desde donde aspiran el aire provocando, en función de la potencia, el grado de vacío del recinto.

En los ventiladores se comunica energía al gas trasegado mediante el impulsor o rodete, con lo cual se crea una diferencia de presión y se

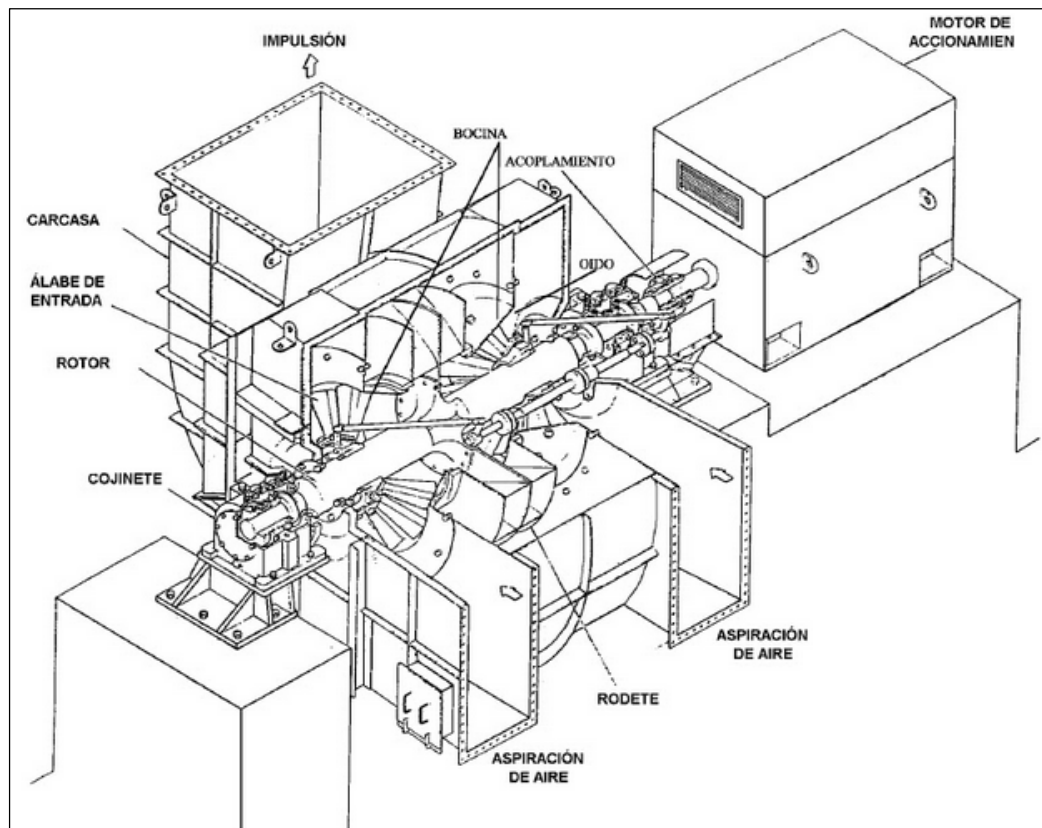
produce la corriente de gas, se utilizan ventiladores cuando se requiere vencer presiones entre 0 y 37 mbar.

Los ventiladores pueden ser axiales o centrífugos, estos últimos son los más usados en los procesos industriales para producir tiro negativo a grandes caudales.

En el ventilador centrífugo, el aire ingresa en dirección paralela al eje del rotor, por la boca de aspiración, y la descarga se realiza tangencialmente al rotor, es decir que el aire cambia de dirección  $90^\circ$ ; este tipo de ventiladores desarrolla presiones altas alcanzando hasta 150 mbar.

Un ventilador centrífugo consta en esencia de un motor de accionamiento, generalmente eléctrico, con los dispositivos de control propios de los mismos: arranque, regulación de velocidad, conmutación de polaridad, etc. y un propulsor giratorio en contacto con el aire, al que le transmite energía.

Figura 3.20: Componentes estructurales de un ventilador centrífugo



Fuente: Labahn, 1985.

### 3.7.7 Filtros de mangas pulse jet

Duda (1977), menciona que el filtro de polvo Pulse Jet, es un dispositivo que recibe una atmósfera cargada de polvo, para filtrarlo, recogiendo el polvo y descargando aire limpio.

El aire sucio entra por el lado de la tolva y golpea contra el deflector, de modo que todo el material (polvo), baja su velocidad y parte de él y cae directamente dentro de la tolva.

Continuando su ascenso, el aire se topa y rodea a las bolsas tubulares apoyadas internamente mediante jaulas de alambre, pasa a través de

las bolsas y se eleva en el interior de las mismas hasta un compartimento de aire limpio común del que es descargado.

Este filtro es por lo general de una sola cámara, salvo en los sistemas de producción continua en donde se contempla divisiones completas dentro de los filtros; esto para tener la posibilidad de realizar mantenimiento a los mismos.

El sistema de limpieza de las mangas es por medio de un chorro de aire a gran velocidad que ingresa a la bolsa, ocasionando una expansión de la misma; haciendo que el material caiga en la tolva de recuperación y sea evacuado.

La limpieza de la mangas se realizan fila por fila. Para ello existe un tubo (flauta) que posee pequeños agujeros, de número igual al de mangas filtrantes ubicados en fila y ubicados en el medio de las mismas.

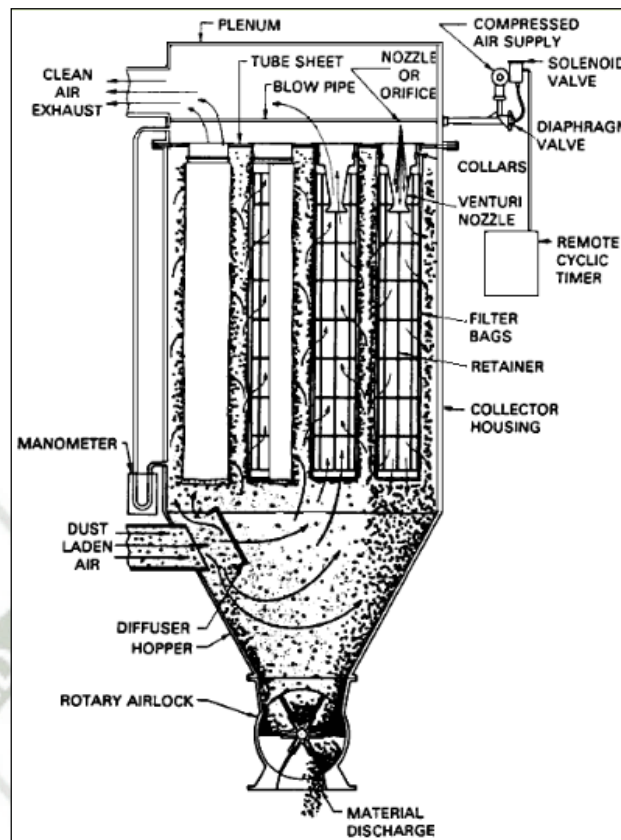
Esta flauta está separada de un pulmón de aire por una válvula de diafragma. Cada fila de mangas cuenta con su respectiva flauta y su respectiva válvula de diafragma.

El aire que sale de agujero de la flauta hacia el interior de la manga es acelerado gracias a un Venturi ubicado en la manga filtrante.

El ciclo de limpieza puede estar controlado por un temporizador y/o por un instrumento que mide la presión diferencial (Photohelic).

Para mangas filtrantes normales, se recomienda que la presión diferencial llegue de 3" a 6" de agua; en el caso de mangas tipo membrana (de papel) la presión deberá ser de 2" a 4" de agua.

Figura 3.21: Componentes estructurales de un filtro de mangas pulse jet



Fuente: Duda, 1977.

### 3.7.8 Compresor de tornillo de dos etapas

La función de un compresor es aspirar aire de la atmósfera y elevar su presión.

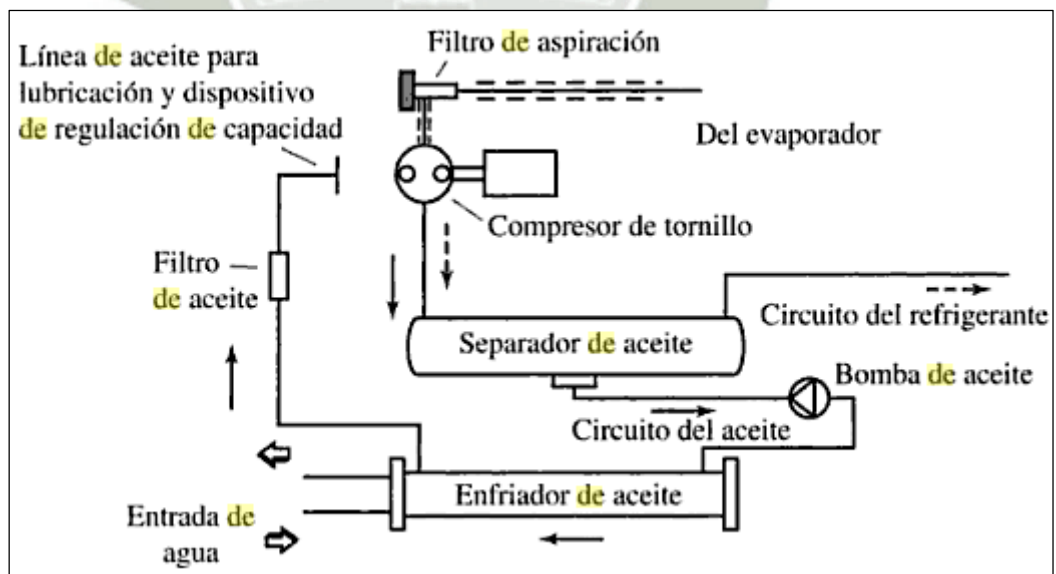
El compresor de tornillo se clasifica como un compresor rotativo de desplazamiento positivo, en este equipo la compresión del aire es continua. Constan de dos rotores llamados primario y secundario, que montados en ambos extremos sobre rodamientos, aseguran su exacta posición al interior del compresor.

El rotor primario de cuarto lóbulos o helicoides, es accionado directamente por el motor eléctrico y gira a la misma velocidad que este. Mediante un sistema de rodamientos, el rotor primario transmite el movimiento al rotor secundario, que tiene seis lóbulos o helicoides y es del mismo diámetro, pero gira a menor velocidad y en sentido contrario; entre los dos rotores existe una separación muy pequeña.

Al girar ambos rotores dentro de la cavidad del compresor y debido a esta pequeña separación, se producen las aberturas de espacios en la zona de aspiración que con el giro van disminuyendo, con lo que el aire se traslada y comprime hacia el otro extremo de los rotores, donde se produce la descarga.

Estos compresores llevan separadores de aceite, este es inyectado a lo largo de los husillos para su lubricación y sellado al mismo tiempo, lo que facilita la compresión del aire.

Figura 3.22: Sistema de un compresor de tornillo de dos etapas



Fuente: Franco, 2006.

## CAPITULO IV

### MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD RCM

#### 4.1 Definiciones de mantenimiento de sistemas

Según Dunn (2005), existe un largo camino para conseguir una comprensión estandarizada de los términos fundamentales relacionados a la rutina de los profesionales de mantenimiento; por lo tanto cada autor o institución cuando presenta algún trabajo o investigación, elige los conceptos más utilizados en su medio ambiente.

Los siguientes conceptos analizan la definición del mantenimiento de sistemas:

Según Duffuaa, Raouf, Dixon (2009), el mantenimiento se define como la combinación de actividades mediante las cuales un equipo o un sistema se mantienen en, o se restablece a, un estado en el que puede realizar las funciones designadas. Es un factor importante en la calidad de los productos y puede utilizarse como una estrategia para una competencia exitosa.

Conforme con Díaz, Quimbiurco (2008), se define al mantenimiento como un conjunto de actividades físicas emprendidas sobre una organización que se realizan sobre un activo (planta, equipamiento, edificaciones), para asegurar que continúe desempeñando las funciones que se esperan de él, dentro de su contexto operacional.

Según Martínez (2007), el mantenimiento industrial, es una actividad dirigida a conservar los equipos e instalaciones en condiciones óptimas de funcionamiento, durante un periodo predeterminado y al menor costo, contribuyendo así a lograr los objetivos de la organización y brindando satisfacción a las expectativas de las partes interesadas, es decir: los dueños de la empresa, sus empleados, clientes y proveedores, así como de la sociedad donde la organización desarrolla sus actividades productivas.

El Diccionario en línea de la Real Academia Española de la Lengua 22 edición (2001), define el mantenimiento como “el conjunto de operaciones y cuidados necesarios, para que instalaciones, edificios, industrias, puedan seguir funcionando adecuadamente”.

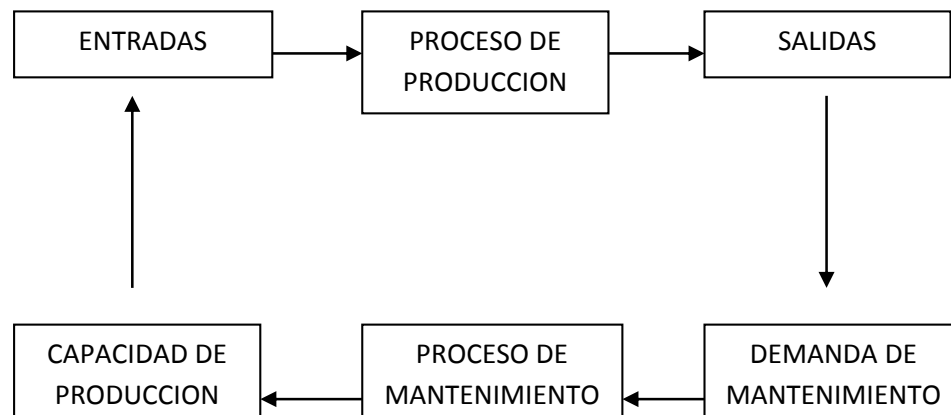
Una de las mejores definiciones del mantenimiento fue presentada por Gits (1992) y fue la siguiente proposición:

El proceso principal en una organización industrial es la producción, en la cual sus insumos (materiales, energía, potencial humano), se transforman en salidas (producto terminado). Este proceso de transformación utiliza un sistema técnico.

Un sistema técnico es un conjunto de elementos físicos que cumplen una función específica. El estado del sistema técnico es la habilidad física considerada relevante para el cumplimiento de su función. Este estado puede ser alterado por causas externas, envejecimiento y uso, que conduzcan inevitablemente a salidas de producción secundarias que demande mantenimiento.

El mantenimiento es la suma de actividades necesarias para mantener sistemas y restaurarlos en el estado necesario para realizar la función de producción. (Figura 4.1).

Figura 4.1: Relación entre el proceso de producción y el mantenimiento



Fuente: Luiz, 2003.

Para que el proceso de mantenimiento pueda apoyar, preservar y en última instancia, perfeccionar las metas organizacionales, es necesario aplicar correctamente las técnicas y medidas administrativas, lo que implica el uso de conocimientos técnicos, administrativos, organizacionales y especialmente del negocio.

## 4.2 Generaciones del mantenimiento

Hasta la década de 1980 la industria de la mayoría de los países occidentales tenía un objetivo bien definido: Obtener el máximo de rentabilidad para una inversión dada.

Con la penetración de la industria oriental en el mercado occidental, el consumidor pasó a ser considerado un elemento importante en las adquisiciones, o sea, exigir la calidad de los productos y los servicios suministrados, y esta demanda hizo que las empresas considerasen este factor calidad como una necesidad para mantenerse competitivas, especialmente en el mercado internacional. Esta exigencia no se debe atribuir exclusivamente a los asiáticos, ya que en 1975 la Organización de las Naciones Unidas definía a la actividad final de cualquier entidad organizada como los esfuerzos conjuntos de las operaciones y el mantenimiento, donde al segundo término le pueden ser atribuidas las siguientes responsabilidades:

- Reducción del tiempo de paralización de los equipos que afectan la operación.
- Reparación, en tiempo oportuno, de los daños que reducen el potencial de ejecución de los servicios;
- Garantía de funcionamiento de las instalaciones, de manera que los productos o servicios satisfagan criterios establecidos por el control de la calidad y estándares preestablecidos.

Moubray (2004), distingue cuatro generaciones diferentes de mantenimiento. Cada una de las cuales representa las mejores prácticas utilizadas en una época determinada; la primera generación cubre el periodo entre 1930 y la segunda guerra mundial.

Con la llegada de la primera guerra mundial y con la implantación de la producción en serie, instituida por Ford, las fábricas pasaron a establecer

programas mínimos de producción y como consecuencia de esto, sintieron la necesidad de formar equipos que pudiesen efectuar reparaciones en máquinas en servicio en el menor tiempo posible.

En esta época la industria estaba poco mecanizada y por lo tanto los tiempos fuera de servicio no eran críticos, lo que llevaba a no dedicar esfuerzos en la prevención de los fallos de los equipos.

Además al ser maquinaria muy simple y normalmente sobredimensionada, los equipos eran muy fiables y fáciles de reparar, por lo que no se hacían revisiones sistemáticas salvo las rutinarias de limpieza y lubricación. El único mantenimiento que se realizaba era el de reparar cuando se avería, es decir, mantenimiento correctivo.

La segunda generación se inicia desde la segunda guerra mundial, la cual provocó un fuerte aumento en la demanda de toda clase de bienes. Este cambio unido al acusado descenso en la oferta de mano de obra que causó la guerra, aceleró el proceso de mecanización de la industria.

En la década de 1930, cuando, en función de la necesidad de aumentar la rapidez de producción, la alta administración pasó a preocuparse, no solamente de corregir fallas sino también de evitar que las mismas ocurriesen, razón por la cual el personal técnico de mantenimiento pasó a desarrollar el proceso de prevención de averías que, juntamente con la corrección, completaban el cuadro general de mantenimiento, formando una estructura tan importante como la de operación.

Alrededor del año 1950, con el desarrollo de la industria para satisfacer los esfuerzos de la posguerra, la evolución de la aviación comercial y de la industria electrónica, los gerentes de mantenimiento observaron que, en muchos casos, el tiempo empleado para diagnosticar las fallas era mayor que el tiempo empleado en la ejecución de la reparación (Tabla 4.1), y seleccionaron grupos de especialistas para conformar un órgano asesor que se llamó ingeniería de mantenimiento y recibió las funciones de planificar y controlar el mantenimiento preventivo analizando causas y efectos de las averías con el objeto de controlar el aumento de los costos de mantenimiento y planificar las revisiones a intervalos fijos.

Tabla 4.1: Tiempos de diagnóstico y reparación según su naturaleza

<b>NATURALEZA</b>	<b>DIAGNOSTICO</b>	<b>REPARACION</b>
MECANICO	10%	90%
HIDRAULICO	20%	80%
ELECTRICO	60%	40%
ELECTRONICO	90%	10%

Fuente: Piedra, 2005.

La tercera generación se inició a mediados de la década de los 70, cuando se aceleraron los cambios a raíz del cambio tecnológico y de las nuevas investigaciones. La mecanización y la automatización siguieron aumentando, se operaba con volúmenes de producción muy elevados, cobraban mucha importancia los tiempos de parada debido a los costos por pérdidas de producción.

La Ingeniería de mantenimiento pasó a desarrollar criterios de predicción o previsión de fallas, con el objetivo de optimizar el desempeño de los grupos de ejecución del mantenimiento. Esos criterios, conocidos como mantenimiento predictivo o preventivo, fueron asociados a métodos de planificación y control de mantenimiento automatizados, reduciendo las tareas burocráticas de los ejecutantes del mantenimiento.

Alcanzó mayor complejidad la maquinaria y aumentaba la dependencia de ellas, se exigían productos y servicios de calidad, considerando aspectos de seguridad y de medio ambiente consolidándose el desarrollo del mantenimiento preventivo.

En los últimos años se ha vivido un crecimiento muy grande de nuevos conceptos de mantenimiento y metodologías aplicadas a la gestión del mantenimiento.

Hasta finales de la década de los 90, los desarrollos alcanzados en la tercera generación incluían:

- Herramientas de ayuda a la decisión como estudios de riesgo, modos de fallo y análisis de causas de fallo.
- Nuevas técnicas de mantenimiento, como el monitoreo de la condición.
- Equipos de diseño, dando mucha relevancia a la fiabilidad y a la manutención.
- Un cambio muy importante en el pensamiento de la organización hacia la participación, el trabajo en equipo y la flexibilidad.

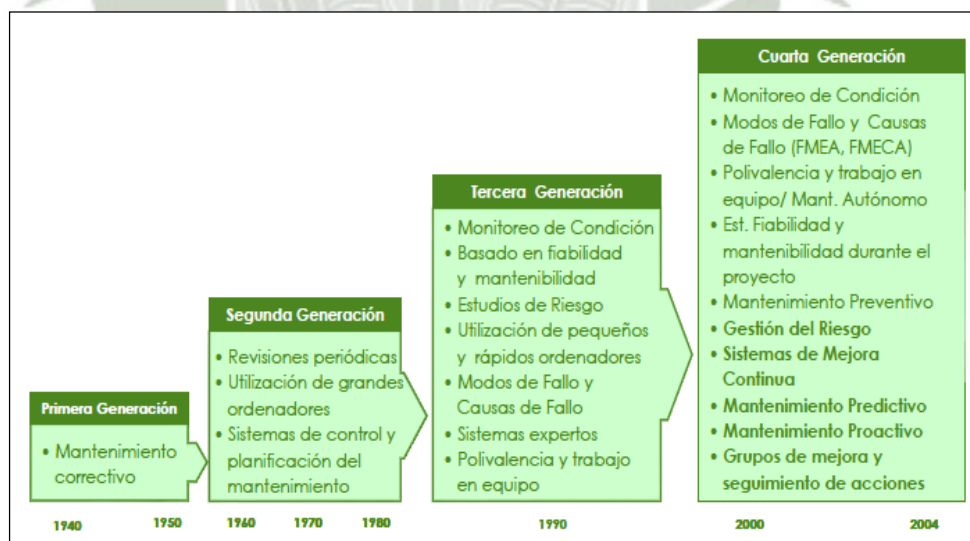
La cuarta generación se centra en la eliminación de fallos utilizando técnicas proactivas. Ya no basta con eliminar las consecuencias del fallo, sino que se debe de encontrar la causa de ese fallo para eliminarlo y evitar así que se repita.

Asimismo, existe una preocupación creciente en la importancia de la manutención y fiabilidad de los equipos, de manera que resulta clave tomar en cuenta estos valores desde la fase del diseño del proyecto.

Otro punto importante es la tendencia a implantar sistemas de mejora continua de los planes de mantenimiento preventivo y predictivo, de la organización y ejecución del mantenimiento.

En la figura se muestran las técnicas de mantenimiento usadas en las cuatro generaciones:

Figura 4.2: Evolución de las técnicas de mantenimiento



Fuente: Moubray, 2004.

Estas etapas evolutivas del mantenimiento industrial se caracterizaron por la reducción de costos y por la garantía de la calidad (a través de la confiabilidad y la productividad de los equipos) y cumplimiento de los tiempos de ejecución (a través de la disponibilidad de los equipos).

Los profesionales de mantenimiento pasaron a ser más exigidos, en la atención adecuada de sus clientes, o sea, los equipos, obras o instalaciones, quedando claro que las tareas que desempeñan, se manifiestan como impacto directo o indirecto en el producto o servicio que la empresa ofrece a sus clientes. La organización corporativa es vista, hoy en día, como una cadena con varios eslabones donde, evidentemente, el mantenimiento es uno de los de mayor importancia, en los resultados de la empresa.

El mejoramiento continuo de las prácticas de mantenimiento, así como la reducción de sus costos, son resultados de la aplicación del ciclo de calidad total como base, en el proceso gerencial.

#### **4.3 La calidad y su relación con el mantenimiento**

A lo largo del tiempo los conceptos de mantenimiento y calidad en las empresas han ido evolucionando de manera sustancial. El concepto de mantenimiento ha evolucionado hacia una concepción global, mientras que la calidad lo ha hecho hacia un concepto de calidad total.

Según Duffuaa, Raouf, Dixon (2009), el mantenimiento tiene un enlace directo con la calidad de los productos, el equipo con buen mantenimiento produce menos desperdicios que el equipo con mantenimiento deficiente.

García (2004) y Díaz, Quimbiurco (2008) mencionan que tradicionalmente, cuando el trabajo que primaba era el artesanal, hablar de calidad era sinónimo de un trabajo bien hecho, independientemente del esfuerzo o costo invertido para realizarlo.

Ureña (1998), menciona los cambios que se produjeron después del trabajo artesanal cuando los artesanos se organizaron en gremios; estos establecen criterios estrictos para la elaboración de los productos a través de especificaciones para los materiales de entrada, proceso y artículos terminados; auditorías de comportamiento de los miembros del gremio y controles para la exportación.

La revolución industrial, la cual produce una transformación en los gremios que desemboca en su desaparición, de tal forma que los artesanos pasan a ser operarios de las nuevas fábricas y se imponen nuevos métodos tales como:

- Especificaciones escritas para los materiales, procesos, artículos terminados y ensayos.
- Mediciones, junto con la utilización de los correspondientes instrumentos de medida y laboratorios de ensayo.
- Formas de normalización.

En el siglo XX el comercio presenta un crecimiento explosivo en volumen y complejidad, tanto en productos como en servicios, las exigencias en calidad son cada vez más rigurosas, lo cual provoca una búsqueda de nuevas fórmulas que permitan controlar todos los factores de producción y gestión de la calidad:

- Ingeniería de calidad que consiste en la aplicación de métodos estadísticos para el control de la calidad en la fabricación.
- Ingeniería de fiabilidad, la cual está basada en la mejora de la fiabilidad de los modelos y fórmulas, diseños y factores de seguridad, para conseguir entre otras cosas reducir los componentes de fabricación.

Las fábricas son sistemas de producción cada vez más complejos y es en ellas donde surgen los departamentos de calidad, cuya actividad está centrada en la calidad en sus diferentes etapas de inspección, ensayo, ingeniería de calidad y de fiabilidad.

Durante la segunda guerra mundial, y debido a la masiva demanda de productos bélicos, y también de productos no bélicos, tuvieron en muchos casos que priorizarse los tiempos de entrega de los pedidos frente a la calidad de los productos.

La necesidad evidente de mejorar la calidad, hace surgir nuevas herramientas como el control estadístico de la calidad, y asociaciones como la Asociación Americana para el Control de la Calidad (ASQC) que actualmente ha cambiado su denominación por Sociedad Americana para la Calidad (ASQ).

Después de la segunda guerra mundial, aparece el desarrollo de la calidad japonesa, estudian los métodos americanos y revolucionan la gestión de la calidad a través de las siguientes ideas:

- Liderazgo de la alta dirección en la revolución de la calidad.
- Todos los niveles se someten a la formación en calidad.
- Ritmo continuado e innovador.
- La mano de obra se integró a través de los círculos de calidad.

En los años 70, los avances tecnológicos consiguen mejoras en los procesos, sustitución de materiales y automatización facilitando un análisis más rápido y precisos de los productos.

A comienzos de los 80 la calidad sobrepasa el entorno propio de la fábrica convirtiéndose en un arma competitiva que abarca desde la concepción inicial del producto o servicio hasta su posterior utilización por parte del cliente o consumidor.

Esta última etapa de la evolución de la calidad esa estrechamente ligada al concepto de mejora continua. El objetivo de la mejora continua es optimizar los resultados actuando sobre los servicios, productos o procesos que sin poder ser considerados como deficientes ofrecen una oportunidad de mejora.

En la actualidad, la calidad se ha convertido en un factor estratégico clave, del que dependen la mayor parte de las organizaciones para mantener su posición en el mercado o incluso para asegurar su supervivencia.

En la tabla 4.2 se muestra la evolución del concepto de calidad.

Tabla 4.2: Evolución del concepto de calidad

	PRIMERA GENERACION	SEGUNDA GENERACION	TERCERA GENERACION	CUARTA GENERACION	QUINTA GENERACION
CONCEPTO	Calidad por inspeccion	Aseguramiento de la calidad	Proceso de calidad total	Proceso de mejora continua de la calidad	Reingenieria y calidad total
ENFOQUE	Herramienta	Herramienta	Estrategia de la empresa	Estrategia de la empresa	Rediseña la empresa
ORIENTACION	Al producto	Al proceso	Al cliente	A mejorar todas las actividades de la empresa hacia el cliente externo	A estructurar procesos completos hacia el cliente externo

Fuente: Moubray, 2004.

#### 4.4 Impacto del mantenimiento en la productividad y los costos

Díaz, Quimbiurco (2008), indican que la productividad es un concepto muy recurrente en los campos de la industria, economía y negocios en general. Una preocupación característica de la sociedad actual es el aseguramiento de la calidad, la productividad y la disminución de costos en las industrias. La productividad es un reto que quiere alcanzar cualquier empresa para poder tener una posición competitiva sostenida en el mercado nacional e internacional.

La productividad ha sido definida tradicionalmente como la relación que existe entre las entradas y las salidas en el proceso de transformación. Las salidas corresponden al producto terminado de cada industria. Las entradas son las unidades de recursos típicamente usados en la fabricación, que generalmente se dividen en cuatro categorías principales:

- Mano de obra directa, el cual indica el número de horas de mano de obra asignadas directamente al proceso de fabricación.
- Bienes de capital, es la inversión en planta, maquinaria o sistemas de información.
- Materiales, corresponde a las materias primas, componentes y materiales auxiliares que están presentes en el proceso.
- Procesos, procedimientos que configuran la misión del proceso de fabricación.

Esta última categoría incluye el mantenimiento, la ingeniería de procesos, la administración del personal de fabricación, los sistemas de control y la supervisión, así como otras actividades necesarias para que el proceso de fabricación funcione correctamente.

La productividad está relacionada con la eficiencia y eficacia, donde la eficiencia es la proporción de los resultados generados en relación con los resultados prescritos y la eficacia es el grado con que se logran las metas u objetivos de interés para la empresa. Entonces la eficiencia del mantenimiento es tan bien que la organización usa el equipo o maquinaria para producir sus productos, y la eficacia es que tanto la organización alcanza sus objetivos de cero fallas, mínimo mantenimiento correctivo y mayor disponibilidad de equipo.

El mantenimiento es un medio para obtener productividad para una empresa, el hecho de lograr mayores niveles de disponibilidad de los equipos productivos incrementara la producción, además ayuda a mantener las condiciones

adecuadas en los equipos para asegurar los estándares de calidad del producto y reducir los costos de mantenimiento.

El planear, programar, coordinar y ejecutar las tareas de mantenimiento en forma eficiente logran disminuir los paros por fallas de equipo y maquinaria, además de mantener cierto estado del equipo, alargando su calidad y tiempo de vida.

Según Duffuaa, Raouf, Dixon (2009), el control de los costos de mantenimiento es una función de la filosofía del mantenimiento, el patrón de operación, el tipo de sistema, los procedimientos y las normas adoptadas por la organización, la reducción y el control de costos se utiliza como una ventaja competitiva en el suministro de productos y servicios.

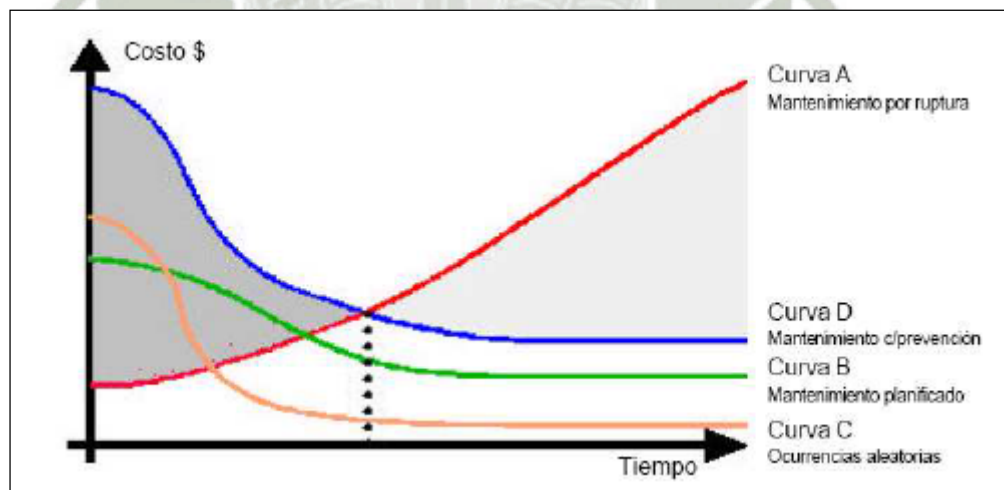
Según Díaz, Quimbiurco (2008), en el aspecto de los costos el mantenimiento correctivo a lo largo del tiempo presenta una tendencia ascendente, debido a la reducción de la vida útil de los equipos y la consecuente depreciación del activo, pérdida de producción o calidad de los servicios, aumento de adquisición de repuestos, pago de horas extras del personal de ejecución del mantenimiento, ociosidad de mano de obra operativa, pérdida de mercado y aumento de riesgos de accidentes.

La implantación de un control y planificación del mantenimiento, buscando la prevención o predicción de la falla, presenta una configuración de costos invertida y tendencia a valores estables, considerando el costo total de una parada de equipo, como la suma del costo del mantenimiento, que incluye: costos de mano de obra, repuestos, materiales, combustibles y lubricantes y el

costo de indisponibilidad que incluye: costo de pérdida de producción (horas no trabajadas), debido a la mala calidad del trabajo, falta de equipos, costo por emergencias, costos extras para reorganizar la producción, costo por repuestos de emergencia, penalidades comerciales e imagen de la empresa.

La inversión inicial de mantenimiento planificado es mayor que el no planificado y no elimina totalmente las fallas aleatorias, cuyo alto valor inicial es justificado por la inexperiencia del personal del mantenimiento que al actuar en equipo, altera su equilibrio operativo. Con el pasar del tiempo y al ganar experiencia, el mantenimiento aleatorio tiende a valores reducidos y estables. La suma general de los gastos de mantenimiento planeado y aleatorio, identificado como mantenimiento preventivo, a partir de un determinado tiempo pasa a ser inferior al del mantenimiento correctivo.

Figura 4.3: Costos de mantenimiento en relación al tiempo



Fuente: Díaz, Quimbiurco; 2008.

#### 4.5 Estrategias de mantenimiento

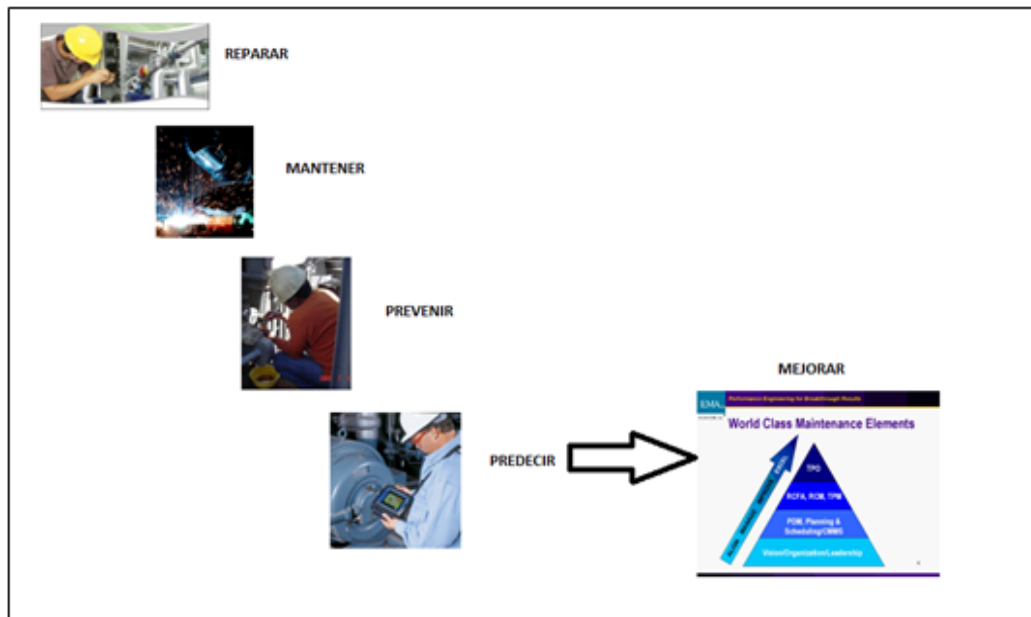
Según Díaz, Quimbiurco (2008), indican que las necesidades de las industrias en los periodos analizados en la evolución del mantenimiento pueden resumirse en la secuencia que se muestra en la figura 4.4, en la cual se aprecia la necesidad de pasar del hecho de reparar hacia un concepto de mejorar.

De esta manera se genera la interrogante de porque el mantenimiento tiene que llevar el mayor peso en el cumplimiento y satisfacción de las necesidades de producción y no se resuelven estos aspectos desde el punto de vista del diseño.

La razón lógica es que si las maquinas se produjeran con niveles elevadísimos de confiabilidad, muchos requisitos estarían satisfechos automáticamente sin la necesidad de los esfuerzos del mantenimiento. Sin embargo estas máquinas serian sumamente costosas para estas condiciones.

La maquinaria en general se concibe y se produce en costos medios, por ello la acción de mantenimiento es vital para garantizar la parte de confiabilidad que se realiza en la utilización y que es de gran magnitud en la mayoría de máquinas convencionales.

Figura 4.4: Evolución de las estrategias de mantenimiento



Fuente: Díaz, Quimbiurco; 2008.

Piedra (2005) refiere que las estrategias que ha desarrollado el mantenimiento para organizar, ejecutar y controlar sus acciones y responder a las exigencias durante los años se distinguen entre sí por:

- El tipo de control que ejercen sobre el estado de las máquinas.
- Los medios utilizados en la realización de este control.
- Las instalaciones sobre las que actúa.
- El volumen de medios que despliegan.

Un sistema óptimo de mantenimiento integral debe hacer uso de las clases o grupos de mantenimiento, clasificándolas y descubriendo las ventajas que cada una puede aportar a la empresa.

#### 4.5.1 Mantenimiento correctivo

Duffuaa, Raouf, Dixon (2009), mencionan que este tipo de mantenimiento solo se realiza cuando el equipo es incapaz de seguir operando. No hay elementos de planeación para este tipo de mantenimiento. Este es el caso que se presenta cuando el costo adicional de otros tipos de mantenimiento no puede justificarse. Este tipo de sistema a veces se conoce como operación hasta la falla y es aplicada comúnmente en los componentes electrónicos.

Díaz, Quimbiurco (2008), mencionan los tipos de mantenimiento correctivo que se presentan normalmente:

- Reparación de fallas: El equipo o maquina defectuosa es restaurado a su estado operacional.
- Salvamento: Esta categoría está relacionada con la disposición de material no reparable y el uso de material de salvamento para reparaciones, overhaul y reconstrucciones de equipos no reparables.
- Reconstrucción: Está relacionado con la restauración de un activo a un patrón estándar tan cercano como sea posible al estado original de funcionamiento, esperanza de vida y apariencia. Esto se logra mediante el desmontaje completo, inspección de todos los componentes, reparación y reemplazo de componentes desgastados y fuera de servicio de acuerdo con especificaciones originales y tolerancias de fabricación para finalmente ensamblar nuevamente y probar según directrices de producción.

- Overhaul: Reacondicionamiento de algún activo a su óptimo estado funcional total de acuerdo a estándares utilizables en mantenimiento, usando la inspección y reparación sólo como apropiadas estrategias.
- Servicio: El servicio puede ser necesitado debido a la acción de ejecutar el mantenimiento correctivo, como por ejemplo, soldadura, recarga en sistemas de aire acondicionado o refrigeración.

#### **4.5.2 Mantenimiento preventivo**

Díaz, Quimbiurco (2008), indican que el mantenimiento preventivo concibe la realización de intervenciones de carácter preventivo y programado con el objetivo de disminuir la cantidad de fallos aleatorios. Con el accionar se introducen nuevos costos, pero estos se reducen en las reparaciones, las cuales disminuyen en cantidad y complejidad. El sistema preventivo requiere de un personal de mayor nivel para ejecutar las investigaciones y estudios que justifiquen las acciones que se programan, su periodicidad y su propia realización.

Se logra una mayor vida útil de los activos aumentando eficiencia y calidad en el trabajo que realizan. Incrementan la disponibilidad, la seguridad operacional y el cuidado al medio ambiente. Además el mantenimiento preventivo garantiza la planificación de recursos con producción. Como aspectos negativos se señala el costo del accionar obligatorio por plan, las afectaciones en mecanismos y sistemas que se deterioran por los continuos desmontajes y la limitación de la vida útil de elementos que se cambian con antelación a su estado limite.

El mantenimiento preventivo básicamente consta de siete elementos.

- Inspección: Inspecciones periódicas en materiales y equipos para determinar su rendimiento físico, mecánico, eléctrico de acuerdo a especificaciones estandarizadas.
- Servicio: Limpieza, lubricación, recarga, preservación, etc. periódica de activos para prevenir la frecuencia de fallas iniciales.
- Calibración: Determinación periódica del valor de características de algún activo comparando con patrones o estándares de referencia; la cual consiste en la reparación de dos instrumentos, uno de los cuales es de estándares certificados de precisión conocida; para detectar y ajustar cualquier discrepancia en la exactitud del parámetro que es comparado al valor estándar establecido.
- Prueba: Pruebas o chequeos periódicos para determinar funcionalidad y determinar degradación mecánica o eléctrica.
- Alineación: Realizar cambios a elementos específicos variables de algún activo con el propósito de alcanzar un funcionamiento óptimo.
- Ajuste: Ajuste periódico de elementos variables en activos con el fin de obtener el funcionamiento óptimo del sistema.
- Instalación: Reemplazo periódico de objetos de vida limitada o que experimentan la degradación por tiempo y desgaste para mantener la tolerancia específica del sistema.

#### **4.5.3 Mantenimiento predictivo**

Díaz, Quimbiurco (2008), mencionan que la estrategia predictiva sirve para planificar el punto futuro de falla de un componente de maquina mediante el regular monitoreo de las condiciones mecánicas, de tal

forma que dicho componente pueda reemplazarse con base en un plan, justo antes de que falle.

El uso del mantenimiento predictivo consiste en establecer, en primer lugar, una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente. Esto se logra mediante la toma de lecturas en intervalos periódicos hasta que el componente falle.

Las inspecciones a realizarse en este tipo de mantenimiento pueden estar programadas y ser cumplidas con cierta periodicidad (monitoreo discreto) o pueden ejecutarse en forma constante con aparatos situados sobre la maquina (monitoreo continuo). El monitoreo continuo tiene la ventaja de indicar la ejecución de la acción correctiva lo más cercano al estado límite del elemento aprovechándose al máximo la vida útil.

Este sistema es el que garantiza el mejor cumplimiento de las exigencias a mantenimiento en los últimos años pues logra las mejores paradas, la mayor calidad y eficiencia en las maquinas, garantiza la seguridad y protección del medio ambiente.

Como aspectos negativos se señalan la necesidad de personal más calificado para las investigaciones y la propia ejecución de las inspecciones y lo más considerable que es el elevado costo de los equipos para la realización del monitoreo operacional de los equipos.

Para seleccionar la técnica del análisis predictivo es necesario entender el comportamiento del elemento al producirse el fallo y los efectos que se provocan. En última instancia serán las consideraciones de tipo

económico y/o de seguridad las que lo decidirán. Los síntomas o efectos en los que se suelen basar estas técnicas pueden ser:

- Efectos dinámicos, vibraciones y ruidos.

Estos análisis nacieron fundamentalmente para prevenir averías en rodamientos de rodillos y bolas.

Los desgastes producen variaciones en los espectros de ruido y vibraciones. Se aplica con frecuencia a: Bombas centrifugas, motores, turbinas, torres de refrigeración, ventiladores, turbinas de gas, compresores centrífugos, compresores alternativos, generadores, reductores.

- Efectos químicos, cambios de composición química.
- Espectrometría y cromatografía.
- Efectos físicos, roturas y desgastes. Líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonidos, radiografías.

Estos análisis nacieron fundamentalmente para prevenir averías en los elementos de soporte de los motores de aviación. Las vibraciones en funcionamiento producen fisuras en la raíz de los soportes que con el tiempo se convierten en grietas peligrosas.

- Efectos térmicos, termografía.
- Efectos eléctricos, cambios en resistencia, conductividad y potencial dieléctrico.
- Efectos de partículas, emisión de partículas.

Estos análisis nacieron fundamentalmente para prevenir averías en rodamientos de fricción y engranajes de ruedas dentadas. Los desgastes producen partículas metálicas que se difunden en el aceite.

#### **4.6 Filosofías de mantenimiento**

##### **4.6.1 Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)**

Duffuaa, Raouf, Dixon (2009), indican que el mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM fue desarrollado por la industria de la aviación civil en Estados Unidos (FAA), la FAA comisionó a la empresa United Airlines para emprender un estudio de la eficacia de las reparaciones generales, basadas en el tiempo, de componentes complejos en los sistemas de los equipos de las aeronaves civiles. Existía la creencia de que estas reparaciones generales basadas en el tiempo no contribuían mucho para reducir la frecuencia de fallas y no eran económicas. Este estudio se llevó a cabo en el momento en que se estaban diseñando aeronaves de cuerpo amplio, y la complejidad de los sistemas de los equipos y sus componentes había crecido dramáticamente con respecto a los diseños anteriores, la conclusión clave fue que las reparaciones generales, basadas en el tiempo, de equipos complejos no afectaba de manera significativa, ni positiva ni negativamente en la frecuencia de fallas. En algunos equipos, en realidad la frecuencia de fallas era mayor inmediatamente después de una reparación general.

Este estudio demostró que la probabilidad condicional de falla ocurre en los primeros periodos de la edad del equipo, luego disminuye hasta una tasa constante de fallas.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad es una metodología lógica derivada de esta investigación en el sector de la aviación, y hace uso de la herramienta del análisis de modo de falla, efecto y grado crítico (FMECA).

El RCM asegura que se emprendan las acciones correctas de mantenimiento preventivo o predictivo y elimina aquellas que no producen ningún impacto en la frecuencia de fallas. Debido al enfoque riguroso para definir funciones, normas, mecanismo de falla, efectos y grado crítico, el sistema del equipo que está bajo revisión se entiende mucho mejor que antes de la revisión. El resultado de cada estudio del RCM del sistema de un equipo es una lista de acciones de mantenimiento, programas y responsabilidades. Estas, a su vez, dan por resultado una mejor disponibilidad, confiabilidad y rendimiento operativo del equipo, y eficacia en costos. Aun cuando el RCM favorece las tácticas del mantenimiento centrado en las condiciones, si la falla no da motivo a una preocupación en cuanto a la seguridad y no tiene un impacto económicamente significativo en la producción, una de las opciones presentadas en el árbol lógico es operar el equipo hasta que falle.

#### **4.6.2 Mantenimiento productivo total (TPM)**

Según Duffuaa, Raouf, Dixon (2009), el mantenimiento productivo TPM es un enfoque gerencial para el mantenimiento que se centra en la participación de todos los empleados de una organización en la mejora del equipo. Este método se desarrolló en el sector manufacturero

japonés, comenzando con la aplicación del mantenimiento preventivo al estilo norteamericano y europeo y avanzando hasta la aplicación de los conceptos de la administración de la calidad total y manufactura justo a tiempo al campo del mantenimiento de los equipos.

El instituto japonés de ingenieros de planta definió el TPM en 1971 con cinco metas claves:

- Maximizar la eficacia global de equipo, que incluye la disponibilidad, eficiencia en el proceso y calidad del producto.
- Aplicar un enfoque sistemático para la confiabilidad, la factibilidad del mantenimiento y los costos del ciclo de vida.
- Hacer participar a operaciones, administración de materiales, mantenimiento, ingeniería y administración en el control del equipo.
- Involucrar a todos los niveles gerenciales y a los trabajadores.
- Mejorar el rendimiento del equipo mediante actividades de grupos pequeños y el desempeño del equipo de trabajadores.

Los operadores del equipo son el punto central de las actividades del TPM. Aunque la mayoría de los operadores entienden lo que hace su equipo, pocos comprenden los mecanismos fundamentales sobre cómo funciona. El término “mantenimiento autónomo” se utiliza para describir las actividades de los operadores que se relacionan con el mantenimiento del equipo y con la naturaleza de estudio independiente de otras acciones de mejora del equipo. Los operadores realizarán tareas de limpieza, inspección, lubricación, ajustes, cambios de componentes menores y otras tareas de mantenimiento ligero que

requieren cierta capacitación e instrucción, pero no destrezas completas de mantenimiento. El operador gradualmente aprende como diagnosticar los problemas del equipo antes que se vuelvan serios.

En el TPM siempre que un equipo funciona por debajo del nivel requerido, la pérdida de funcionamiento se registra y se monitorea. Estas pérdidas pueden agruparse en seis categorías: descomposturas, preparación y ajustes, trabajo en vacío y paros menores, reducción en la velocidad, defectos y pérdidas de rendimiento. Las descomposturas y preparaciones ocasionan tiempo muerto y producen un impacto en la disponibilidad; la reducción de la velocidad tiene un impacto en el tiempo del ciclo, y los defectos y pérdidas de rendimiento tienen impacto en la calidad. La eficacia global del equipo, definida como el producto de disponibilidad, tiempo del ciclo y tasa de calidad, es la medida clave de eficacia del TPM. El operador y el trabajador de mantenimiento son capacitados para identificar problemas relacionados con la eficacia global del equipo y para realizar conjuntamente análisis de causas fundamentales para investigar las pérdidas.

El TPM fomenta el desarrollo de la planeación sistemática y el control del mantenimiento preventivo y correctivo, y apoya plenamente las actividades autónomas realizadas por el operador.

#### **4.6.3 Sistema de gestión de calidad**

Piedra (2005) indica que antes de los ochentas, el sector de mantenimiento no prestaba a la calidad la misma atención sistemática que le prestaban las organizaciones manufactureras, pero a partir de

esta década, el interés de la calidad comenzó a ingresar al sector de mantenimiento, este interés se ha expandido durante los noventa y ya en la actualidad es necesario que la calidad se maneje sistemáticamente en el mantenimiento. Las actividades de calidad tienen que abarcar toda la organización y no solamente las áreas donde se tenga contacto directo con el cliente, con la norma ISO 9000 los indicadores de calidad para el mantenimiento son fundamentales para el manejo del negocio.

#### **4.6.4 Estrategia de las cinco S**

Según Piedra (2005), las cinco S son el fundamento del modelo de productividad creado en Japón y hoy aplicado en empresas occidentales.

Son poco frecuentes las fábricas, talleres y oficinas que aplican en forma estandarizada las cinco S en igual forma como se mantienen las cosas personales a diario. Esto no debería ser así, ya que en el trabajo diario las rutinas de mantener el orden y la organización sirven para mejorar la eficiencia del trabajo y la calidad de vida en aquel lugar donde se pasa más de la mitad de la vida, ante esto nace la afirmación de que no vale la pena mantener el trabajo desordenado, sucio y poco organizado.

Por esto cobra importancia la aplicación de las cinco S. No se trata de una moda, un nuevo modelo de dirección o un proceso japonés, simplemente es un principio básico de mejorar la calidad de vida y hacer del sitio de trabajo un lugar donde valga la pena vivir.

La estrategia de las 5 S enfatiza aspectos básicos como los siguientes: utilizar la herramienta adecuada, el lubricante indicado, la información

correcta, el lugar asignado, el respeto por la hora señalada y el orden establecido, detalles que muchas veces parecen poco relevantes para los graves problemas que debemos afrontar a diario. Sin embargo, si se descuidan esos "pequeños detalles básicos", se está desatendiendo las causas de muchos problemas graves que requerirán atención urgente. Por lo general, este tipo de problemas tienen las siguientes características:

- Nadie considera que le corresponda la responsabilidad total de su ocurrencia.
- La forma en que pudo evitarse es obvia y sencilla, si se hubiera actuado a tiempo.
- Consume enormes cantidades de energía y recursos, varias veces los necesarios para evitarlos.
- Las personas viven resolviéndolos continua y reiteradamente, sin darse cuenta de que ellos mismos los que los estamos ocasionando por la manera de actuar.

La estrategia de las 5 S toma su nombre de cinco palabras japonesas: Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke.

#### **4.6.4.1 Seiri**

Significa que se debe diferenciar entre los elementos necesarios y los innecesarios, y descartar estos últimos. Una mirada minuciosa revela que sólo se necesita un pequeño número de objetos, ya que muchos de ellos no se utilizaran nunca o solo serán necesarios en un futuro lejano. Herramientas inservibles, máquinas obsoletas, piezas

rotas sobrantes, recipientes vacíos y rotos, bancales de madera, materias primas, productos discontinuados y defectuosos, contenedores, estantes, tarimas, revistas, libros y catálogos obsoletos, basura, artículos que no se requieren en el proceso, oficinas y construcciones inservibles, entre muchos otros. Es aconsejable retirar los elementos que no se usaran en los próximos treinta días, pues generan gastos innecesarios de gestión, de personal, de transporte, de falta de espacio. Con base en el conocimiento del proceso, se debe clasificar los elementos y agruparlos según un común denominador: su utilidad para desarrollar el trabajo, y cuál es el tiempo de uso.

Para eliminar lo innecesario existen dos grandes obstáculos: el apego a las cosas y el temor que muchas personas sienten cuando corren el riesgo de perderlas. Deshacerse de lo innecesario es el secreto de una buena organización. Sin embargo, es mucho más complicado de lo que parece, ya que no hay un método que permita liberar a las personas de lo que no necesitan; se considera que el tiempo para discernir si algo es o no necesario es tiempo perdido; a lo innecesario se le asocia un valor sentimental y por ello hay resistencia a desecharlo.

#### **4.6.4.2 Seiton**

Significa poner las cosas en orden, es decir, disponer en forma ordenada todos los elementos que quedan después del Seiri. En Occidente, la segunda S corresponde al vocablo inglés Straighten,

que significa poner en orden los elementos esenciales para tener fácil acceso a los mismos. Se ha dejado el número mínimo necesario de elementos, que ahora se debe clasificar según su uso y disponerlos como corresponde para minimizar el tiempo de búsqueda y optimizar el esfuerzo. En pocas palabras, se debe organizar lo necesario, lo que es sinónimo de estandarizar el almacenamiento de los objetos, lo que permitirá que cualquier persona pueda localizar cualquier elemento en forma rápida, tomarlo, utilizarlo y devolverlo fácilmente a su lugar. Para que todo esto se lleve a cabo con todo éxito, se requieren tres definiciones clave, a saber:

- Qué artículo se van a almacenar.
- Dónde se ubicará el artículo.
- Cuánto se pueden almacenar.

Para concretar esto, cada ítem debe tener un nombre, un espacio y un volumen designados.

Se debe especificar no solo la ubicación, sino que también el número máximo de unidades que dejaremos. Es aconsejable, demarcar un área en el piso con pintura para almacenar una determinada cantidad de unidades, así como colgar del techo un objeto que limite la cantidad de pilas que podemos concretar. Si nos referimos a materiales en proceso que alimentan al proceso siguiente, de esta forma se ha limitado el número de unidades fabricadas; todo exceso por sobre este número es innecesario, ya que no hay necesidad de producir más de lo que puede consumir el proceso siguiente. Se

debe recordar que cuanto más duro se trabaje amontonando materiales que no son absorbidos por el proceso siguiente, mayor será la cantidad de dinero que pierda la empresa. Cada ítem debe tener su propia ubicación, así como cada espacio en la planta debe tener su destino señalado. Algunos criterios útiles que ayudan a localizar más fácilmente los objetos, son los siguientes:

- Ordenar los artículos en estanterías, mediante claves numéricas o alfanuméricas.
- Determinar los lugares de almacenamiento según el tiempo de utilización: dejar a mano lo que se utiliza diariamente, un poco más lejos lo semanal, mensual, anual.
- Otro ordenamiento podría ser por tamaño, por peso, por proveedor, etc.
- Cada pared debe estar codificada, utilizando nombres como Pared A; Pared B. Luego, la ubicación de los elementos como bidones, tomas de agua, herramientas, moldes, etc. se referirán según estos nombres.
- Para que las herramientas estén al alcance de la mano, sean fáciles de recoger y de regresar a su sitio, es aconsejable pintar las siluetas sobre la superficie donde deben guardarse, lo que facilita saber cuándo están en uso.
- Los pasadizos también deben pintarse claramente: su destino es el tránsito por lo que deben estar siempre despejados, y no dejar nada allí.

#### 4.6.4.3 Seiso

Es sinónimo de limpieza permanente del entorno de trabajo, incluidas las máquinas y las herramientas, pisos y paredes, erradicando fuentes de suciedad. En Occidente, la tercera S está asociada al término Scrub (limpiar). Hay un axioma japonés que dice: "Seiso significa verificar".

Un operador que limpia una máquina puede descubrir muchos defectos de funcionamiento. Cuando la máquina está cubierta de aceite y polvo, es difícil identificar cualquier problema que se está originando. Al limpiarla, se puede detectar con facilidad una fuga de aceite, una grieta, tornillos flojos, y solucionar estas situaciones con facilidad. El Seiso contribuye a mejorar el mantenimiento preventivo de las instalaciones. En las fábricas japonesas es habitual observar al presidente de la empresa, el directorio y los gerentes y jefes vestidos con ropa de trabajo adecuada, con trapos y cepillos realizando las tareas de limpieza. Cada diez metros, aproximadamente, hay un conjunto de elementos de limpieza que está disponible para todos. Hay que predicar con el ejemplo, y aprender a limpiar con diligencia y humildad de manera cotidiana y esmerada. La limpieza en la empresa es toda una filosofía de mejoramiento que está estrechamente ligada a los resultados. Un lugar de trabajo limpio origina:

- Un ambiente agradable que influye en la motivación de todo el personal.

- Máquinas y equipos bien mantenidos, lo que se corresponde con costos bajos de mantenimiento correctivo y bajos porcentajes de materiales defectuosos.
- La reducción de las fuentes de contaminación de materiales, lo que influye en los bajos costos por desperdicios.
- Buena visibilidad, para detectar fallas antes de que se tornen graves, lo cual influye en la buena calidad y en menores costos.
- Que el avance logrado con las dos primeras "S" se consolide y mantenga.

La limpieza es un factor común de los procesos altamente productivos, y es una tarea que exige constancia y participación de todos. No es aconsejable subcontratar las tareas de limpieza en los procesos clave de la organización, debiendo recaer la responsabilidad en las mismas personas que trabajan en el sector. Está demostrado que cuando existen grupos de personas contratadas para las actividades de ordenamiento y limpieza, es altamente probable que el personal estable se desentienda de esas tareas. Entonces, es conveniente rotar las responsabilidades y ser equitativo con la carga de trabajo de limpieza en todos los integrantes de la organización.

#### **4.6.4.4 Seiketsu**

Es extender hacia las personas el concepto de pulcritud, y practicar continuamente los tres pasos anteriores. En Occidente, la cuarta S proviene del vocablo Systematize (Sistematizar), es decir, llevar a

cabo una rutina de limpieza y verificación. Las personas mantienen su aspecto adecuado, utilizando ropa de trabajo limpia, lentes, guantes, barbijos y zapatos de seguridad, y hacen de la ejecución de las tres primeras S un hábito. En las fábricas japonesas es muy común observar una gran cantidad de espejos sobre las paredes, con el fin de devolver continuamente la imagen de las personas para ayudarlas a mantenerse pulcras y presentables. Cada persona tiene otro equipo de trabajo disponible para ser utilizado de inmediato, en caso de necesidad. En las empresas existe un lavadero donde todos lavan y planchan los equipos de trabajo que se han ensuciado. Es muy común en las empresas ejecutar Seiri, Seiton y Seiso por primera vez, pero si no existe el convencimiento del esfuerzo diario, la situación volverá rápidamente a su situación original. La gerencia de planta debe diseñar sistemas y procedimientos que aseguren la continuidad de la estrategia 5 S, con su permanente apoyo, compromiso, respaldo e involucramiento. No es saludable prepararse especialmente para las ocasiones en que se recibirán visitas de clientes importantes, gastando cientos de litros de pintura, miles de litros de agua y detergente. Estos impulsos para limpiar y ordenar todo lo que está a la vista, no solo es cosmetología barata, sino que es un autoengaño para quien lo practica, a la vez que genera desconfianza entre los integrantes del grupo de trabajo. No solo es necesario parecer limpios y ordenados, sino que se debe serlo realmente.

El concepto del Ciclo "Deming" o PDCA (Planificar, Hacer, Comparar y Ajustar), se incorpora a las 5 S a través del Seiketsu, que indica las tareas de evaluación y retroalimentación del proceso, paso indispensable para la mejora continua del entorno.

Existen varias maneras de evaluar el nivel de cada etapa de las 5 S:

- Autoevaluación.
- Evaluación por parte de un consultor experto.
- Evaluación por parte de un superior.
- Una combinación de los tres puntos anteriores.
- Competencia entre diferentes grupos de Mejora Continua.

Se debe determinar dónde, cómo, qué y cuándo evaluar y se debe explicar a todos la necesidad de realizar la evaluación con el fin de que cada persona vaya controlando por sí misma su área, hasta llegar al autocontrol.

#### **4.6.4.5 Shitsuke**

Construir la autodisciplina y formar el hábito de comprometerse en las cinco S, mediante el establecimiento de estándares. Para Occidente, la última de las S proviene de Standarize (estandarizar). La autodisciplina consiste en respetar las reglas de juego, los acuerdos y compromisos, a partir del natural auto convencimiento. Sin disciplina, toda actividad de mejora a partir del trabajo en equipo estará destinada al fracaso. La disciplina es fundamental para potenciar el trabajo grupal, la armonía entre las personas y la sinergia del equipo. La disciplina nos marca el camino que conduce a

la formación de los hábitos, es decir, que se puedan ejecutar de manera natural ciertas tareas que antes presentaban dificultad. La clave está en la sucesiva repetición de esas tareas, hasta que se ejecuten de manera inconsciente.

La disciplina es algo indispensable, que se aprende para hacer la vida de las personas más tranquilas y efectivas, sin obstáculos ni problemas. La disciplina es la base de las sociedades civilizadas y es lo mínimo que se requiere para que una organización sea productiva. Las personas que continuamente practican las Cuatro primeras S, deben adquirir el hábito de hacer estas actividades como parte de su trabajo diario, con autodisciplina, en conformidad con las reglas que se han acordado. Al implementar el programa de las 5 S, la gerencia establece los estándares para cada uno de los cinco pasos, los que deben abarcar las formas de evaluación del progreso en cada una de las etapas. La autodisciplina es fundamental para todo proceso de mejora continua, ya que se puede confiar en que las personas con autodisciplina se presentarán puntualmente a trabajar, mantendrán ambientes de trabajo limpios, ordenados y seguros, en que se respeten los estándares existentes. Un lugar de trabajo disciplinado se caracteriza porque todas las personas, comenzando por su líder, cumplen habitualmente con los aspectos siguientes:

- Respetan la puntualidad y la asistencia.
- Limpian cotidianamente lo que ensucian.
- Cumplen lo que prometen.

- Utilizan el uniforme y equipos de seguridad según las normas establecidas.
- Realizan las actividades rutinarias conforme a los estándares.
- Devuelven a su lugar los objetos que han utilizado.
- Ejecutan las auditorías del Programa 5 S conforme a lo programado.

#### **4.6.5 Estrategia del proceso de Deming**

Deming creó el ciclo PHVA (Planificar, hacer o ejecutar, verificar o controlar y actuar) que refleja un mecanismo de evolución para la mejora continua en toda actividad con el fin de hacer lo correcto desde la primera vez.

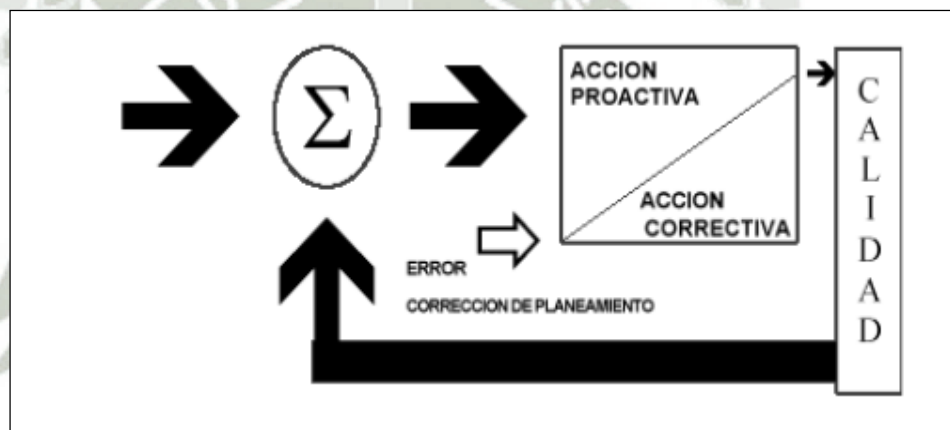
La planificación es simplemente la determinación de la secuencia de actividades necesarias para alcanzar los resultados deseados. Hacer es el acto de implantación del plan. Las actividades de planificación y ejecución son muy familiares. Cuando al implantar el plan no se alcanzan resultados, se elabora otro plan descartando el que presenta fallas. Siendo esto lo común, pero bajo el ciclo Deming se verifican los resultados de lo ejecutado para determinar la diferencia con el resultado esperado. Al actuar basados en el análisis, se determinan los cambios necesarios para mejorar el resultado y se repite el proceso, usando el nuevo conocimiento ganado para los planes futuros.

El ciclo es un proceso iterativo que busca la mejora a través de cada ciclo, su filosofía básica es hacer pequeños incrementos, en lugar de hacer grandes rupturas a la vez. El enfoque seguro y progresivo de

aprender de la experiencia y construir con éxito sobre la base de la experiencia pasadas lleva a numerosas ganancias que se acumulan en el tiempo pueden ser superiores a las mejoras.

La metodología propuesta por Deming para la gestión de la calidad controla el proceso de obtención de un resultado deseado sin que ocurran desvíos con relación a las expectativas, pudiendo considerarse como un sistema de control a retroalimentación del proceso de la calidad.

Figura 4.5: Sistema de control a retroalimentación del proceso de calidad



Fuente: Piedra, 2005.

#### 4.6.5.1 Planear

Cada una de las acciones o atenciones que requieran los equipos, las modificaciones que se realicen en los sistemas, así como los proyectos que se ejecuten, deben participar de todo un buen proceso de planeación para ubicar en esta fase las potencialidades, obstáculos que se han de superar e incluso valorar todos los recursos requeridos y existentes.

La planeación adecuada, buscando un resultado de calidad se basa en la aplicación de tecnologías adecuadas, trabajo interdisciplinario y en equipo, la formulación de puntos de control que sean para el proceso enriquecedores y que revelen precisamente si se trabaja con el concepto de calidad.

Es vital planear, sin importar que tan grande es el trabajo a realizar.

#### **4.6.5.2 Hacer o ejecutar**

Significa poner en práctica lo planeado, buscando siempre la eficiencia y el buen resultado en cada una de las acciones requeridas sin dejar de lado que se debe cumplir con los requisitos y criterios de aceptación ya delineados en la planeación.

Se requiere dar un constante seguimiento al proceso de implementación y es importante recordar que mediante la medición se puede determinar adecuadamente si algo es bueno o no.

#### **4.6.5.3 Verificar o controlar**

Significa decidir si los resultados cumplen con los requisitos y criterios que en un principio se definieron.

Se debe partir de la objetividad. De allí que es vital que la medición se base en géneros cuantitativos en vez de cualitativos.

Realizar un trabajo, una reparación, modificación o proyecto y que de cómo resultado que todo funcione, no necesariamente indica que el trabajo fue de calidad y que se haya cumplido anteriormente el proceso de calidad. Todo debe enfocarse principalmente en función de si se cumplieron tanto los procedimientos establecidos junto con

los requisitos predefinidos y lo que es más importante; si se logró la satisfacción del cliente.

#### **4.6.5.4 Actuar**

En una gestión de mantenimiento siempre hay cosas que no salen como son esperadas, más la perseverancia y el mejoramiento ha de ser un aliado en cualquier labor a desempeñar, en especial en la aplicación de un servicio como lo es la gestión de mantenimiento.

La aplicación de planear, hacer, verificar y actuar no es más que una herramienta que se puede utilizar fácilmente en la gestión de mantenimiento tanto como modelo para la resolución de problemas, como para mejorar algo dentro del proceso de calidad. Siempre que se sistematice esta u otra forma de trabajar en grupo, se hará que el conocimiento sobre los equipos, sistemas y situaciones imprevistas sea incrementado paulatinamente y los resultados del trabajo tiendan necesariamente a ser mejores.

#### **4.6.6 Dirección por políticas (Hoshin Kanri)**

Piedra (2005) menciona que es posible que la dirección por políticas o Hoshin Kanri en japonés sea una estrategia de dirección que permite formular, desarrollar y ejecutar los planes de la empresa con la participación de todos los integrantes de la organización. La dirección por políticas se emplea para asegurar el crecimiento a largo plazo, prevenir la recurrencia de situaciones no deseadas en la planificación y problemas de ejecución.

La dirección por políticas se realiza en ciclos anuales y busca alcanzar las grandes mejoras aplicando las ideas y técnicas de control de calidad en el proceso de gestión de la empresa. En igual forma como en un proceso industrial se realizan actividades de control de proceso, la dirección por políticas realiza actividades de control de calidad en el proceso directivo, asegurando la mínima variabilidad en el logro de los resultados de todas las personas integrantes de la organización. La dirección por políticas permite coordinar las actividades de cada persona y equipo humano para el logro de los objetivos en forma efectiva.

Esta estrategia permite organizar y dirigir la totalidad de actividades que promueve el mantenimiento productivo total TPM.

Se orienta a aquellos sistemas que deben ser mejorados para el logro de los objetivos estratégicos. Por ejemplo, la eliminación sistemática de todo tipo de despilfarros que se presentan en el proceso productivo. Participación y coordinación de todos los niveles y departamentos en la planificación, desarrollo y despliegue de los objetivos anuales y sus medios para alcanzarlos.

Planificación y ejecución fundamentada en hechos. Formulación de metas y planes en cascada a través de toda la organización apoyándose en las verdaderas capacidades de la organización.

## 4.7 Mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM

### 4.7.1 Definición

Según Moubray (2004), es un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual. El RCM permite determinar la forma más efectiva de manejar el mantenimiento. Su objetivo central es el aumento de la confiabilidad con el costo más efectivo posible. Costo efectivo no significa el menor costo: es el menor costo necesario para alcanzar la confiabilidad deseada y podría ser mayor que el que se tenía al principio.

### 4.7.2 Ventajas

- Mayor seguridad e integridad ambiental.

El RCM reduce o elimina los riesgos identificables concernientes a seguridad de los activos y el medio ambiente, incorporándolos a la toma de decisiones de mantenimiento.

- Mayor funcionamiento operacional

El RCM permite asociar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para cada activo y también las acciones derivadas en caso que no se pueda aplicar el mantenimiento.

- Mayor costo – eficacia del mantenimiento

El RCM centra su atención en las acciones de mantenimiento de mayor impacto en el desempeño de la planta lo que asegura que toda inversión se realice en áreas donde se obtengan los mejores resultados.

- Mayor vida útil de componentes costosos

Se alcanza la reducción de los costos de mantenimiento por unidad producida.

- Mayor motivación del personal y trabajo en equipo.

El proceso de implementación del RCM requiere del involucramiento e interacción del personal de las distintas áreas de la empresa, incrementando el sentido de pertenencia y fomentando el trabajo en equipo.

#### **4.7.3 Desventajas**

- Debido a la complejidad del proceso de implementación, se requiere personal con conocimiento necesario para la aplicación de la metodología y el desarrollo de procedimientos.
- Los resultados generalmente son a mediano y largo plazo lo cual puede ser un motivo de descontento por parte de las jefaturas que exigen, en su mayoría, resultados inmediatos.
- Los paradigmas antiguos de mantenimiento son difíciles de cambiar en el personal cuya mentalidad se enfoca en un mantenimiento tradicional, siendo insensibles al cambio.

#### **4.7.4 Jerarquización de activos, análisis de criticidad.**

Moubray (2004), indica que el análisis de criticidad es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Para realizar un análisis de criticidad se debe definir un alcance y propósito

para el análisis, establecer los criterios de evaluación y seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas objeto del análisis. Matemáticamente, la criticidad se puede expresar como:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia} \quad (4.1)$$

Donde la frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado y la consecuencia está referida con: el impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente. En función de lo antes expuesto se establecen como criterios fundamentales para realizar un análisis de criticidad los siguientes:

- Impacto en la seguridad.
- Impacto en el medio ambiente.
- Nivel de producción manejado.
- Impacto en la producción.
- Tiempo promedio para reparar.
- Impacto en el mantenimiento.

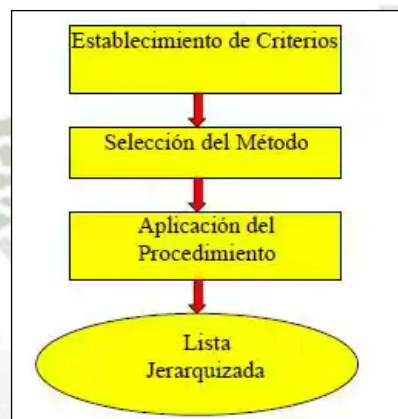
Matemáticamente se puede expresar como:

$$\text{Consecuencia} = (\text{Seguridad} + \text{Ambiente} + (\text{Nivel de producción manejado} + \text{tiempo promedio para reparar} + \text{Impacto en la producción}) + \text{Impacto en el mantenimiento}) \quad (4.2)$$

Un modelo básico de análisis de criticidad, es equivalente al mostrado en la figura 4.6. El establecimiento de criterios se basa en los seis criterios fundamentales nombrados anteriormente. Para la selección del

método de evaluación se toman criterios de ingeniería, factores de ponderación y cuantificación. Para la aplicación de un procedimiento definido se trata del cumplimiento de la guía de aplicación que se haya diseñado. Por último, la lista jerarquizada es el producto que se obtiene del análisis.

Figura 4.6: Modelo básico de criticidad



Fuente: Huerta, 2001.

Emprender un análisis de criticidad tiene su máxima aplicabilidad cuando se han identificado al menos una de las siguientes necesidades:

- Fijar prioridades en sistemas complejos.
- Administrar recursos escasos.
- Determinar impacto en el negocio.
- Aplicar metodologías de confiabilidad operacional.

El análisis de criticidad aplica en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieran ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso o negocio donde

formen parte. Sus áreas comunes de aplicación se orientan a establecer programas de implantación y prioridades en los siguientes campos.

- Mantenimiento e inspección.
- Materiales.
- Disponibilidad de planta.
- Personal.

#### **4.7.5 Contexto Operacional**

Moubray (2004) menciona que es importante tener claro la definición de unidades de proceso y sistemas:

##### **4.7.5.1 Unidades de Proceso**

Se define como una agrupación lógica de sistemas que funcionan unidos para suministrar un servicio y al procesar y manipular materia prima e insumo.

##### **4.7.5.2 Sistemas y Subsistemas**

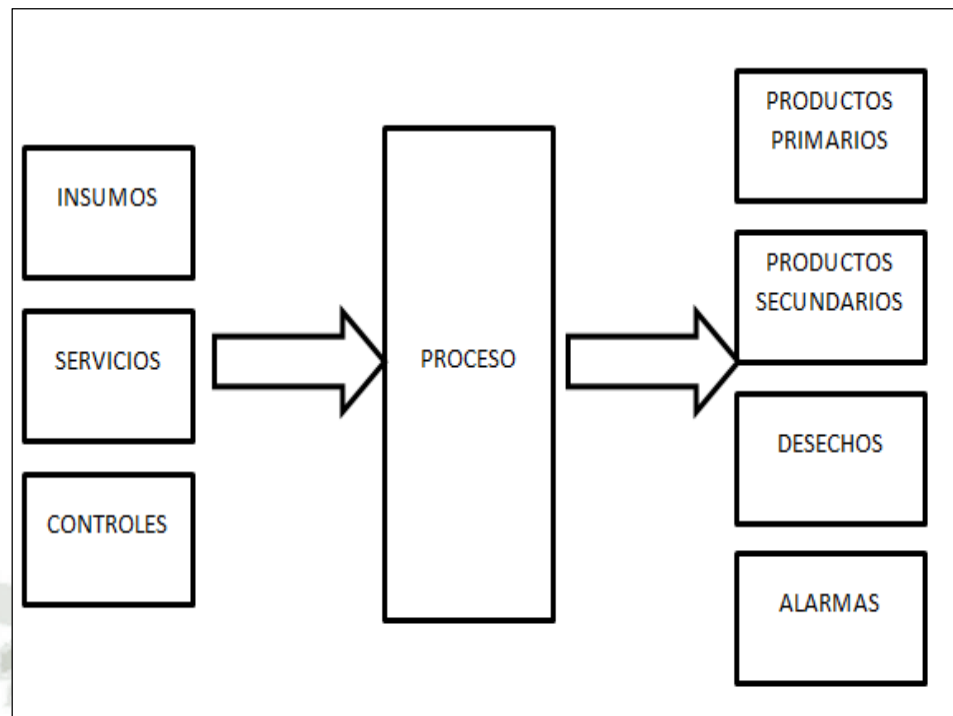
Conjunto de elementos interrelacionados dentro de las unidades de proceso que tienen una función específica.

##### **4.7.5.3 Diagrama EPS**

El diagrama de entrada, proceso y salida es una herramienta que facilita la visualización del sistema para su posterior análisis.

En este diagrama se visualizan los insumos, servicios y controles como entradas mientras que los productos primarios, secundarios, desechos y alarmas de los controles.

Figura 4.7: Diagrama de proceso



Fuente: Adaptado de Moubray, 2004.

#### 4.7.6 Las siete preguntas del RCM

Moubray (2004), indica que cualquier proceso RCM debe responder satisfactoriamente a siete preguntas en la secuencia indicada.

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional? (funciones).
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas necesidades? (fallas funcionales).
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional? (modos de falla).
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla? (efectos de falla).
- ¿En qué sentido es importante la falla? (consecuencias de falla).

- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir la falla? (tareas proactivas).
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada? (tarea de búsqueda de fallas, rediseño o RTF).

La norma SAE JA1011 establece un conjunto de criterios que debe satisfacer una metodología para poder llamarse RCM, y están basados en las 7 preguntas del proceso.

#### 4.7.6.1 Funciones

Antes de definir el proceso a aplicar para determinar que debe hacerse para que un activo físico continúe haciendo aquello que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional.

Por eso el primer paso en el proceso RCM es definir funciones de cada activo en su contexto operacional, junto con los parámetros de funcionamiento deseados.

Moubray (2004) menciona que lo que los usuarios esperan que sea realizado por los activos puede ser dividido en dos categorías:

- Funciones primarias: Resumen en primera instancia el porqué de la adquisición del activo. Esta categoría cubre temas como velocidad, flujo, caudal, producción, capacidad de carga o almacenaje, calidad del producto y servicio al cliente.
- Funciones secundarias: Indican lo que se espera del activo que haga más allá de simplemente cubrir sus funciones primarias. En esta categoría se cubre las expectativas que los usuarios relacionados con el área de seguridad, control, contención,

confort, integridad estructural, economía, protección, eficiencia operacional, cumplimiento de las regulaciones ambientales y hasta apariencia del activo.

#### 4.7.6.2 Fallas funcionales

Moubray (2004), indica que es el estado en el cual el activo no puede cumplir una función acuerdo al parámetro de funcionamiento que el usuario considera aceptable.

Es importante definir la falla en función de la pérdida de una función específica en lugar de la falla del activo en conjunto. Para esto deben considerarse dos puntos adicionales.

- Falla total:

Estado de falla en el cual el activo pierde su función principal en su totalidad.

- Falla parcial:

Estado de falla en el cual el activo cumple con su función principal fuera de los parámetros de desempeño especificados.

El mantenimiento cumple con sus objetivos cuando se adopta una política correcta de manejo de fallas. Previo a esto, debe identificar que fallas deben ocurrir, esto se denomina el análisis AMECF, el cual propone identificar las circunstancias que llevaron a la falla (modos de falla) e identificar que eventos pueden provocar que el activo falle (efectos y consecuencias de falla).

#### 4.7.6.3 Modos de falla

Moubray (2004), menciona que es un evento simple que causa una falla funcional.

Una vez identificada la falla funcional el siguiente paso es identificar todos los hechos que pueden haber causado cada estado de falla, los que se les denomina modos de falla. Los modos de falla incluyen aquellos que han ocurrido en equipos similares operando en el mismo contexto, también incluyen fallas que actualmente están siendo prevenidas por programas de mantenimiento existentes así como fallas que aún no han ocurrido pero son consideradas altamente posibles.

La mayoría de listas tradicionales de modos de falla incorporan fallas causadas por el deterioro o desgaste por el funcionamiento cotidiano de los activos, estos modos de falla tienen una elevada importancia por lo que es necesario un análisis detenido de los mismos.

Sin embargo, para que todas las causas probables de falla en los equipos puedan ser identificadas y resueltas adecuadamente, estas listas deben incluir fallas causadas por errores humanos (por parte de los operadores y personal de mantenimiento) y además errores de diseño.

Es importante identificar la causa de cada falla con suficiente detalle para asegurarse de no desperdiciar tiempo y esfuerzo intentando tratar síntomas en lugar de causas reales.

#### 4.7.6.4 Efectos de falla

El cuarto paso en el proceso de RCM consiste en hacer un listado de los efectos de falla, donde se describe lo que ocurre cuando acontece cada modo de falla.

Esta descripción incluye la información necesaria para apoyar la evaluación de las consecuencias de falla, entre estas tenemos:

- La existencia de evidencias de la falla.
- De qué modo representa una amenaza para la seguridad o el medio ambiente.
- De qué manera afecta a la producción o a las operaciones.
- Los daños físicos causados por la falla.
- Qué debe hacerse para reparar la falla.

El proceso de identificar funciones, fallas, modos de falla y efectos de falla trae asombrosas y muchas veces apasionantes oportunidades de mejorar el desempeño y la seguridad así como también eliminar el desperdicio.

#### 4.7.6.5 Consecuencias de falla

Es inevitable que con la aparición de fallas en los activos una organización es afectada de algún modo, ya sea afectando las operaciones, la calidad del producto, el servicio al cliente, la seguridad o el medio ambiente tomando tiempo y dinero para ser reparadas.

Son estas consecuencias las que fuertemente influyen el intento de prevenir cada falla. En otras palabras, si una falla tiene serias

consecuencias se hace un gran esfuerzo para intentar evitarla. Por otro lado si tiene consecuencias leves o nulas, es posible no realizar mantenimiento de rutina y basta con una simple limpieza y lubricación básica.

Uno de los puntos fuertes del RCM es que reconoce que las consecuencias de las fallas son más importantes que sus aspectos técnicos. De hecho reconoce que la única razón para hacer cualquier tipo de mantenimiento proactivo no es evitar las fallas sino evitar las consecuencias de las fallas.

Moubray (2004), clasifica estas consecuencias en cuatro categorías que serán la base del marco del trabajo estratégico para la toma de decisiones en el mantenimiento.

- Consecuencias de fallas ocultas

No tienen un impacto directo, pero exponen a la organización a fallas múltiples con consecuencias serias y hasta catastróficas.

- Consecuencias ambientales y para la seguridad

Una falla tiene consecuencias en la seguridad siempre y cuando cause lesiones y hasta la muerte a operadores o personal de mantenimiento. Mientras que tiene consecuencias ambientales si infringe alguna normativa o reglamento ambiental tanto corporativo, regional e internacional.

- Consecuencias operacionales.

Una falla tiene consecuencias operacionales si afecta la producción (cantidad, calidad del producto, atención al cliente o costos operacionales) además del costo directo de la reparación.

- Consecuencias no operacionales

Las fallas involucradas en esta categoría no afectan la seguridad ni la producción, solo se relacionan con el costo directo de la reparación.

#### 4.7.6.6 **Análisis de criticidad de los modos de falla basado en el riesgo**

- **Severidad (S)**

Se cuantifica la severidad de los efectos, estos son evaluados en una escala del 1 al 10 donde 10 es lo más severo.

Tabla 4.3: Criterios de evaluación de severidad

Efecto	Criterios: Severidad del efecto para AMEF de Proceso	Fila
Peligroso; sin alarma	Puede poner en peligro al operador del ensamblaje. El incidente afecta la operación o la no conformidad segura del producto con la regulación del gobierno. El incidente ocurrirá sin alarma.	10
Peligroso; con alarma	Puede poner en peligro al operador del ensamblaje. El incidente afecta la operación o la no conformidad segura del producto con la regulación del gobierno. El incidente ocurrirá con alarma.	9
Muy Arriba-	Interrupción Importante a la cadena de producción. 100% de producto puede ser desechado. El producto es inoperable con pérdida de función primaria.	8
Alto	Interrupción de menor importancia a la cadena de producción. E producto puede ser clasificado y una porción desechada. E producto es operable, pero en un nivel reducido de funcionamiento.	7
Moderado	Interrupción es de menor importancia a la cadena de producción. Una porción del producto puede ser desechado (no se clasifica). El producto es operable, pero un cierto ítem(s) de la comodidad / de la conveniencia es inoperable	6
Bajo	Interrupción es de menor importancia a la cadena de producción. 100% del producto puede ser devuelto a trabajar. El producto es operable, pero algunos ítems de la comodidad / de la conveniencia funcionan en un nivel reducido del funcionamiento.	5
Muy Bajo	Interrupción es de menor importancia a la cadena de producción. El producto puede ser clasificado y una porción puede ser devuelta a trabajar. La mayoría de los clientes notan el defecto.	4
De menor importancia	Interrupción es de menor importancia a la cadena de producción. Una porción del producto puede ser devuelto a trabajar en línea solamente hacia fuera-de-estación. Los clientes medios notan el defecto.	3
Muy De menor importancia	Interrupción es de menor importancia a la cadena de producción. Una porción del producto puede ser devuelto a trabajar en línea solamente en-estación. Los clientes exigentes notan el defecto.	2
Ninguno	El modo de fallo no tiene ningún efecto.	1

	Criterios de la evaluación y sistema de graduación sugeridos para la severidad de efectos en un proceso AMECF
--	---

Fuente: Mariani, 2007.

Luego de que los efectos y la severidad han sido listadas, se deben identificar las causas de los modos de falla.

- **Ocurrencia (O)**

Las causas son evaluadas en términos de ocurrencia, esta se define como la probabilidad de que una causa en particular ocurra y resulte en un modo de falla durante la vida esperada del producto, es decir, representa la remota probabilidad de que el cliente experimente el efecto del modo de falla. El valor de la ocurrencia se determina a través de la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Criterios de evaluación de ocurrencia

Probabilidad del incidente	Incidente Tarifas	Pk de C	Fila
Muy Arriba: El incidente es casi inevitable	11 en 2	< 0,33	10
	1 en 3	< 0,33	9
Alto: Asociado generalmente a los procesos similares que han fallado anteriormente	1 en 8	< 0,51	8
	1 en 20	<0,67	7
Moderado: Asociado generalmente a los procesos similares previos que han experimentado incidentes ocasionales, pero no en proporciones importantes	1 en 80	< 0,83	6
	1 en 400	< 1,00	5
	1 de 2000	< 1,17	4
Bajo: Los Incidentes aislados se asociaron a procesos similares	1 en 15.000	< 1,33	3
Muy Bajo: Solamente los incidentes aislados se asocian a procesos casi idénticos	1 en 150.000	< 1,50	2
Telecontrol: El incidente es inverosímil.	1 en 1.500.000	< 1,67	1

Criterios de la evaluación y sistema de graduación sugeridos para la ocurrencia del incidente en un AMECF de proceso

Fuente: Mariani, 2007.

- **Detección (D)**

La detección es una evaluación de las probabilidades de que los controles del proceso propuestos detecten el modo de falla, antes de que la parte o componente salga de la localidad de manufactura o ensamble.

Tabla 4.5: Criterios de evaluación de detección

Detección	Criterios: Probabilidad de la detección por control de proceso Fila	
Casi Imposible	Ninguno de los controles disponibles detectar incidente Modo o causa	10
Muy Alejado	Los controles actuales tienen una probabilidad muy alejada de detectar modo o causa de fallo	9
Alejado	Los controles actuales tienen una probabilidad alejada de detectar modo o causa de fallo	8
Muy Bajo	Los controles actuales tienen una probabilidad muy baja de detectar modo o causa de fallo	7
Bajo	Los controles actuales tienen una probabilidad baja de detectar Modo o causa de fallo	6
Moderado	Los controles actuales tienen una probabilidad moderada de detectar modo o causa de fallo	5
Moderadamente Alto	Los controles actuales tienen una probabilidad moderadamente alta de detectar modo o causa de fallo	4
Alto	Los controles actuales tienen una alta probabilidad de detectar modo o causa de fallo	3
Muy Alto	Los controles actuales tienen una probabilidad muy alta de detectar modo o causa de fallo	2
Casi Seguro	Controles actuales detectan casi seguros al modo o a la causa de fallo. Los controles confiables de la detección se saben con procesos similares.	1

	Criterios de la evaluación y sistema de graduación sugeridos para la detección de una causa del incidente o del modo de fallo en un proceso AMECF
--	---

Fuente: Mariani, 2007.

- **NPR**

Es el número de prioridad de riesgo, el cual es el producto matemático de la severidad, ocurrencia y detección.

$$NPR = S \cdot O \cdot D \quad (4.3)$$

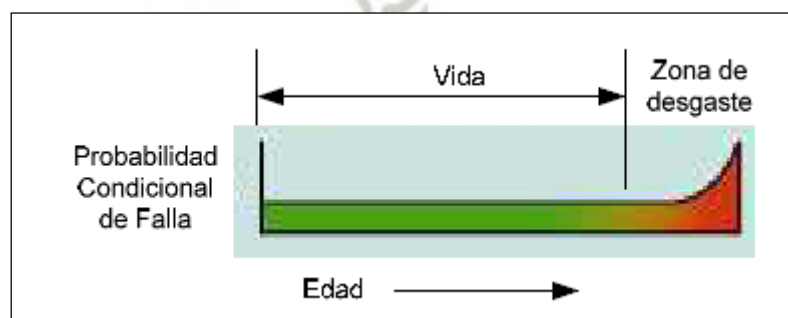
Este valor se emplea para identificar los riesgos más serios para buscar acciones correctivas.

#### 4.7.7 Tareas proactivas del mantenimiento

##### 4.7.7.1 Generalidades, Teoría del envejecimiento de maquinaria y equipos

Moubray (2004), indica que el enfoque tradicional sugería que los equipos operan confiablemente durante un periodo X y luego se desgastan. Con ello se podrían planear acciones preventivas un tiempo antes de que ocurra la falla.

Figura 4.8: Perspectiva tradicional de la falla

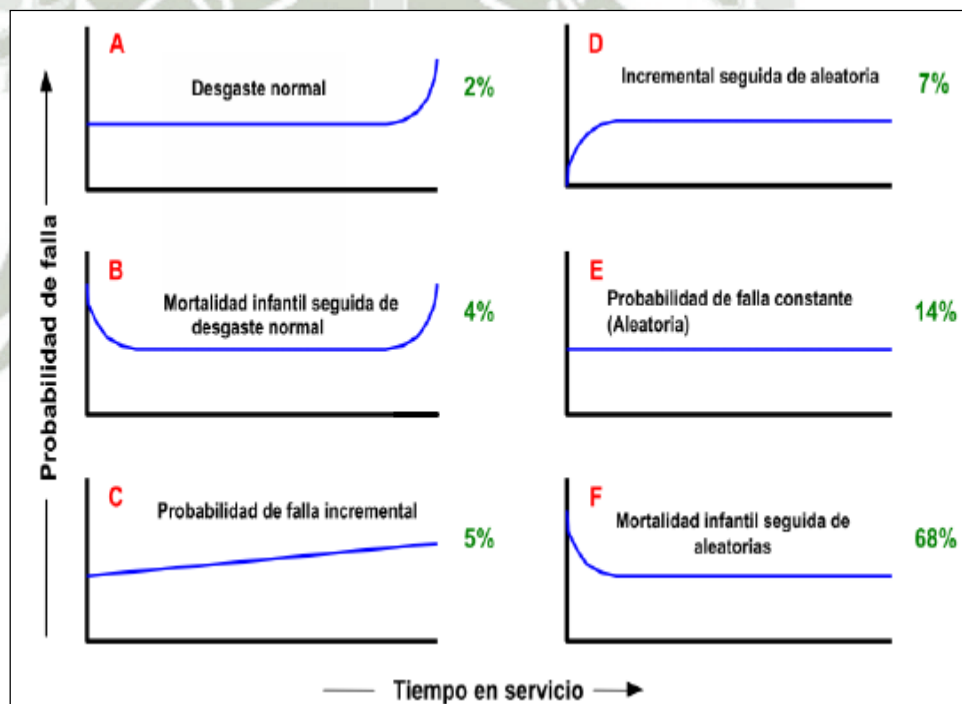


Fuente: Moubray, 2004.

Este patrón es cierto para algunos tipos de equipos simples y para algunos complejos con modos de falla dominantes. Las fallas relacionadas con la edad frecuentemente van asociadas a la fatiga, corrosión, abrasión y evaporación.

Sin embargo los equipos cada vez son mucho más complejos, esto ha generado sorprendentes cambios en los patrones de falla. La figura 4.9 muestra algunos patrones de falla para componentes mecánicos y eléctricos.

Figura 4.9: Patrones de fallas actuales



Fuente: Moubray, 2004.

- Patrón A

Muestra una probabilidad constante o de lento incremento, terminando en la zona de desgaste, abarca el 2% de elementos.

- Patrón B

Muestra la tradicional curva de “bañera”, comenzando con un alto índice de falla.

Se estima que un 4% de elementos se ajustan a ese patrón.

- Patrón C

Muestra un crecimiento lento de la probabilidad condicional de falla sin un periodo de desgaste identificable, abarca el 5% de elementos.

- Patrón D

Muestra una baja probabilidad de falla cuando el equipo es nuevo con un crecimiento rápido hasta un nivel constante, abarca el 7% de elementos.

- Patrón E

Muestra una probabilidad constante en todas las edades (falla al azar), abarca el 14% de elementos.

- Patrón F

Muestra una alta probabilidad de falla en su inicio decreciendo hasta una probabilidad de falla constante o de crecimiento muy lento. Abarca el 68% de elementos.

La idea de que cuanto más seguido un activo es reparado menos probabilidades tiene de fallar, actualmente es cierto pero en muy pocos casos. A menos que exista un modo de falla dominante

relacionado con la edad, los límites de edad tienen que ver poco o nada con mejorar la confiabilidad de los componentes complejos.

Esto lleva a retomar el concepto de tareas proactivas. El RCM las divide en tres grupos.

- Tareas de reacondicionamiento cíclicas.
- Tareas de sustitución cíclicas.
- Tareas a condición.

Para evaluar si vale la pena realizar tareas proactivas, estas deben reducir las consecuencias de la falla en tal grado que justifique los costos directos e indirectos de realizarlas.

Adicionalmente, debe analizar si es técnicamente factible realizarlas, lo que se define como:

“Una tarea es técnicamente factible si físicamente permite reducir o realizar una acción que reduzca la consecuencia del modo de falla asociado, a un nivel que sea aceptado por el dueño o usuario del activo.”

Técnicamente existen dos puntos a considerar para la selección de tareas proactivas:

- Relación entre la edad del componente que se está considerando y la probabilidad de que falle.
- Que sucede una vez que ha comenzado a ocurrir la falla.

En el siguiente punto se analizan las tareas en las que sí existe la relación edad – falla (tareas de reacondicionamiento o sustitución cíclicas o preventivos), en el punto subsecuente se detallaran los

casos cuando no existe esta relación (tareas a condición o predictivas).

#### **4.7.7.2 Tareas de reacondicionamiento o sustitución cíclicas**

Los paradigmas antiguos exponían que todo equipo tenía un patrón de falla tipo B expuesto anteriormente.

Actualmente, todavía se asume que los componentes que realizan tareas similares se desgastaran de manera similar en un periodo de tiempo con fallas prematuras durante su utilización.

Los patrones de falla asociados con la edad aplican para componentes simples o componentes complejos con modos de falla dominantes; además de otros factores como fatiga, corrosión, evaporación y oxidación. Las características del desgaste ocurren generalmente cuando el equipo entra en contacto con el producto.

Las tareas de reacondicionamiento cíclico indican sustituir o reacondicionar la capacidad de un componente antes de un límite de edad específica, sin importar la condición del activo en ese momento.

Las tareas de sustitución cíclicas consisten en descartar un componente o elemento de un límite de edad específica, sin importar la condición del activo en ese momento.

Cabe tomar en cuenta que los dos términos: reacondicionamiento y sustitución pueden envolver una misma tarea por lo cual es necesario determinar el nivel de análisis para aplicar el termino correspondiente.

La frecuencia de este tipo de tareas se determina por la edad en la que el componente o elemento presenta un incremento rápido en la probabilidad condicional de falla, es decir, cada componente tiene una vida límite que el RCM la divide en dos, con especial énfasis en la seguridad.

- Límite de vida segura.
- Límite de vida económica.

Las tareas de reacondicionamiento o sustitución cíclicas son técnicamente factibles si:

#### **4.7.7.2.1 Tareas de reacondicionamiento cíclico**

- Existe un intervalo (edad) identificable en el que el elemento muestre un incremento rápido en la probabilidad condicional de falla.
- La mayoría de elementos sobreviven a este intervalo (en el caso de consecuencias a la seguridad) o ambiente deben ser todos los elementos).
- Se recupera la condición original (100%) del elemento o componente.

#### **4.7.7.2.2 Tareas de sustitución cíclicas**

- Existe un intervalo (edad) identificable en el que el elemento muestre un incremento rápido en la probabilidad condicional de falla.

- La mayoría de elementos sobreviven a este intervalo (en el caso de consecuencias a la seguridad) o ambiente deben ser todos los elementos).

#### 4.7.7.3 Tareas a condición

El incremento de los nuevos tipos de manejo de falla se debe a la continua necesidad de prevenirlas dejando de lado las técnicas clásicas para hacerlo. La gran parte de las nuevas técnicas se basan en el hecho de que la mayoría de ellas dan algún tipo de advertencia de que están por ocurrir, Moubray (2004) indica que estas advertencias se denominan fallas potenciales y se define como condiciones físicas identificables que indican que una falla potencial esta por ocurrir o en proceso de ocurrir.

A este tipo de tareas se la asocia con el mantenimiento predictivo ya que los componentes se dejan en servicio a condición de que continúen cumpliendo parámetros de desempeño deseados. La aplicación de este tipo de tareas es una excelente opción para el manejo de fallos pero debe ser analizada su factibilidad ya que puede resultar en una pérdida de tiempo y dinero.

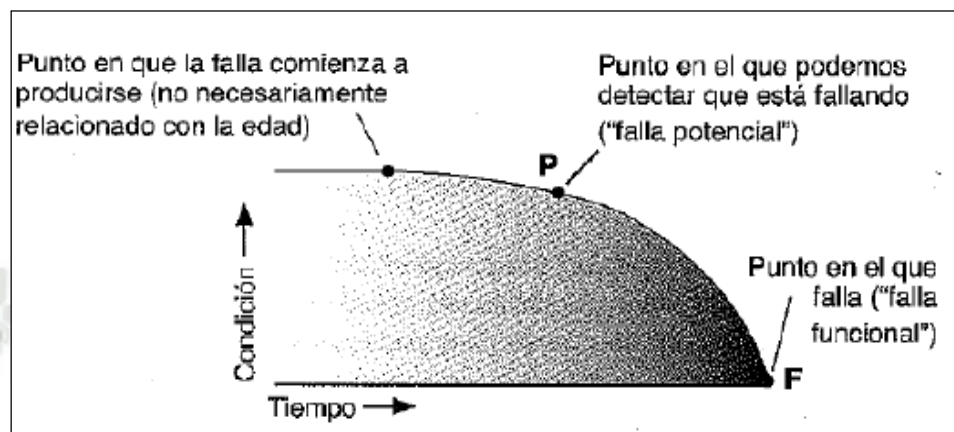
Cuando se habla de tareas a condición, se tiene que analizar el rango P – F (falla: potencial – funcional).

Para ello, se debe empezar con el hecho de que existe poca o ninguna relación entre la edad (tiempo en funcionamiento) de un activo y la probabilidad de que este falle. Aunque esto es cierto, también es verdad que la mayoría de modos de falla dan indicios de

que están en proceso o a punto de ocurrir. A este estado, se lo denomina falla potencial.

En la figura 4.10 se muestra la curva P – F que detalla las instancias finales de la falla.

Figura 4.10: Curva P – F

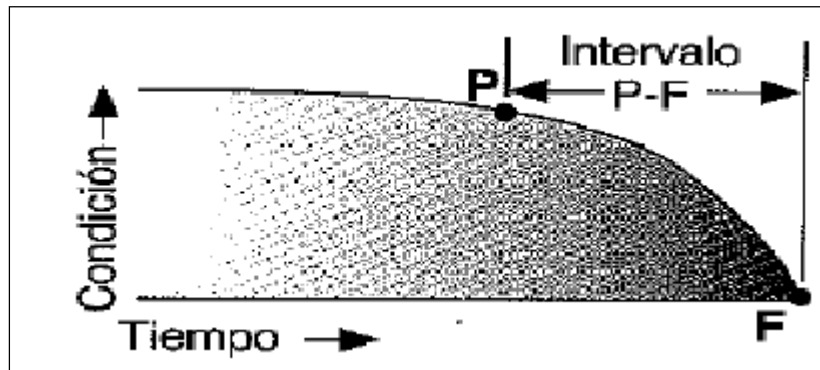


Fuente: Moubray, 2004.

Las tareas a condición consisten en inspeccionar o verificar la existencia de fallas potenciales para actuar en función de prevenir la falla funcional o evitar las consecuencias de la misma.

Adicionalmente es necesario determinar el intervalo de tiempo desde la detección de la falla potencial hasta la ocurrencia de la falla funcional, al que se lo denomina intervalo P – F como indica la figura 4.11.

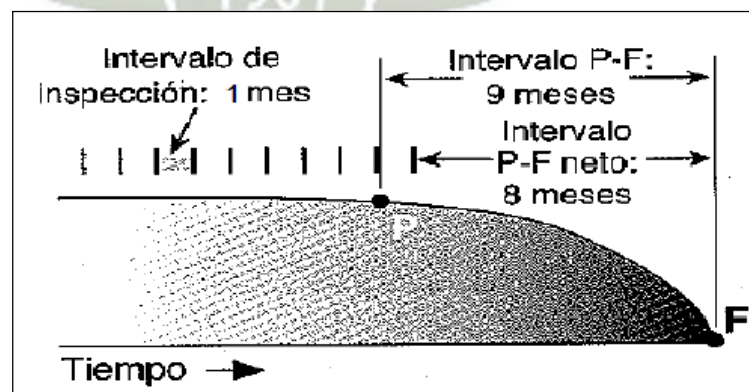
Figura 4.11: Intervalo P – F



Fuente: Moubray, 2004.

Dicho intervalo regula la frecuencia de realización de las tareas a condición que debe ser a intervalos menores al  $P - F$ . Ahora existe el punto en el que se descubre la falla potencial con una técnica de monitoreo específica. El tiempo transcurrido desde el descubrimiento de la falla potencial hasta la ocurrencia de la falla funcional se conoce como intervalo  $P - F$  neto. En la figura 4.12 se muestra un ejemplo cuya frecuencia de inspección es mensual, obteniendo un intervalo  $P - F$  neto de ocho meses, siendo el intervalo  $P - F$  de nueve meses.

Figura 4.12: Intervalo  $P - F$  neto



Fuente: Moubray, 2004.

Una tarea a condición es técnicamente factible si:

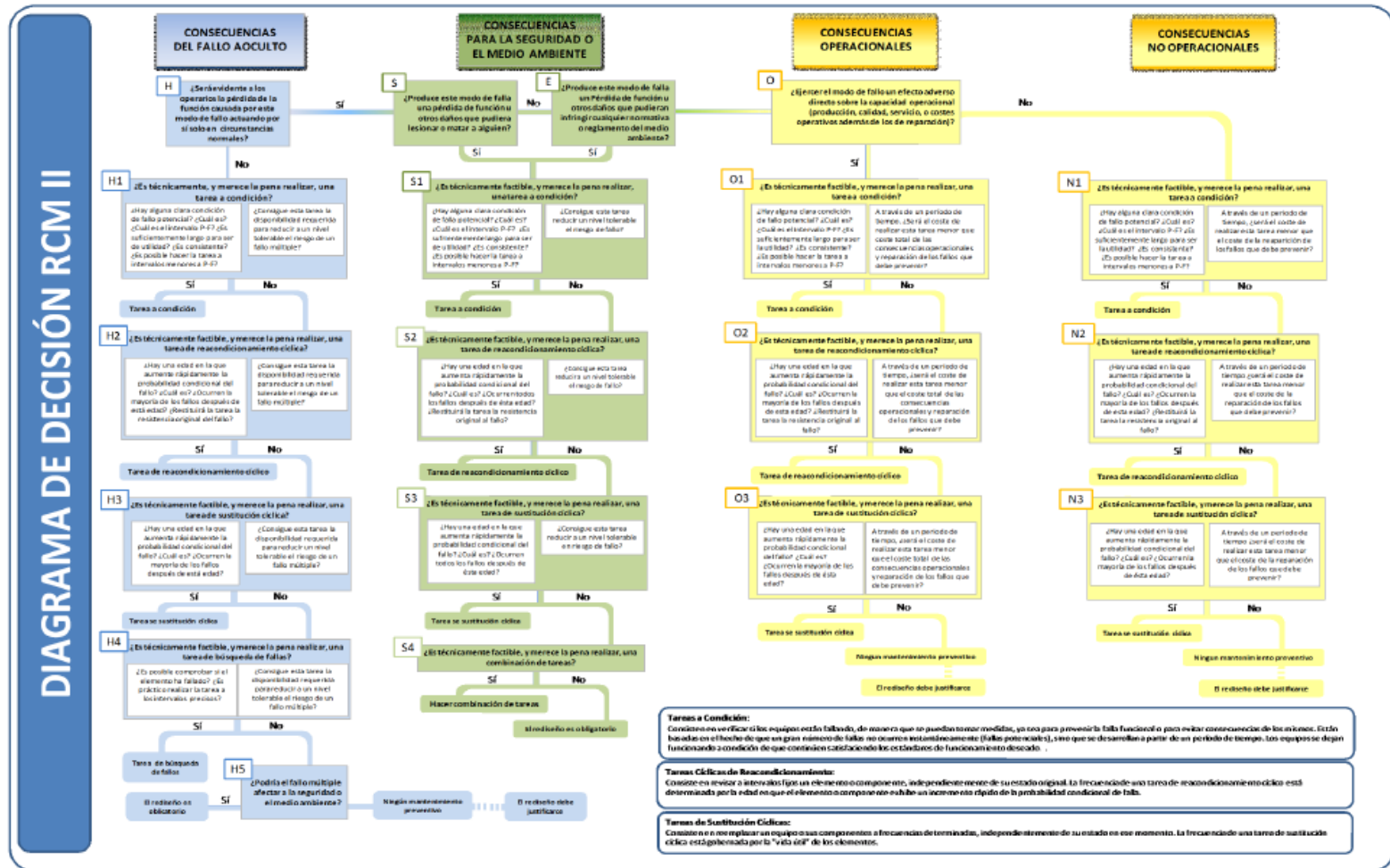
- Es posible definir una condición clara de una falla potencial.
- El intervalo P – F es razonablemente consistente.
- Resulta práctico monitorear el elemento a intervalos menores al P – F.
- El intervalo P – F neto es lo suficientemente largo como para ser de utilidad.

#### 4.7.7.4 **Árbol lógico de decisión**

Con las consecuencias ya determinadas se escoge según un orden lógico de preguntas la tarea que se debe determinar, si las tareas de mantenimiento basadas en la condición, reacondicionamiento o sustitución no son aplicables, en este caso la solución recae en el rediseño de elementos o procesos dependiendo del caso.

En la figura 4.13 se muestra el árbol lógico de decisión.

Figura 4.13: Árbol lógico de decisión



Fuente: Moubray, 2004.

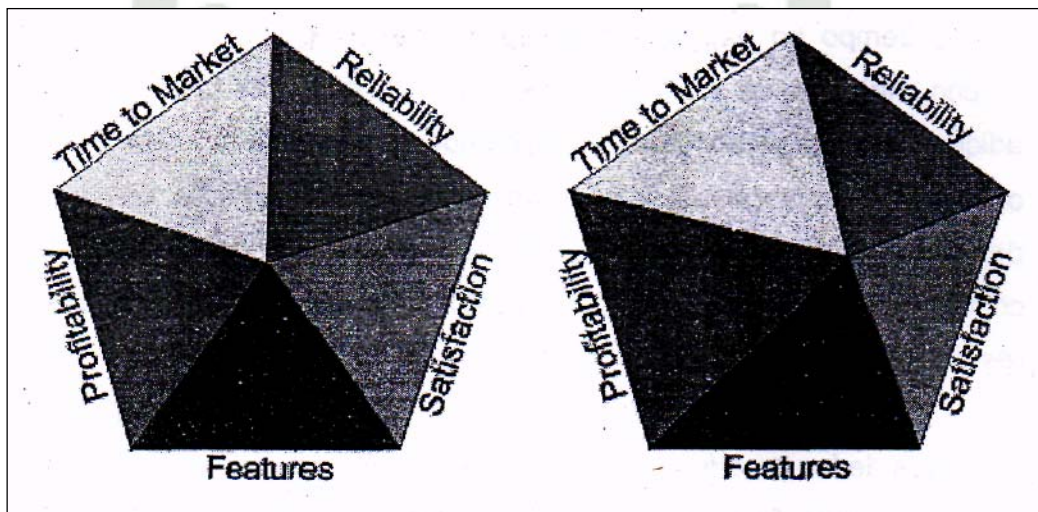
#### 4.8 Ingeniería de confiabilidad

Mariani (2007), indica que la ingeniería de confiabilidad proporciona las herramientas teóricas y prácticas en donde la probabilidad y la capacidad de las piezas, de los componentes, del equipo, de los productos y de los sistemas para realizar sus funciones requeridas por períodos de tiempo deseados sin falla, en entornos especificados y con una confianza deseada, puedan ser especificadas, diseñadas, predichas, probadas y demostradas.

La ingeniería de la confiabilidad se basa en los resultados de pruebas de laboratorios internos (o contratados) y de datos referente a los resultados del rendimiento del producto en el campo. Los datos producidos por estas fuentes se utilizan para medir con exactitud y para mejorar la confiabilidad de los productos que son producidos. Esto es particularmente importante pues las preocupaciones del mercado conducen un empuje constante para la reducción de costos. Sin embargo, se debe poder mantener una perspectiva "macro" en vez simplemente de buscar una solución rápida. La tentación a menudo es cortar camino y ahorrar costos iniciales usando piezas más baratas o cortando programas de prueba. Desafortunadamente, las piezas más baratas son generalmente menos confiables y los programas de prueba inadecuados pueden permitir que los productos con los defectos sin descubrir salgan en el campo. Los ahorros rápidos en el corto plazo por el uso de componentes más baratos o de tamaños de muestra pequeños de pruebas darán lugar generalmente a costos a largo plazo más altos bajo la forma de costos de garantía o a la pérdida de confianza del cliente. Se debe encontrar el equilibrio apropiado entre la confiabilidad, la satisfacción del cliente, el tiempo de

mercadeo, las ventas y las características. La figura 4.14 ilustra este concepto. El polígono a la izquierda representa un proyecto correctamente balanceado. El polígono a la derecha representa un proyecto en el cual la confiabilidad y la satisfacción de cliente se han sacrificado por ventas y tiempo de mercadeo.

Figura 4.14: Representación gráfica de proyectos equilibrados y desequilibrados

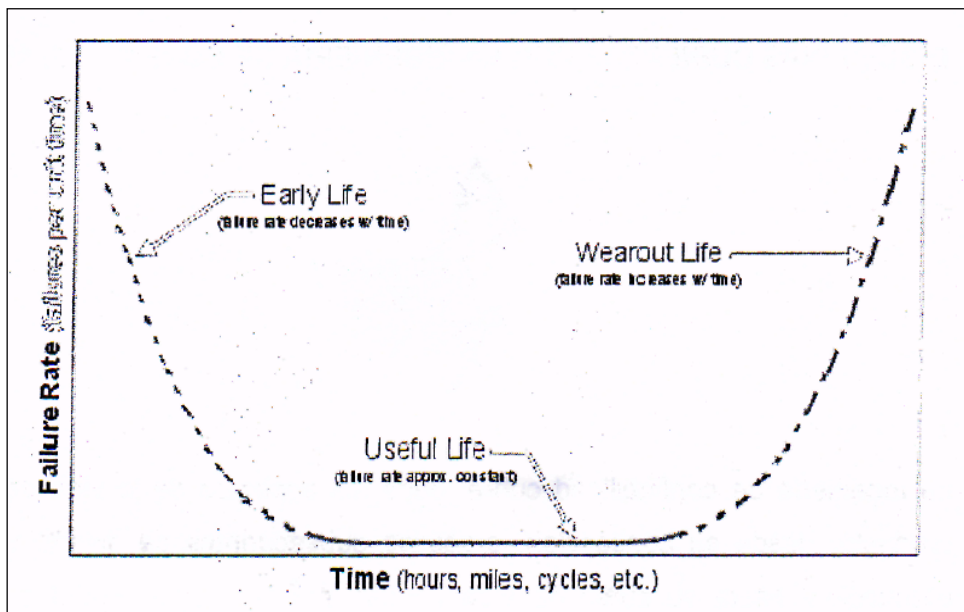


Fuente: Mariani, 2007.

#### 4.8.1 La curva de la bañera de la confiabilidad

La mayoría de los productos (así como los seres humanos) exhiben características de la falla como se muestra en la curva de la bañera de la figura 4.15.

Figura 4.15: Curva idealizada de la bañera de la confiabilidad



Fuente: Mariani, 2007.

Esta curva se traza con la vida del producto en el eje x y con la tasa de fallas en el eje y. La vida puede estar en minutos, horas, años, ciclos, actuaciones o cualquier otra unidad cuantificable del tiempo o del uso. La tasa de fallas se da como fallas entre unidades sobrevivientes por unidad de tiempo. Como se puede ver de este diagrama, muchos productos comenzarán sus vidas con una tasa de fallas más alta (que pueda ser debido a los defectos de fabricación, mala manipulación durante el envío, al pobre control de calidad de piezas entrantes, etc.) y exhibirán una tasa de fallas que disminuye. La tasa de fallas entonces se estabiliza generalmente a una tasa aproximadamente constante en la región de la vida útil, donde las fallas observadas son fallas aleatorias. A medida que los productos experimentan mayor uso y desgaste, la tasa

de fallas comienza a incrementarse mientras que la población comienza a experimentar las fallas relacionadas con el desgaste.

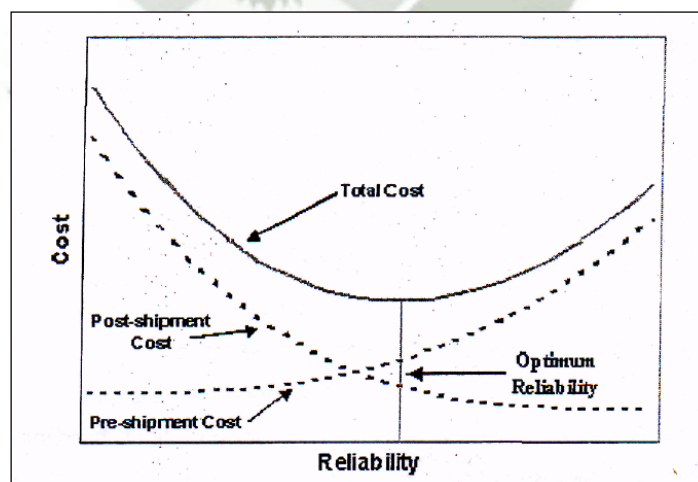
#### 4.8.2 Quemado

Mirando esta curva particular de la bañera, debe ser bastante obvio que sería mejor enviar un producto al principio de la región de la vida útil, que justo a la región de la línea de producción; previniendo así al cliente fallas tempranas. Esta práctica es comúnmente referida como quemado, y se realiza con frecuencia para los componentes electrónicos. La determinación del tiempo correcto del quemado requiere el uso de metodologías de confiabilidad, así como la optimización de los costos implicados (es decir costo de fallas tempranas contra el costo de quemar), para determinar la tasa óptima de fallas en el envío.

#### 4.8.3 Reducción al mínimo del costo del fabricante

La figura 4.16 muestra la confiabilidad del producto en el eje x y el costo del productor en el eje y.

Figura 4.16: Costo total del producto vs confiabilidad del producto



Fuente: Mariani, 2007.

Si el fabricante aumenta la confiabilidad de su producto, él aumentará el costo del diseño y/o de la producción del producto. Sin embargo, un bajo costo de diseño y de producción no implica un bajo costo total del producto. El costo total del producto no se debe calcular como simplemente el costo del producto cuando sale del muelle del envío, sino como el costo total del producto durante el transcurso de su vida. Esto incluye los costos de la garantía y de reemplazo para los productos defectuosos, los costes incurridos por la pérdida de clientes debido a los productos defectuosos, la pérdida subsecuente de ventas, etc. Aumentando la confiabilidad del producto, uno podría aumentar los costes iniciales del producto, pero disminuir los costes del soporte. Un coste total mínimo óptimo del producto puede ser determinado y ser puesto en ejecución calculando la confiabilidad óptima para tal producto. La figura 4.16 representa tal panorama. El costo total del producto es la suma de los costos de producción y de diseño así como los otros costos del post-envío. Se puede ver que en un nivel óptimo de confiabilidad, el costo total del producto es mínimo. El nivel óptimo de confiabilidad es el que coincide con el costo total mínimo sobre el transcurso de la vida entera del producto.

#### 4.8.4 Ventajas de un programa de ingeniería de confiabilidad

- Tiempo óptimo de quemado.
- Período óptimo de garantía y costos estimados de la garantía.
- Tiempo óptimo de reemplazo preventivo para los componentes en un sistema reparable.

- Requerimientos de los repuestos y tasa de producción, dando por resultado un control mejorado del inventario con la predicción correcta de los requerimientos de los repuestos.
- Una mejor información sobre los tipos de fallas experimentadas por las piezas y sistemas que ayudan a los esfuerzos de diseñar, de investigar y de desarrollar para reducir al mínimo estas fallas.
- Establecimiento de cuáles fallas ocurren en un determinado tiempo en la vida de un producto y de una mejor preparación para hacer frente a ellos.
- Estudios de los efectos de la edad, aplicación y duración de la misión y niveles de la tensión de la operación en confiabilidad.
- Una base para comparar dos o más diseños y elegir el mejor diseño desde el punto de vista de la confiabilidad.
- Evaluación de la cantidad de redundancia presente en el diseño.
- Estimaciones de la redundancia requerida para alcanzar la confiabilidad especificada.
- La dirección con respecto a las decisiones de la acción correctiva para reducir al mínimo las fallas y para reducir los tiempos de mantenimiento y de reparación, los cuales eliminarán el sobredimensionamiento.
- La ayuda proporciona las pautas para las prácticas del control de calidad.

- La optimización del objetivo de la confiabilidad que se debe diseñar en productos y sistemas para el costo total mínimo de poseer, operar y mantener durante el transcurso de sus vidas.
- La capacidad de conducir estudios de compensación entre parámetros tales como confiabilidad, mantenimiento, disponibilidad, costo, peso, volumen, operatividad, utilidad y seguridad para obtener el diseño óptimo.
- Reducción de costos de garantía o, para el mismo costo, aumento en el tiempo y la cobertura de la garantía.
- Establecimiento de las pautas para la evaluación de distribuidores desde el punto de vista de la confiabilidad del producto.
- Promoción de ventas en base a índices de confiabilidad y mediciones con ventas y departamentos de marketing.
- Aumento de la satisfacción de cliente y un aumento de ventas como resultado de la satisfacción del cliente.
- Promoción de la imagen y de la reputación positivas de la compañía.

#### **4.8.5 Confiabilidad y Control de calidad**

Aunque los términos confiabilidad y calidad son a menudo usados indiferentemente, hay una diferencia entre estas dos disciplinas. Mientras que la confiabilidad se refiere al rendimiento de un producto en el curso de su vida entera, el control de calidad se refiere al rendimiento de un producto en un punto de tiempo, generalmente durante el proceso de fabricación. Según lo indicado en la definición, la confiabilidad

asegura que los componentes, el equipo y los sistemas funcionan sin falla por períodos deseados durante su entera vida de diseño, desde el concepto (nacimiento) hasta su desecho (muerte). El control de calidad es solo, no obstante, vital acoplamiento en el proceso total de la confiabilidad. El control de calidad asegura conformidad a las especificaciones. Esto reduce la variación de la fabricación, que puede degradar la confiabilidad. El control de calidad también comprueba que las piezas y los componentes entrantes cumplan las especificaciones, que los productos sean examinados y probados correctamente, y que los productos enviados tienen un nivel de calidad igual o mayor que lo especificado. El nivel especificado de la calidad debe ser tal que sea aceptable a los usuarios, al consumidor y al público. Ningún producto puede realizarse confiablemente sin las entradas del control de calidad porque la calidad de las piezas y de los componentes es necesaria fabricar el producto para asegurar su confiabilidad.

#### **4.8.6 Variables aleatorias**

La mayoría de los problemas en la ingeniería de la confiabilidad se ocupan generalmente de medidas cuantitativas, tales como el tiempo hasta la falla de un componente, o si el componente falla o no falla. Al juzgar si un componente es defectuoso o no defectuoso, solamente son posibles dos resultados. Se puede denotar una variable aleatoria  $X$  como representante de estos resultados posibles (es decir defectuoso o no defectuoso). En este caso,  $X$  es una variable aleatoria que puede tomar solamente estos valores.

En el caso de tiempos hasta la falla, la variable aleatoria  $X$  puede tomar el tiempo hasta la falla (o el tiempo de un evento de interés) del producto o componente y puede estar en una gama a partir de 0 al infinito (puesto que no sabemos el tiempo exacto).

En el primer caso, donde la variable aleatoria puede tomar solamente dos valores discretos (ejemplo que defectuoso = 0 y no defectuoso = 1), la variable sería una variable aleatoria discreta. En el segundo caso, el producto se puede encontrar con fallas en cualquier momento después del tiempo 0, es decir en 12.4 horas o en 100.12 horas y así sucesivamente, así  $X$  puede tomar cualquier valor en esta gama. En este caso, la variable aleatoria  $X$  sería una variable aleatoria continua.

#### 4.8.7 Distribuciones

Una distribución estadística es descrita completamente por su pdf (o función de densidad de probabilidad). Se utiliza la definición pdf para mostrar el resto de las funciones comúnmente usadas en la ingeniería de confiabilidad.

Existen diversas distribuciones y cada una de ellas tiene una forma definida  $f(t)$ . Estas distribuciones fueron formuladas para modelar o representar matemáticamente ciertos comportamientos. Algunas distribuciones tienden a representar mejor los datos de vida y son más comúnmente llamadas distribuciones del curso de vida.

#### 4.8.8 Parámetros de las distribuciones

Las distribuciones pueden tener cualquier número de parámetros.

A medida que el número de parámetros aumenta, así lo hace la cantidad de datos requeridos para un ajuste apropiado. Generalmente la mayoría de las distribuciones usadas para el análisis de confiabilidad, se limitan a un máximo de tres parámetros. Estos tres parámetros se conocen usualmente como el parámetro de escala, el parámetro de forma y el parámetro de localización.

##### 4.8.8.1 Parámetro de escala

El parámetro de escala es el tipo más común de parámetro. En el caso de distribuciones de un parámetro, el parámetro único es el parámetro de escala. El parámetro de escala define donde cae el lomo de la distribución, o cuan estirada está la distribución. En el caso de la distribución normal, el parámetro de la escala es la desviación estándar.

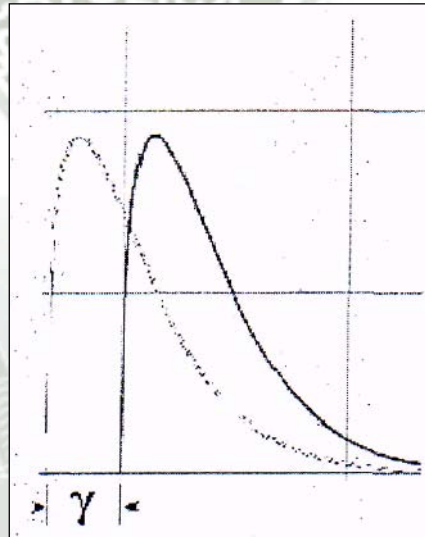
##### 4.8.8.2 Parámetro de forma

El parámetro de forma, como el nombre implica, ayuda a definir la forma de una distribución. Algunas distribuciones, tales como la exponencial o la normal, no tienen un parámetro de forma puesto que tienen una forma predefinida que no cambia. En el caso de la distribución normal, la forma es siempre la familiar forma de campana. El efecto del parámetro de forma en una distribución se refleja en las formas de la pdf, de la función de confiabilidad y de la función de la tasa de fallas.

#### 4.8.8.3 Parámetro de localización

El parámetro de localización se utiliza para cambiar una distribución en una dirección u otra. El parámetro de localización, denotado generalmente como  $\gamma$ , define la localización o ubicación del origen de una distribución y puede ser positivo o negativo. En términos de distribuciones del curso de vida, el parámetro de localización representa un cambio de tiempo.

Figura 4.17: Representación del parámetro de localización



Fuente: Mariani, 2007.

Esto significa que la inclusión de un parámetro de localización para una distribución cuyo dominio sea normalmente  $[0, \infty]$  cambiará el dominio a  $[\gamma, \infty]$ , donde  $\gamma$  puede ser positivo o negativo. Esto puede tener algunos efectos profundos en términos de confiabilidad. Para un parámetro de localización positivo, esto indica que la confiabilidad para esa distribución particular es siempre 100% hasta

ese punto  $y$ . Es decir que no puede ocurrir una falla antes de este tiempo  $y$ .

#### 4.8.9 Las Funciones de Densidad de Probabilidad y Función de distribución acumulada.

Al ser el tiempo de vida o tiempo para la falla una variable aleatoria continua tendrá una función de densidad de probabilidad pdf y por lo tanto una función de distribución acumulada cdf asociadas a él.

Entonces se denota:

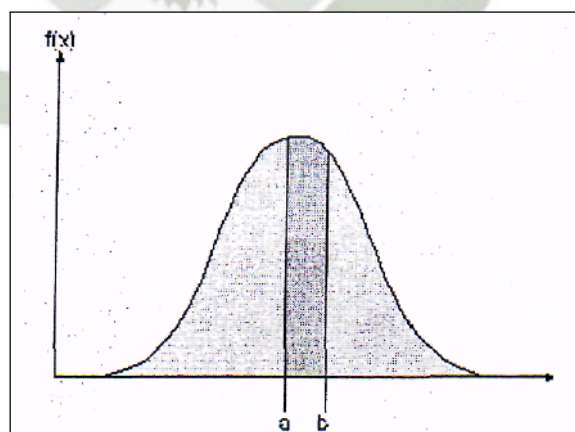
La función de densidad de probabilidad, **pdf** como  $f(x)$ .

La función de distribución acumulada, **cdf**, como  $F(x)$ .

El pdf y el cdf dan una descripción completa de la distribución de la probabilidad de una variable aleatoria.

Si  $X$  es una variable aleatoria continua, entonces la función densidad de probabilidad, pdf, de  $X$ , es una función  $f(x)$  tales que para dos números,  $a$  y  $b$  con  $a \leq b$ .

Gráfico 4.1: Función densidad de la probabilidad



Fuente: Mariani, 2007.

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \text{ and } f(x) \geq 0 \text{ for all } x$$

(4.4)

Es decir, la probabilidad de que X tome un valor en el intervalo [a, b] es el área bajo la función de densidad de a hasta b.

La función de distribución acumulada, cdf, es la probabilidad que la unidad falle después de cierto tiempo t, es decir, F(x) de una variable aleatoria, X, y para un número x se define:

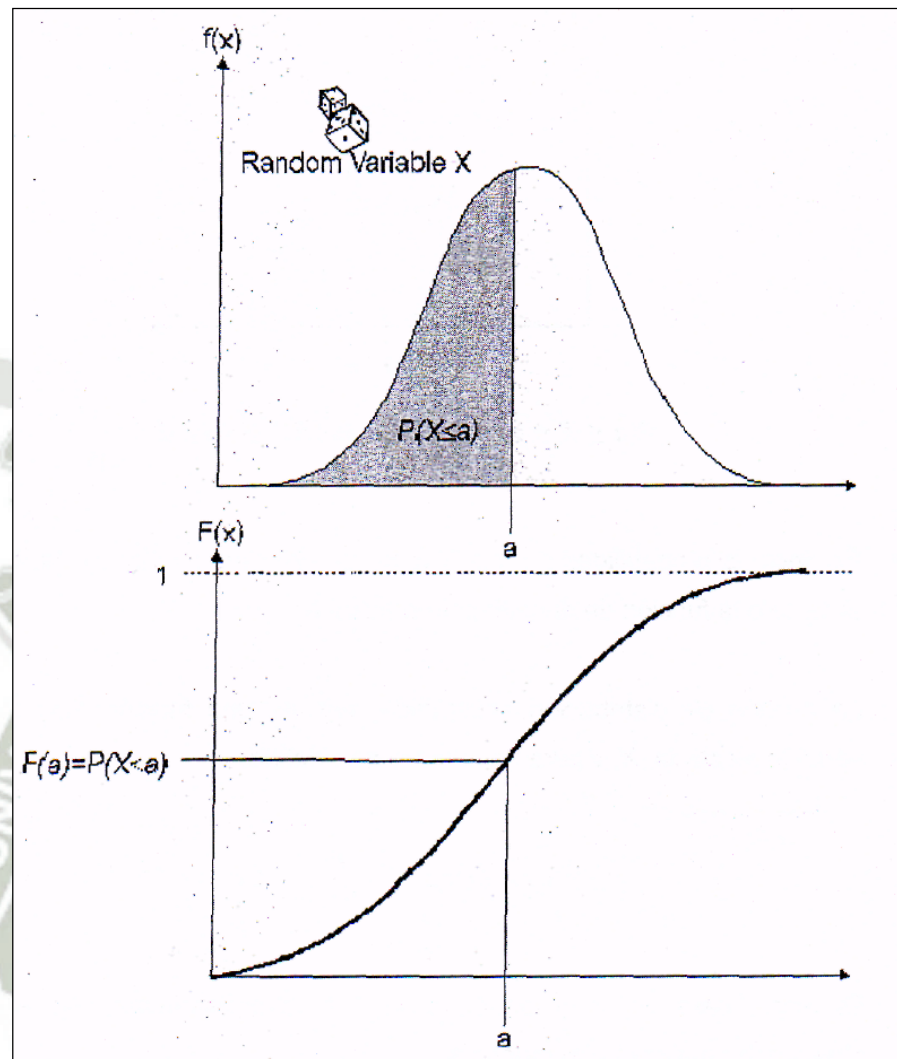
$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(s)ds$$

(4.5)

Para un valor dado x, F(x) es la probabilidad que el valor observado de X será a lo mucho x.

Los límites de la integración dependen del dominio de f(x). Por ejemplo, para todas las distribuciones consideradas anteriormente, este dominio sería  $[0 + \infty]$ ,  $[-\infty, + \infty]$  o  $[y, + \infty]$ . En el caso de  $[y + \infty]$  se utiliza el y constante para denotar un punto arbitrario diferente a cero (o una localización que indica el punto de partida para la distribución). El gráfico 4.2 ilustra la relación entre la función de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulada.

Grafico 4.2: Relación entre pdf y cdf



Fuente: Mariani, 2007.

La relación matemática entre la pdf y la cdf está dada por:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(s) ds$$

(4.6)

Inversamente:

$$f(x) = \frac{d(F(x))}{dx}$$

(4.7)

El valor de la cdf en  $x$  es el área bajo función de densidad de probabilidad hasta  $x$ , si está elegido. También debe precisarse que el área total debajo de la pdf es siempre igual a 1, o matemáticamente:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$$

(4.8)

Una vez conocidas las funciones pdf o  $f(t)$  y cdf o  $F(t)$  para una distribución particular se pueden determinar otras características del modelo, entre ellas tres funciones empleadas comúnmente cuando se trata con datos de confiabilidad.

#### 4.8.9.1 La función de Confiabilidad o supervivencia

La función de confiabilidad indica la probabilidad de que la unidad sobreviva hasta cierto tiempo  $t$ .

Se escribe como  $R(t)$ , conocida también como función supervivencia. Sobre dicha base se puede escribir:

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) \\ &= 1 - P(T < t) \end{aligned}$$

$$R(t) = 1 - F(t)$$

(4.9)

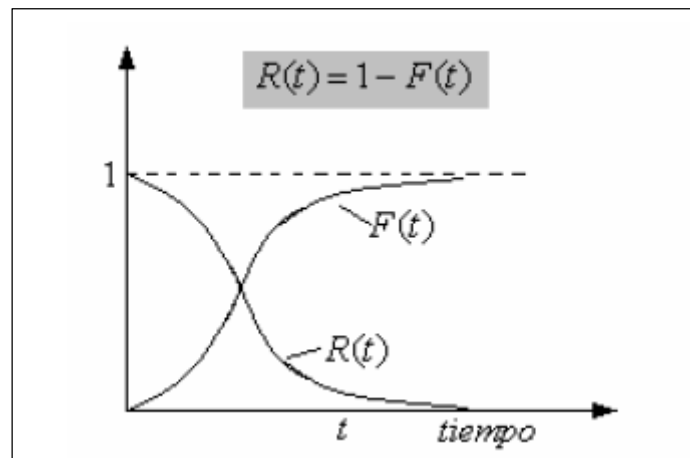
Dónde:

$R(t)$  = Función de supervivencia.

$F(t)$  = Función de distribución.

La confiabilidad es igual a 1 menos la probabilidad de falla. Las funciones se muestran en el grafico 4.3.

Grafico 4.3: Confiabilidad y Probabilidad de falla



Fuente: Mariani, 2007.

#### 4.8.9.2 Función Riesgo o probabilidad de falla

Otra cantidad muy importante en los estudios y cálculos de confiabilidad es la velocidad de falla de las unidades; esta se determina por la función llamada riesgo y se escribe  $h(t)$ , y se define como:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

1961 (4.10)

Dónde:

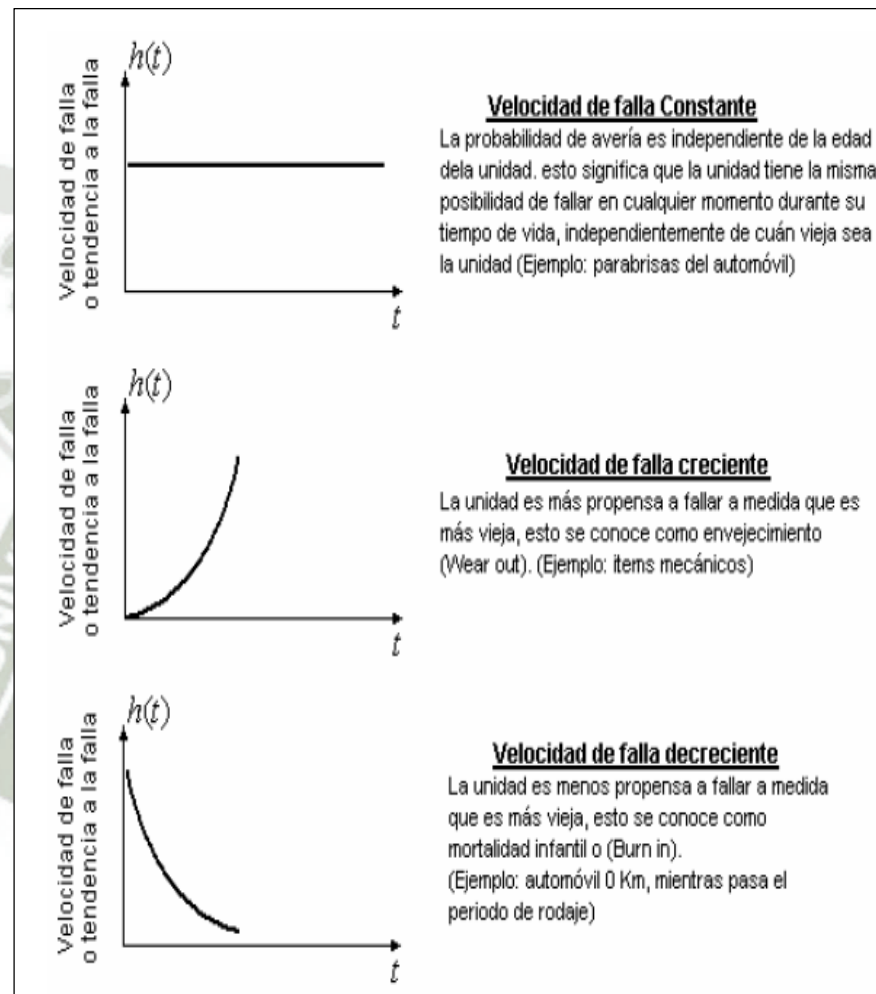
$f(t)$  = Función de densidad.

$R(t)$  = Función de supervivencia.

La función riesgo o función velocidad instantánea de falla indica “la tendencia o inclinación a la falla” o “riesgo” para la unidad, luego de transcurrido el tiempo  $t$ .

A partir del gráfico de  $h(t)$ , se puede obtener una representación útil del comportamiento de la unidad. En la figura 4.18 se muestran los tres casos comunes.

Figura 4.18: Diferentes velocidades de falla



Fuente: Mariani, 2007.

#### 4.8.9.3 Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)

El tiempo medio entre fallas (MTBF) o vida media es un concepto utilizado muy frecuentemente en los trabajos sobre confiabilidad electrónica y eléctrica (también mecánica). Se define como el “tiempo de vida promedio” o esperado de un ítem. Así, según la definición de MTBF, se obtiene:

$$\mu = \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) + \gamma$$

funcion gamma

(4.11)

Dónde:

$\mu$  Ó MTBF = Tiempo medio entre fallas.

$\beta$  = parámetro de forma.

$\eta$  = parámetro de escala.

$\gamma$  = parámetro de localización.

Teniendo el factor función gamma señalado en amarillo se procede a ubicar el valor de la función gamma en la tabla de valores de la función gamma.

Es posible obtenerlo por la función Excel EXP (GAMMA.LN ()).

#### 4.8.10 La distribución Weibull

La distribución Weibull es una distribución de confiabilidad de fines generales usada para modelar fuerza de materiales, los tiempos hasta la falla de componentes electrónicos y mecánicos, equipos o sistemas. Cuando las fallas ocurren en servicio, es necesario calcular una predicción del número de fallas que podrían ocurrir en un próximo periodo de tiempo.

La distribución Weibull provee con mayor frecuencia los mejores cálculos de la vida de los componentes, esto se da debido al rango amplio de los parámetros y las familias de distribuciones que cubre, incluyendo la distribución normal, exponencial y poisson.

##### 4.8.10.1 Datos para el análisis Weibull

Los datos precisos para una distribución Weibull son las edades de las partes componentes o sistemas que fallan, estos datos pueden ser:

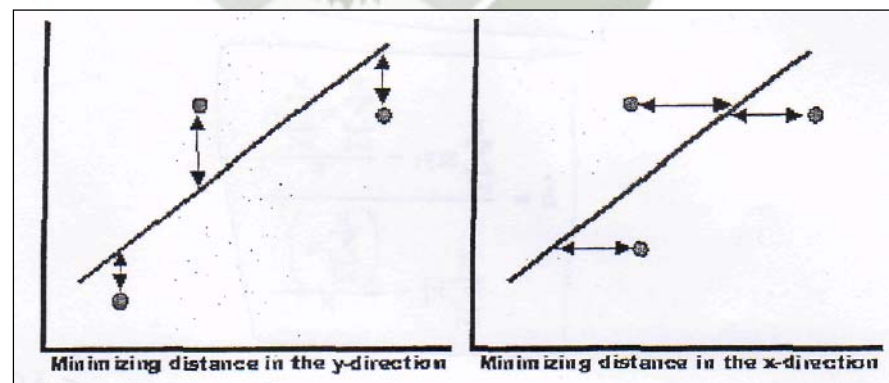
- Tiempos de operación de equipos (horas, meses, kilómetros).
- Arranques y paradas.
- Lanzamientos de aviones o equipos militares.
- Tiempos de almacenamiento.
- Ciclos de fatiga.
- Ciclos de alto estrés.
- Altas temperaturas.

#### 4.8.10.2 Estimación de los parámetros Weibull mediante el método de los mínimos cuadrados.

El método de los mínimos cuadrados lineal se usa para todo el análisis de regresión, a excepción de los casos de Weibull de tres parámetros, Weibull mezclado, distribuciones gamma y gamma generalizadas donde se emplea una técnica no lineal de regresión.

El método de los mínimos cuadrados requiere que una línea recta sea fijada a un conjunto de puntos de datos, tal que la suma de los cuadrados de la distancia de los puntos a la línea ajustada sea reducida al mínimo. Esta minimización se puede realizar en la dirección vertical u horizontal. Si la regresión está en X, entonces se fija la línea para reducir al mínimo las desviaciones horizontales de los puntos a la línea. Si la regresión está en Y, entonces esta significa que la distancia de las desviaciones verticales de los puntos a la línea reducida al mínimo. Esto se ilustra en la siguiente figura.

Figura 4.19: Distancia de las desviaciones x e y



Fuente: Mariani, 2007.

#### 4.8.10.2.1 Regresión de rangos en Y

Según el principio de los mínimos cuadrados, que reduce al mínimo la distancia vertical entre los puntos de datos y la línea recta fijada a los datos, la mejor línea recta apropiada a estos datos es la línea recta  $y = a + bx$  tales que:

$$\sum_{i=1}^N (\hat{a} + \hat{b}x_i - y_i)^2 = \min(a, b) \sum_{i=1}^N (a + bx_i - y_i)^2$$

(4.12)

Dónde:

a = Punto de intersección o coordenada de origen.

b = Pendiente de la recta o parámetro de la forma.

N = Numero de los puntos de datos o parámetro de escala.

Estas ecuaciones son reducidas al mínimo por estimaciones de a y b tales que:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x}$$

(4.13)

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}{N}}$$

(4.14)

$$\eta = e^{\frac{\hat{a}}{\hat{b}}}$$

(4.15)

#### 4.8.10.2.2 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación es una medida que muestra cuan bien el modelo de regresión lineal se ajusta a los datos y es denotado generalmente por  $\rho$ . En el caso de análisis de datos de vida, es una medida para la fortaleza de la relación lineal (correlación) entre los rangos medianos y los datos. Se define el coeficiente de correlación de la población como sigue:

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

(4.16)

Donde

$\sigma_{xy}$  = covarianza de x y de y

$\sigma_x$  = desviación estándar de x,

$\sigma_y$  = desviación estándar de y.

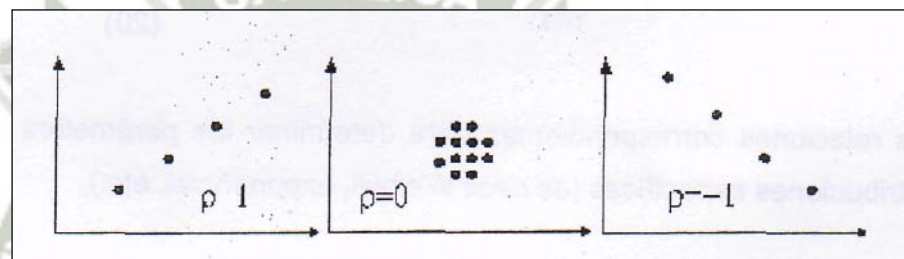
El estimador de  $\rho$  es el coeficiente de correlación de la muestra, dado por:

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}{N} \right) \left( \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^N y_i \right)^2}{N} \right)}}$$

(4.17)

La gama de  $\rho$  es de  $-1 \leq \rho \leq 1$ .

Figura 4.20: Gama de  $\rho$



Fuente: Mariani, 2007

Cuanto más cercano el valor está a  $\pm 1$ , mejor es el ajuste lineal.  $+1$  indica que un perfecto ajuste con una pendiente positiva, mientras que  $-1$  indica un ajuste perfecto con una pendiente negativa.

Por la función Excel COEF.DE.CORREL también es posible calcular el coeficiente de correlación.

Un valor de coeficiente de correlación de cero indicaría que los datos están dispersados aleatoriamente y no tendría ningún patrón o correlación en lo referente al modelo de regresión lineal.

Un valor de 100% indica que el coeficiente de correlación se ajusta a la ecuación de la recta por lo tanto el parámetro de localización es 0.

#### 4.8.10.3 Funciones de la confiabilidad Weibull

En su caso más general, la pdf de Weibull de tres parámetros se define por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

(4.18)

Donde

$f(t)$  = Función de densidad.

$\beta$  = parámetro de forma.

$\eta$  = parámetro de escala.

$\gamma$  = parámetro de localización.

$t$  = tiempo de falla.

Cuando se determina que el parámetro de localización es 0 se le llama Weibull de dos parámetros.

La cdf se define por:

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$$

(4.19)

Dónde:

$F(t)$  = Función de distribución de fallas.

$\beta$  = parámetro de forma.

$\eta$  = parámetro de escala.

$\gamma$  = parámetro de localización.

$t$  = tiempo de falla.

Como se mencionó, las funciones de confiabilidad, de supervivencia y el tiempo medio entre fallas son la consecuencia de haber determinado la pdf y la cdf.

#### 4.8.10.4 Factibilidad técnica

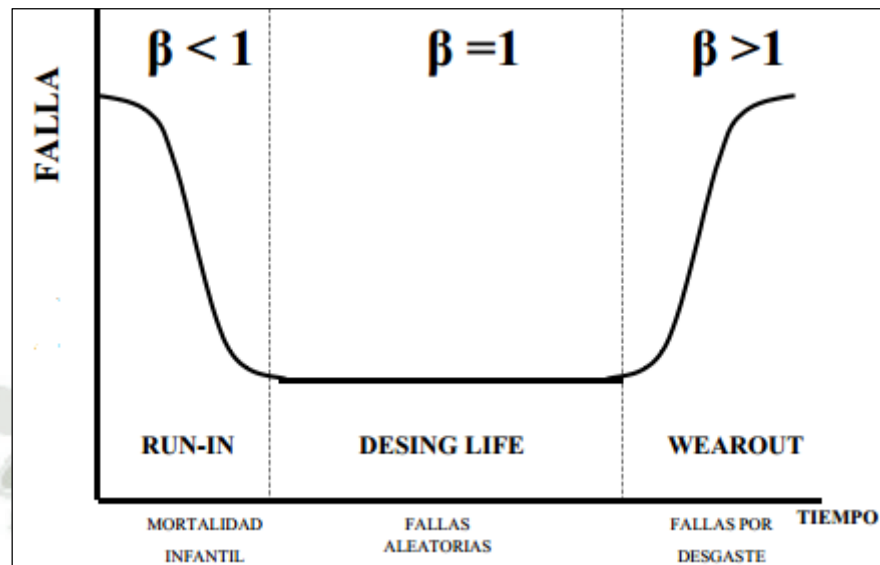
Los parámetros  $\beta$  y  $\eta$  de la distribución Weibull son los valores usados para el análisis de vida de los componentes.

$\beta$  muestra la clase de falla como son mortalidad infantil, aleatoria, desgaste, y se llama parámetro de la forma porque determina la familia o el tipo de distribución.

$\eta$  es el parámetro de vida.

La curva de la bañera mencionada anteriormente en este capítulo explica las fallas que pueden ocurrir en el tiempo para un determinado equipo. El parámetro de la forma se ubica en esta curva y adquiere ciertos valores en el tiempo como se muestra en la figura 4.21.

Figura 4.21: Valores  $\beta$  en la curva de la bañera



Fuente: Murillo, 2001.

#### 4.8.10.4.1 $\beta$ menor a 1 implica mortalidad infantil

Los equipos electrónicos y mecánicos pueden iniciar con una alta tasa de fallas en el inicio de los proyectos y nuevos diseños, esto se puede deber a las siguientes razones:

- Problemas de ensamblaje.
- Problemas de producción.
- Problemas de control de calidad.
- Fallas en componentes eléctricos.

#### 4.8.10.4.2 $\beta$ igual a 1 implica fallas aleatorias

Falla independientemente del tiempo de operación y es igual a una distribución exponencial, se puede deber a:

- Errores humanos.
- Fallas debido a la naturaleza

- Mantenimiento inapropiado.
- Intervalos entre fallas

#### **4.8.10.4.3 $\beta$ es mayor a 1 implica falla por deterioro**

Bajo esta clase se ubican la mayoría de las fallas mecánicas y se puede deber a:

- Operar durante largos tiempos con poca frecuencia de mantenimiento.
- Escaso mantenimiento preventivo y predictivo.
- Repuestos y partes inadecuadas.

El objetivo del análisis técnico mediante el método Weibull es conocer el tiempo exacto donde se pueden efectuar tareas de sustitución o reacondicionamiento cíclicos.

#### **4.8.10.5 Factibilidad económica**

El costo de una falla no planeada siempre es mayor que el costo de mantenimientos planificados.

Si el intervalo de mantenimiento es muy corto, el costo de reemplazo será muy alto, por el contrario, si este es muy largo, el costo de la falla no planeada será muy alto.

El análisis Weibull permite encontrar el intervalo del costo efectivo para el reemplazo del componente.

El costo óptimo por unidad de tiempo viene dado por la siguiente formula:

$$C(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{(t_p + T_p) R(t_p) + \int_{-\infty}^{t_p} t f(t) dt + T_f [1 - R(t_p)]}$$

(4.20)

Dónde:

C (tp) = Costo por unidad de tiempo

Cp = Costo de la tarea preventiva.

Cf = Costo de la tarea correctiva.

R (tp) = Función de supervivencia.

Tp = Duración de la tarea preventiva.

Tf = Duración de la tarea correctiva

tp = Tiempo de la falla.

dt = Diferencial de tiempo.

Con este análisis se determina el tiempo y el costo óptimo para establecer las estrategias de mantenimiento pertinentes.

#### 4.9VAN

El valor actual neto consiste en la actualización de los flujos netos de fondos a una tasa conocida o costo de capital propio. Se puede calcular por la función Excel VNA o por la siguiente formula:

$$VPN = S_0 + \sum \frac{S_t}{(1 + i)^n}$$

(4.21)

Dónde:

VPN = Valor actual neto.

So = Inversión inicial.

St = Flujo efectivo neto del periodo.

n = Numero de periodos de vida del proyecto.

i = Costo de capital propio

Cuando se trata de evaluar costos, una opción recomendable es el VAC (valor actual de costos), que permite comparar alternativas de igual vida útil; la alternativa de solución evaluada que presente el menor VAC es la más conveniente desde el punto de vista técnico – económico.

La fórmula matemática es la misma que el VAN.

El CAE es un indicador económico que también permite comparar alternativas de igual vida útil.

$$CAE = VAC \cdot \left[ \frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

(4.22)

Dónde:

CAE = Costo anual equivalente.

VAC = Valor actual de los costos.

$n$  = Numero de periodos de vida del proyecto.

$i$  = Costo de capital propio

El costo de capital propio se puede calcular utilizando el modelo de valuación de activos CAPM, el cual según Gitman (2007), es un modelo de precios de activos de capital utilizado para valorar activos en mercados financieros desarrollados, que relaciona el riesgo no diversificable y el rendimiento de todos los activos.

Dicho modelo de valuación propone hallar dicho costo sumando a una tasa libre de riesgo, una prima por riesgo que ha sido ponderada por la volatilidad del resultado de la empresa respecto de la volatilidad del mercado, e incluyendo además una prima por riesgo país. Se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$r_E = R_f + \beta (R_m - R_f) + RP$$

(4.23)

Dónde:

$r_E$  = Costo de capital propio.

$R_f$  = Tasa libre de riesgo.

$\beta$  = Beta del sector.

$R_m - R_f$  = Prima por riesgo de mercado.

$RP$  = Prima por riesgo país.

Los siguientes conceptos fueron presentados por Salardi, Solís (2009):

#### **4.9.1 Tasa libre de riesgo**

La tasa libre de riesgo es el retorno esperado para un activo sin riesgo de incumplimiento, existiendo el consenso de tomar como indicador de esta tasa al rendimiento ofrecido por los bonos del tesoro norteamericano a 10 años de los últimos 12 meses.

#### **4.9.2 Beta del mercado**

El beta es un coeficiente que recoge la volatilidad de una cartera, empresa, sector; con respecto al conjunto del mercado del cual forma parte, recogiendo con ello el riesgo sistemático.

#### **4.9.3 Prima por riesgo de mercado**

Es el diferencial entre la rentabilidad esperada de invertir en activos riesgosos y la rentabilidad que ofrecen los papeles estatales de renta fija norteamericanos.

#### **4.9.4 Prima por riesgo país**

La prima por riesgo país involucra la idea de una compensación adicional al inversionista por invertir en el Perú, asumiendo los riesgos inherentes a dicha situación.

## CAPITULO V

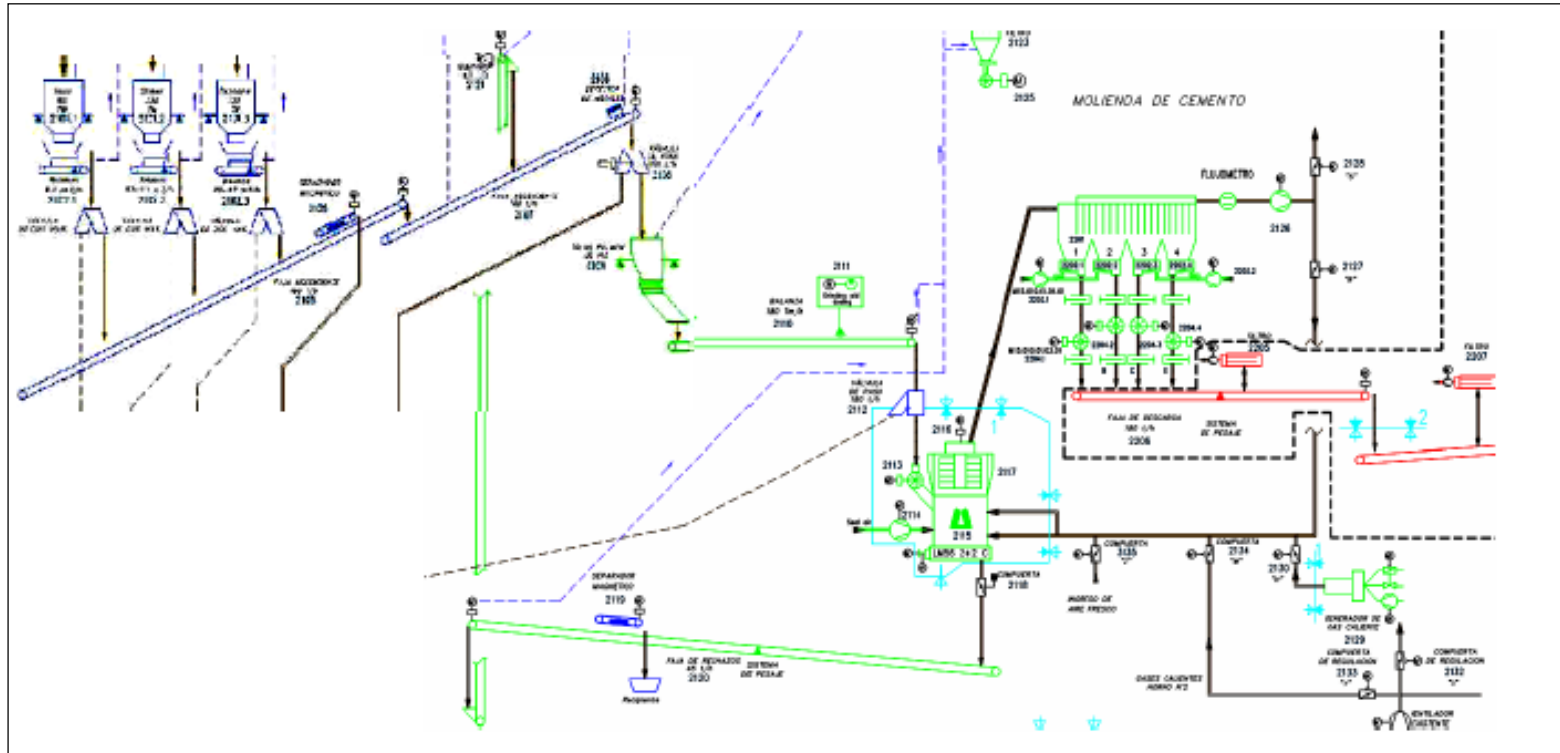
DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMAN EL MOLINO Y

DIAGNOSTICO DE LA SITUACION ACTUAL



## 5.1 Flow sheet del molino Loesche 56 2 + 2

Figura 5.1: Flow sheet Molino Loesche 56 2+2



Fuente: Mischorr, 2010



## 5.2 Descripción del proceso

En el proceso de cemento del molino vertical Loesche 56 2 + 2 el material es alimentado mediante tres balanzas de materias primas; de yeso, puzolana y Clinker respectivamente, el material es descargado hacia una tolva de almacenamiento temporal (tolva pulmón) por medio de unas fajas transportadoras.

La balanza principal alimenta el material almacenado en la tolva pulmón hacia el molino pasando por una válvula rotativa que dosifica la caída del material y evita el desgaste excesivo de los componentes de la cámara interior del molino. El aditivo de molienda es inyectado por una bomba mientras el material pasa por la válvula rotativa.

El material ingresa a la mesa de molienda accionada por el motor - reductor y por las fuerzas centrífugas de esta, el material es esparcido hacia el dam ring que da forma a la cama de material, mientras tanto los rodillos esclavos comprimen el material y los rodillos máster muelen el material comprimido. Simultáneamente una bomba centrífuga inyecta agua debajo de las llantas de los rodillos para facilitar la molienda y evitar vibraciones del reductor.

El flujo de gases generado por el ventilador principal ingresa por el nozzle ring y transporta el material molido por los rodillos máster hacia el clasificador dinámico. Este flujo de gases a la salida del molino debe tener una temperatura de  $80 \pm 5$  ° Celsius para secar el material, la temperatura se obtiene por medio de dos ductos que provienen del enfriador del horno 2 de la planta de cemento, los cuales llegan en valores de 90 a 130 ° Celsius.

Ocasionalmente cuando el horno 2 está parado se usan los gases calientes que provienen de un quemador de diesel 2.

En el clasificador dinámico el material golpea contra los álabes fijos y luego contra los álabes móviles del rotor, una vez pasados los álabes móviles el material ya clasificado es transportado por el flujo hacia el filtro de mangas principal.

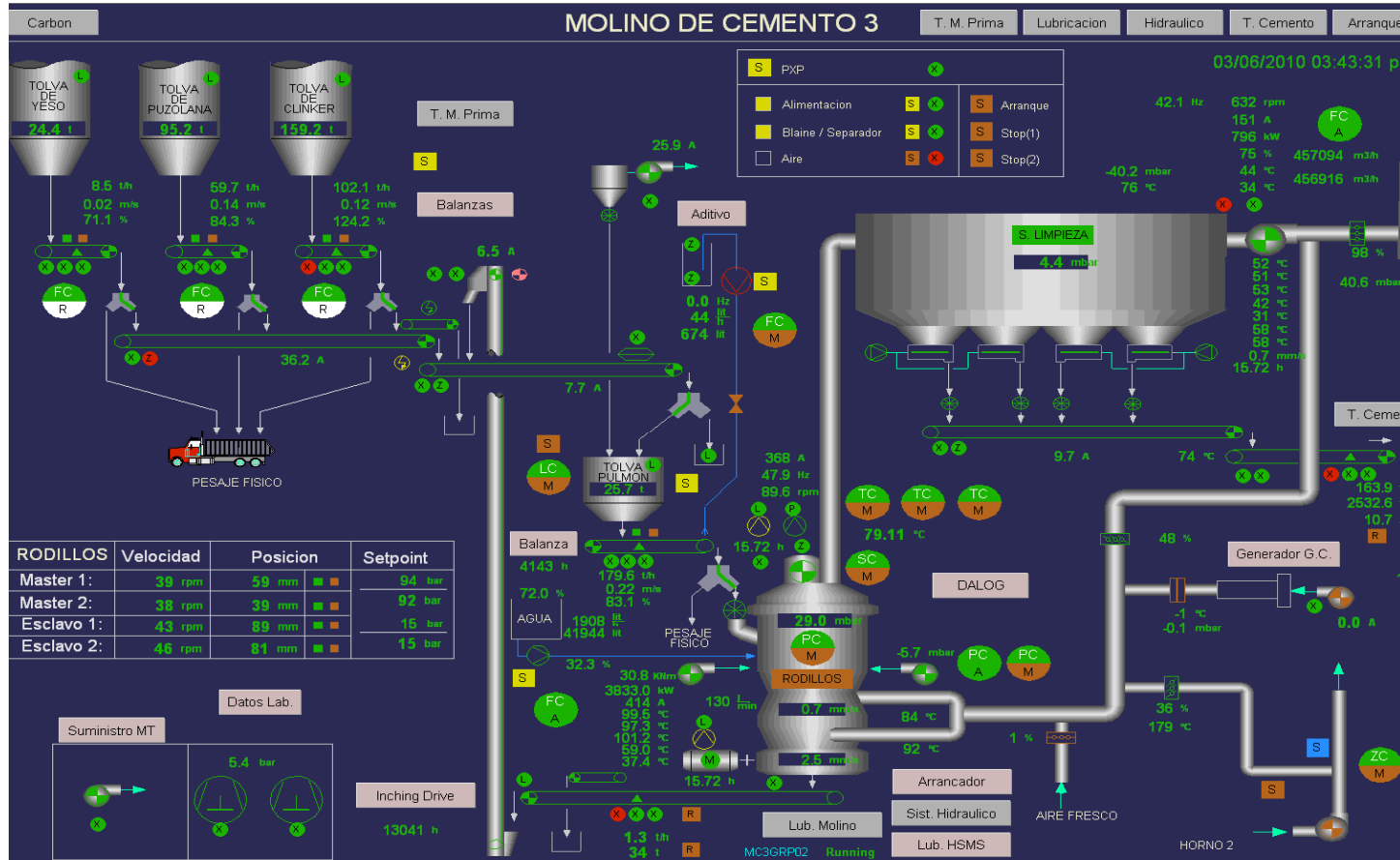
El cemento se adhiere a las mangas del filtro mientras que válvulas con aire comprimido de éste, se activan mediante la orden de una secuencia electrónica, golpeando las mangas y haciendo que el cemento caiga hacia un conjunto de aerodeslizadores y elevadores de cangilones que transportan el material hacia los silos de almacenamiento de producto terminado.

La operación del proceso productivo se controla desde el sistema SCADA que permite supervisar y controlar las variables del proceso a distancia proporcionando comunicación con los equipos de campo (controladores autónomos) y controlando el proceso de forma automática por medio de un software especializado.

En las figuras 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran las pantallas de operación del sistema SCADA.

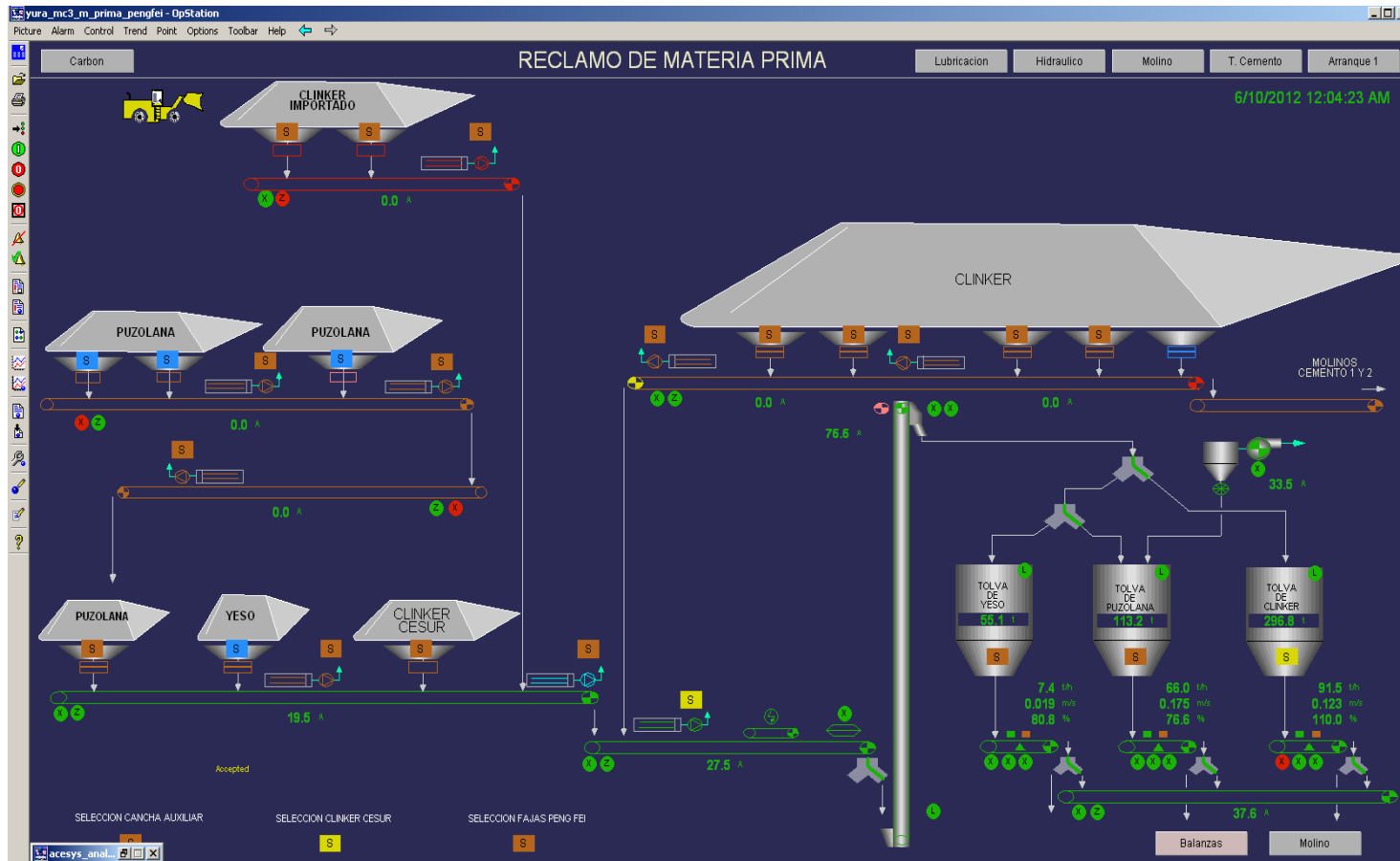
### 5.3 Pantallas de operación del sistema SCADA

Figura 5.2: Molienda de cemento



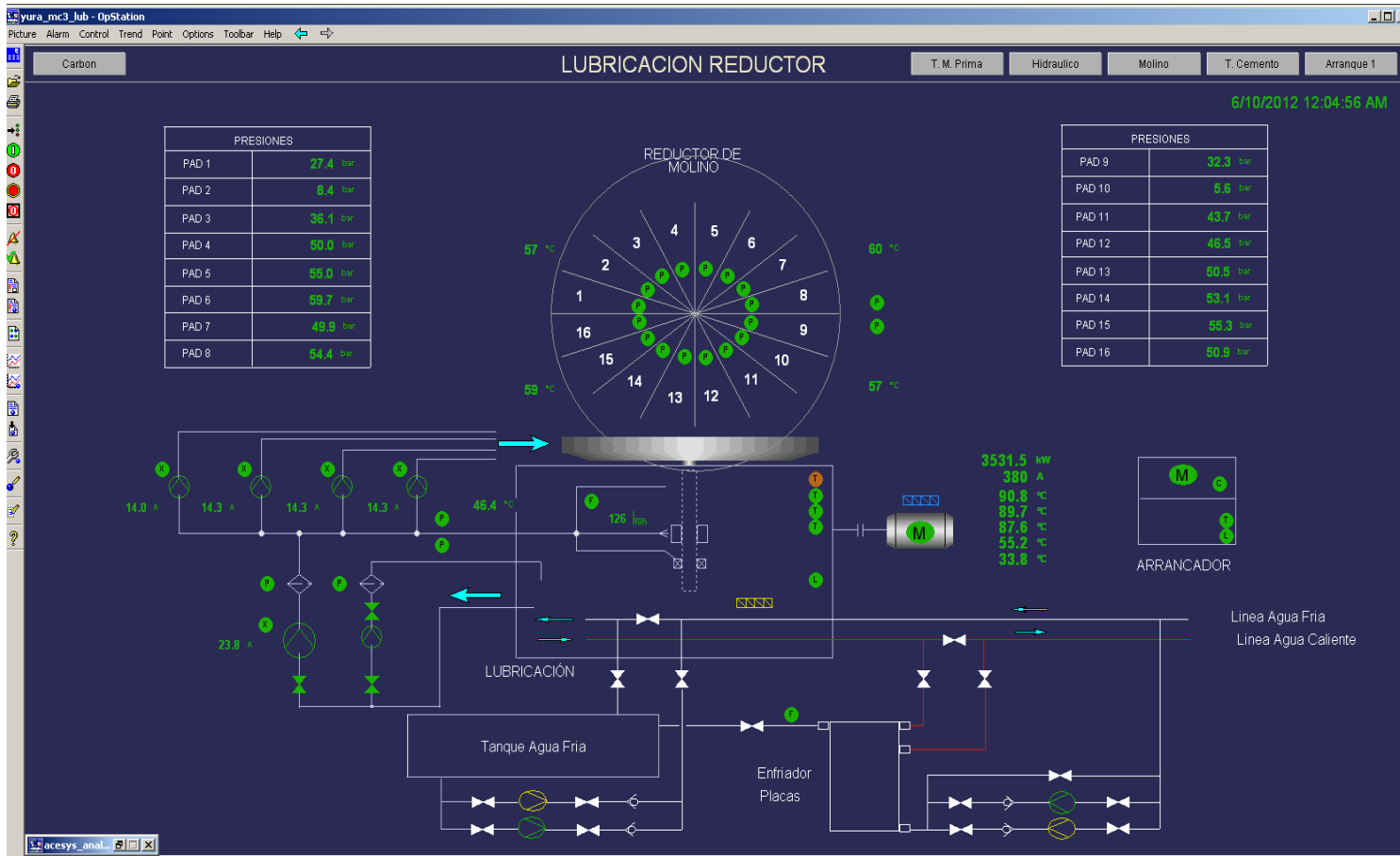
Fuente: SCADA Yura S.A.2012

Figura 5.3: Transporte de materia prima



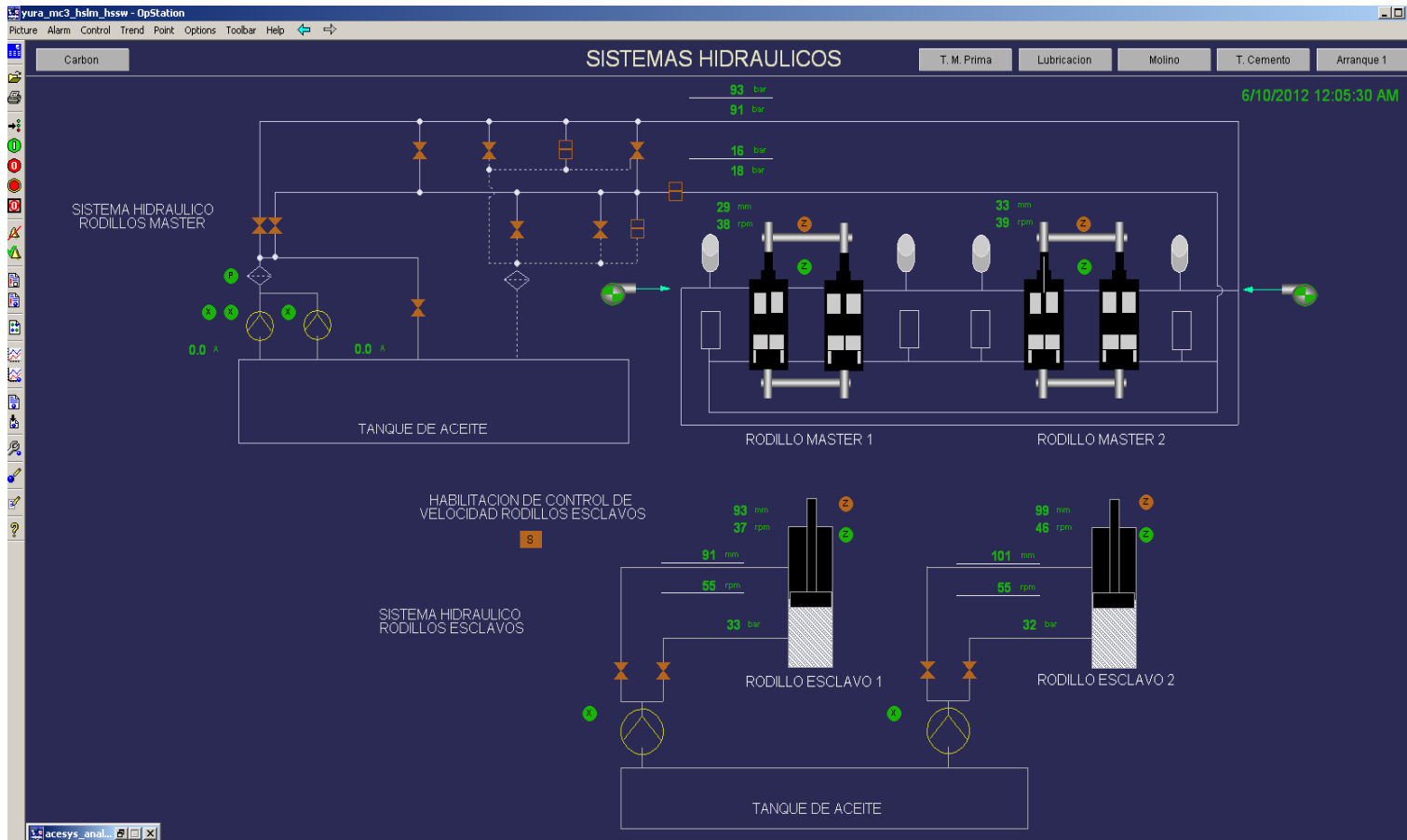
Fuente: SCADA Yura S.A.2012

Figura 5.4: Sistema de lubricación del reductor



Fuente: SCADA Yura S.A.2012

Figura 5.5: Sistemas hidráulicos de los rodillos



Fuente: SCADA Yura S.A.2012

#### 5.4 Partes del molino

Para fines de la investigación, los equipos se van a clasificar en equipos principales que son los equipos propiamente del molino y equipos auxiliares que son los equipos de transporte y despolvORIZACION de material usados en la industria minera y cementera en general. El funcionamiento de los equipos auxiliares ya ha sido detallado en el capítulo III, por lo que en este capítulo solo se van a mencionar para que posteriormente se tenga una referencia de ellos en la aplicación de la metodología en el capítulo siguiente.

##### 5.4.1 Equipos auxiliares

En la tabla 5.1 se lista la descripción detallada de los equipos auxiliares del molino.

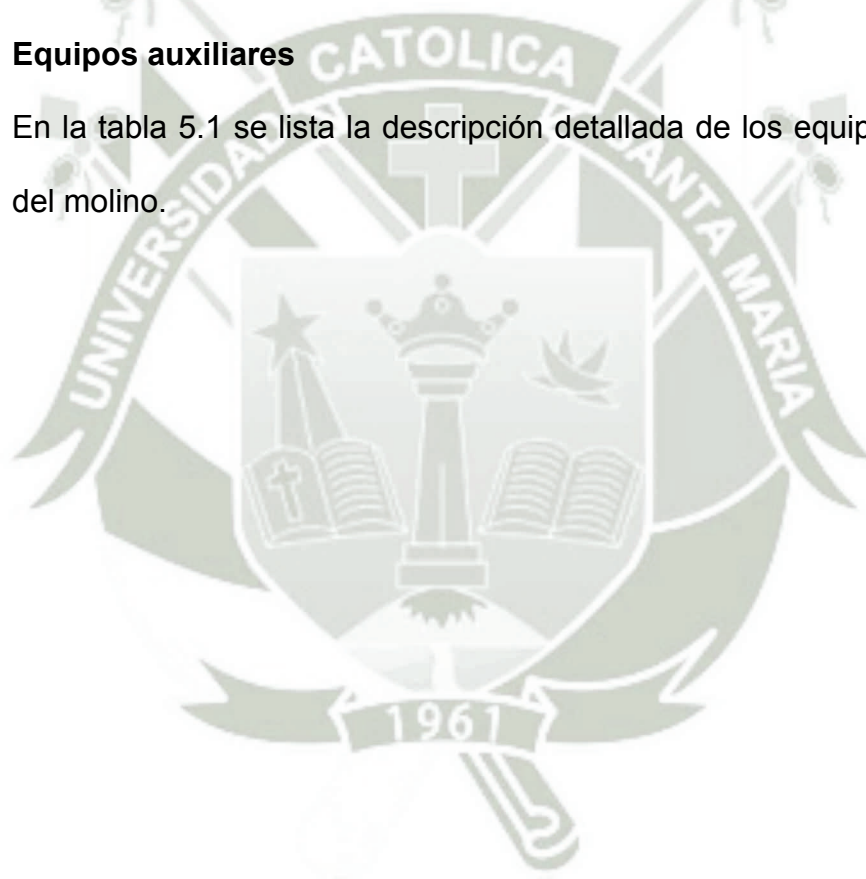


Tabla 5.1: Equipos auxiliares del molino

<b>Equipo</b>	<b>Denominación de objeto técnico</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Potencia</b>	<b>Unidad</b>
L3-2001-1	Descargador puzolana 1		250	TM/H
L3-2001-1A	Motor reductor descarga puzolana 1	SEW	1.5	KW
L3-2001-2	Descargador puzolana 2		250	TM/H
L3-2001-2A	Motor reductor descarga puzolana 2	SEW	1.5	KW
L3-2002	Filtro compacto despolvorizacion	WAM	5.5	KW
L3-2003-1	Descargador yeso 1		250	TM/H
L3-2003-1A	Motor reductor descargador yeso 1	SEW	1.5	KW
L3-2003-2	Descargador yeso 2		250	TM/H
L3-2003-2A	Motor reductor descargador yeso 2	SEW	1.5	KW
L3-2004-1	Filtro compacto despolvorizacion	WAM	5.5	KW
L3-2004-2	Filtro compacto despolvorizacion	WAM	5.5	KW
L3-2005	Faja transportadora yeso	SIG	300	TM/H
L3-2005-1	Motor reductor faja transportadora yeso	SEW	30	KW
L3-2006	Filtro compacto despolvorizacion	WAM	5.5	KW
L3-2007	Faja transportadora puzolana	SIG	300	TM/H
L3-2007-1	Motor reductor faja transportadora puzolana	SEW	30	KW
L3-2008-1	Descargador Clinker 1		280	TM/H
L3-2008-1A	Motor reductor descargador Clinker 1	SEW	2.2	KW
L3-2008-2	Descargador Clinker 2		280	TM/H
L3-2008-2A	Motor reductor descargador Clinker 2	SEW	2.2	KW
L3-2008-3	Descargador Clinker 3		280	TM/H
L3-2008-3A	Motor reductor descargador Clinker 3	SEW	2.2	KW
L3-2008-4	Descargador Clinker 4		280	TM/H
L3-2008-A	Motor reductor descargador Clinker 4	SEW	3	KW
L3-2009	Filtro compacto despolvorizacion	WAM	3	KW
L3-2010	Filtro compacto despolvorizacion	WAM	5.5	KW

L3-2011	Faja transportadora Clinker	SIG	300	TM/H
L3-2011-1	Motor reductor (cabeza) faja Clinker	SEW	30	KW
L3-2011-2	Motor reductor (cola) faja Clinker	SEW	22	KW
L3-2012	Filtro compacto despolvorizacion	WAM	5.5	KW
L3-2013	Faja transportadora ascendente n° 1	SIG	300	TM/H
L3-2013-1	Motor reductor faja transportadora	SEW	30	KW
L3-2014	Elevador de cangilones	AUMUND	400	TM/H
L3-2014-1	Motor elevador cangilones		75	KW
L3-2015	Winche	YALE	2.3	KW
L3-2016-1	Motor reductor válvula tres vías	SEW		
L3-2016-2	Compuerta de 02 vías			
L3-2016-A	Compuerta de Clinker			
L3-2016-A1	Motor reductor compuerta Clinker	SEW EURODRIVE		
L3-2016-B	Compuerta de puzolana y yeso			
L3-2016-B1	Motor reductor compuerta puzolana y yeso	SEW EURODRIVE		
L3-2017	Filtro de despolvorizacion	DONALSON		
L3-2018	Ventilador filtro de despolvorizacion	SANDVIK	50	HP
L3-2019	Válvula rotatoria filtro de despolvorizacion	SANDVIK	50	HP
L3-2020	Compresor ir up6-40-115	INGERSOLL RAND	30	KW
L3-2026	Separador magnético	ERIEZ		
L3-2026-1	Motor separador magnético	RELIANCE ELECTRIC	3	HP
L3-2101-1	Tolva de yeso	CMS	80	TM
L3-2101-2	Tolva de puzolana	CMS	150	TM
L3-2101-3	Tolva de Clinker	CMS	300	TM
L3-2102-1	Balanza dosificadora de yeso	SCHENCK PROCESS	15	TM/H
L3-2102-1A	Motor reductor faja de balanza yeso	SEW	1.5	KW
L3-2102-2	Balanza dosificadora de puzolana	SCHENCK PROCESS	65	TM/H
L3-2102-2A	Motor reductor faja balanza puzolana	SEW	3	KW
L3-2102-3	Balanza dosificadora de Clinker	SCHENCK PROCESS	190	TM/H

L3-2102-3A	Motor reductor faja balanza Clinker	SEW	0.75	KW
L3-2103	Faja transportadora ascendente n° 2	SIG	250	TM/H
L3-2103-2	Motor reductor faja ascendente n° 2	SIEMENS	60	HP
L3-2105	Separador magnético	ERIEZ		
L3-2105-1	Motor separador magnético		2	HP
L3-2106	Detector de metales	TECTRON		
L3-2107	Faja transportadora ascendente n° 3	SIG	200	TM/H
L3-2107-1	Motor reductor faja ascendente n° 3	SEW	7.5	KW
L3-2108	Válvula de paso de 2 vías	CMS		
L3-2109	Tolva pulmón	CMS	50	TM
L3-2110	Balanza dosificadora	SHENCK	200	TM
L3-2110-1	Motor balanza dosificadora	SEW	3	KW
L3-2111-1	Electrobomba centrífuga para aditivo	HIDROSTAL		
L3-2111-2	Electrobomba centrífuga para aditivo	HIDROSTAL		
L3-2111-3	Electrobomba centrífuga para agua	HIDROSTAL		
L3-2111-4	Electrobomba centrífuga para agua	HIDROSTAL		
L3-2112	Válvula de paso de 2 vías			
L3-2113	Válvula rotativa	KREISEL		
L3-2113-1	Motor válvula rotativa	SEW		
L3-2114	Ventilador de aire de sello		12.6	KW
L3-2119	Separador magnético	ERIEZ		
L3-2119-1	Moto reductor separador magnético	SEW EURODRIVE	0.75	KW
L3-2120	Faja transportadora de rechazos molino	SIG	40	TM/H
L3-2120-1	Motor reductor faja de rechazo	SEW	4	KW
L3-2121	Elevador de cangilones	AUMUND	45	TM/H
L3-2121-1	Motor elevador cangilones	SIEMENS	15	KW
L3-2121-2	Motor auxiliar elevador cangilones	FLENDER		
L3-2123	Filtro de despolvorizacion	DONALSON		
L3-2124	Ventilador filtro de despolvorizacion	SANDVIK	30	HP

L3-2126	Ventilador de filtro	VENTI OELDE	750000	m3/h
L3-2126-1	Motor ventilador	SIEMENS	2000	KW
L3-2126-2	Variador de frecuencia (driver)	ALLEN BRADLEY		
L3-2126-3	Sistema de refrigeración de driver	LG		
L3-2127	Compuerta regulación "r"	EDELHOFF GMBH		
L3-2127-1	Motor compuerta regulación "r"	AUMA	0.75	KW
L3-2128	Compuerta regulación "s"	EDELHOFF GMBH		
L3-2128-1	Motor compuerta regulación "s"	AUMA	0.37	KW
L3-2129	Generador de gas caliente loma	SAACKE		
L3-2129-1	Quemador	SAACKE		
L3-2129-2	Quemador (motor)	LAMMERS	6.3	KW
L3-2129-4	Ventilador quemador	SANDVIK	34.5	KW
L3-2133	Compuerta regulación "y"	EDELHOFF GMBH		
L3-2133-1	Motor compuerta regulación "y"		0.37	KW
L3-2134	Compuerta regulación "w"	EDELHOFF GMBH		
L3-2134-1	Motor compuerta regulación "w"	AUMA	0.37	KW
L3-2135	Compuerta regulación "z"	EDELHOFF GMBH		
L3-2135-1	Motor compuerta regulación "z"	AUMA	0.37	KW
L3-2137-1	Compresor 1 ir epe300-2s	INGERSOLL RAND	300	HP
L3-2137-2	Compresor 2 (stand by) ir epe300-2s	INGERSOLL RAND	300	HP
L3-2137-3	Secador de aire ir	INGERSOLL RAND		
L3-2139	Ventilador 1 aire sello rodillo master	AIRTEC		
L3-2139-1	Motor ventilador 1 aire/sello/rodillo/master	WEG		
L3-2140	Ventilador 2 aire sello rodillo master	AIRTEC		
L3-2140-1	Motor ventilador 2 aire/sello/rodillo/master	WEG		
L3-2141	Sistema/enfriamiento/lubricación reductor			
L3-2141-1	Bomba de agua n°1	HIDROSTAL		
L3-2141-2	Bomba de agua stand by n°1	HIDROSTAL		
L3-2142-1	Bomba de agua n°2	HIDROSTAL		

L3-2142-2	Bomba de agua stand by n°2	HIDROSTAL		
L3-2201	Filtro principal	FULLER		
L3-2203-1	Soplador de aire 1	NYB	15	HP
L3-2203-2	Soplador de aire 2	NYB	15	HP
L3-2204-1	Válvula rotatoria 1	FULLER BULK H		
L3-2204-1A	Motor válvula rotatoria 1	SEW	3	HP
L3-2204-2	Válvula rotatoria 2	FULLER BULK H		
L3-2204-2A	Motor válvula rotatoria 2	SEW	3	HP
L3-2204-3	Válvula rotatoria 3	FULLER BULK H		
L3-2204-3A	Motor válvula rotatoria 3	SEW	3	HP
L3-2204-4	Válvula rotatoria 4	FULLER BULK H		
L3-2204-4A	Motor válvula rotatoria 4	SEW	3	HP
L3-2205	Filtro compacto de despolvorizacion	WAM	5.5	KW
L3-2212	Filtro compacto de despolvorizacion	WAM	5.5	KW
L3-2213	Soplador de aire canaleta aerodeslizador		250	TM/H
L3-2213-1	Motor soplador aire canaleta aerodeslizador	WEG	15	HP
L3-2214	Canaleta aerodeslizador para cemento		250	TM/H
L3-2215	Elevador de cangilones	AUMUND	250	TM/H
L3-2215-1	Motor elevador cangilones	SIEMENS	30	KW
L3-2215-2	Motor auxiliar elevador cangilones	FLENDER	1.8	KW
L3-2217	Soplador de aire canaleta aerodeslizador	AIRTECH	250	TM/H
L3-2217-1	Motor soplador aire canaleta aerodeslizador	WEG	10	HP
L3-2218	Canaleta aerodeslizador para cemento			
L3-2219	Distribuidor			
L3-2220	Compuerta de cemento	CMS		
L3-2221	Soplador de aire canaleta aerodeslizador	AIRTECH	250	TM/H
L3-2221-1	Motor soplador aire canaleta aerodeslizador	WEG	10	HP
L3-2222	Canaleta aerodeslizador para cemento	CMS	250	TM/H
L3-2223	Compuerta de cemento	CMS		

L3-2224	Soplador de aire canaleta aerodeslizador	AIRTECH	250	TM/H
L3-2224-1	Motor soplador aire canaleta aerodeslizador	WEG	10	HP
L3-2225	Canaleta aerodeslizador para cemento	CMS	250	TM/H
L3-2226	Soplador de aire canaleta aerodeslizador	AIRTECH	250	TM/H
L3-2226-1	Motor soplador aire canaleta aerodeslizador	WEG	10	HP
L3-2227	Canaleta aerodeslizador para cemento	CMS	250	TM/H
L3-2228	Compuerta de cemento	CMS		
L3-2229	Soplador aire canaleta aerodeslizador	AIRTECH	250	TM/H
L3-2229-1	Motor soplador aire canaleta aerodeslizador	WEG	10	HP
L3-2230	Canaleta aerodeslizador para cemento	CMS	250	TM/H
L3-SE2000	Subestación de molino LOESCHE			
EN-SILO1	Silo/n°/1		2500	TM
EN-SILO2	Silo/n°/2		2500	TM
EN-SILO3	Silo/n°/3		2500	TM
EN-SILO4	Silo/n°/4		2500	TM
EN-SILO5	Silo/n°/5		5000	TM
EN-SILO6	Silo/n°/6		10000	TM
L3-2240	Compuerta de 02 vías			
L3-2241	Canaleta aerodeslizador 1		250	TM/H
L3-2241-A	Ventilador de canaleta 1		12.5	HP
L3-2242	Canaleta aerodeslizador 2		250	TM/H
L3-2242-A	Ventilador de canaleta 2		12.5	HP
L3-2243	Canaleta aerodeslizador 3		250	TM/H
L3-2243-A	Ventilador de canaleta 3		12.5	HP
L3-2244	Canaleta aerodeslizador 4		250	TM/H
L3-2244-A	Ventilador de canaleta 4		12.5	HP
L3-2245	Elevador de cangilones	AUMUND	250	TM/H
L3-2245-A	Motor principal elevador cangilones			
L3-2245-B	Motor auxiliar elevador cangilones			

L3-2246	Filtro de mangas	LIYANG		
L3-2246-A	Ventilador de filtro de mangas			
L3-2246-B	Válvula rotativa de filtro de mangas			
L3-2247	Filtro de mangas	LIYANG		
L3-2247-A	Ventilador de filtro de mangas			
L3-2247-B	Válvula rotativa de filtro de mangas			
EN-1103	Canaleta aerodeslizador		250	TM/H
EN-1103-A	Ventilador de canaleta		12.5	HP
EN-1103-B	Compuerta de derivación			
EN-1104	Canaleta aerodeslizador		250	TM/H
EN-1104-A	Ventilador de canaleta		12.5	HP
EN-1104-B	Compuerta de derivación			
EN-1105	Filtro de mangas			
EN-1105-A	Ventilador de filtro de mangas			
EN-1105-B	Válvula rotativa de filtro de mangas			

Fuente: SAP Yura S.A.2012



## 5.4.2 Equipos principales

Los equipos principales son el reductor, la cámara de rechazo, la cámara de molienda, sistemas de lubricación e hidráulicos y el clasificador dinámico.

### 5.4.2.1 Reductor

Para reducir la velocidad del motor, el reductor cuenta con un engranaje cónico y dos planetarios (dispuestos verticalmente).

El piñón de ataque flotante del primer planetario está conectado al eje del engranaje cónico por medio de un acople doble coronado.

El soporte axial es realizado por un disco de empuje de plástico.

Los grados de libertad permiten que el engranaje central interior esté dispuesto de tal forma que se produzca un engrane igual de los dientes e igual distribución de carga en los tres engranajes planetarios.

Los engranajes del planetario son esféricos en sus ejes, soportados en rodamientos de rodillos autoalineantes para que ellos se puedan adaptar al patrón de carga de sus dientes.

El torque es transmitido en el engranaje central interior del segundo planetario que está fijado a través de los dientes del acoplamiento montados en el acoplamiento del eje. El acoplamiento del eje está conectado rígidamente en su parte baja con el porta planetario.

El porta planetarios está fijado verticalmente, su peso es soportado por una brida de fijación acomodada en la brida del

segundo planetario por medio de un tirante, el cual esta soportado en un rodamiento anti fricción.

El toque es introducido en el piñón del segundo planetario en seis engranajes planetarios. Hay una distribución pareja del torque ya que los engranajes planetarios están dispuestos en pares y por un piñón libre.

El porta planetario es llevado en un rodamiento radial. Una tarea adicional del rodamiento radial es guiar la placa de empuje que está conectada rígidamente al porta planetario.

Ambos anillos con dentadura interna están conectados rígidamente con la cubierta por la porta anillos en común.

La sensibilidad de perturbación del engranaje completo superior es por lo tanto reducida a un mínimo gracias el libre movimiento.

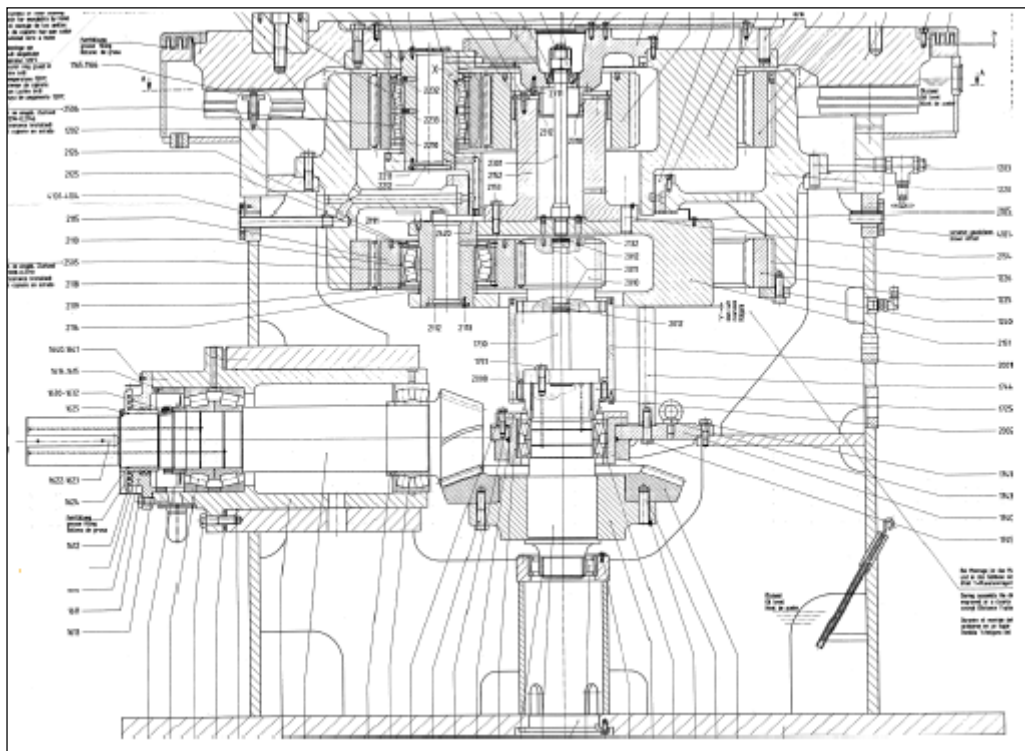
Los dientes de los engranajes no son afectados por los movimientos de bamboleo de la cámara de molienda y/o el disco de empuje debido a desbalances del molino con vibraciones causadas por los rodillos.

El eje de entrada esta acomodado en dos amplios rodamientos anti fricción. En el lado de entrada hay un par de rodamientos de rodillos cónicos en disposición x sirviendo como un rodamiento axial, en el lado del engranaje cónico hay un rodamiento de rodillos autoalineante.

Para absorber la presión axial del molino así como el peso del material a moler y la mesa un rodamiento axial especial está dispuesto en la parte superior del lado de salida de la cubierta.

El eje de entrada y el rodamiento del disco axial de salida son sellados por sellos laberintos sin contacto.

Figura 5.6: Reductor RENK



Fuente: Manual de instrucciones de operación RENK, 2000

Datos técnicos:

- Tipo: RENK KPV 170.
- Identificación RENK: 80103995
- Año de fabricación: 2000
- Potencia nominal: 4000 KW.
- Velocidad de entrada: 1190 rpm.

- Velocidad de salida: 22 rpm.
- Ratio: 53.9.
- Carga en rodamiento axial: 6550 KN.
- Aceite: 4100 litros de aceite ISO VG 320.
- Motor auxiliar: SEW K77DT90L4-TF con variador de frecuencia, potencia 1.5 KW.

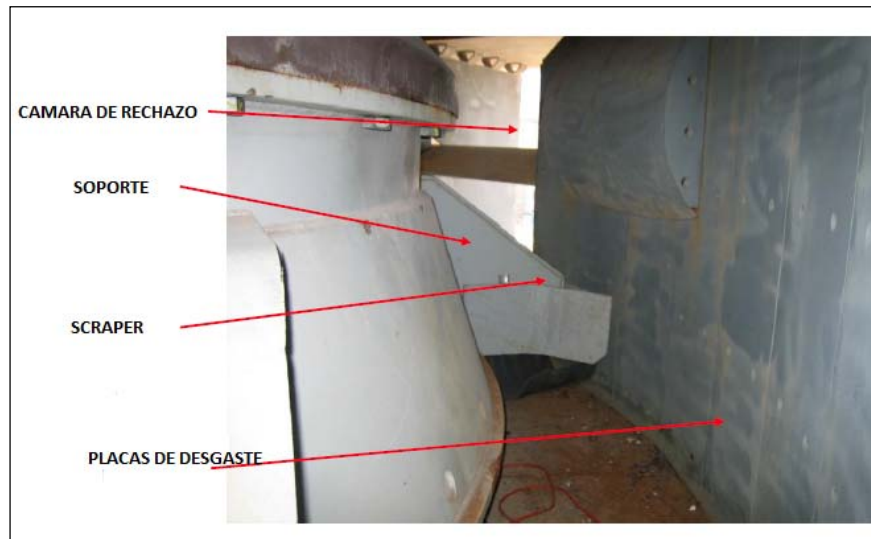
Los rodamientos del reductor tienen sensores de vibración instalados que ofrecen lecturas de los valores del envoltorio de aceleración (mide la aceleración de las vibraciones de alta frecuencia), y se puede visualizar desde el SCADA.

#### **5.4.2.2 Cámara de rechazo**

La cámara de rechazo es la base del molino, tiene dos funciones principales las cuales son recibir y evacuar el material grueso proveniente de la cámara de molienda y recibir los gases calientes provenientes del ventilador principal por medio de dos ductos, estos gases ingresan hacia la cámara de molienda y sirven para transportar el material hacia el filtro principal y luego retornar hacia el molino en un ciclo cerrado.

En la cámara de rechazo se encuentran los scrapers o rascadores los cuales se encuentran ubicados en el mismo rotor de la mesa de molienda, con la finalidad de que al girar empujen el material grueso hacia una tolva temporal para luego por medio de una faja ingresar de nuevo al proceso y no tener pérdidas.

Figura 5.7: Cámara de rechazo



Fuente: Mischorr, 2010

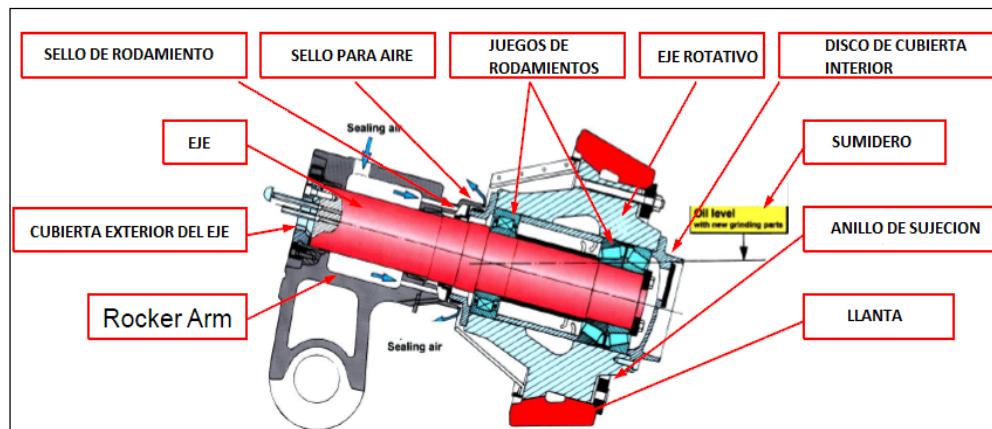
#### 5.4.2.3 Cámara de molienda

En la cámara de molienda se efectúa la operación de molienda propiamente dicha, ahí se encuentran los rodillos máster y esclavos, la mesa, dam ring, nozzle ring, armor ring y las toberas de inyección de agua.

##### 5.4.2.3.1 Rodillos Máster

Los rodillos Máster son los equipos que muelen el material fresco que está sobre la mesa, sus componentes estructurales son el rocker arm, el eje del rodillo, cubierta exterior del eje, un eje rotativo, dos juegos de rodamientos, disco de cubierta interior, sellos de rodamiento, sello para aire, anillo de sujeción, llanta del rodillo sujeta al eje rotativo, cubierta protectora del eje y el sumidero de aceite que contiene aproximadamente 190 litros por rodillo.

Figura 5.8: Componentes estructurales del rodillo Máster



Fuente: Mischorr, 2010

El rocker arm es el componente que se conecta con el pistón y transfiere la fuerza hidráulica hacia el rodillo para que éste se pueda mover, el rocker arm se divide en el superior y el inferior conectados por un eje.

También se inyecta aire de sello a través del rocker arm dentro del rodillo para prevenir la penetración del polvo.

Las llantas del rodillo están hechas de una alta aleación de cromo, resistentes al desgaste pero frágiles, para evitar el daño de los rodillos estos no deben rebotar muy fuerte cuando se mueve material y evitar el contacto con algún fierro que ingrese con el material de alimentación. Para evitar que los rodillos golpeen la mesa, hay un tope mecánico que los mantiene a 20 mm de esta.

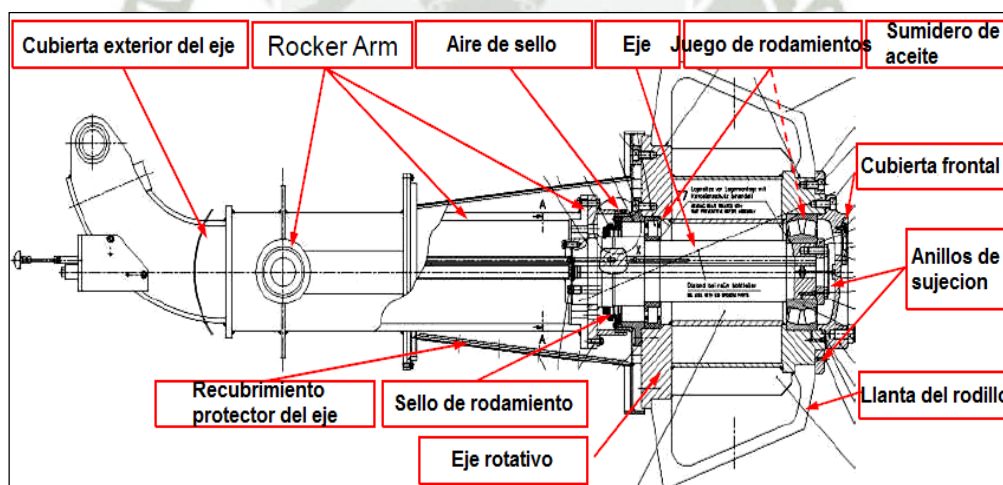
#### 5.4.2.3.2 Rodillos esclavos

Los rodillos esclavos compactan el material y lo prepara para ser molido por los rodillos máster, se aplica presión hidráulica para bajar los rodillos hacia la mesa y para mantener la posición de trabajo que es de 70 a 100 mm sobre ésta.

Los componentes estructurales de los rodillos esclavos son el eje del rodillo fijo unido al rocker arm, la cubierta exterior del eje, eje rotativo, dos juegos de rodamientos, sellos de rodamientos, llanta del rodillo sujeta al eje, recubrimiento protector del eje, aire de sello y sumidero de aceite.

Hay 75 litros de aceite por rodillo.

Figura 5.9: Componentes estructurales del rodillo Esclavo



Fuente: Mischorr, 2010

#### 5.4.2.3.3 Mesa de molienda

La mesa de molienda está hecha de cromo duro, posee placas de soldadura para protegerla del desgaste, las placas se pueden reemplazar hasta 12 veces según se requiera, el ratio

de desgaste típico para moler Clinker es de 6 a 8 gramos por tonelada de cemento.

#### **5.4.2.3.4 Dam ring**

El dam ring retiene el material en la mesa para desarrollar la altura de cama del material bajo los rodillos, el material de sobra pasara por encima del dam ring hacia los segmentos nozzle ring, el material fino se irá hacia arriba del molino transportado por el flujo de gases y el material grueso caerá por los segmentos hacia la cámara de rechazo.

El dam ring consiste de un anillo de segmentos soldados uno sobre otro, la altura del dam ring de este molino es de 340 mm, la altura total puede ser modificada sacando o colocando más segmentos según las necesidades de producción.

Realizando las modificaciones en el dam ring se logran los siguientes efectos:

- Estabilización de la operación del molino (control de vibración).
- Optimización del consumo de energía.
- Optimización de la calidad del producto.

#### **5.4.2.3.5 Nozzle (Louvre ring)**

Actúa como una boquilla para generar un puente aéreo, es importante que el flujo de gases que circula por ese sector sea el adecuado para evitar el excesivo rechazo de material, si es mucho ocasionara más desgaste en la cámara interior. Debajo

de cada rodillo máster hay placas fijas del nozzle ring para evitar el desgaste excesivo de sus ejes.

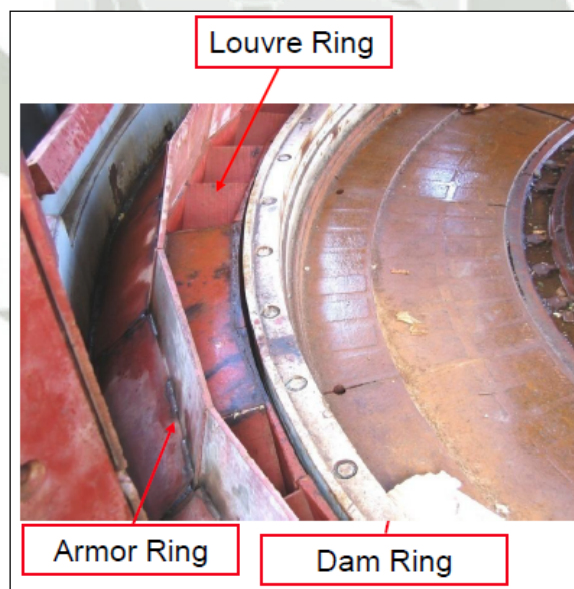
Las placas del nozzle ring están inclinadas  $45^\circ$  para guiar el flujo de gases hacia la parte superior.

#### 5.4.2.3.6 Armor ring

Actúa como protección del cuerpo del molino, está inclinado hacia adentro en  $30^\circ$  para evitar que el material y el gas vayan hacia las paredes, mucha inclinación hace que haya gran desgaste en el centro del molino.

El área hueca entre el armor ring y la pared del molino sirve para que se llene de material durante la operación y actúa como una protección natural para el desgaste.

Figura 5.10: Mesa de molienda, armor ring, dam ring y nozzle ring

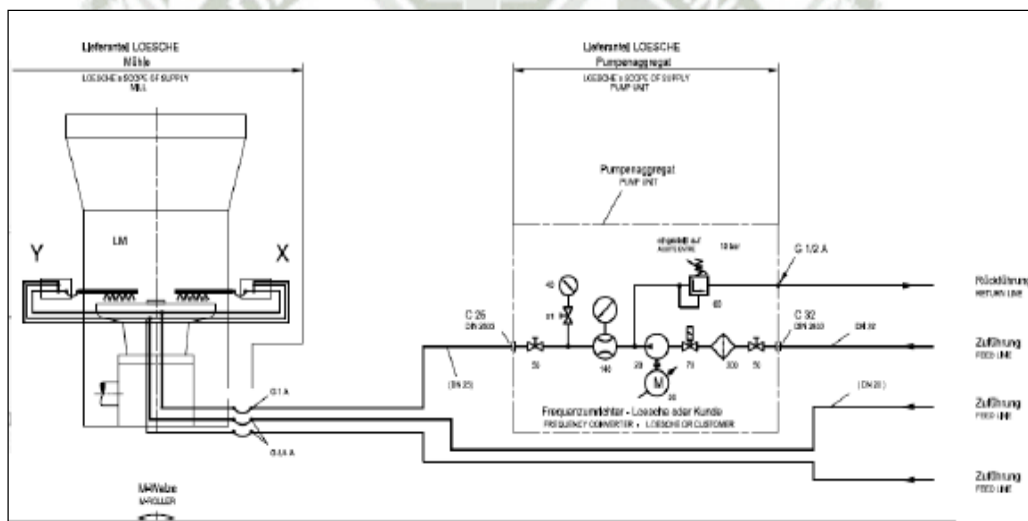


Fuente: Mischorr, 2010

#### 5.4.2.3.7 Sistema de inyección de agua

Las bombas de agua de planta proveen a este sistema, luego existen dos bombas centrífugas dispuestas en paralelo como forma de protección de la operación, la bomba suministra agua desde un tanque hacia dos toberas, las cuales están ubicadas debajo de cada rodillo Máster, estas toberas distribuyen el agua en el lecho de molienda. Una línea de aire comprimido está conectada en la misma línea de suministro de agua por medio de unas válvulas de bola.

Figura 5.11: Plano hidráulico del sistema de inyección de agua



Fuente: Mischorr, 2010

El propósito de inyectar agua al molino es evitar las vibraciones durante su operación, el aire comprimido conectado en paralelo a las líneas de agua no debe trabajar en simultáneo con la inyección de agua, solo se abren las válvulas manuales de la línea de aire cuando el molino está parado y las toberas requieren limpieza.

Suministrar un gran caudal de agua hacia el molino da como resultado calidad del cemento baja, incrementa el consumo de energía del motor principal debido a que reduce la velocidad de flujo de material debajo de los rodillos haciendo que estos muelan mayor cantidad, por el contrario poca agua puede resultar en altas vibraciones del molino.

La inyección de agua se inicia automáticamente cuando se da alimentación al molino y para automáticamente cuando se corta la alimentación.

#### **5.4.2.4 Sistemas de lubricación e hidráulicos**

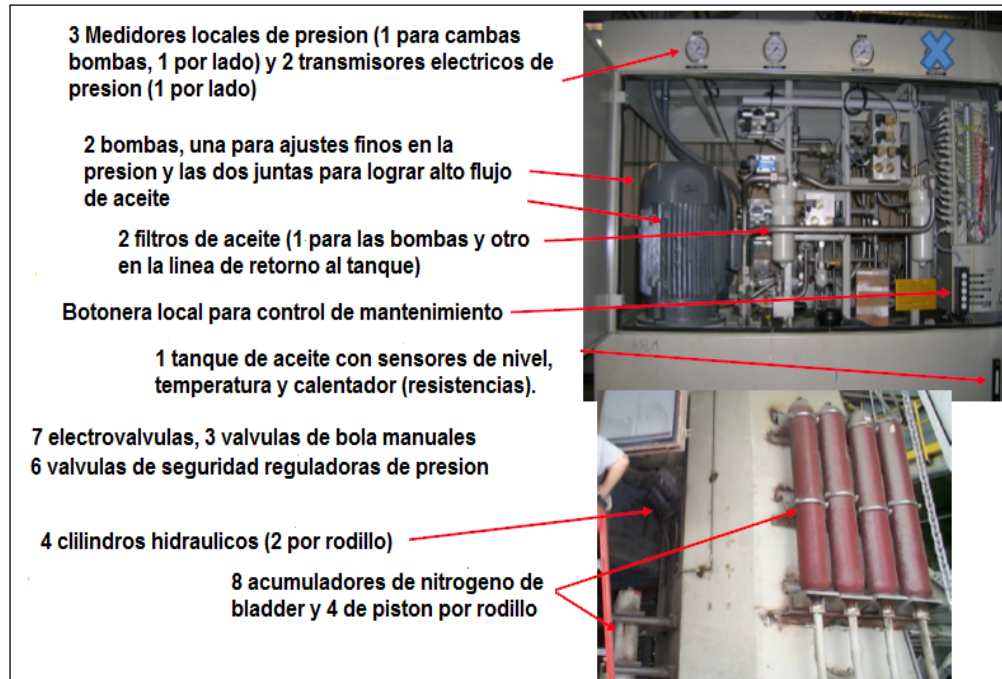
Lo componen los sistemas hidráulicos de los rodillos Máster y esclavos, el sistema de lubricación o recirculación de los rodillos Máster, el sistema de engrase del rocker arm de los rodillos Máster, el sistema de lubricación del reductor RENK, el sistema de alta presión del reductor y el circuito de filtración fina.

##### **5.4.2.4.1 Sistema hidráulico Rodillos Máster**

En la figuras 5.12 y 5.13 se muestran los componentes del sistema hidráulico.

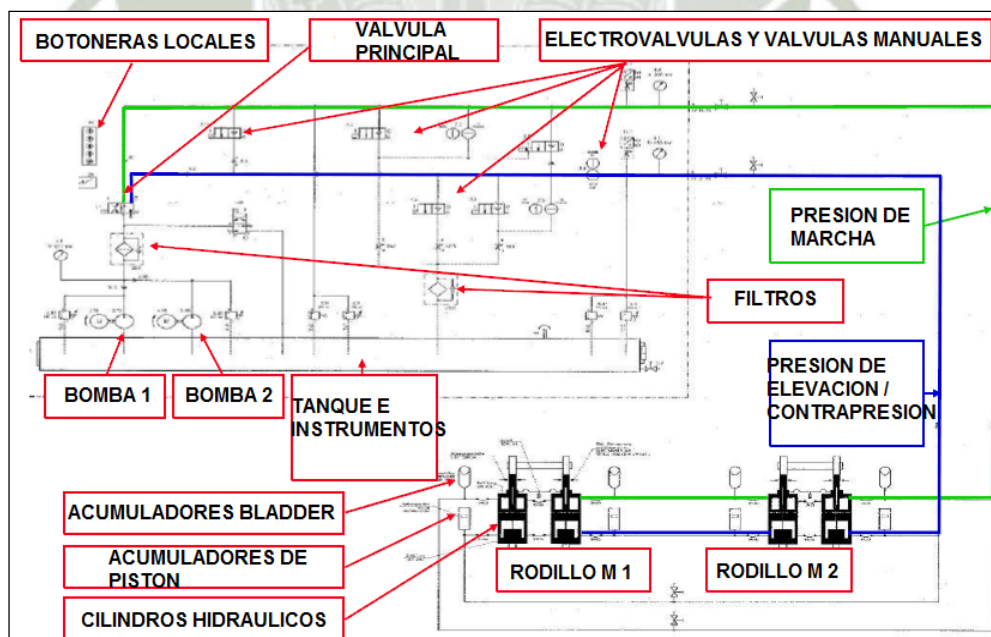
Figura 5.12: Componentes del sistema hidráulico de Rodillos

Máster



Fuente: Mischorr, 2010

Figura 5.13: Sistema hidráulico de Rodillos Máster



Fuente: Mischorr, 2010

El sistema hidráulico de los rodillos Máster tiene tres funciones, las cuales son bajar los rodillos durante el arranque permitiendo un arranque suave con material, elevar los rodillos al cortar alimentación y proveer la presión hidráulica en la operación de molienda.

En la operación de molienda el sistema hidráulico provee la presión hidráulica y absorbe el choque de los rodillos.

Las bombas hidráulicas bombean aceite del tanque a través de las líneas hacia los cilindros, las válvulas dirigen el aceite hacia el lugar adecuado y la presión es ajustada, la presión de operación jala el rocker arm hacia abajo presionando el rodillo hacia el material mientras que la contrapresión absorbe el choque adicional para una operación suave del molino.

Cuando el molino para, la contrapresión es incrementada hasta que los rodillos se levantan (presión de elevación), en operación, los rodillos saltan hacia arriba y hacia abajo lo cual resulta en un continuo intercambio de aceite entre los cilindros y los acumuladores en ambos lados (absorbe el choque).

Datos técnicos:

- 1400 litros de Aceite ISO VG 32.
- Capacidad de las bombas 47.2 litros/min y 175 BAR de presión (las bombas son idénticas).
- Presión de operación del sistema de 80 a 105 BAR.

- Contrapresión, es la presión mínima que se queda en el lado de elevación de los cilindros con la finalidad de actuar en contra la presión de operación de tal forma que se minimice la vibración del reductor principal. Trabaja de 15 a 20 BAR.
- Presión de elevación, cuando el molino está parado el lado de elevación de los cilindros es bombeado para levantar los rodillos, solo para mantenimiento se drena toda la presión.

#### **5.4.2.4.2 Sistema de lubricación Rodillos Máster**

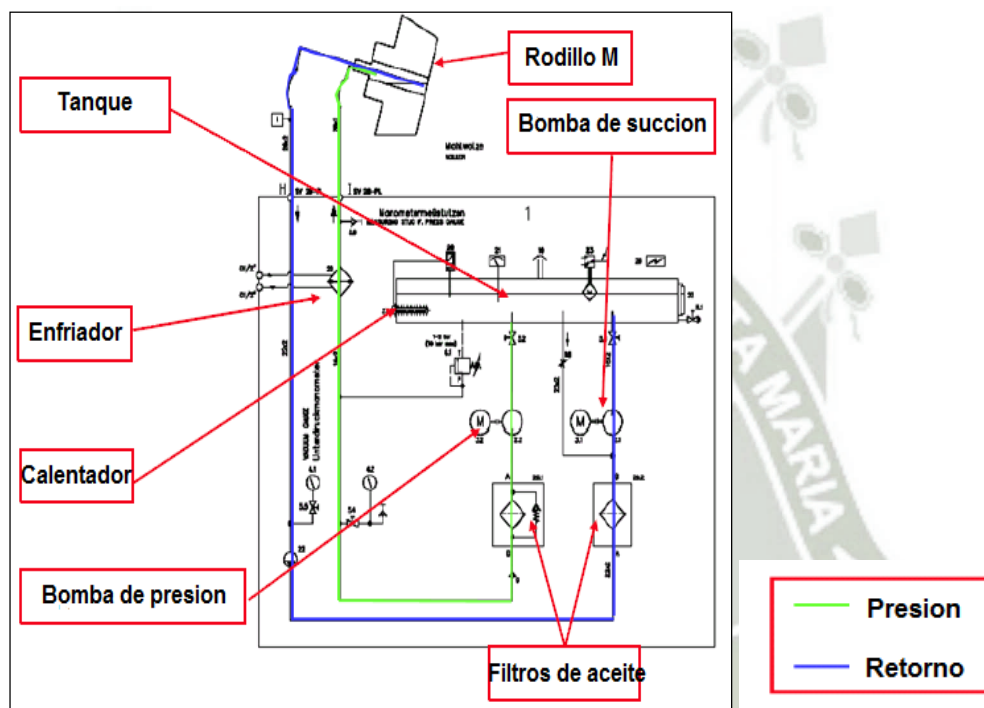
Los componentes del sistema de lubricación por rodillo máster son los siguientes:

- 1 tanque de aceite con sensores de nivel, temperatura y calentador (resistencias).
- 1 bomba de presión para transmitir el aceite pre calentado dentro del rodillo pasando por:
  - 1 filtro de aceite con una válvula bypass.
  - 1 enfriador de aceite con una válvula de control de agua.
  - Medidores de presión local indicando la presión en la línea antes y después del enfriador de aceite.
- 1 válvula de seguridad reguladora de presión antes del enfriador atrás del tanque.
- 1 bomba de succión que retorna el aceite del rodillo hacia el tanque pasando por:

- 1 filtro de aceite.
- 1 medidor local de presión indicando la succión antes del filtro.

La figura 5.14 muestra los componentes del sistema de lubricación de los rodillos máster.

Figura 5.14: Sistema de lubricación de Rodillos Máster



Fuente: Mischorr, 2010

Datos técnicos:

- 850 litros de aceite ISO VG 320 para ambos rodillos.
- Capacidad de bomba de presión 61 litros/min.
- Capacidad de bomba de succión 11 litros/min.
- Con una temperatura del aceite menor a 15° Celsius las bombas no arrancan.

- Con una temperatura del aceite menor a 55° Celsius arranca el calentador de aceite.
- Con una temperatura del aceite mayor a 60° Celsius se para el calentador de aceite.
- Con una temperatura del aceite mayor a 70° Celsius se tiene la alarma de alta temperatura.
- Con una temperatura del aceite mayor a 80° Celsius por 30 minutos para las bombas.

La lubricación o recirculación de aceite en los rodillos máster tiene dos funciones las cuales son enfriar los rodamientos y empaquetaduras del rodillo e identificar fallas en los sellos por nivel de tanque bajo antes de que el rodillo se seque.

Si el aceite es muy frío la bomba de presión bombea más aceite que lo que succiona la bomba de succión y el rodillo se llena mucho, si el aceite es muy caliente los sellos internos se pueden dañar, las bombas de succión arrancan varios minutos antes que las bombas de presión.

La circulación arranca o para 30 minutos después de dar alimentación al molino para permitir que los rodillos se calienten o enfríen según sea el caso.

#### **5.4.2.4.3 Sistema de engrase del rocker arm de los rodillos Master**

El sistema automático suministra grasa a los rodamientos radial y axial de los ejes del rocker arm. Existen 12 puntos de engrase, 6 en cada eje.

Las conexiones del rocker arm hacia los cilindros hidráulicos son engrasadas manualmente, existen 4 puntos de grasa por rodillo.

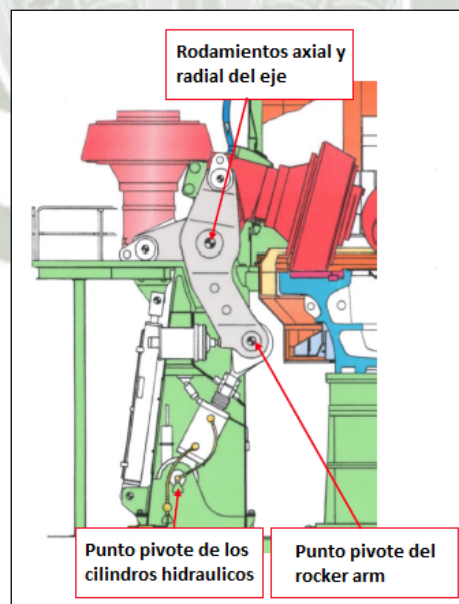
Las conexiones entre los cilindros hidráulicos y la base del molino son engrasadas manualmente, son 2 puntos de grasa por rodillo.

El engrase automático funciona mediante una bomba que arranca durante 13 minutos cada 47 minutos mientras el molino este en trabajo y el engrase manual se hace una vez al día.

Componentes estructurales:

- 1 bomba de pistones de grasa KPF 2 G.
- 1 tanque de grasa.
- 2 distribuidores de grasa.

Figura 5.15: Puntos de engrase del rocker arm de los rodillos Master



Fuente: Mischorr, 2010

#### 5.4.2.4.4 Sistema hidráulico Rodillos Esclavos

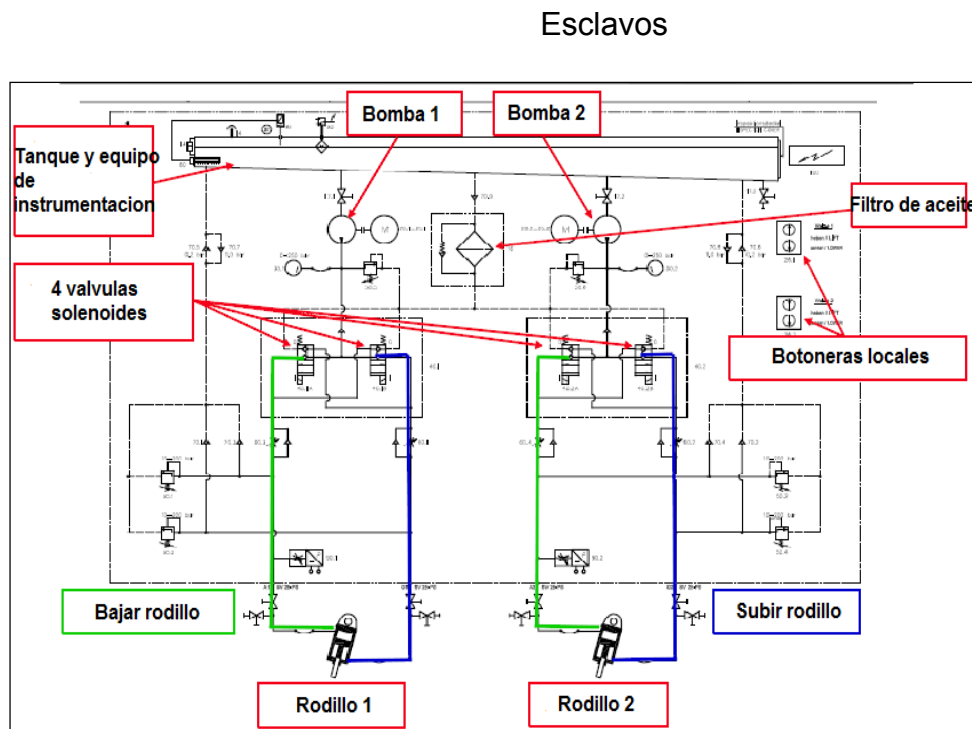
El sistema emplea una mínima presión hidráulica de 30 BAR, los rodillos esclavos no están sujetos a inestabilidades de la mesa de molienda por lo tanto no necesita acumuladores de nitrógeno. El sistema hidráulico baja los rodillos cuando se da alimentación y los sube cuando se corta alimentación, en la operación el control automático ajusta la posición óptima de trabajo del rodillo esclavo.

Los componentes del sistema hidráulico son los siguientes:

- 1 tanque de aceite con sensores de nivel, temperatura y calentador (resistencia).
- 2 bombas de presión, una por rodillo cada una con una válvula de seguridad reguladora de presión y medidor local de presión.
- 1 filtro de retorno común.
- 2 válvulas solenoides por bomba.
- Botoneras locales para cada rodillo.
- 2 cilindros hidráulicos.

La figura 5.16 muestra los componentes del sistema hidráulico de los rodillos esclavos.

Figura 5.16: Componentes del sistema hidráulico de Rodillos



Fuente: Mischorr, 2010

Datos técnicos:

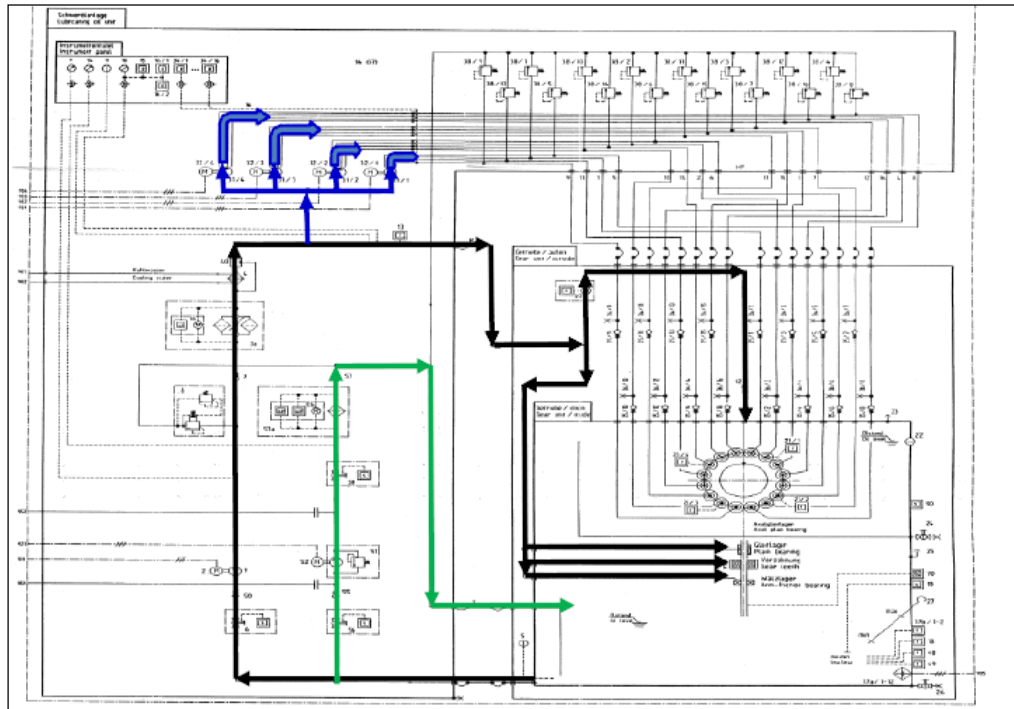
- 100 litros de aceite ISO VG 32.
- Capacidad de cada bomba 2.5 litros/min.
- Presión de cada bomba 250 BAR.
- Presión de elevación de 50 a 60 BAR.
- Presión de marcha de 10 a 20 BAR en contacto normal con el material.

#### 5.4.2.4.5 Sistema de lubricación del reductor RENK

Lo componen el sistema de lubricación propiamente dicho o llamado también sistema de baja presión, el circuito de filtración fina de aceite y el sistema de alta presión. En la figura 5.17 se muestra el sistema de lubricación; en líneas azules el

sistema de alta presión, en negras el sistema baja presión y en verdes el circuito de filtración fina.

Figura 5.17: Sistemas de lubricación del reductor RENK



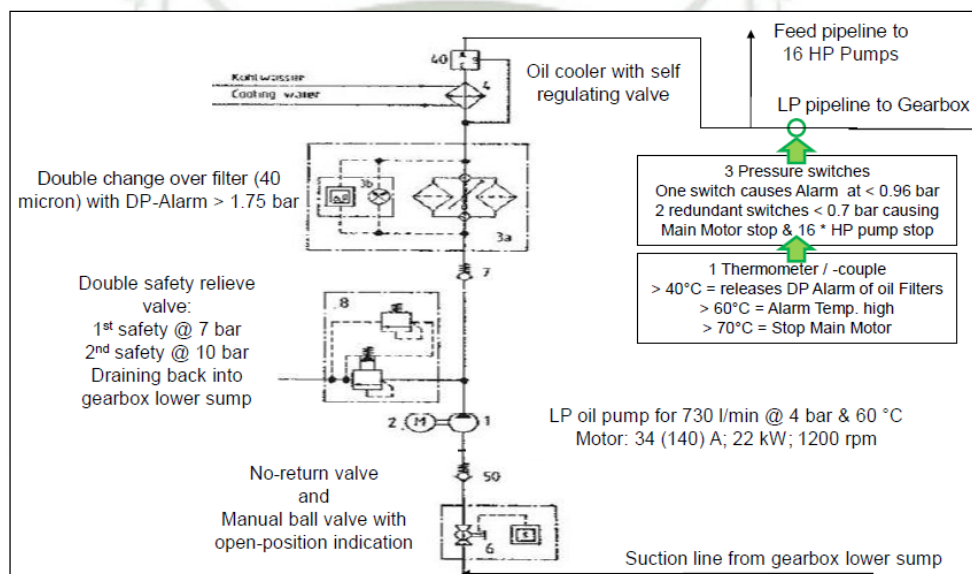
Fuente: Mischorr, 2010

Componentes estructurales del sistema de baja presión:

- Bomba de baja presión de engranajes de 730 litros/min de capacidad, 4 BAR y 60 ° Celsius.
- Motor Siemens de 22 KW de potencia y 1200 rpm.
- 1 válvula de bola.
- 1 válvula anti retorno.
- Válvula de seguridad doble accionada a 7 y a 10 BAR.
- 2 filtros de 40 micras con 1.75 BAR de presión máxima.
- Enfriador de aceite con válvula reguladora de caudal.

- 1 flujómetro a la entrada del reductor con un flujo mínimo de 110 litros/min.
- 3 sensores de presión, uno de 0.96 BAR de presión máxima y los otros 2 de 0.7 Bar.
- 1 termocupla, a 70 ° Celsius es la máxima temperatura de operación.

Figura 5.18: Sistema de baja presión del reductor RENK



Fuente: Mischorr, 2010

Es un sistema de lubricación estándar, se succiona el aceite del reductor, este pasa por el filtro dual de 40 micrones cada uno, la ventaja de contar con esos dos filtros en paralelo es que si uno se satura se puede direccionar la línea hacia el otro en operación sin mayores complicaciones; cuando se filtra el aceite pasa por un enfriador de tubos el cual cuenta con una válvula mecánica de tres vías que retorna a la línea el aceite

aún caliente. El sistema cuenta con protecciones como sensores de presión, de temperatura y válvulas de seguridad. Parte del aceite de este sistema es bombeado hacia la parte superior del reductor, donde se encuentran los PADS, este aceite tiene la finalidad de enfriar esa zona para evitar que los PADS calienten ya que son muy sensibles ante la temperatura y podrían dañarse, los PADS como se verán posteriormente son cubos que inyectan el aceite del sistema de alta presión.

#### 5.4.2.4.6 Sistema de alta presión del reductor RENK

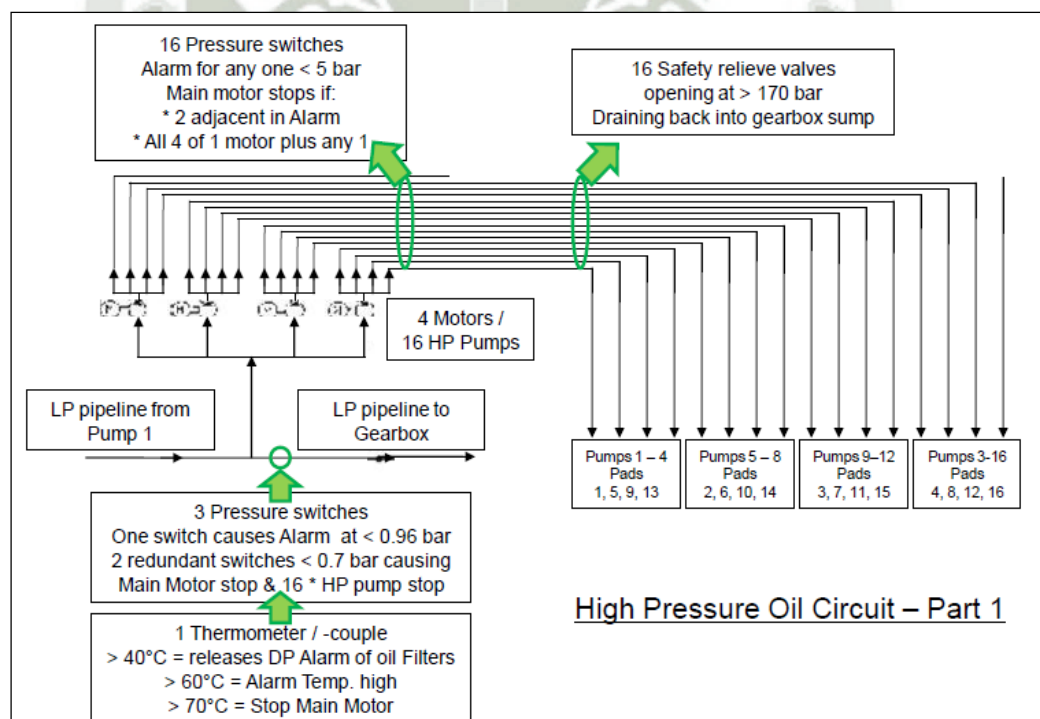
Componentes estructurales:

- 16 bombas de alta presión de pistones de 7.61 litros/min de capacidad, de 46 BAR y 50 ° Celsius.
- 4 motores Siemens 18 KW de potencia y 1200 rpm.
- 16 presostatos de 5 BAR de presión máxima.
- 16 válvulas de seguridad de 170 BAR de presión máxima.
- 3 sensores de presión uno de 0.96 BAR de presión máxima y los otros 2 de 0.7 Bar.
- 1 termocupla, a 70 ° Celsius es la máxima temperatura de operación.
- 16 líneas de alta presión.
- 16 PADS cada uno con una válvula anti retorno.
- Líneas de evacuación de aceite de la parte superior hacia la parte inferior del reductor.

- Respiradero.
- Visores de nivel de aceite.
- Válvula manual en la parte inferior del reductor para operación de drenaje.
- 4 termocuplas en la zona de los PADS con un rango máximo de temperatura de operación de 75 ° Celsius.

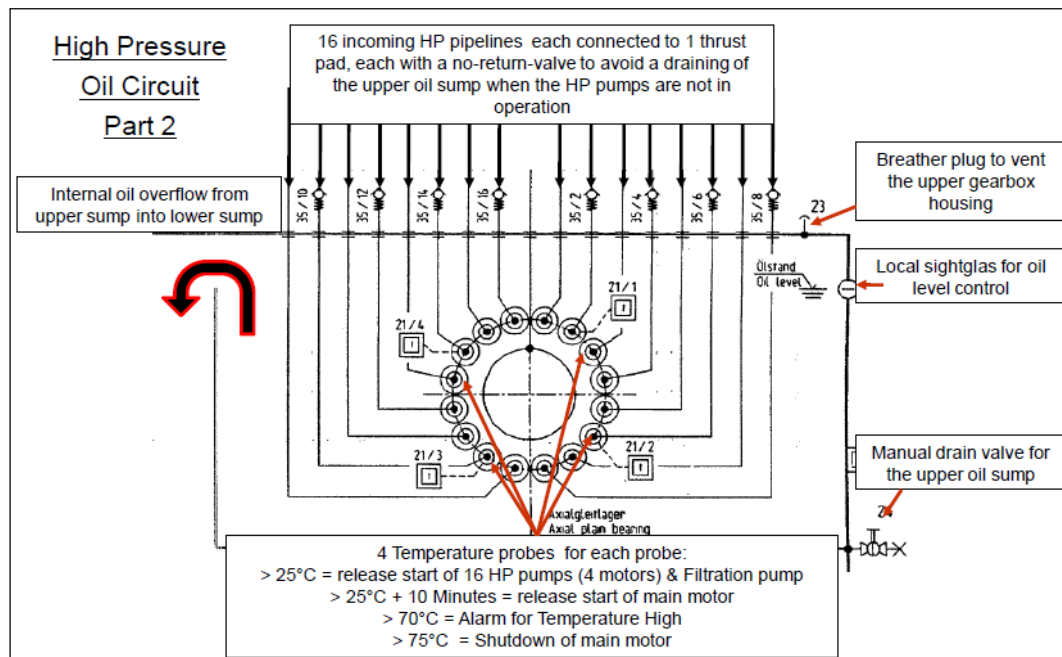
Las figuras 5.19 y 5.20 muestran el sistema de alta presión del reductor.

Figura 5.19: Sistema de alta presión del reductor RENK parte 1



Fuente: Mischorr, 2010

Figura 5.20: Sistema de alta presión del reductor RENK parte 2



Fuente: Mischorr, 2010

La finalidad del sistema de alta presión es inyectar aceite a razón de 50 BAR hacia los PADS, los PADS son unos cubos ubicados en todo el perímetro de la parte superior del reductor, estos tienen un conducto en su centro por donde pasa el aceite, con el aceite inyectado por los 16 PADS se forma una película de un grosor de 10 mm aproximadamente, esta película de aceite es la base de la mesa de molienda, ahí flota la mesa de molienda accionada por el reductor.

Este sistema cuenta con 4 motores que accionan 16 bombas, una para cada PAD, y así se inyecta el aceite hacia la parte superior mediante líneas independientes.

El sistema cuenta con sensores que lo protegen de sobrepresiones y temperaturas elevadas.

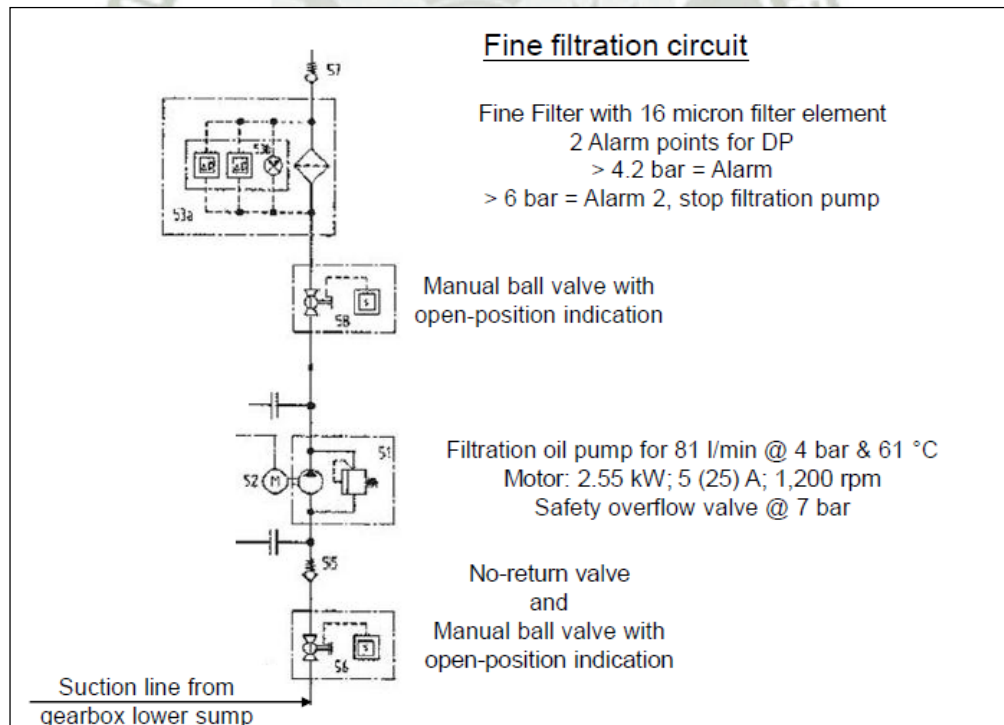
#### 5.4.2.4.7 Circuito de filtración fina del aceite

Componentes estructurales:

- 1 bomba de engranajes de 81 litros / min de capacidad, de 4 BAR y 61 ° Celsius.
- 1 motor Siemens de 2.55 KW de potencia y 1200 rpm.
- Válvula de seguridad con 7 BAR de presión máxima.
- Válvula anti retorno.
- 2 Válvulas de bola manuales.
- 1 filtro de aceite de 16 micras con 6 BAR de presión máxima.

En la figura 5.21 se muestra el circuito de filtración fina.

Figura 5.21: Circuito de filtración fina del aceite



Fuente: Mischorr, 2010

La finalidad de este circuito es filtrar finamente el aceite del reductor y luego retornarlo a los sistemas de baja y alta presión, su función secundaria es usar la bomba para introducir o drenar aceite del reductor en un cambio de aceite para mantenimiento.

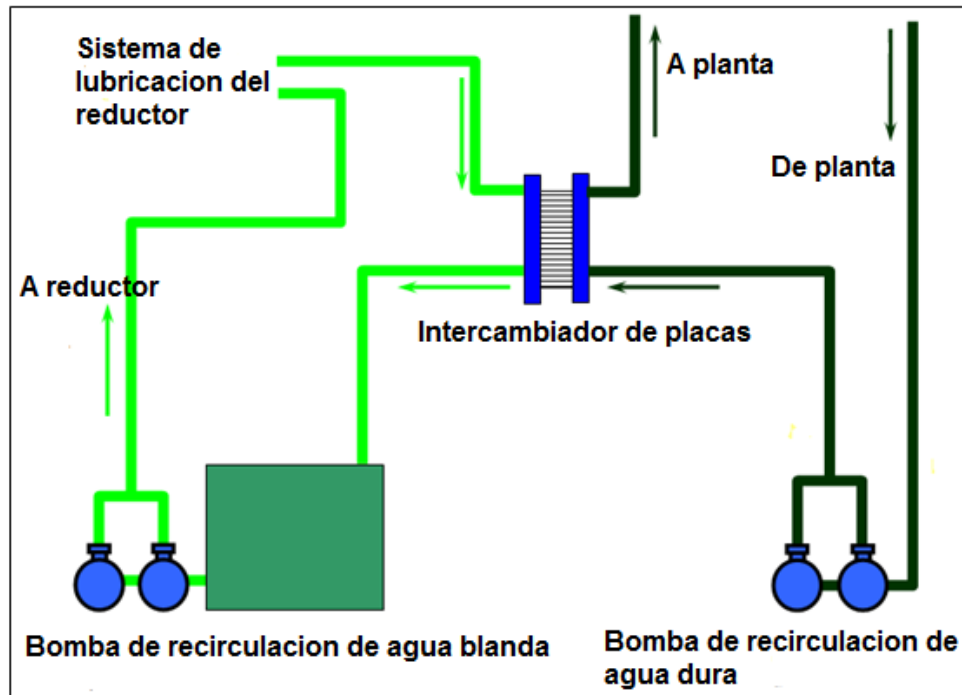
#### 5.4.2.4.8 Sistema de enfriamiento por agua

El sistema de lubricación cuenta con un sistema de enfriamiento por agua, el cual succiona el agua de planta y la direcciona hacia un tanque diario pasando por un enfriador de placas. El agua del tanque diario es bombeada hacia el sistema de lubricación del reductor como se ve en la figura 5.22.

Componentes estructurales:

- 4 bombas centrifugas HIDROSTAL.
- 1 enfriador de placas ALFA LAVAL.
- Válvulas manuales.
- Instrumentación.
- 1 tanque diario de 5000 galones de capacidad.

Figura 5.22: Sistema de enfriamiento por agua



Fuente: Elaboración Propia

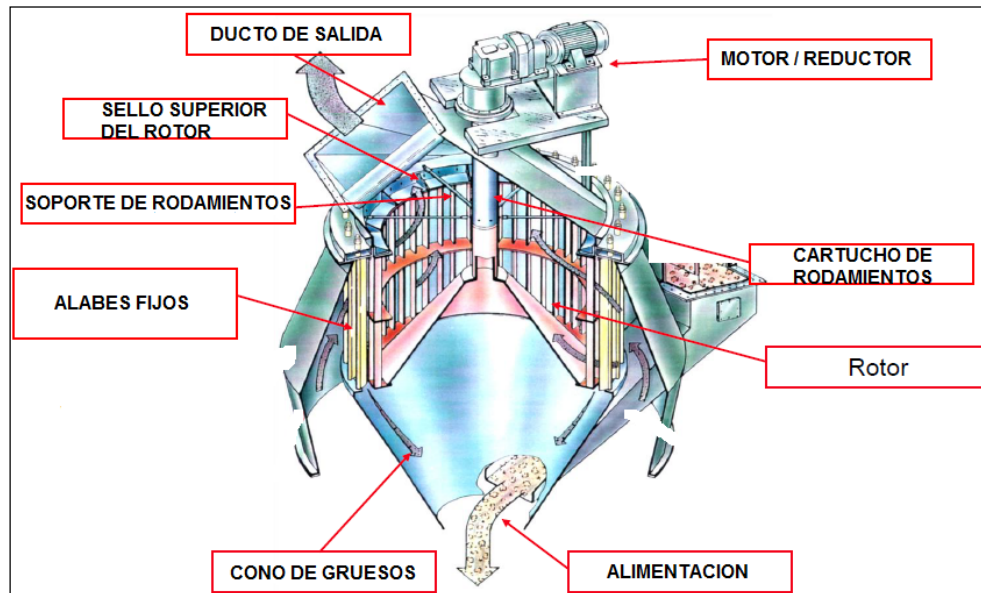
#### 5.4.2.5 Clasificador dinámico

Componentes estructurales:

- 1 Motor MENZEL de 1200 KW de potencia y 1900 rpm con variador de frecuencia.
- 1 Reductor FLENDER con 103.5 rpm de velocidad nominal.
- 1 rotor con 360 álabes móviles.
- 30 álabes fijos.
- Cono de gruesos.
- Ducto de salida.
- 1 bomba de pistones de grasa KPF 2 G.

La figura 5.23 muestra los componentes estructurales del clasificador dinámico.

Figura 5.23: Componentes estructurales del clasificador dinámico



Fuente: Mischorr, 2010

El clasificador dinámico tiene como finalidad separar las partículas de cemento finas de las gruesas para obtener la mayor superficie específica según Blaine del cemento, mientras mayor sea la velocidad del rotor mejor será la calidad (resistencia del cemento). Los álabes fijos integrados en la caseta superior del clasificador dirigen la mezcla de aire y material de un flujo ascendente a un flujo tangencial, el rotor gira en la misma dirección que el flujo tangencial.

En el espacio entre los álabes fijos y el rotor se forma un campo de fuerzas centrífugas en el cual la mezcla de aire y material se clasifica.

Las partículas de mayor tamaño caen hacia la parte inferior por la fuerza de la gravedad. Después de dejar el espacio entre los álabes fijos y el rotor las partículas gruesas vuelven a la mesa de molienda para ser molidas nuevamente y el material ya clasificado sale del clasificador con el flujo de gases hacia el filtro del sistema.

La bomba de grasa tiene la finalidad de engrasar los rodamientos del rotor durante 12 minutos automáticamente cada 48 minutos.

## 5.5 Producción, calidad y mantenimiento del molino

### 5.5.1 Producción del molino

El rendimiento nominal del molino es 180 TM / h, los equipos principales y auxiliares están diseñados para esa capacidad de producción.

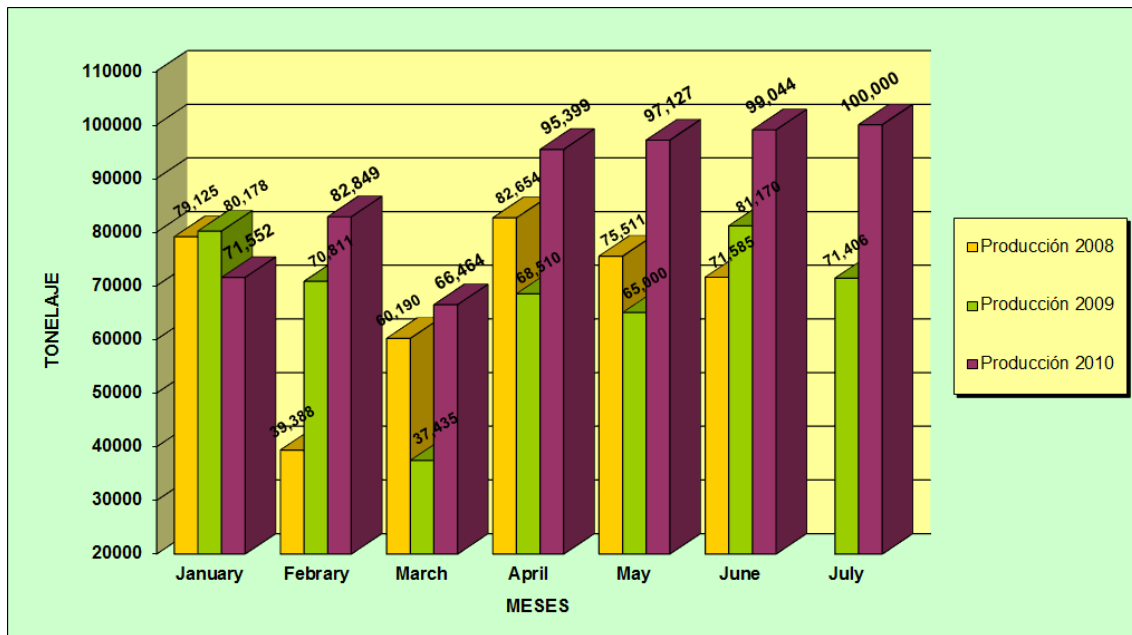
La producción se ha incrementado desde el año 2008 hasta el 2010 como se observa en la tabla 5.2 y en el gráfico 5.1.

Tabla 5.2: Producción del molino Loesche desde el 2008 hasta el 2010

	<b>PRODUCCION MENSUAL (TM)</b>		
<b>MES</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
Enero	79125	80178	71552
Febrero	39388	70811	82849
Marzo	60190	37435	66464
Abril	82654	68510	95399
Mayo	75511	65000	97127
Junio	71585	81170	99044
Julio	55511	71406	100000
<b>Total</b>	<b>463964</b>	<b>474510</b>	<b>612435</b>

Fuente: SAP Yura S.A.2012.

Grafico 5.1: Producción comparativa del molino Loesche



Fuente: Elaboración Propia.

Se producen 3 tipos de cemento en el molino, los cuales son el tipo 1P, tipo I y tipo V, la producción mayoritaria es el cemento tipo 1P que es de uso general en todas las construcciones.

En la tabla 5.3 se observa la producción de los diferentes tipos de cemento en el molino Loesche y sus condiciones de operación.

Tabla 5.3: Producción de tipos de cemento en el molino Loesche

	<b>Mezcla Clinker</b>	<b>Potencia consumida</b>	<b>Presión molienda</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Temperatura molino</b>	<b>Velocidad clasificador</b>	<b>Dosificación agua</b>	<b>Blaine</b>	<b>Fineza</b>
Tipo	%	KW	BAR	TM/hora	°C	RPM	Litros/hora	cm <sup>2</sup> /gr	%
1P	100 Yura	3600-3800	100-105	180	79-81	92-94	1300-1700	4600-4800	2.1-2.9
	50 – 50 Yura-Cesur	3600-3800	90-98	180	80-82	89-92	1300-1700	4500-4700	2.1-2.9
	50 – 50 Corea-Cesur	3500-3700	95-100	180	80-82	89-92	1300-1700	4500-4700	2.2-2.8
	90 – 10 Corea-Cesur	3500-3600	90-95	180	80-82	89-92	1300-1700	4500-4700	2.2-2.8
Tipo I	100 Yura	3400-3700	95-105	180	88-90	88-90	3000-3500	3600-3900	3-4
Tipo V	100 Yura	3400-3700	95-105	180	88-90	88-90	3000-3500	3600-3900	3-4

Fuente: SCADA Yura S.A.2012.

### 5.5.2 Calidad del cemento en el molino

El molino Loesche obtiene una mayor calidad del cemento que los sistemas de molienda de bolas a un menor costo como se indicó en el capítulo I, es por eso que es tan crítico en los equipos de la planta cementera.

La tabla 5.4 muestra la calidad del cemento que produce el molino Loesche, con el concepto de calidad se refiere a obtener principalmente una resistencia a la compresión ( $\text{kg-f/cm}^2$ ) mínima de 230 a la edad de 7 días.

Tabla 5.4: Calidad del cemento en el molino Loesche

Fecha	Procedencia Muestra		Fineza Retenido malla N°	Blaine	Resistencia a Compresión, $\text{kg-f/cm}^2$		
	Muestras	Silo			1 Día	3 Días	7 Días
05-ene-2010	1P	silo 6	4.80	4216	93.68	193.17	236.57
06-ene-2010	1P	silo 6	5.00	4200	89.57	181.93	231.14
06-ene-2010	1P	silo 4	5.60	4120	84.10	180.77	222.62
07-ene-2010	1P	silo 6	4.20	4440	89.86	176.50	235.02
07-ene-2010	1P	silo 4	4.10	4354	80.21	177.67	222.81
08-ene-2010	1P	silo 6	5.00	4460	93.78	181.93	227.46
11-ene-2010	1P	silo 6	4.00	4500	102.18	179.41	244.51
12-ene-2010	1P	silo 5	3.80	4233	100.79	188.52	238.51
13-ene-2010	1P	silo 6	3.30	4590	95.34	181.54	232.50
13-ene-2010	1P	silo 5	3.70	4280	88.70	174.76	216.23
13-ene-2010	1P	silo 6	4.20	4300	93.54	181.93	232.89
14-ene-2010	1P	silo 6	3.80	4330	89.92	179.99	234.05
16-ene-2010	1P	silo 6	4.40	4270	94.78	174.57	237.73
16-ene-2010	1P	silo 2	3.90	4340	90.21	177.67	232.31
17-ene-2010	1P	silo 6	3.80	4430	94.80	186.00	255.36
18-ene-2010	1P	silo 5	4.10	4320	97.30	183.09	236.18

19-ene-2010	1P	siló 6	3.30	4280	101.27	187.55	238.12
20-ene-2010	1P	siló 6	3.30	4200	95.56	187.94	236.76
20-ene-2010	1P	siló 5	3.90	4420	109.08	204.60	247.42
21-ene-2010	1P	siló 6	3.60	4230	99.67	202.46	248.19
21-ene-2010	1P	siló 2	3.60	4300	101.00	186.64	232.89
22-ene-2010	1P	siló 6	3.70	4240	97.40	210.61	261.76
23-ene-2010	1P	siló 6	3.70	4200	111.10	181.35	244.71
31-ene-2010	1P	siló 5	3.80	4530	90.79	167.40	215.84
01-feb-2010	1P	siló 6	4.12	4440	87.19	181.54	232.11
02-feb-2010	1P	siló 2	2.70	4500	117.04	198.98	226.30
02-feb-2010	1P	siló 5	3.10	4560	98.39	174.37	225.91
03-feb-2010	1P	siló 4	2.90	4530	102.09	174.18	224.56
03-feb-2010	1P	siló 6	3.20	4280	108.02	196.46	236.38
03-feb-2010	1P	siló 6	2.90	4530	105.71	177.86	230.56
04-feb-2010	1P	siló 5	4.40	4200	98.21	178.63	229.98
04-feb-2010	1P	siló 6	3.40	4330	108.25	177.28	234.24
04-feb-2010	1P	siló 4	3.10	4410	93.02	187.94	240.04
05-feb-2010	1P	siló 6	2.30	4360	96.99	193.56	247.03
05-feb-2010	1P	siló 6	3.20	4410	132.14	211.77	255.17
06-feb-2010	1P	siló 4	3.70	4440	88.16	188.04	247.81
06-feb-2010	1P	siló 4	2.80	4480	98.58	175.15	248.39
06-feb-2010	1P	siló 6	3.00	4450	98.15	185.81	233.47
07-feb-2010	1P	siló 6	3.30	4560	94.57	180.58	234.05
09-feb-	1P	siló 4	2.90	4440	92.13	199.56	232.89

2010							
09-feb-2010	1P	siló 6	3.00	4500	108.05	178.25	220.88
09-feb-2010	1P	siló 5	3.00	4550	111.41	201.12	243.54
10-feb-2010	1P	siló 4	3.00	4520	99.82	166.24	233.05
11-feb-2010	1P	siló 6	2.90	4490	113.32	187.74	225.72
12-feb-2010	1P	siló 5	3.10	4450	103.85	192.59	228.82
12-feb-2010	1P	siló 4	2.90	4400	83.22	200.92	241.03
13-feb-2010	1P	siló 6	3.06	4360	106.65	195.49	247.03
13-feb-2010	1P	siló 6	2.70	4440	93.17	198.20	256.33
14-feb-2010	1P	siló 6	2.90	4430	90.67	169.92	223.69
14-feb-2010	1P	siló 5	3.10	4520	92.98	175.48	222.18
14-feb-2010	1P	siló 4	3.00	4540	101.72	171.94	221.99
15-feb-2010	1P	siló 2	3.10	4450	108.46	192.64	230.89
16-feb-2010	1P	siló 4	3.10	4440	93.96	175.15	230.56
16-feb-2010	1P	siló 6	3.20	4440	93.79	180.58	231.34
17-feb-2010	1P	siló 5	3.10	4082	101.06	186.78	226.88
18-feb-2010	1P	siló 4	3.10	4440	97.34	169.14	227.46
18-feb-2010	1P	siló 6	3.61	4400	112.86	198.59	239.67
19-feb-2010	1P	siló 6	2.80	4510	118.08	182.06	242.96
19-feb-2010	1P	siló 6	3.50	4420	103.43	175.24	239.09
20-feb-2010	1P	siló 6	2.27	4280	108.38	208.67	276.09
21-feb-2010	1P	siló 5	2.90	4500	94.09	190.07	241.60
21-feb-2010	1P	siló 2	2.70	4216	109.90	206.34	280.94
24-feb-2010	1P	siló 6	3.40	4160	112.28	184.24	221..84

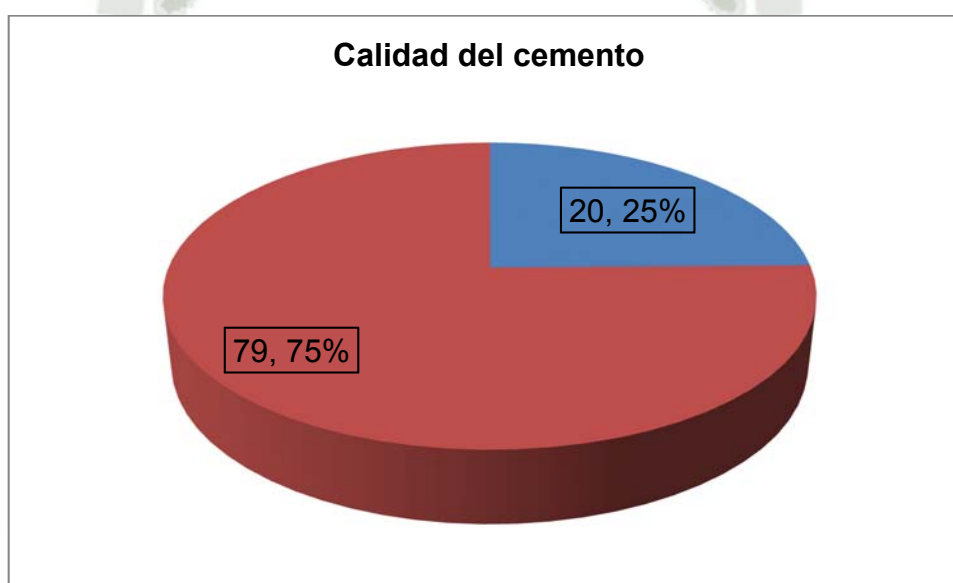
24-feb-2010	1P	siló 4	3.00	4400	102.09	177.09	230.95
25-feb-2010	1P	siló 6	3.60	4300	100.25	202.85	247.42
25-feb-2010	1P	siló 5	3.80	4360	107.65	187.74	234.83
26-feb-2010	1P	siló 6	3.00	4450	111.32	197.04	248.00
27-feb-2010	1P	siló 6	3.30	4440	92.47	179.41	231.92
28-feb-2010	1P	siló 6	3.00	4480	100.96	207.50	236.18
28-feb-2010	1P	siló 4	3.20	4480	100.69	202.85	235.02
28-feb-2010	1P	siló 6	3.10	4470	99.74	188.33	241.61
07-mar-2010	1P	siló 6	3.30	4340	101.89	187.55	243.54
09-mar-2010	1P	siló 6	3.61	4240	109.24	192.01	227.08
10-mar-2010	1P	siló 2	3.20	4200	108.89	197.04	231.34
10-mar-2010	1P	siló 6	9.37	4010	104.97	183.68	219.71
11-mar-2010	1P	siló 5	3.80	4400	90.31	173.99	230.17
11-mar-2010	1P	siló 4	3.61	4340	96.41	185.22	230.76
11-mar-2010	1P	siló 6	3.09	4370	94.57	182.12	230.76
12-mar-2010	1P	siló 5	2.78	4400	98.39	170.11	209.83
12-mar-2010	1P	siló 6	2.88	4470	97.50	171.66	204.98
13-mar-2010	1P	siló 4	2.60	4360	89.11	169.34	229.59
13-mar-2010	1P	siló 6	3.30	4390	86.06	175.93	231.53
14-mar-2010	1P	siló 5	3.30	4450	91.93	186.00	231.34
16-mar-2010	1P	siló 6	3.09	4510	102.61	216.61	265.83
16-mar-2010	1P	siló 5	3.90	4300	104.76	203.83	229.40
16-mar-2010	1P	siló 6	3.10	4430	119.74	219.13	274.35
18-mar-	1P	siló 6	4.74	4130	96.70	179.22	222.62

2010							
18-mar-2010	1P	siló 6	3.70	4330	103.48	187.74	235.02
19-mar-2010	1P	siló 6	4.22	4380	85.44	168.75	204.99
20-mar-2010	1P	siló 6	3.60	4400	94.67	185.61	242.38
21-mar-2010	1P	siló 4	3.70	4460	91.62	188.71	243.73
23-mar-2010	1P	siló 4	3.60	4420	106.33	200.34	240.83
23-mar-2010	1P	siló 6	3.90	4380	105.79	196.85	238.51
24-mar-2010	1P	siló 6	3.80	4510	106.06	183.48	234.83
26-mar-2010	1P	siló 6	2.49	4400	100.69	183.48	236.38
27-mar-2010	1P	siló 2	2.70	4440	91.70	195.30	248.78
28-mar-2010	1P	siló 6	2.80	4600	103.64	193.36	245.48
28-mar-2010	1P	siló 4	2.90	4500	95.03	173.21	215.06
31-mar-2010	1P	siló 6	4.00	4330	106.64	179.03	257.30
01-abr-2010	1P	siló 6	2.99	4450	92.23	189.88	233.28
01-abr-2010	1P	siló 4	2.60	4520	98.23	185.42	244.70
02-abr-2010	1P	siló 5	2.90	4560	97.26	185.61	233.08
02-abr-2010	1P	siló 6	3.00	4550	107.55	187.94	233.85
02-abr-2010	1P	siló 2	2.90	4490	99.78	187.94	231.73
04-abr-2010	1P	siló 4	2.68	4410	107.01	206.93	269.12
04-abr-2010	1P	siló 6	2.16	4450	102.46	214.09	258.27
06-abr-2010	1P	siló 4	2.68	4530	112.22	196.08	
06-abr-2010	1P	siló 5	2.06	4490	108.79	189.88	
07-abr-2010	1P	siló 6	2.70	4620	100.19	205.18	
07-abr-2010	1P	siló 4	1.75	4590	118.03	204.64	

07-abr-2010	1P	siló 6	2.27	4530	113.15	194.53	
08-abr-2010	1P	siló 6	2.60	4640	108.15	191.81	
08-abr-2010	1P	siló 5	2.10	4730	111.12	199.37	
08-abr-2010	1P	siló 4	2.47	4620	122.00	210.80	

Fuente: SAP Yura S.A.2012.

Grafico 5.2: Calidad del cemento en el molino Loesche

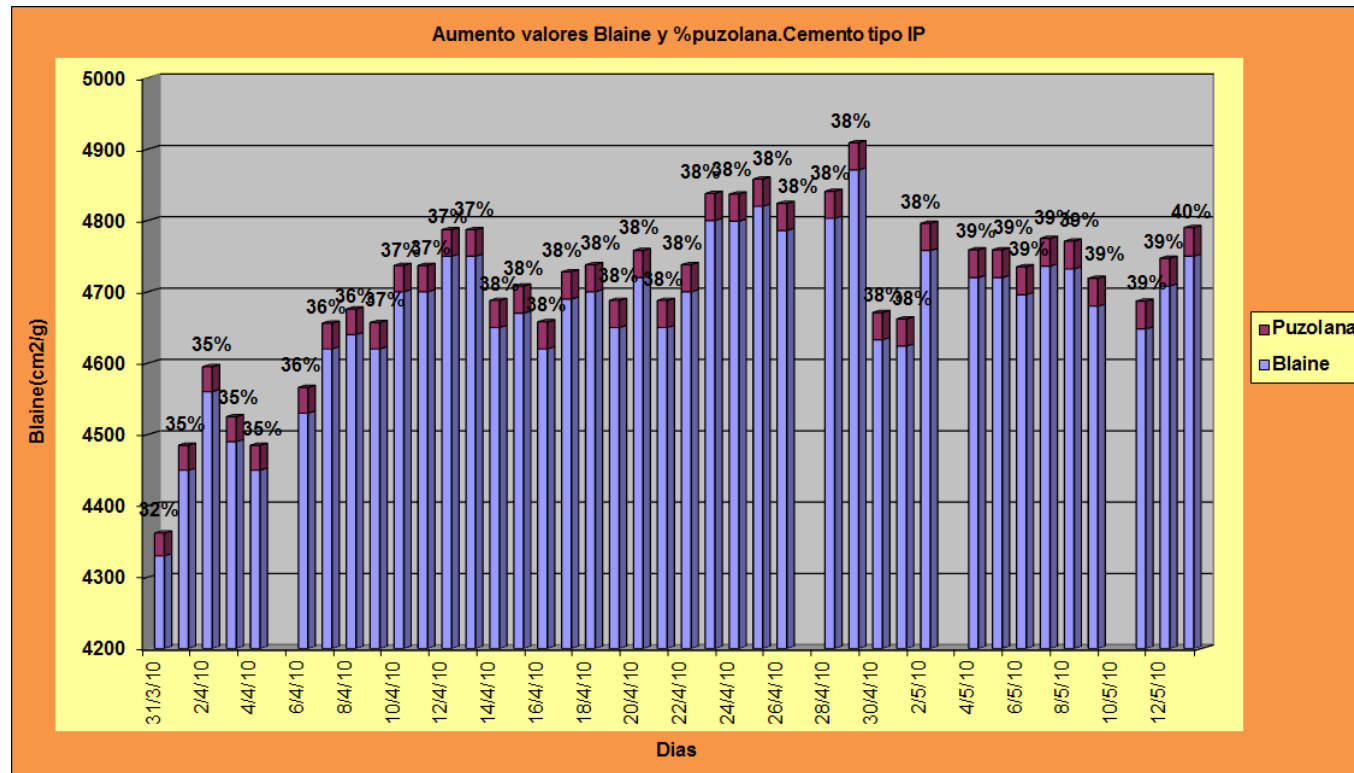


Fuente: Elaboración Propia.

El gráfico 5.2 indica que el 80% de 105 muestras desde enero hasta abril del año 2010 cumple con los requisitos de calidad.

Con el pasar del tiempo se han conseguido mejoras en el proceso que permiten que la calidad del cemento en cuanto a valores Blaine se incremente como se observa en el gráfico 5.3.

Grafico 5.3: Incremento de la calidad del cemento tipo 1P



Fuente: SAP Yura S.A.2012, elaboración Propia.

### 5.5.3 Estrategia mantenimiento actual

Para determinar mediante datos reales que estrategia de mantenimiento se sigue actualmente, en la tabla 5.5 y en el gráfico 5.4 se describen las paradas del molino por fallas y por mantenimiento programado en un mes de operación.

Tabla 5.5: Paradas del molino en 1 mes

<b>CODIGO</b>	<b>EQUIPO</b>	<b>TIPO DE FALLA</b>
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115-1	Motor principal molino vertical	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2120	Faja transportadora de rechazos	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2206	Faja transportadora de cemento 1	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Programa producción
L3-2115	Molino vertical de cemento	Programa producción
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica

L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2126	Ventilador de filtro	Falla mecánica
L3-2109	Tolva pulmón	Falla electrónica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla eléctrica
L3-2210	Elevador de cangilones	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	silos llenos
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2220	Compuerta de cemento	Falla electrónica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2126-2	Variador de frecuencia (driver)	Falla electrónica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla mecánica
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2208	Faja transportadora de cemento 2	Falla electrónica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2210	Elevador de cangilones	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla eléctrica
L3-2016-B	Compuerta de puzolana y yeso	Falla mecánica
L3-2115-2	Reductor molino vertical	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica

L3-2016-B	Compuerta de puzolana y yeso	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2208-2	Báscula de cinta para faja	Falla eléctrica
L3-2208-2	Báscula de cinta para faja	Falla eléctrica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2208	Faja transportadora de cemento 2	Falla electrónica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2208-2	Báscula de cinta para faja	Falla eléctrica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2210	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2208	Faja transportadora de cemento 2	Falla electrónica
L3-2210	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2210	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2210	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2210	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2110	Balanza dosificadora	Mantenimiento programado
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2120	Faja transportadora de rechazos	Falla mecánica
L3-2126	Ventilador de filtro	Falla electrónica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla electrónica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla electrónica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115-1	Motor principal molino vertical	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115-1	Motor principal molino vertical	Falla electrónica
L3-2115-1	Motor principal molino vertical	Falla electrónica
L3-2115-1	Motor principal molino vertical	Falla eléctrica
L3-2102-3	Balanza dosificadora de Clinker	Falla mecánica

L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115-1	Motor principal molino vertical	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2103	Faja transportadora ascendente	Falla mecánica
L3-2240	Compuerta de 02 vías	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2214	Canaleta aerodeslizador	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115-1	Motor principal molino vertical	Falla mecánica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla electrónica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla electrónica
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado

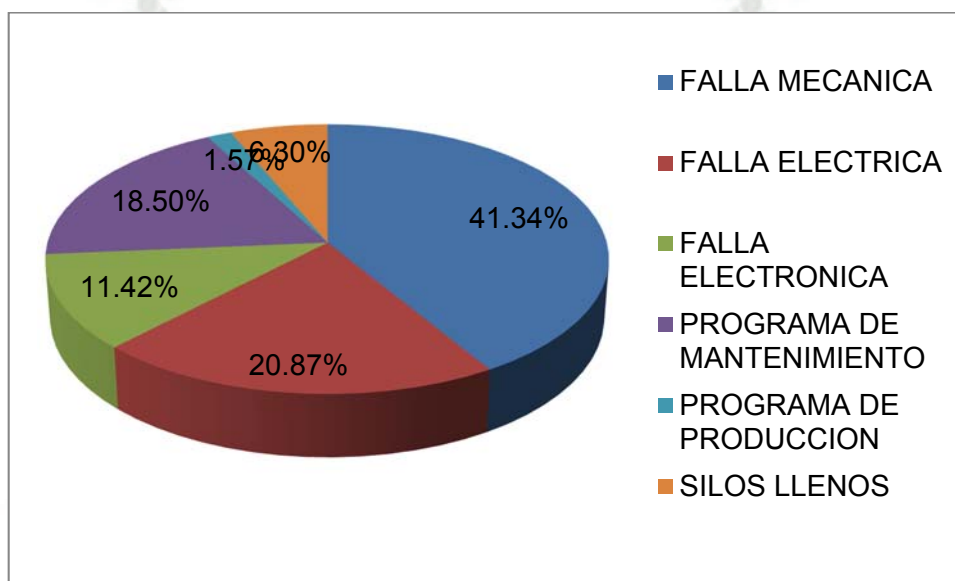
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla mecánica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla mecánica
L3-2107	Faja transportadora ascendente	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla electrónica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2113	Válvula rotativa	Falla electrónica
L3-2126	Ventilador de filtro	Falla eléctrica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2218	Canaleta aerodeslizador	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla mecánica
L3-2215	Elevador de cangilones	Falla mecánica
L3-2120	Faja transportadora de rechazos	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica

L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2126	Ventilador de filtro	Falla eléctrica
L3-2136	Sistema hidráulico del molino	Falla mecánica
L3-2136	Sistema hidráulico del molino	Falla mecánica
L3-2136-E	Lubricación del reductor del molino	Falla mecánica
L3-2126	Ventilador de filtro	Falla eléctrica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla eléctrica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla eléctrica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla eléctrica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla eléctrica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2121	Elevador de cangilones	Falla Electrónica
L3-2103	Faja transportadora ascendente	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Programa producción
L3-2115	Molino vertical de cemento	Programa producción
L3-2219	Distribuidor	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Silo lleno
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla mecánica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla eléctrica
L3-2113	Válvula rotativa	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2219	Distribuidor	Falla eléctrica
L3-2110	Balanza dosificadora	Falla eléctrica

L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado
L3-2103	Faja transportadora ascendente	Falla mecánica
L3-2016-A	Compuerta de Clinker	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla mecánica
L3-2107	Faja transportadora ascendente	Falla electrónica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Falla eléctrica
L3-2115	Molino vertical de cemento	Mantenimiento programado

Fuente: SAP Yura S.A.2012.

Grafico 5.4: Cantidad de fallas del molino en 1 mes



Fuente: Elaboración Propia.

El grafico 5.4 indica que el 73.73% de paradas se deben a fallas mecánicas, eléctricas y electrónicas. Esto significa que se aplica el mantenimiento correctivo o respuesta a la falla de 73.73%, de este valor el 41.34% son fallas mecánicas.

El mantenimiento preventivo y predictivo o paradas programadas significan el 18.5% de los paros.

En el momento de la parada por mantenimiento fundamentalmente se corrigen las fallas más notorias, pero no existe un plan de inspecciones adecuado en operación y en parada del molino para los modos de fallas críticos que pueda dar como resultado intervenciones efectivas que reduzcan el número de paros del molino, esto se refleja en el porcentaje elevado de las fallas que ocurren durante la operación.

En el caso del monitoreo a condición o mantenimiento predictivo se tiene un contrato con SKF y con MOBIL para los análisis vibracionales y de aceite, los cuales representan costos de S/. 56 400 y S/. 120 000 anuales, en el caso del análisis vibracional hay problemas con la programación de las actividades a falta de un plan.

Por esta información se determina que la estrategia de mantenimiento que se usa actualmente principalmente es la de mantenimiento correctivo.

#### **5.5.4 Fallas críticas durante el periodo de operación del molino.**

La operación del molino vertical comenzó en el año 2007, desde este periodo hasta la actualidad se han presentado dos fallas en el reductor, y una falla en el sistema de baja presión del reductor.

##### **5.5.4.1 Daño en la piñonería del reductor**

La falla ocurrió en julio del año 2008 donde se observaron roturas con desprendimientos de trozos del soporte de los tres piñones planetarios de la etapa 1.

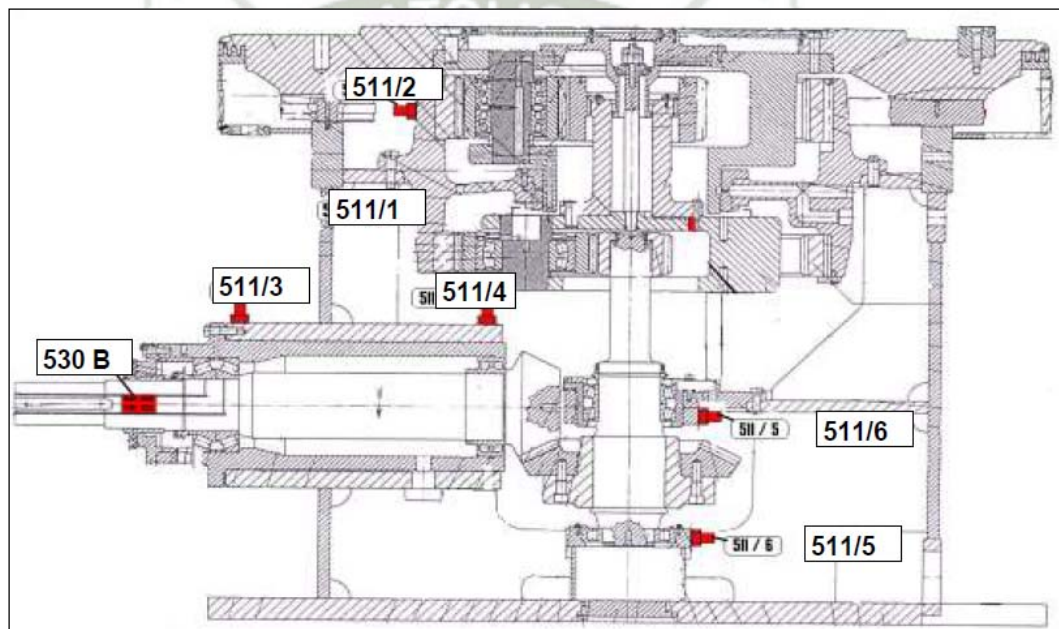
La causa fue por desgaste y falta de mantenimiento predictivo.

La parada se extendió por 6 meses, represento un costo de lucro cesante de S/. 334 000 000.00 y un costo de mantenimiento correctivo de S/. 2 000 000.00 aproximadamente.

#### 5.5.4.2 Daño en los rodamientos del reductor

La falla ocurrió en septiembre del año 2009 donde se dañó la pista exterior del rodamiento interior del eje del piñón de ataque. En la figura 5.24 es el punto 511/4.

Figura 5.24 Puntos de medición de vibraciones en el reductor RENK



Fuente: Reporte DALOG 2009/09/23.

En la figura 5.25 se muestra el incremento rápido de la tendencia del envolvente de aceleración del rodamiento cuando se presentó la falla y como estuvo cuando se reparó. Previamente no se presentaron otros síntomas como el incremento de la temperatura en el punto o incremento de las vibraciones.

Figura 5.25: Tendencia del envolvente de aceleración de la pista exterior del rodamiento del piñón de ataque

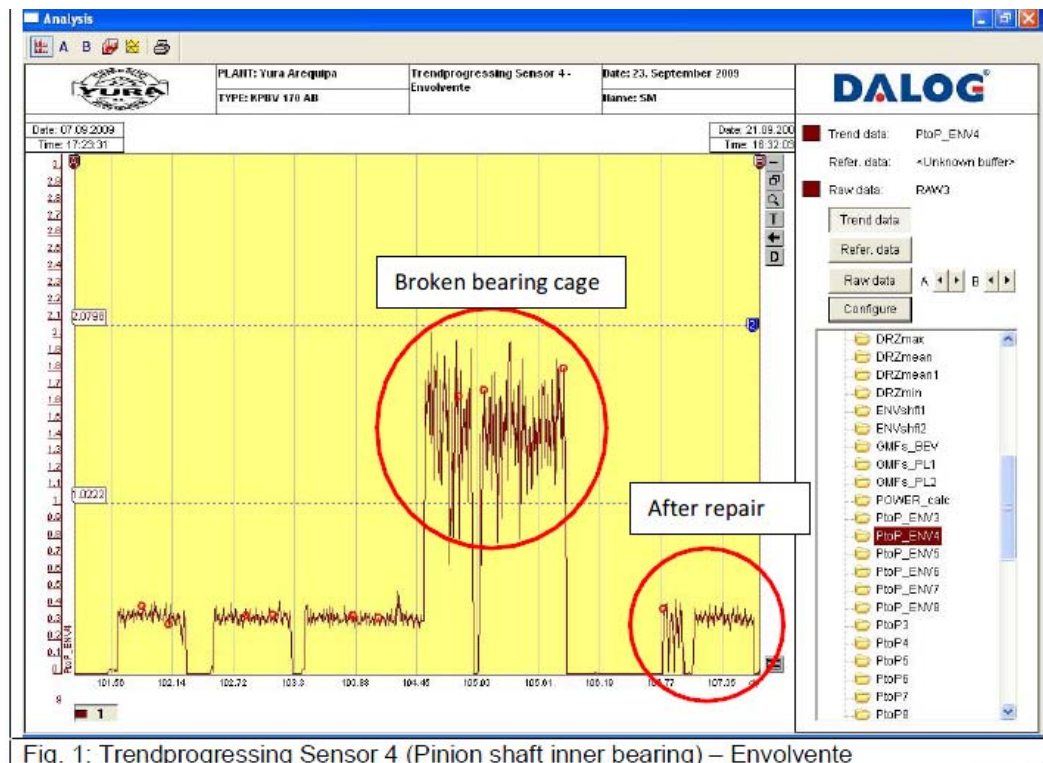


Fig. 1: Trendprogressing Sensor 4 (Pinion shaft inner bearing) – Envolvente

Fuente: Reporte número 7 DALOG 2009/09/23.

La falla fue causada por el desgaste de la pieza por el uso.

La parada se extendió 15 días, represento un costo de lucro cesante de S/. 28 000 000 y un costo de mantenimiento correctivo de S/. 500 000 aproximadamente.

#### 5.5.4.3 Daño en el sistema de baja presión del reductor

La falla ocurrió en julio del año 2009. Los síntomas fueron constantes fugas de aceite por los sellos de la bomba hasta que paro la bomba por una de sus protecciones (corriente alta del motor).

Se observó falla en interna y se cambió la bomba.

La parada tuvo una duración de un día, represento un costo de lucro cesante de S/. 1 860 000 y costo de mantenimiento correctivo de S/. 45 000.

Para evitar estos costos por paradas no programadas debido a fallas mecánicas y mantener el crecimiento de la producción y la calidad del producto en el molino es que se plantea la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad que será descrito en el siguiente capítulo.



## CAPITULO VI

### APLICACION DE LA METODOLOGIA RCM EN EL SISTEMA DE MOLIENDA VERTICAL LM 56 2 + 2

#### 6.1 Sistemas o subsistemas a analizar

Para iniciar el análisis, como se observa en las tablas 6.1 y 6.2, los equipos se han clasificado en auxiliares y principales, y posteriormente se han resumido teniendo en cuenta la similitud en el funcionamiento de los equipos auxiliares. También se han eliminado los motores eléctricos que no serán objeto del estudio como se indicó en el capítulo I.

Tabla 6.1: Sistemas o subsistemas a analizar

<b>TIPO</b>	<b>SISTEMA</b>	<b>SUBSISTEMAS</b>	<b>CANTIDAD APROXIMADA COMPONENTES</b>
<b>SISTEMAS AUXILIARES</b>	<b>RECIRCULACION DE GASES</b>	Ventilador principal ID FAN 2000 KW	1 motor con variador de velocidad
		Compuertas accionamiento eléctrico	4 compuertas, 4 motores
	<b>TRANSPORTE DE MATERIAS PRIMAS</b>	Tolvas de campo de materia prima	5 unidades
		Tolvas de materia prima	3 unidades.
		Balanzas dosificadoras	3 unidades.
		Fajas transportadoras	3 fajas, 3 motores , 3 reductores
		Elevador de cangilones	1 elevador, 1 motor, 1 reductor
		Compuertas accionamiento eléctrico	5 compuertas, 5 motores
		Filtros de despolvorizacion	6 filtros, 6 ventiladores.

	<b>RECIRCULACION DE MATERIAL</b>	Fajas transportadoras	2 fajas, 2 motores, 2 reductores
		Elevador de cangilones	1 elevador, 1 motor, 1 reductor
		Tolva de rechazo	1 unidades
		Compuerta accionamiento neumático	1 compuerta, 2 pistones
	<b>TRANSPORTE DE PRODUCTO TERMINADO</b>	Elevador de cangilones	4 elevadores, 4 motores, 4 reductores
		Canaletas transportadoras	20 unidades, 20 ventiladores
		Compuertas accionamiento neumático	6 compuertas, 6 pistones
		Válvula rotativa	4 unidades.
		Filtro principal	1 unidades, 24 tarjetas, 5720 mangas.
		Filtros de despolvorizacion	6 filtros, 6 ventiladores.
	<b>SISTEMA DE ALIMENTACION</b>	Tolva pulmón	1 unidad.
		Válvula rotativa	1 unidad.
		Balanza de mezcla	1 unidad.
		Filtros de despolvorizacion	1 unidad.
		Bomba de Inyección de aditivo de molienda	2 tanques, 2 bombas

<b>SISTEMAS PRINCIPALES</b>	<b>SISTEMA MOTRIZ</b>	Motor eléctrico MENZEL 4000 KW	1 unidad.	
		Reductor RENK	1 unidad.	
	<b>CLASIFICADOR DINÁMICO</b>	Álabes fijos	30 unidades.	
		Álabes móviles o rotor	360 unidades.	
		Motor 1200 KW	1 unidades. Con variador de velocidad	
		Reductor FLENDER	1 unidades.	
	<b>CAMARA DE MOLIENDA</b>	Rodillos Master	2 unidades.	
		Rodillos Esclavos	2 unidades.	
		Mesa de molienda	1 unidad.	
		Dam ring	4 anillos.	
		Nozzle ring	50 planchas.	
		Armor ring	30 planchas.	
		Sistema de inyección de agua	2 toberas, 1 bomba, 1 tanque.	
	<b>CAMARA DE RECHAZO</b>	Scrapers	6 unidades.	
		Tolva temporal	1 unidad.	

	<b>SISTEMAS DE LUBRICACION E HIDRAULICOS</b>	Lubricación reductor	2 bombas, 1 filtro dual
		Alta presión reductor	16 bombas, 1 filtro, 16 presostatos
		Hidráulico master	2 bombas, 2 filtros
		Lubricación master	4 bombas, 1 enfriador de tubos, 2 filtros
		Hidráulico esclavos	2 bombas, 1 filtro
		Filtración fina	1 bomba, 1 filtro
		Enfriamiento	4 bombas, 1 enfriador placas
		Bombas de engrase	2 unidades

Fuente: Elaboración Propia



Tabla 6.2: Resumen de sistemas o subsistemas a analizar

<b>SISTEMA</b>	<b>SUBSISTEMAS</b>
<b>SISTEMAS AUXILIARES</b>	Compuertas accionamiento eléctrico
	Tolvas de cancha de materia prima
	Tolvas de materia prima, rechazo y pulmón
	Balanzas dosificadoras
	Fajas transportadoras
	Elevadores de cangilones
	Filtros de despolvorización
	Compuertas accionamiento neumático
	Canaletas transportadoras
	Válvulas rotativas
	Filtro principal
	Bomba de Inyección de aditivo de molienda
	Compresor
<b>SISTEMA MOTRIZ</b>	Reductor RENK
<b>CLASIFICADOR DINÁMICO</b>	Álabes fijos
	Álabes móviles o rotor
	Reductor FLENDER
<b>CAMARA DE MOLIENDA</b>	Rodillos Master
	Rodillos Esclavos
	Mesa de molienda
	Dam ring
	Nozzle ring
	Armor ring
	Sistema de inyección de agua
<b>CAMARA DE RECHAZO</b>	Scrapers
	Tolva temporal
<b>SISTEMAS DE LUBRICACION E HIDRAULICOS</b>	Sistema de lubricación reductor
	Sistema de alta presión reductor
	Sistema hidráulico rodillos master
	Sistema lubricación rodillos master
	Sistema hidráulico rodillos esclavos
	Circuito de filtración fina
	Sistema de enfriamiento
Bombas de engrase	

Fuente: Elaboración Propia

## 6.2 Análisis de criticidad

Según la metodología descrita se debe de cuantificar la importancia de los equipos objetos del análisis, por lo que se han establecido siete criterios de evaluación y se han asignado pesos de acuerdo a la magnitud de los ítems mostrados en la tabla 6.3.

En la tabla 6.4 se ha identificado la matriz de criticidad, la cual determina si los equipos analizados son críticos, semi críticos o no críticos según los rangos de valores asignados, el valor de criticidad se calcula multiplicando cada valor de frecuencia por cada valor de consecuencia que se ha asignado (fórmula 4.1). Las consecuencias han sido asignadas de acuerdo al criterio del autor para poder generar los valores.

Para conocer los rangos de valores de criticidad se ha colocado la frecuencia y las consecuencias de las fallas potenciales.

Tabla 6.3: Criterios para el análisis de criticidad

<b>1 CRITERIOS PARA LA FRECUENCIA DE FALLA</b>		
<b>Nº</b>	<b>CRITERIO</b>	<b>PESO</b>
1	Pésimo mayor 10 fallas/año	4
2	Malo 7 - 10 fallas/año	3
3	Regular 4 - 7 fallas/año	2
4	Promedio 0 - 4 fallas/año	1
<b>2 CRITERIOS PARA EL IMPACTO EN SEGURIDAD</b>		
<b>Nº</b>	<b>CRITERIO</b>	<b>PESO</b>
1	Pérdidas de vidas humanas	8
2	Lesiones permanentes	6
3	Daños severos	4
4	Lesiones menores	2
5	Incidentes menores	1
<b>3 CRITERIOS PARA EL IMPACTO EN MEDIO AMBIENTE</b>		
<b>Nº</b>	<b>CRITERIO</b>	<b>PESO</b>
1	Afecta al medio ambiente - alto impacto	7
2	Violación a las normas ambientales	4
3	Provoca molestias mínimas a instalaciones o al ambiente limpieza	1
<b>4 CRITERIOS PARA EL NIVEL DE PRODUCCION MANEJADO</b>		
<b>Nº</b>	<b>CRITERIO</b>	<b>PESO</b>
1	Afecta severamente a la producción	6
2	Afecta medianamente a la producción	4
3	Afecta mínimamente a la producción	2
4	No afecta a la producción	1

<b>5 CRITERIOS PARA EL TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR</b>		
<b>Nº</b>	<b>CRITERIO</b>	<b>PESO</b>
1	Pésimo mayor a 4 meses	5
2	Malo de 2 a 4 meses	4
3	Regular 0.25 a 1 mes	2
4	Promedio 0.1 a 0.2 mes	1
<b>6 CRITERIOS PARA EL IMPACTO EN PRODUCCION</b>		
<b>Nº</b>	<b>CRITERIO</b>	<b>PESO</b>
1	Parada inmediata de toda la producción	6
2	Parada de complejo planta y repercusión en otros complejos	4
3	Impacta en niveles de producción o calidad	2
4	No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción	1
<b>7 CRITERIOS PARA EL IMPACTO EN EL MANTENIMIENTO</b>		
<b>Nº</b>	<b>CRITERIO</b>	<b>PESO</b>
1	No existe opción de producción o no existe repuesto	5
2	Hay opción de repuesto compartido	3
3	Función de repuesto disponible	1

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.4: Matriz de criticidad

<b>Frecuencia</b>	<b>4</b>	80	160	240	320	400
	<b>3</b>	60	120	180	240	300
	<b>2</b>	40	80	120	160	200
	<b>1</b>	20	40	60	80	100
		<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>Consecuencia</b>						
		<b>CRITICIDAD</b>	<b>CODIGO</b>	<b>RANGO</b>		
		ALTA (CRITICO)	C	160 - 400		
		MEDIA (SEMICRITICO)	S	80 - 120		
		BAJA (NO CRITICO)	N	20 -60		

Fuente: Elaboración Propia

Teniendo la matriz y los criterios para el análisis se ha determinado la criticidad de los subsistemas mostrados en la tabla 6.5.

La criticidad se ha determinado matemáticamente por la fórmula 4.2.

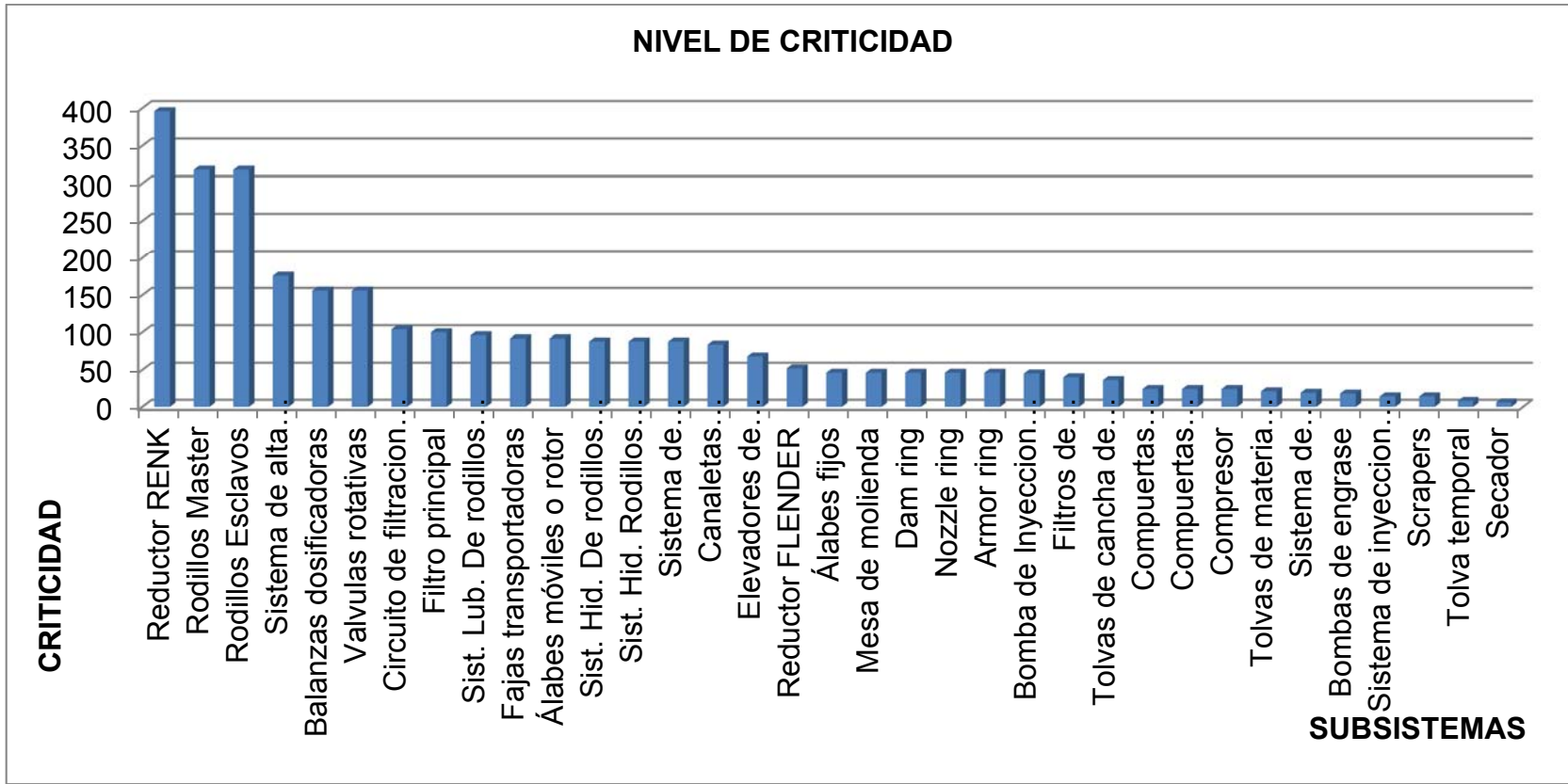
Tabla 6.5: Nivel de criticidad para cada sistema o subsistema

SISTEMA	SUBSISTEMAS	Frecuencia	Seguridad	Ambiente	N. Producción	TPPR	Productividad	Mantenimiento	Consecuencia	Puntaje	Criticidad
SISTEMAS AUXILIARES	Compuertas accionamiento eléctrico	3	4	1	2	1	1	1	8	24	N
	Tolvas de cancha de materia prima	2	8	7	2	1	1	1	18	36	N
	Tolvas de materia prima, rechazo y pulmón	1	8	4	4	1	2	1	21	21	N
	Balanzas dosificadoras	4	1	1	6	1	6	1	39	156	S
	Fajas transportadoras	2	8	1	6	1	6	1	46	92	S
	Elevadores de cangilones	2	8	1	4	1	6	1	34	68	N
	Filtros de despolvorización	4	1	7	1	1	1	1	10	40	N
	Compuertas accionamiento neumático	3	4	1	2	1	1	1	8	24	N
	Canaletas transportadoras	2	1	4	6	1	6	1	42	84	S
	Válvulas rotativas	4	1	1	6	1	6	1	39	156	S
	Filtro principal	2	6	7	6	1	6	1	50	100	S
	Bomba de Inyección de aditivo de molienda	3	4	7	1	1	3	1	15	45	N
	Compresor	2	1	4	2	1	2	3	12	24	N
	SISTEMA MOTRIZ	Reductor RENK	2	6	7	6	5	6	5	198	396
CLASIFICADOR DINÁMICO	Álabes fijos	1	8	1	6	1	6	1	46	46	N
	Álabes móviles o rotor	2	8	1	6	1	6	1	46	92	S
	Reductor FLENDER	1	6	7	6	1	6	3	52	52	N

<b>CAMARA DE MOLIENDA</b>	Rodillos Master	2	8	4	6	4	6	3	159	318	C
	Rodillos Esclavos	2	8	4	6	4	6	3	159	318	C
	Mesa de molienda	1	8	1	6	1	6	1	46	46	N
	Dam ring	1	8	1	6	1	6	1	46	46	N
	Nozzle ring	1	8	1	6	1	6	1	46	46	N
	Armor ring	1	8	1	6	1	6	1	46	46	N
	Sistema de inyección de agua	2	1	1	2	1	2	1	7	14	N
<b>CAMARA DE RECHAZO</b>	Scrapers	1	8	1	2	1	2	1	14	14	N
	Tolva temporal	1	2	1	2	1	2	1	8	8	N
<b>SISTEMAS DE LUBRICACION E HIDRAULICOS</b>	Sistema de lubricación del reductor	1	6	7	6	2	6	3	88	88	S
	Sistema de alta presión del reductor	2	6	7	6	2	6	3	88	176	C
	Sistema Hidráulico de rodillos master	1	6	7	6	2	6	3	88	88	S
	Sistema de lubricación de rodillos master	2	6	7	4	2	4	3	48	96	S
	Sistema Hidráulico de rodillos esclavos	1	6	7	6	2	6	3	88	88	S
	Circuito de filtración fina	2	6	7	6	1	6	3	52	104	S
	Sistema de enfriamiento	1	1	1	4	1	4	1	19	19	N
	Bombas de engrase	1	2	7	4	1	2	1	18	18	N

Fuente: Elaboración Propia

Grafico 6.1: Nivel de criticidad para cada sistema o subsistema



Fuente: Elaboración Propia



Los resultados del análisis de criticidad se muestran en la tabla 6.6.

Tabla 6.6: Resultados del análisis de criticidad

SUBSISTEMAS	PUNTAJE /CRITICIDAD	
Reductor RENK	396	C
Rodillos Master	318	C
Rodillos Esclavos	318	C
Sistema de alta presión reductor	176	C
Balanzas dosificadoras	156	S
Válvulas rotativas	156	S
Circuito de filtración fina	104	S
Filtro principal	100	S
Sistema lubricación master	96	S
Fajas transportadoras	92	S
Álabes móviles o rotor	92	S
Sistema hidráulico rodillos master	88	S
Sistema hidráulico rodillos esclavos	88	S
Sistema de lubricación reductor	88	S
Canaletas transportadoras	84	S
Elevadores de cangilones	68	N
Reductor FLENDER	52	N
Álabes fijos	46	N
Mesa de molienda	46	N
Dam ring	46	N
Nozzle ring	46	N
Armor ring	46	N
Bomba de Inyección de aditivo de molienda	45	N
Filtros de despolvORIZACION	40	N
Tolvas de cancha de materia prima	36	N
Compuertas accionamiento eléctrico	24	N
Compuertas accionamiento neumático	24	N
Compresor	24	N
Tolvas de materia prima, rechazo y pulmón	21	N
Sistema de enfriamiento	19	N
Bombas de engrase	18	N
Sistema de inyección de agua	14	N
Scrapers	14	N
Tolva temporal	8	N
Secador	6	N

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que los subsistemas que son críticos son el reductor RENK, los rodillos máster, los rodillos esclavos y el sistema de alta presión del reductor. Estos subsistemas van a seguir siendo analizados para descubrir los modos de falla más críticos.

### 6.3 Contexto Operacional

En la tabla 6.7 se muestra el contexto operacional en el cual funciona el equipo.

Tabla 6.7: Contexto operacional

<b>PERSONAL DE OPERACIÓN</b>	
Educación	Educación superior
Capacitación	Process and Mechanic / Maintenance Training by LOESCHE AMERICA TRAINIG
Experiencia	4 años de experiencia en la operación de molinos verticales
Turnos	3 turnos rotativos de 8 horas
<b>PERSONAL DE MANTENIMIENTO</b>	
Educación	Educación técnica / superior
Capacitación	Mechanic / Maintenance Training by LOESCHE AMERICA TRAINIG
Experiencia	4 años de experiencia en la operación de molinos verticales
Turnos	3 turnos rotativos de 8 horas
<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN</b>	
Altitud	2500 m.s.n.m.

Temperatura Máxima y mínima	Mínimo: 5 °C Máximo: 25 °C
Neblina	Si
Lluvia	Si
Humedad	Baja
Hielo	No
<b>CONDICIONES DEL TERRENO DE TRABAJO</b>	
Impactos	Sismos
Abrasivo	Altamente abrasivo por el contenido de Silicio
Humedad	Baja
Acumulación de material	Polvo

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 6.8 se muestran la unidad de proceso, el sistema y los subsistemas objetos del estudio.

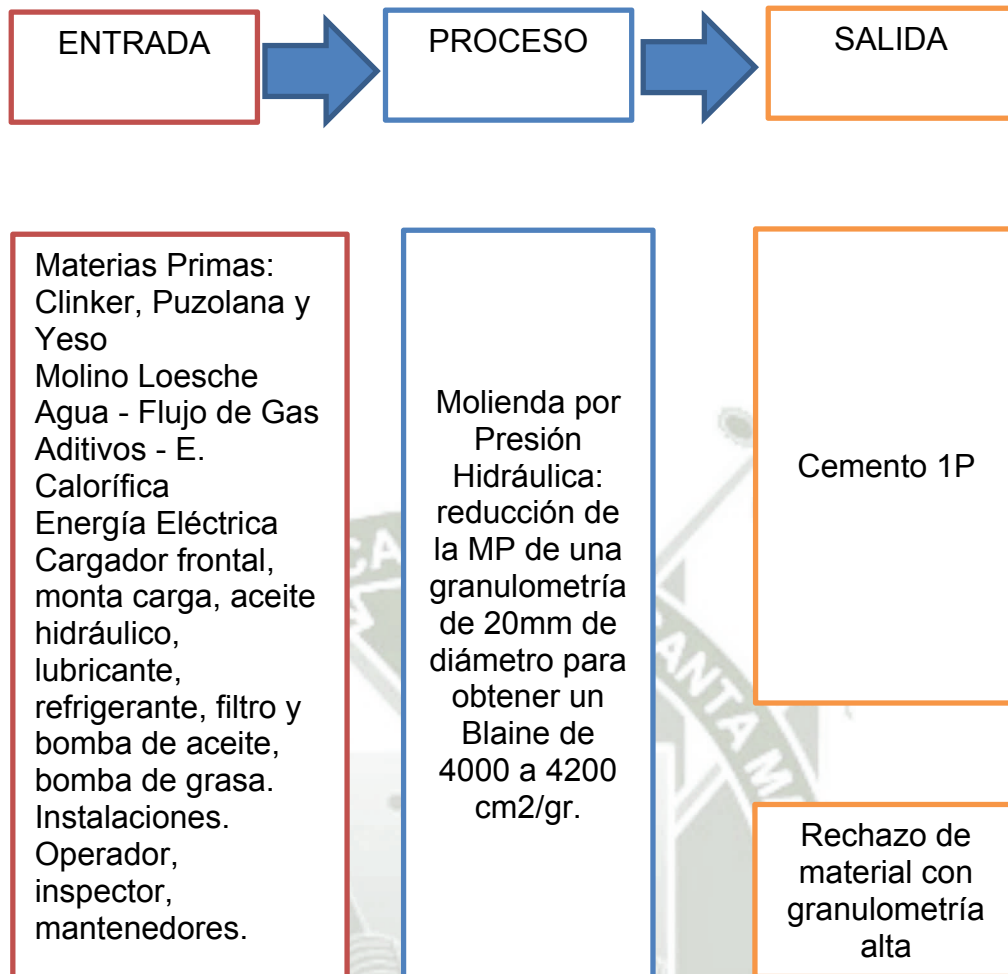
Tabla 6.8: Unidad de proceso, sistema y subsistemas

<b>NIVEL DE DETALLE</b>	<b>NOMBRE DEL NVEL DE DETALLE</b>	<b>PROPOSITO</b>
Unidad de proceso	Molienda	Transformar la materia prima en producto terminado
Sistema	Reductor	Incrementar el torque entregado por el motor eléctrico para hacer girar la mesa de molienda
Subsistema	Rodillos Master	Moler la materia prima en la mesa de molienda
Subsistema	Rodillos Esclavos	Comprimir la materia prima en la mesa de molienda
Subsistema	Sistema de alta presión reductor	Inyectar aceite a alta presión a los PADS para formar la película de aceite donde gira la tornamesa

Fuente: Elaboración Propia

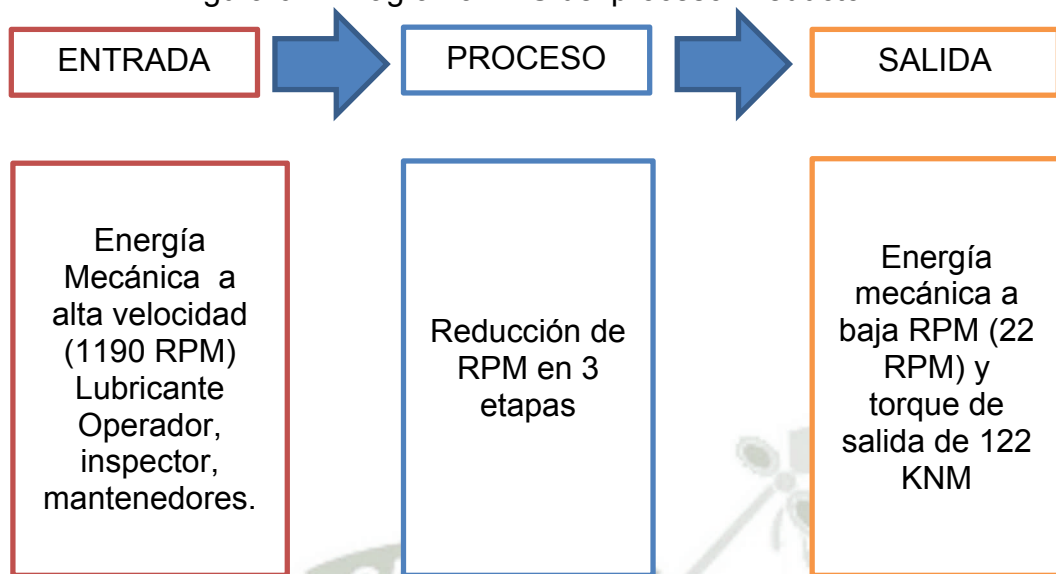
En las figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 se muestran los diagramas EPS de cada ítem.

Figura 6.1: Diagrama EPS del proceso: Molienda



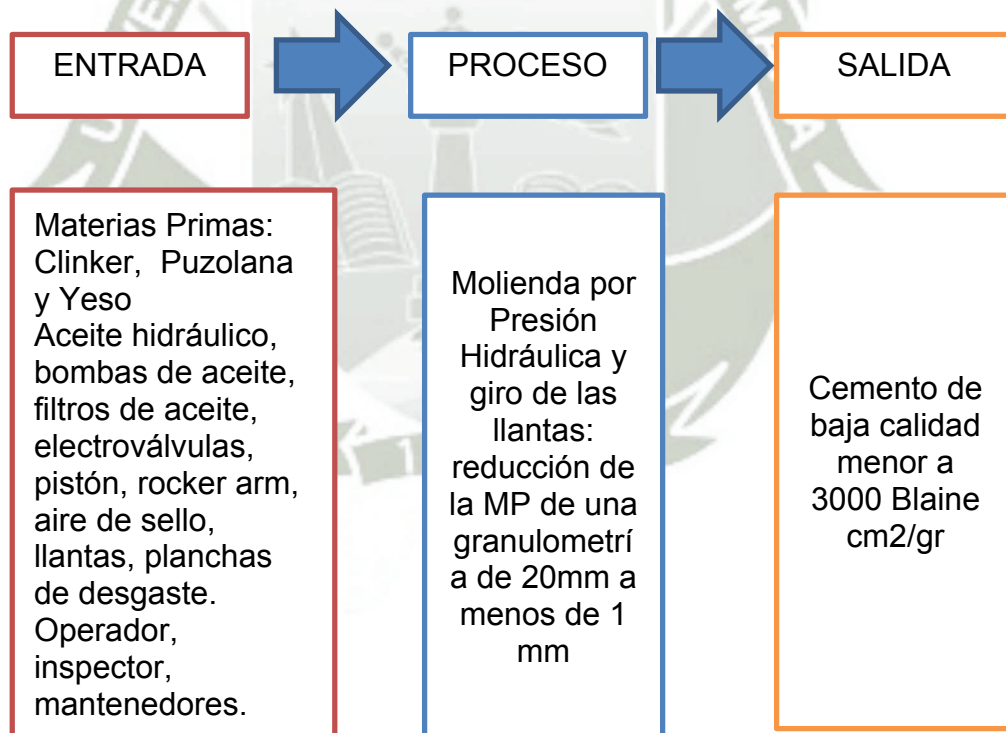
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.2: Diagrama EPS del proceso: Reductor



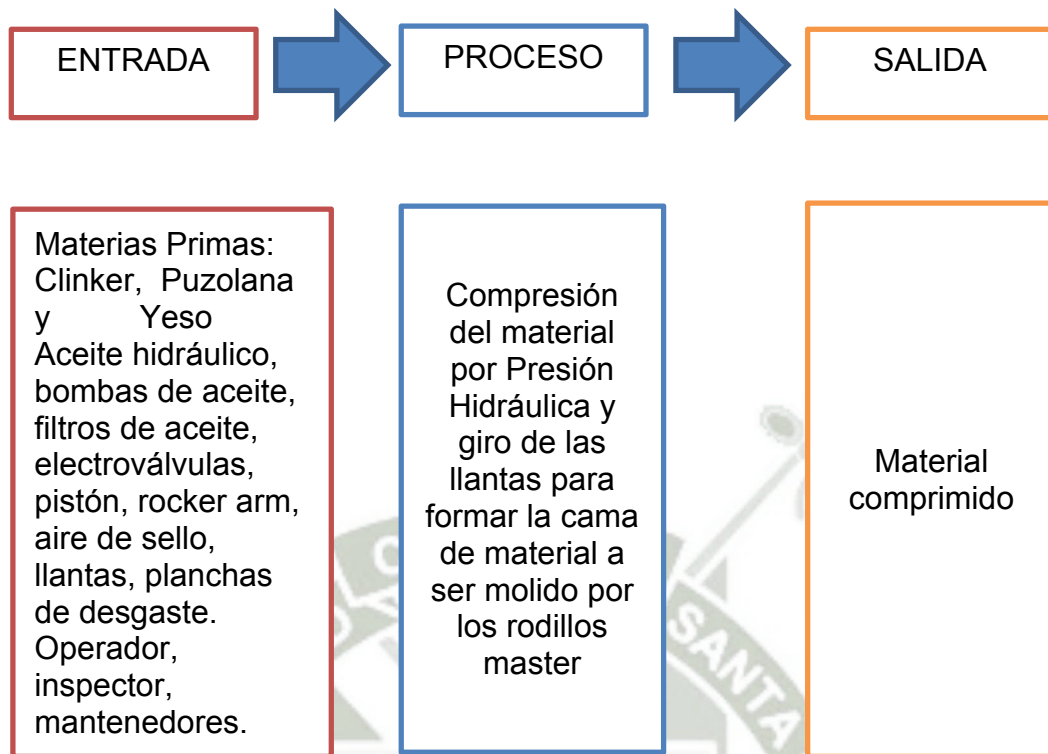
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.3: Diagrama EPS del proceso: Rodillos Master



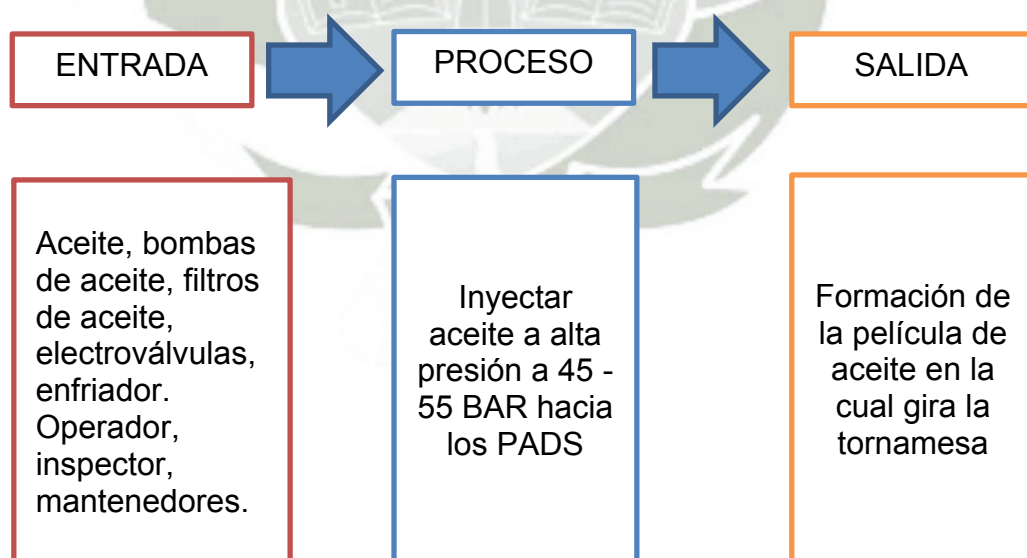
Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.4: Diagrama EPS del proceso: Rodillos Esclavos



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.5: Diagrama EPS del proceso: Sistema de alta presión del reductor



Fuente: Elaboración Propia

#### 6.4 Análisis de modos, efectos y criticidad de la falla: AMECF

En las tablas 6.9 y 6.10, según la metodología, se describen las funciones de los equipos críticos determinados por el análisis previo, sus fallas funcionales y los modos de falla que podrían presentarse.

En la tabla 6.11 se ha hecho nuevamente el análisis de criticidad para todos los modos de falla, de tal forma que se puedan encontrar los más críticos.



Tabla 6.9: Funciones y fallas funcionales

Subsistema	COD	Función	COD	Falla funcional
<b>Reductor RENK</b>	1	Accionar la mesa de molienda a un torque de 22 KNm a una carga plena de 180 Ton. Y 100 bar +/-5 de presión	1A	No transmite torque
			1B	El torque transmitido es menor a 122 KN.m
			1C	El torque transmitido sobrepasa el valor de 61.6 KN.m
			1D	El torque transmitido sobrepase al torque nominal por más de 1.5 min.
			1E	El torque nominal sobrepase 10 veces el 37.4 KN.m durante 1 min.
			1F	Torque dinámico mayor o igual al torque promedio por más de 1 min. (torque dinámico = torque pico a pico)
			1G	Presión hidráulica de los rodillos master mayor a 115 BAR.
			1H	Carga mayor a 180 Ton.
			1I	Carga menor a 120 Ton. Con presión hidráulica mayor a 80 bar

	2	Los parámetros de operación son: temperatura de trabajo 70 °C, vibración máx. de 14 mm/s	2A	Temperatura del reductor mayor a 70 °C
			2B	Temperatura del reductor menor a 45 °C
			2C	Vibración mayor a 14 mm/s
<b>Rodillos Master</b>	3	Descender hacia la mesa de molienda cuando se da alimentación con una presión hidráulica de 80 BAR sin colisionar con los topes mecánicos	3A	Rodillos no descienden hacia la mesa
			3B	La presión hidráulica es mayor o menor a 80 BAR al arranque
			3C	Existe vibración mayor a 10 mm /s cuando los rodillos descienden
	4	Elevarse totalmente cuando se corta alimentación a una altura de 250 mm sobre la mesa	4A	Los rodillos no se elevan cuando se corta alimentación

	5	Moler 180 TM/h de materia prima con 100 +/- 5 BAR de presión hidráulica a una altura de 40 a 60 mm de la mesa de molienda sin provocar vibraciones mayores a 5 mm/s	5A	La presión de molienda es mayor a 110 BAR
			5B	La altura hacia la mesa de molienda es mayor a 60 mm
			5C	La altura hacia la mesa de molienda es menor a 20 mm
			5D	Las vibraciones durante la molienda son mayores a 5 mm/s
<b>Rodillos Esclavos</b>	6	Descender hacia la mesa de molienda 1 minuto después de que hayan descendido los rodillos master	6A	Los rodillos no descienden hacia la mesa
	7	Elevarse totalmente cuando se corta alimentación a una altura de 250 mm sobre la mesa	7A	Los rodillos no se elevan cuando se corta alimentación
	8	Comprimir el material a una altura de la mesa de 75 a 105 mm y mantener una presión hidráulica de 30 a 40 BAR sin provocar vibraciones mayores a 15 mm/s	8A	La presión hidráulica de los rodillos es menor a 30 BAR

			8B	El movimiento de los rodillos provoca vibraciones de 15 mm/s
<b>Sistema de alta presión del reductor</b>	9	Inyectar aceite a 50 BAR hacia los PADS para formar la película de aceite de 10 mm de grosor	9A	El sistema no inyecta aceite hacia los PADS
			9B	La presión del aceite es menor a 40 BAR
			9C	La presión del aceite es mayor a 60 BAR

Fuente: Elaboración Propia

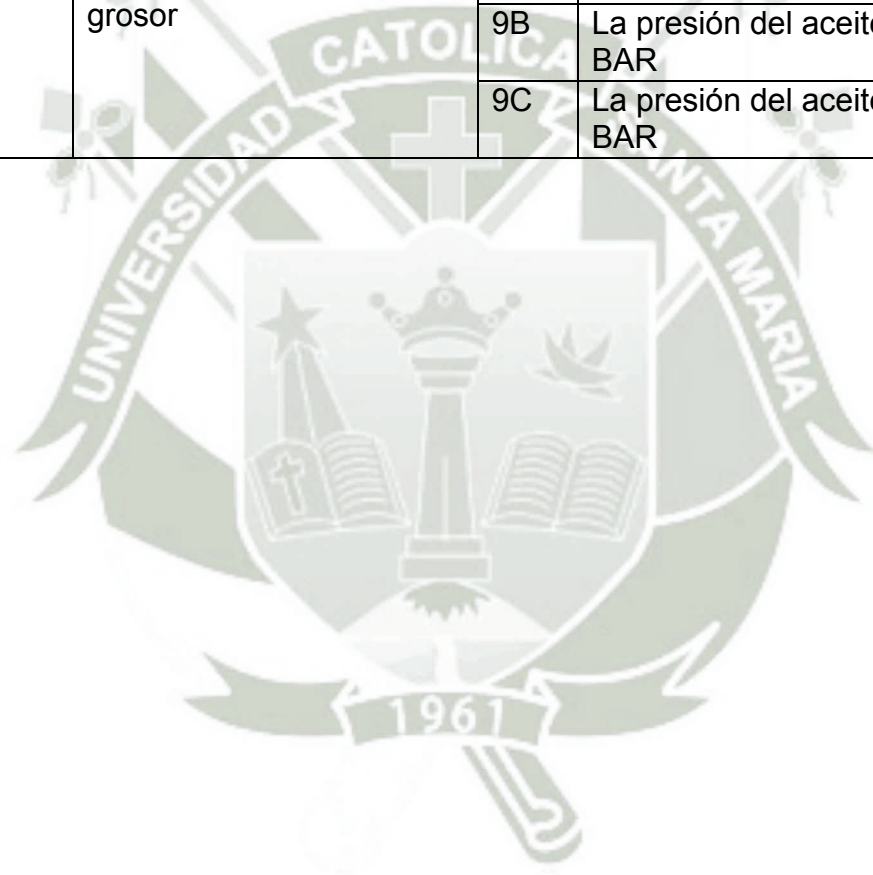


Tabla 6.10: Modos de falla

<b>COD</b>	<b>MODO DE FALLA</b>
1A1	No llega corriente al Motor eléctrico.
1A2	Acople mecánico roto
1A3	Rodamientos del reductor agarrotado
1A4	Rotura de dientes de la piñonería del reductor
1A5	Rotura de eje
1A6	No hay suministro de energía
1A7	Demasiado rechazo de material (mayor a 40 TM/h)
1A8	Sistema de seguridad accionado
1A9	Desbalance en la base (accionamiento de presostatos de PADS en diferentes zonas)
1A10	Accionamiento de dos o más presostatos de PADS consecutivos
1A11	Caudal de agua menor a 1200 litros/h
1A12	Sistema de control defectuoso
1A13	Sistema de protección defectuoso
1B1	Acople mecánico defectuoso
1B2	Rodamientos del reductor agarrotado
1B3	Rotura de dientes de la piñonería del reductor
1B4	Torque del motor eléctrico menor a 32060 Nm
1B5	Falla en el sistema de lubricación
1B5	Sobrepresión en la mesa
1B6	Material muy fino (polvo de puzolana)

1B7	Deficiencia en suministro eléctrico
1C1	Sobrepresión en la mesa
1C2	Material muy fino (polvo de puzolana)
1C3	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h
1C4	Caudal de agua mayor a 3000 litros/h
1C5	Caudal de agua menor a 1200 litros/h
1C6	Caudal de aire mayor a 550000 m <sup>3</sup> /h
1D1	Sobrepresión en la mesa
1D2	Material muy fino (polvo de puzolana)
1D3	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h
1D4	Caudal de agua mayor a 3000 litros/h
1D5	Caudal de agua menor a 1200 litros/h
1D6	Caudal de aire mayor a 550000 m <sup>3</sup> /h
1E1	Sobrepresión en la mesa
1E2	Material muy fino (polvo de puzolana)
1E3	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h
1E4	Caudal de agua mayor a 3000 litros/h
1E5	Caudal de agua menor a 1200 litros/h
1E6	Caudal de aire mayor a 550000 m <sup>3</sup> /h
1F1	Dureza de la materia prima mayor a 600 BHN
1F2	Ingreso de metales al proceso
1G1	Mala operación
1H1	Mala operación

1H2	Descarga de material de los filtros de recuperación
1I1	Mala operación
1I2	Sistema de dosificación de balanzas de materias primas obstruidas
1I3	Sistema de dosificación de balanza de mezcla obstruidas
2A1	Bombas de baja presión de aceite malogrado
2A2	Bombas de purga o flushing de aceite malogrado
2A3	Enfriador de aceite dañado
2A4	Enfriador de agua dañado
2A5	Bajo nivel de flujo de agua
2B1	Pre calentadores de aceite malogrados
2B2	Bombas de baja presión de aceite malogrado
2B3	Bombas de purga o flushing de aceite malogrado
2C1	Sobrepresión en la mesa
2C2	Material muy fino (polvo de puzolana)
2C3	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h
2C4	Caudal de agua mayor a 3000 litros/h
2C5	Caudal de agua menor a 1200 litros/h
2C6	Caudal de aire mayor a 550000 m <sup>3</sup> /h
2C7	Material muy grueso mayor a 600 BHN
2C8	Mala dosificación de la balanza de alimentación
2C9	Aforo de material en la balanza de alimentación
2C10	Ingreso de metales al proceso

2C11	Rotura de forro de los rodillos Master
2C12	Rotura de copas protectoras de los rodillos Master
2C13	Rotura de DAM ring
2C14	Temperatura de salida del molino menor a 75° C
3A1	Deficiencia en suministro eléctrico
3A2	Falla en las bombas hidráulicas Master
3A3	Electroválvulas en mal estado
3A4	Rodamientos de chumaceras agarrotados Master
3A5	Rotura de mangueras hidráulicas Master
3A6	Sistema de control defectuoso
3A7	Falla en sensores de posición
3A8	Daño en pistones hidráulicos Master
3B1	Sistema de control defectuoso
3B2	Falla en las bombas hidráulicas Master
3B3	Falla en las electroválvulas
3B4	Mala operación
3C1	Mala calibración de la altura de los rodillos hacia la mesa
3C2	Mala regulación de los topes mecánicos
3C3	Roturas en el forro de los rodillos Master
3C4	Mala operación
3C5	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h
3C6	Caudal de agua menor a 1200 lt/h
3C7	Temperatura de salida del molino menor a 75° C

3C8	Altura de rodillos de 80 mm hacia la mesa
3C9	Material muy fino (polvo de puzolana)
4A1	Deficiencia en suministro eléctrico
4A2	Falla en las bombas hidráulicas Master
4A3	Falla en sensores de posición
4A4	Electroválvulas en mal estado
4A5	Rodamientos de chumaceras agarrotados Master
4A6	Rotura de mangueras hidráulicas Master
4A7	Sistema de control defectuoso
4A8	Parada del motor principal
4A9	Vibración excesiva de operación mayor a 20 mm/s
5A1	Falla en las bombas hidráulicas Master
5A2	Filtros de aceite sucios
5A3	Electroválvulas en mal estado
5A4	Sistema de control defectuoso
5A5	Mala operación
5A6	Presión diferencial del molino mayor a 45 mbar
5B1	Mala calibración de la altura de los rodillos hacia la mesa
5B2	Mala regulación de los topes mecánicos
5B3	Falla en sensores de posición
5B4	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h
5B5	Mala operación
5B6	Exceso de material sobre la mesa

5B7	Material muy grueso mayor a 600 BHN
5B8	Velocidad del clasificador dinámico en 103 rpm
5C1	Sistema de control defectuoso
5C2	Falla en sensores de posición
5C3	Tope mecánico dañado
5D1	Falla en las bombas hidráulicas Master
5D2	Electroválvulas en mal estado
5D3	Rodamientos de chumaceras agarrotados Master
5D4	Rotura de mangueras hidráulicas Master
5D5	Sistema de control defectuoso
5D6	Acumuladores de nitrógeno con fuga
5D7	Plato y/o bladders de acumuladores dañados
5D8	Mala operación
5D9	Tope mecánico dañado
5D10	Rotura de llanta Master
6A1	Deficiencia en suministro eléctrico
6A2	Falla en las bombas hidráulicas Esclavos
6A3	Electroválvulas en mal estado
6A4	Rotura de mangueras hidráulicas Esclavos
6A5	Sistema de control defectuoso
6A6	Daño en pistones hidráulicos Esclavos
7A1	Deficiencia en suministro eléctrico
7A2	Falla en las bombas hidráulicas Esclavos

7A3	Parada del motor principal
7A4	Electroválvulas en mal estado
7A5	Rotura de mangueras hidráulicas Esclavos
7A6	Sistema de control defectuoso
8A1	Falla en las bombas hidráulicas Esclavos
8A2	Electroválvulas en mal estado
8A3	Rotura de mangueras hidráulicas Esclavos
8A4	Sistema de control defectuoso
8A5	Mala operación
8A6	Presión diferencial del molino mayor a 45 mbar
8A7	Material muy fino (polvo de puzolana)
8B1	Material muy fino (polvo de puzolana)
8B2	Material muy grueso mayor a 600 BHN
8B3	Ingreso de metales al proceso
8B4	Rotura de llanta Esclavo
9A1	Deficiencia en suministro eléctrico
9A2	Temperatura del aceite mayor a 70° C
9A3	Temperatura del aceite menor a 25° C
9A4	Falla en bombas de alta presión
9A5	Falla en sensores de posición de válvulas
9A6	Válvulas manuales cerradas
9B1	Falla en bombas de alta presión
9B2	Filtro flushing sucio

9B3	Tuberías tapadas
9B4	Fuga de aceite por la línea
9B5	Temperatura del aceite mayor a 70° C
9C1	Falla en presostatos
9C2	Falla en válvulas de seguridad

Fuente: Elaboración Propia



Tabla 6.11: Análisis de criticidad de los modos de falla

COD	MODO DE FALLA	Frecuencia	Seguridad	Ambiente	N. Producción	TPPR	Producción	Mantenimiento	Consecuencia	Puntaje	Criticidad
1A1	No llega corriente al Motor eléctrico.	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
1A2	Acople mecánico roto	1	2	1	2	1	4	3	14	14	N
1A3	Rodamientos del reductor agarrotado	1	2	1	6	2	6	5	80	80	C
1A4	Rotura de dientes de la piñonera del reductor	1	2	1	6	2	6	5	80	80	C
1A5	Rotura de eje	1	2	1	6	1	6	5	44	44	S
1A6	No hay suministro de energía	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
1A7	Demasiado rechazo de material (mayor a 40 TM/h)	1	1	1	2	1	1	1	5	5	N
1A8	Sistema de seguridad accionado	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
1A9	Desbalance en la base (accionamiento de presostatos de PADS en diferentes zonas)	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
1A10	Accionamiento de dos o más presostatos de PADS consecutivos	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
1A11	Caudal de agua menor a 1200 litros/h	1	1	1	2	1	1	1	5	5	N
1A12	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
1A13	Sistema de protección defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N



1F1	Dureza de la materia prima mayor a 600 BHN	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
1F2	Ingreso de metales al proceso	1	2	1	4	1	4	1	20	20	N
1G1	Mala operación	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
1H1	Mala operación	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
1H2	Descarga de material de los filtros de recuperación	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
1I1	Mala operación	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
1I2	Sistema de dosificación de balanzas de materias primas obstruidas	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
1I3	Sistema de dosificación de balanza de mezcla obstruidas	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
2A1	Bombas de baja presión de aceite malogrado	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
2A2	Bombas de purga o flushing de aceite malogrado	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
2A3	Enfriador de aceite dañado	1	2	4	4	1	4	1	23	23	N
2A4	Enfriador de agua dañado	1	2	1	4	1	4	1	20	20	N
2A5	Bajo nivel de flujo de agua	1	1	1	2	1	1	1	5	5	N
2B1	Pre calentadores de aceite malogrados	1	1	1	4	1	1	1	7	7	N
2B2	Bombas de baja presión de aceite malogrado	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
2B3	Bombas de purga o flushing de aceite malogrado	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
2C1	Sobrepresión en la mesa	1	2	1	1	1	1	1	5	5	N
2C2	Material muy fino (polvo de puzolana)	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
2C3	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
2C4	Caudal de agua mayor a 3000 litros/h	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
2C5	Caudal de agua menor a 1200 litros/h	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
2C6	Caudal de aire mayor a 550000 m <sup>3</sup> /h	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
2C7	Material muy grueso mayor a 600 BHN	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
2C8	Mala dosificación de la balanza de alimentación	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
2C9	Aforo de material en la balanza de alimentación	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
2C10	Ingreso de metales al proceso	1	2	1	4	1	4	1	20	20	N

2C11	Rotura de forro de los rodillos Master	1	2	1	4	1	4	3	22	22	N
2C12	Rotura de copas protectoras de los rodillos Master	1	2	1	4	1	4	3	22	22	N
2C13	Rotura de DAM ring	1	2	1	4	1	4	3	22	22	N
2C14	Temperatura de salida del molino menor a 75° C	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3A1	Deficiencia en suministro eléctrico	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
3A2	Falla en las bombas hidráulicas Master	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
3A3	Electroválvulas en mal estado	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3A4	Rodamientos de chumaceras agarrotados Master	1	2	1	6	1	6	5	44	44	S
3A5	Rotura de mangueras hidráulicas Master	1	2	4	4	1	4	1	23	23	N
3A6	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3A7	Falla en sensores de posición	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3A8	Daño en pistones hidráulicos Master	1	2	1	6	2	6	5	80	80	C
3B1	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3B2	Falla en las bombas hidráulicas Master	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
3B3	Falla en las electroválvulas	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3B4	Mala operación	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
3C1	Mala calibración de la altura de los rodillos hacia la mesa	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3C2	Mala regulación de los topes mecánicos	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
3C3	Roturas en el forro de los rodillos Master	1	2	1	4	1	1	1	8	8	N
3C4	Mala operación	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
3C5	Caudal de aire menor a 425000 m3/h	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3C6	Caudal de agua menor a 1200 litros/h	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3C7	Temperatura de salida del molino menor a 75° C	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3C8	Altura de rodillos de 80 mm hacia la mesa	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
3C9	Material muy fino (polvo de puzolana)	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
4A1	Deficiencia en suministro eléctrico	1	1	1	1	1	2	1	5	5	N

4A2	Falla en las bombas hidráulicas Master	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
4A3	Falla en sensores de posición	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
4A4	Electroválvulas en mal estado	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
4A5	Rodamientos de chumaceras agarrotados Master	1	2	1	6	1	6	5	44	44	S
4A6	Rotura de mangueras hidráulicas Master	1	2	4	4	1	4	1	23	23	N
4A7	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
4A8	Parada del motor principal	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
4A9	Vibración excesiva de operación mayor a 20 mm/s	1	2	1	4	1	4	1	20	20	N
5A1	Falla en las bombas hidráulicas Master	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
5A2	Filtros de aceite sucios	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
5A3	Electroválvulas en mal estado	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5A4	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5A5	Mala operación	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
5A6	Presión diferencial del molino mayor a 45 mbar	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5B1	Mala calibración de la altura de los rodillos hacia la mesa	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5B2	Mala regulación de los topes mecánicos	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
5B3	Falla en sensores de posición	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5B4	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5B5	Mala operación	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
5B6	Exceso de material sobre la mesa	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5B7	Material muy grueso mayor a 600 BHN	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
5B8	Velocidad del clasificador dinámico en 103 rpm	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5C1	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5C2	Falla en sensores de posición	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5C3	Tope mecánico dañado	1	2	1	2	1	2	1	8	8	N
5D1	Falla en las bombas hidráulicas Master	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S

5D2	Electroválvulas en mal estado	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5D3	Rodamientos de chumaceras agarrotados Master	1	2	1	6	1	6	5	44	44	S
5D4	Rotura de mangueras hidráulicas Master	1	2	4	4	1	4	1	23	23	N
5D5	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
5D6	Acumuladores de nitrógeno con fuga	1	2	4	2	1	2	1	11	11	N
5D7	Plato y/o bladders de acumuladores dañados	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
5D8	Mala operación	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
5D9	Tope mecánico dañado	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
5D10	Rotura de llanta Master	1	2	1	6	2	6	5	80	80	C
6A1	Deficiencia en suministro eléctrico	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
6A2	Falla en las bombas hidráulicas Esclavos	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
6A3	Electroválvulas en mal estado	1	1	1	2	1	1	1	5	5	N
6A4	Rotura de mangueras hidráulicas Esclavos	1	2	4	4	1	4	1	23	23	N
6A5	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
6A6	Daño en pistones hidráulicos Esclavos	1	2	1	6	2	6	5	80	80	C
7A1	Deficiencia en suministro eléctrico	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
7A2	Falla en las bombas hidráulicas Esclavos	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
7A3	Parada del motor principal	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
7A4	Electroválvulas en mal estado	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
7A5	Rotura de mangueras hidráulicas Esclavos	1	2	4	4	1	4	1	23	23	N
7A6	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
8A1	Falla en las bombas hidráulicas Esclavos	1	2	4	6	1	6	3	45	45	S
8A2	Electroválvulas en mal estado	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
8A3	Rotura de mangueras hidráulicas Esclavos	1	2	4	4	1	4	1	23	23	N
8A4	Sistema de control defectuoso	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
8A5	Mala operación	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N

8A6	Presión diferencial del molino mayor a 45 mbar	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
8A7	Material muy fino (polvo de puzolana)	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
8B1	Material muy fino (polvo de puzolana)	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
8B2	Material muy grueso mayor a 600 BHN	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
8B3	Ingreso de metales al proceso	1	2	1	4	1	4	1	20	20	N
8B4	Rotura de llanta Esclavo	1	2	1	6	2	6	5	80	80	C
9A1	Deficiencia en suministro eléctrico	1	1	1	2	1	2	1	7	7	N
9A2	Temperatura del aceite mayor a 70° C	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
9A3	Temperatura del aceite menor a 25° C	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
9A4	Falla en bombas de alta presión	1	2	1	6	1	6	3	42	42	S
9A5	Falla en sensores de posición de válvulas	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
9A6	Válvulas manuales cerradas	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
9B1	Falla en bombas de alta presión	1	2	1	6	1	6	3	42	42	S
9B2	Filtro flushing sucio	1	1	1	2	1	4	1	11	11	N
9B3	Tuberías tapadas	1	1	1	2	1	4	1	11	11	N
9B4	Fuga de aceite por la línea	1	2	4	4	1	4	1	23	23	N
9B5	Temperatura del aceite mayor a 70° C	1	1	1	1	1	1	1	4	4	N
9C1	Falla en presostatos	1	1	1	4	1	4	1	19	19	N
9C2	Falla en válvulas de seguridad	1	1	1	4	1	4	1	19	19	N

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.12: Resumen de la criticidad de los modos de falla

<b>COD</b>	<b>MODO DE FALLA</b>	<b>Puntaje-Criticidad</b>
1A3	Rodamientos del reductor agarrotado	80
1A4	Rotura de dientes de la piñonera del reductor	80
1B2	Rodamientos del reductor agarrotado	80
1B3	Rotura de dientes de la piñonera del reductor	80
3A8	Daño en pistones hidráulicos Master	80
5D10	Rotura de llanta Master	80
6A6	Daño en pistones hidráulicos Esclavos	80
8B4	Rotura de llanta Esclavo	80
2A1	Bombas de baja presión de aceite malogrado	45
2A2	Bombas de purga o flushing de aceite malogrado	45
2B2	Bombas de baja presión de aceite malogrado	45
2B3	Bombas de purga o flushing de aceite malogrado	45
3A2	Falla en las bombas hidráulicas Master	45
3B2	Falla en las bombas hidráulicas Master	45
4A2	Falla en las bombas hidráulicas Master	45
5A1	Falla en las bombas hidráulicas Master	45
5D1	Falla en las bombas hidráulicas Master	45
6A2	Falla en las bombas hidráulicas Esclavos	45
7A2	Falla en las bombas hidráulicas Esclavos	45
8A1	Falla en las bombas hidráulicas Esclavos	45
3A4	Rodamientos de chumaceras agarrotados Master	44
4A5	Rodamientos de chumaceras agarrotados Master	44
5D3	Rodamientos de chumaceras agarrotados Master	44
1A5	Rotura de eje	44
9B1	Falla en bombas de alta presión	42
9A4	Falla en bombas de alta presión	42
2A3	Enfriador de aceite dañado	23
3A5	Rotura de mangueras hidráulicas Master	23
4A6	Rotura de mangueras hidráulicas Master	23
5D4	Rotura de mangueras hidráulicas Master	23
6A4	Rotura de mangueras hidráulicas Esclavos	23
7A5	Rotura de mangueras hidráulicas Esclavos	23
8A3	Rotura de mangueras hidráulicas Esclavos	23
9B4	Fuga de aceite por la línea	23
2C11	Rotura de forro de los rodillos Master	22
2C12	Rotura de copas protectoras de los rodillos Master	22
2C13	Rotura de DAM ring	22
1F2	Ingreso de metales al proceso	20
2A4	Enfriador de agua dañado	20

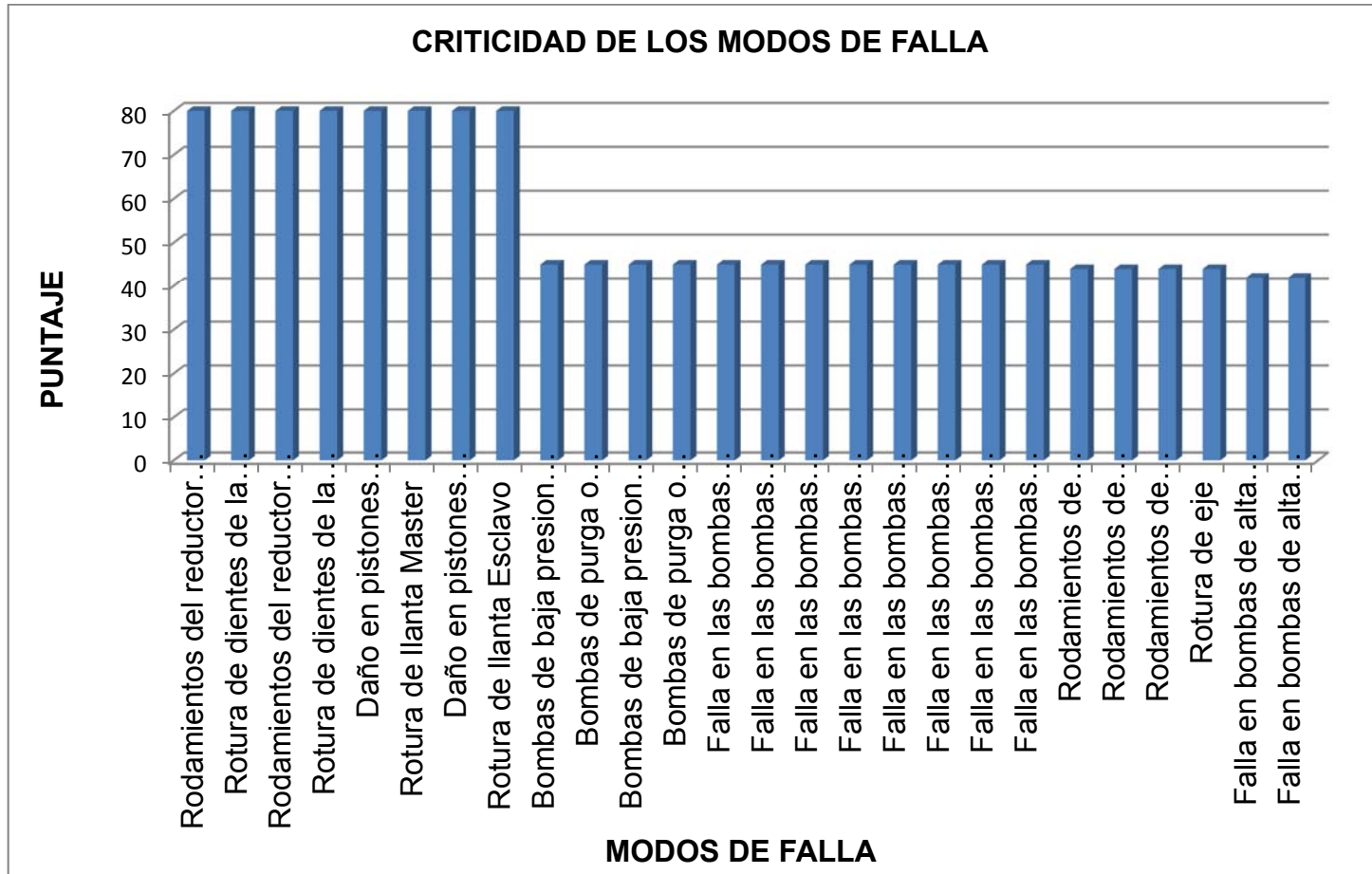
2C10	Ingreso de metales al proceso	20
4A9	Vibración excesiva de operación mayor a 20 mm/s	20
8B3	Ingreso de metales al proceso	20
9C1	Falla en presostatos	19
9C2	Falla en válvulas de seguridad	19
1B5	Falla en el sistema de lubricación	16
1A2	Acople mecánico roto	14
1B1	Acople mecánico defectuoso	13
5D6	Acumuladores de nitrógeno con fuga	11
9B2	Filtro flushing sucio	11
9B3	Tuberías tapadas	11
3C3	Roturas en el forro de los rodillos Master	8
5C3	Tope mecánico dañado	8
1A1	No llega corriente al Motor eléctrico.	7
1A6	No hay suministro de energía	7
1B6	Material muy fino (polvo de puzolana)	7
1B7	Deficiencia en suministro eléctrico	7
1C2	Material muy fino (polvo de puzolana)	7
1D2	Material muy fino (polvo de puzolana)	7
1E2	Material muy fino (polvo de puzolana)	7
1F1	Dureza de la materia prima mayor a 600 BHN	7
1G1	Mala operación	7
1H1	Mala operación	7
1I1	Mala operación	7
2B1	Pre calentadores de aceite malogrados	7
2C2	Material muy fino (polvo de puzolana)	7
2C7	Material muy grueso mayor a 600 BHN	7
3A1	Deficiencia en suministro eléctrico	7
3B4	Mala operación	7
3C2	Mala regulación de los topes mecánicos	7
3C4	Mala operación	7
3C9	Material muy fino (polvo de puzolana)	7
5A2	Filtros de aceite sucios	7
5A5	Mala operación	7
5B2	Mala regulación de los topes mecánicos	7
5B5	Mala operación	7
5B7	Material muy grueso mayor a 600 BHN	7
5D7	Plato y/o bladders de acumuladores dañados	7
5D8	Mala operación	7
5D9	Tope mecánico dañado	7
6A1	Deficiencia en suministro eléctrico	7
7A1	Deficiencia en suministro eléctrico	7
8A5	Mala operación	7

8A7	Material muy fino (polvo de puzolana)	7
8B1	Material muy fino (polvo de puzolana)	7
8B2	Material muy grueso mayor a 600 BHN	7
9A1	Deficiencia en suministro eléctrico	7
1A7	Demasiado rechazo de material (mayor a 40 TM/h)	5
1A11	Caudal de agua menor a 1200 litros/h	5
1B5	Sobrepresión en la mesa	5
1C1	Sobrepresión en la mesa	5
1D1	Sobrepresión en la mesa	5
1E1	Sobrepresión en la mesa	5
2A5	Bajo nivel de flujo de agua	5
2C1	Sobrepresión en la mesa	5
4A1	Deficiencia en suministro eléctrico	5
6A3	Electroválvulas en mal estado	5
1A8	Sistema de seguridad accionado	4
1A9	Desbalance en la base (accionamiento de presostatos de PADS en diferentes zonas)	4
1A10	Accionamiento de dos o más presostatos de PADS consecutivos	4
1A12	Sistema de control defectuoso	4
1A13	Sistema de protección defectuoso	4
1B4	Torque del motor eléctrico menor a 32 KNm	4
1C3	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h	4
1C4	Caudal de agua mayor a 3000 litros/h	4
1C5	Caudal de agua menor a 1200 litros /h	4
1C6	Caudal de aire mayor a 550000 m <sup>3</sup> /h	4
1D3	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h	4
1D4	Caudal de agua mayor a 3000 litros /h	4
1D5	Caudal de agua menor a 1200 litros /h	4
1D6	Caudal de aire mayor a 550000 m <sup>3</sup> /h	4
1E3	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h	4
1E4	Caudal de agua mayor a 3000 litros /h	4
1E5	Caudal de agua menor a 1200 litros /h	4
1E6	Caudal de aire mayor a 550000 m <sup>3</sup> /h	4
1H2	Descarga de material de los filtros de recuperación	4
1I2	Sistema de dosificación de balanzas de materias primas obstruidas	4
1I3	Sistema de dosificación de balanza de mezcla obstruidas	4
2C3	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h	4
2C4	Caudal de agua mayor a 3000 litros /h	4
2C5	Caudal de agua menor a 1200 litros /h	4
2C6	Caudal de aire mayor a 550000 m <sup>3</sup> /h	4

2C8	Mala dosificación de la balanza de alimentación	4
2C9	Atoro de material en la balanza de alimentación	4
2C14	Temperatura de salida del molino menor a 75° C	4
3A3	Electroválvulas en mal estado	4
3A6	Sistema de control defectuoso	4
3A7	Falla en sensores de posición	4
3B1	Sistema de control defectuoso	4
3B3	Falla en las electroválvulas	4
3C1	Mala calibración de la altura de los rodillos hacia la mesa	4
3C5	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h	4
3C6	Caudal de agua menor a 1200 litros /h	4
3C7	Temperatura de salida del molino menor a 75° C	4
3C8	Altura de rodillos de 80 mm hacia la mesa	4
4A3	Falla en sensores de posición	4
4A4	Electroválvulas en mal estado	4
4A7	Sistema de control defectuoso	4
4A8	Parada del motor principal	4
5A3	Electroválvulas en mal estado	4
5A4	Sistema de control defectuoso	4
5A6	Presión diferencial del molino mayor a 45 mbar	4
5B1	Mala calibración de la altura de los rodillos hacia la mesa	4
5B3	Falla en sensores de posición	4
5B4	Caudal de aire menor a 425000 m <sup>3</sup> /h	4
5B6	Exceso de material sobre la mesa	4
5B8	Velocidad del clasificador dinámico en 103 rpm	4
5C1	Sistema de control defectuoso	4
5C2	Falla en sensores de posición	4
5D2	Electroválvulas en mal estado	4
5D5	Sistema de control defectuoso	4
6A5	Sistema de control defectuoso	4
7A3	Parada del motor principal	4
7A4	Electroválvulas en mal estado	4
7A6	Sistema de control defectuoso	4
8A2	Electroválvulas en mal estado	4
8A4	Sistema de control defectuoso	4
8A6	Presión diferencial del molino mayor a 45 mbar	4
9A2	Temperatura del aceite mayor a 70° C	4
9A3	Temperatura del aceite menor a 25° C	4
9A5	Falla en sensores de posición de válvulas	4
9A6	Válvulas manuales cerradas	4
9B5	Temperatura del aceite mayor a 70° C	4

Fuente: Elaboración Propia

Grafico 6.2: Criticidad de los modos de falla



Fuente: Elaboración Propia

Ya se han hallado los modos de falla más críticos, los cuales son dos casos de rodamientos del reductor agarrotados (causados por fallas funcionales diferentes), dos casos de rotura de dientes de la piñonería del reductor (causados por fallas funcionales diferentes), daño en los pistones hidráulicos de los rodillos master, rotura de llantas de los rodillos máster, daño en los pistones hidráulicos de los rodillos esclavos y rotura de llantas de los rodillos esclavos.

En la tabla 6.13 se muestran los efectos y consecuencias de los modos de falla que se han determinado teniendo en cuenta los criterios de seguridad, medio ambiente, impacto en la producción y mantenimiento, luego se calcula el número de prioridad de riesgo (formula 4.3) de los modos de falla.

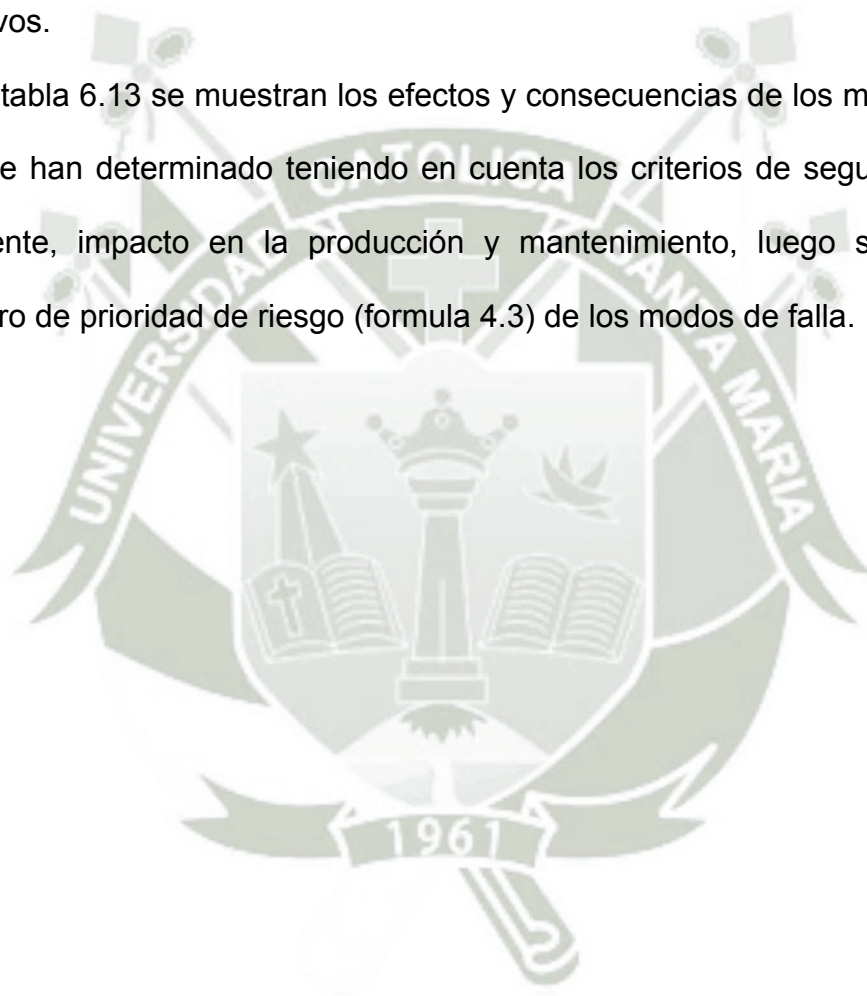


Tabla 6.13: Efectos y consecuencias de los modos de falla

COD	Modo de falla	COD	Efectos y Consecuencias	S	O	D	NPR
1A3	Rodamientos del reductor agarrotados	1A3A	<p>Evidente/No evidente: Si es evidente, el torque del motor eléctrico no es transmitido al reductor, se detiene la producción.</p> <p>Descripción del evento: El sistema de control (SCADA) indica una elevada corriente y temperatura en el motor eléctrico, y el reductor no transmite torque. El personal mecánico verifica el estado del reductor en campo, desmonta las tapas del reductor e inspecciona sus componentes internos.</p> <p>Tiempo de verificación en campo: 1 hora.</p> <p>Desmontaje y reemplazo de componentes: 7 días</p> <p>Tiempo de arranque del motor: 2 h.</p> <p>No afecta a la seguridad y medio ambiente.</p> <p>*Afecta en la producción en: S/. 8 271 529.41</p> <p>**Impacto de falla en el mantenimiento: S/. 567 150.00</p>	8	3	6	144

1A4	Rotura de dientes de la piñonera del reductor	1A4A	<p>Evidente/No evidente: Si es evidente, el torque del motor eléctrico no es transmitido al reductor.</p> <p>Descripción del evento: El sistema de control (SCADA) indica una elevada corriente y temperatura en el motor eléctrico, y el reductor no transmite torque. El personal mecánico verifica el estado del reductor en campo, desmonta las tapas del reductor e inspecciona sus componentes internos.</p> <p>Tiempo de verificación: 1 hora.</p> <p>Desmontaje y reemplazo de componentes: 7 días</p> <p>Tiempo de arranque del motor: 2 h.</p> <p>No afecta a la seguridad y medio ambiente.</p> <p>*Afecta en la producción en: S/. 8 271 529.41</p> <p>**Impacto de falla en el mantenimiento: S/. 741 400.00</p>	8	3	6	144

1B2	Rodamientos del reductor agarrotados	1B2A	<p>Evidente/No evidente: Si es evidente, se eleva la temperatura del reductor, disminuye el torque, se elevan las vibraciones y hay presencia de ruidos anómalos.</p> <p>Descripción del evento: El sistema de control (SCADA) indica que el motor eléctrico presenta un elevado consumo de corriente y temperatura alta, el reductor también presenta temperatura alta debido a que este frena al motor eléctrico. El personal mecánico verifica el estado del reductor en campo, desmonta las tapas del reductor y según la condición programa el mantenimiento o cambio del componente.</p> <p>Tiempo de verificación en campo: 1 hora.</p> <p>Desmontaje y reemplazo de componentes: 7 días.</p> <p>Tiempo de arranque del motor: 2 h.</p> <p>No afecta a la seguridad y medio ambiente.</p>	8	3	6	144

			<p>*Afecta en la producción en: S/. 8 271 529.41</p> <p>**Impacto de falla en el mantenimiento: S/. 567 150.00</p>				
1B3	Rotura de dientes de la piñonería del reductor	1B3A	<p>Evidente/No evidente: Si es evidente, hay presencia de ruidos anómalos, incremento de la temperatura y vibraciones en el reductor.</p> <p>Descripción del evento: El sistema de control (SCADA) indica un incremento en la temperatura y vibraciones del reductor y si se llegase a superar el límite permisible de vibraciones, se detiene el motor y por lo tanto la producción. El personal mecánico verifica el estado del reductor en campo, desmonta las tapas del reductor y verifica el estado de sus componentes internos.</p> <p>Tiempo de verificación: 1 hora.</p> <p>Desmontaje y reemplazo de componentes: 7 días.</p> <p>Tiempo de arranque del motor: 2 h.</p> <p>No afecta a la seguridad y medio ambiente.</p>	8	3	6	144

			*Afecta en la producción en: S/. 8 271 529.41  **Impacto de falla en el mantenimiento: S/. 741 400.00				
3A8	Daño en pistones hidráulicos masters	3A8A	Evidente/No evidente: Si es evidente, existen vibraciones elevadas en el reductor y fugas de aceite por el primer nivel del molino.  Descripción del evento: El sistema de control (SCADA) indica la posición con respecto a la mesa de los rodillos en 20 mm sin que ese valor sufra oscilaciones, se debe a que los rodillos han colisionado con sus respectivos topes mecánicos y están estáticos, lo cual provoca vibraciones elevadas y por lo tanto la parada del motor principal. El personal mecánico verifica el estado de los pistones hidráulicos de los rodillos y procede a su desmontaje y reemplazo.  Tiempo de verificación: 1 hora.  Desmontaje y reemplazo de componentes: 7 días.  Tiempo de arranque del motor: 2 h.	6	2	4	48

			<p>No afecta a la seguridad y medio ambiente.</p> <p>*Afecta en la producción en: S/. 8 271 529.41</p> <p>**El impacto de la falla en el mantenimiento: S/. 164 750.00</p>				
5D10	Rotura de llanta master	5D10A	<p>Evidente/No evidente: Si es evidente, existen vibraciones elevadas en el reductor y ruidos anómalos al interior de la cámara de molienda.</p> <p>Descripción del evento: El sistema de control (SCADA) indica vibraciones del reductor elevadas, así como aumento de la presión diferencial del molino y posibles cambios bruscos en la posición con respecto a la mesa de todos los rodillos. El personal mecánico ingresa al molino, procede a desmontar la llanta y su reemplazo.</p> <p>Tiempo de verificación: 1 hora.</p> <p>Desmontaje y reemplazo de componentes: 7 días.</p> <p>Tiempo de arranque del motor: 2 h.</p> <p>No afecta a la seguridad y medio ambiente.</p>	7	2	4	56

			*Afecta en la producción en: S/. 8 271 529.41 **El impacto de la falla en el mantenimiento: S/. 1 067 000.00				
6A6	Daño en pistones hidráulicos esclavos	6A6A	Evidente/No evidente: Si es evidente, existen vibraciones elevadas en el reductor y fuga de aceite en la plataforma principal del molino. Descripción del evento: El sistema de control (SCADA) indica la posición con respecto a la mesa de los rodillos en 70 mm sin que ese valor sufra oscilaciones, se debe a que los rodillos han colisionado con sus respectivos topes mecánicos y están estáticos, lo cual provoca vibraciones elevadas y por lo tanto la parada del motor principal. El personal mecánico verifica el estado de los pistones hidráulicos de los rodillos y procede a su desmontaje y reemplazo. Tiempo de verificación: 1 hora. Desmontaje y reemplazo de componentes: 7 días. Tiempo de arranque del motor: 2 h.	6	2	3	36

			<p>No afecta a la seguridad y medio ambiente.</p> <p>*Afecta en la producción en: S/. 8 271 529.41</p> <p>**El impacto de la falla en el mantenimiento: S/. 144 750.00</p>				
8B4	Rotura de llanta esclavo	8B4A	<p>Evidente/No evidente: Si es evidente, existen vibraciones elevadas en el reductor y ruidos anómalos al interior de la cámara de molienda.</p> <p>Descripción del evento: El sistema de control (SCADA) indica vibraciones del reductor elevadas, así como aumento de la presión diferencial del molino y posibles cambios bruscos en la posición con respecto a la mesa de todos los rodillos. El personal mecánico ingresa al molino, procede a desmontar la llanta y su reemplazo.</p> <p>Tiempo de verificación: 1 hora.</p> <p>Desmontaje y reemplazo de componentes: 7 días.</p> <p>Tiempo de arranque del motor: 2 h.</p> <p>No afecta a la seguridad y medio ambiente.</p>	7	2	3	42

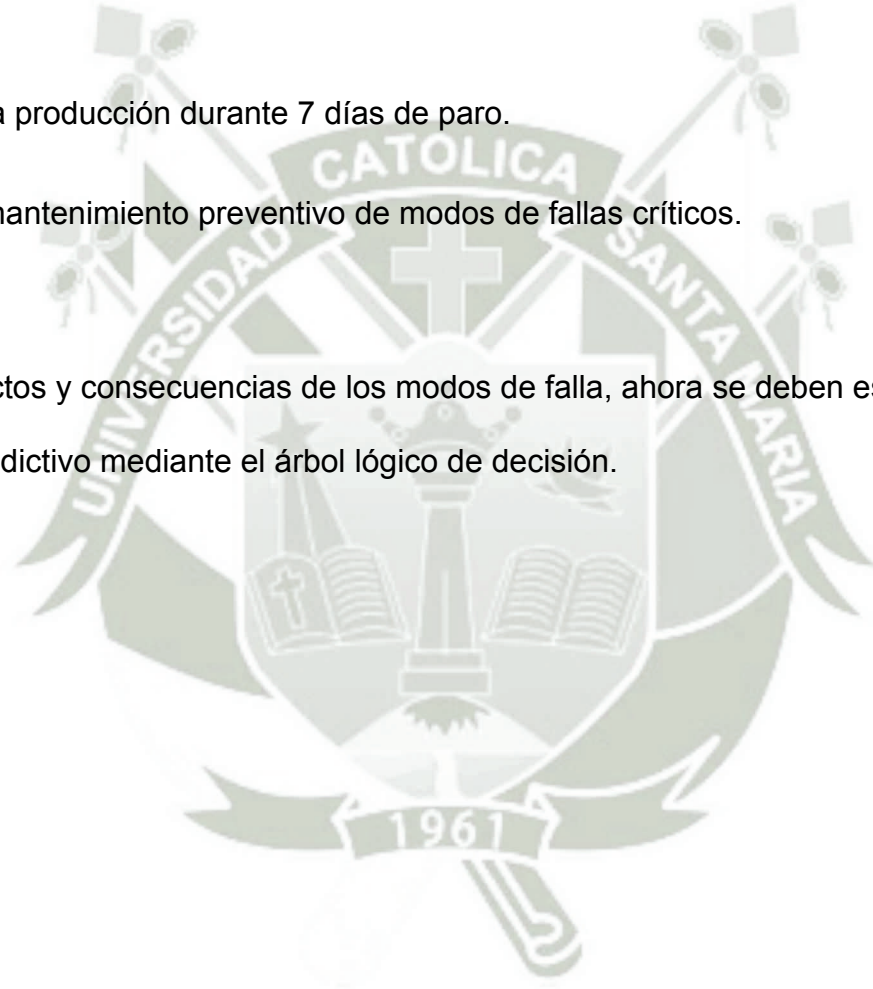
			*Afecta en la producción en: S/. 8 271 529.41				
			**El impacto de la falla en el mantenimiento: S/. 1 067 000.00				

(\*) Ver anexo 1.1: Impacto en la producción durante 7 días de paro.

(\*\*) Ver anexo 1.2: Costos de mantenimiento preventivo de modos de fallas críticos.

Fuente: Elaboración Propia

Ya se han determinado los efectos y consecuencias de los modos de falla, ahora se deben establecer las estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo mediante el árbol lógico de decisión.



En la tabla 6.14 se muestra el análisis y selección de estrategias de mantenimiento basadas en el árbol lógico de decisiones.

Tabla 6.14: Análisis y selección de las estrategias de mantenimiento

REFERENCIA AMEF				CONSECUENCIAS					ARBOL LOGICO DE DECISION					ESTRATEGIAS	
F	FF	MF	NPR	E					E1	E2	E3	E4	E5	TIPO DE MANTENIMIENTO	TAREA
				S	A				SA1	SA2	SA3	SA4	SA5		
						P			P1	P2	P3	P4	P5		
							M		M1	M2	M3	M4	M5		
1	A	3A	144	S	N	N	S		P1					Mantenimiento a condición	Análisis vibracional, análisis de aceite y termografía.
1	A	4A	144	S	N	N	S		P1					Mantenimiento a condición	Análisis vibracional, análisis de aceite y termografía.
1	B	2A	144	S	N	N	S		P1					Mantenimiento a condición	Análisis vibracional, análisis de aceite y termografía.
1	B	3A	144	S	N	N	S		P1					Mantenimiento a condición	Análisis vibracional, análisis de aceite y termografía.

3	A	8A	48	S	N	S					SA3			Sustitución Cíclica	Reemplazo de pistones y cambio de componentes
5	D	10A	56	S	N	N	S				P3			Sustitución Cíclica	Reemplazo de llantas de rodillos Master
6	A	6A	36	S	N	S					SA3			Sustitución Cíclica	Reemplazo de pistones y cambio de componentes
8	B	4A	42	S	N	N	S				P3			Sustitución Cíclica	Reemplazo de llantas de rodillos Esclavos

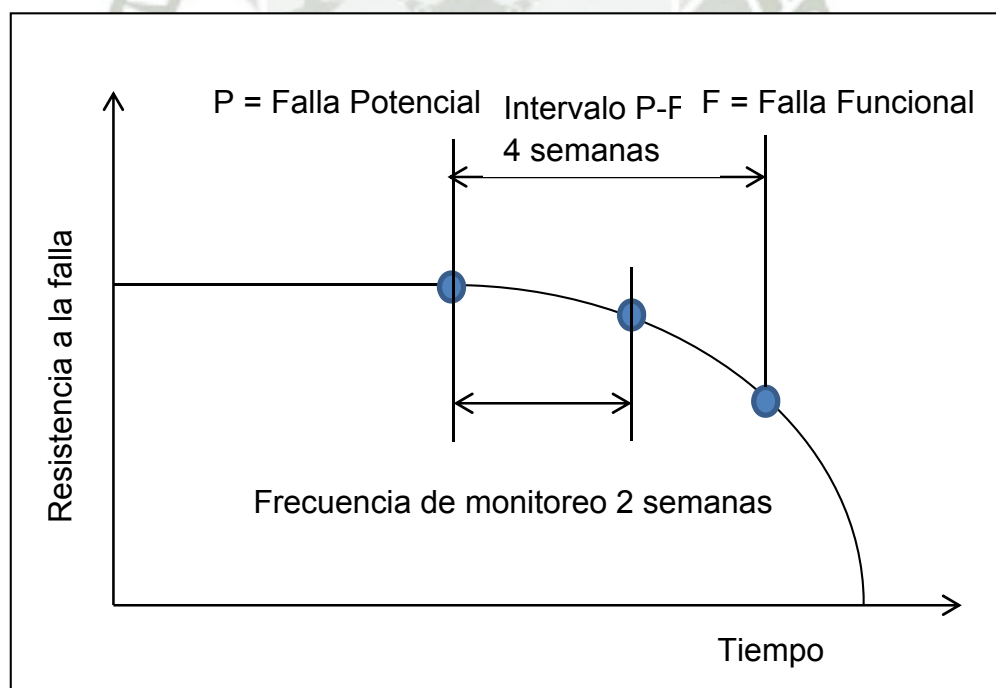
Fuente: Elaboración Propia



La finalidad de las tareas de mantenimiento a condición según la metodología RCM, es convertirlas a estrategias de tipo sustitución cíclica o reacondicionamiento cíclico, por esta razón se realiza el análisis Weibull posteriormente; para hallar el tiempo en donde el costo de mantenimiento es el óptimo sin que el equipo falle para realizar la acción preventiva.

Para los modos de falla; rodamientos del reductor agarrotados y rotura de dientes de la piñonería del reductor; se ha determinado que el tipo de mantenimiento a aplicar es el mantenimiento a condición, para estos casos se ha determinado la frecuencia de monitoreo, la cual es representada por el intervalo neto P-F de los análisis de aceite, de vibraciones y termografía como se muestra en las figura 6.6.

Figura 6.6: Intervalo P-F de monitoreo a condición



Fuente: Elaboración Propia

Habiendo determinado la frecuencia de monitoreo de las tareas a condición, es posible establecer la frecuencia y el costo del mantenimiento predictivo, que se muestran en la tabla 6.15.

Tabla 6.15: Frecuencia y costo del mantenimiento predictivo de los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3

DESCRIPCIÓN	MARCA	TAREA	RESPONSABLE	DÍA APROXIMADO	DURACIÓN DE LA TAREA	COSTO DE LA TAREA (*)
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	15/01/2013	60 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	15/01/2013	30 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	15/01/2013	15 minutos	S/. 5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	30/01/2013	60 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	30/01/2013	30 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	30/01/2013	15 minutos	S/. 5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	14/02/2013	60 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	14/02/2013	30 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	14/02/2013	15 minutos	S/. 5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	01/03/2013	60 minutos	S/. 1,250.00

REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	01/03/2013	30 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	01/03/2013	15 minutos	S/. 5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	16/03/2013	60 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	16/03/2013	30 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	16/03/2013	15 minutos	S/. 5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	31/03/2013	60 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	31/03/2013	30 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	31/03/2013	15 minutos	S/. 5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	15/04/2013	60 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	15/04/2013	30 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	15/04/2013	15 minutos	S/. 5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	30/04/2013	60 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	30/04/2013	30 minutos	S/. 1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	30/04/2013	15 minutos	S/. 5,000.00

REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	15/05/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	15/05/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	15/05/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	30/05/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	30/05/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	30/05/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	14/06/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	14/06/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	14/06/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	29/06/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	29/06/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	29/06/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	14/07/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	14/07/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	14/07/2013	15 minutos	S/.	5,000.00

REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	29/07/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	29/07/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	29/07/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	13/08/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	13/08/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	13/08/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	28/08/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	28/08/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	28/08/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	12/09/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	12/09/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	12/09/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	27/09/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	27/09/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	27/09/2013	15 minutos	S/.	5,000.00

REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	12/10/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	12/10/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	12/10/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	27/10/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	27/10/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	27/10/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	11/11/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	11/11/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	11/11/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	26/11/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	26/11/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	26/11/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	11/12/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	11/12/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	11/12/2013	15 minutos	S/.	5,000.00

REDUCTOR	RENK	Análisis vibracional	YURA	26/12/2013	60 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis termográfico	YURA	26/12/2013	30 minutos	S/.	1,250.00
REDUCTOR	RENK	Análisis de aceite	MOBIL	26/12/2013	15 minutos	S/.	5,000.00
					<b>SUB TOTAL</b>	S/.	180,000.00

(\*) Ver anexo 1.4: Costo de mantenimiento predictivo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.16: Costo total del mantenimiento predictivo de los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3

Descripción	Costo
Mantenimiento predictivo (ver Tabla 6.15)	S/. 180,000.00
Equipo con software MICROLOG SKF de registro de vibraciones y temperatura	S/. 81,000.00
Cámara Termográfica con software SKF	S/. 54,000.00
<b>TOTAL</b>	<b>S/. 315,000.00</b>

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6.17 se muestra la viabilidad técnica de las estrategias de los modos de falla más críticos.

Tabla 6.17: Viabilidad técnica de los modos de falla críticos

ESTRATEGIAS					VIABILIDAD	
F	FF	MF	TIPO DE MANTENIMIENTO	TAREA	FRECUENCIA	TECNICA
1	A	3A	Mantenimiento a condición	Análisis vibracional, análisis de aceite y termografía.	Cada 2 semanas	Se tiene un intervalo P-F de 4 semanas, el cual es suficiente para detectar la falla potencial con un intervalo neto de 2 semanas y programar el mantenimiento.
1	A	4A	Mantenimiento a condición	Análisis vibracional, análisis de aceite y termografía.	Cada 2 semanas	Se tiene un intervalo P-F de 4 semanas, el cual es suficiente para detectar la falla potencial con un intervalo neto de 2 semanas y programar el mantenimiento.
1	B	2A	Mantenimiento a condición	Análisis vibracional, análisis de aceite y termografía.	Cada 2 semanas	Se tiene un intervalo P-F de 4 semanas, el cual es suficiente para detectar la falla potencial con un intervalo neto de 2 semanas y programar el mantenimiento.

1	B	3A	Mantenimiento a condición	Análisis vibracional, análisis de aceite y termografía.	Cada 2 semanas	Se tiene un intervalo P-F de 4 semanas, el cual es suficiente para detectar la falla potencial con un intervalo neto de 2 semanas y programar el mantenimiento.
3	A	8A	Sustitución Cíclica	Reemplazo de pistones y cambio de componentes	Cada 2 años	La vida útil de los pistones hidráulicos es de 2 años de acuerdo al contexto operacional.
5	D	10A	Sustitución Cíclica	Reemplazo de llantas de rodillos Master	Cada 6 meses	La vida útil de las llantas es de 6 meses de acuerdo al contexto operacional.
6	A	6A	Sustitución Cíclica	Reemplazo de pistones y cambio de componentes	Cada 2 años	La vida útil de los pistones hidráulicos es de 2 años de acuerdo al contexto operacional.
8	B	4A	Sustitución Cíclica	Reemplazo de llantas de rodillos Esclavos	Cada año	La vida útil de las llantas es de 1 año de acuerdo al contexto operacional.

Fuente: Elaboración Propia.

## 6.5 Cálculo del tiempo óptimo de cambio de pieza: Modos de falla 1A3 y 1B2: Rodamientos del reductor agarrotados

### 6.5.1 Obtención de los datos

En el tiempo de operación del reductor RENK se presentó una falla funcional causada por el modo este modo de falla y se tiene el siguiente registro de operación en meses.

Tabla 6.18: Tiempos de operación del reductor modos de falla 1A3 y  
1B2

I	TO (*)	Tipo
1	23.67	F
2	30.11	F

(\*) Ver anexo 1.5: Tiempos de operación del reductor

Fuente: Elaboración Propia

### 6.5.2 Cálculo de los parámetros de Weibull: Método de los mínimos cuadrados

Tabla 6.19: Parámetros de Weibull modos de falla 1A3 y 1B2

	TO	RANGO MEDIANA	X	Y RANGO MEDIANA				
	h	$(i-0.3)/(N+0.4)$	ln (ti)	$\ln(\ln(1/(1-F)Ti))$				
	i	Ti	F(Ti)	Xi	Yi	X2	Y2	XiYi
	1.0000	23.6700	0.2917	3.1642	-1.0647	10.0122	1.1335	-3.3688
	2.0000	30.1100	0.7083	3.4049	0.2088	11.5931	0.0436	0.7108
<b>SUMA</b>			1.0000	6.5691	-0.8559	21.6053	1.1771	-2.6581
<b>N</b>	2							

Fuente: Elaboración Propia

Con los resultados de la tabla se estiman los valores de a, b, la ecuación de la recta y el parámetro de la escala n, mediante las fórmulas 4.13, 4.14 y 4.15.

$$a = -17.8085$$

$$b = 5.2916$$

$$y = 5.2916x - 17.8085$$

$$n = 28.9453 \text{ meses.}$$

### 6.5.3 Cálculo del coeficiente de correlación

Tabla 6.20: Coeficiente de correlación modos de falla 1A3 y 1B2

	TO	RANGO MEDIANA	X	Y RANGO MEDIANA	X Prom	Xi - X prom	(Xi - X prom) 2	Y PROM	Yi - Y prom	(Yi - Y prom) 2	Xi - X prom *
	h	$(i-0.3)/(N+0.4)$	ln (ti)	$\ln(\ln(1/(1-F(Ti))))$							
i	Ti	F(Ti)	Xi	Yi							
1	23.6700	0.2917	3.1642	-1.0647	3.2845	-0.1203	0.0145	-0.4280	-0.6367	0.4054	0.0766
2	30.1100	0.7083	3.4049	0.2088	3.2845	0.1203	0.0145	-0.4280	0.6367	0.4054	0.0766
<b>Sum</b>		<b>1.0000</b>	<b>6.5691</b>	<b>-0.8559</b>	<b>6.5691</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0290</b>	<b>-0.8559</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.8108</b>	<b>0.1532</b>
<b>N</b>	<b>2</b>										
<b>COEFICIENTE DE CORRELACION</b>	r	1	100%	FORMULA 4.17							
<b>COEFICIENTE DE CORRELACION</b>	r	1	100%	POR FUNCION EXCEL							

Fuente: Elaboración Propia

Los parámetros estimados son los siguientes:

- Parámetro de forma  $\beta = 5.2916$
- Parámetro de escala  $\eta = 28.9453$
- Parámetro de localización  $\gamma = 0$

El parámetro de localización es 0 porque el coeficiente de correlación se ajusta a la ecuación de la recta.

#### 6.5.4 Cálculo de la vida media o tiempo medio entre fallas

Para este cálculo ha sido necesario usar el anexo 1.3 Tabla de valores de la función gamma y la fórmula 4.11.

Tabla 6.21: MTBF modos de falla 1A3 y 1B2

	$1+(1/\beta)$	1.18897713		
	F. Gamma	0.92089	tiempo	F. gamma tabla
Vida media	<b>MTBF</b>	<b>26.6554237</b>	meses	Con tabla
Vida media	<b>MTBF</b>	<b>26.6635274</b>	meses	Con función Excel

Fuente: Elaboración Propia

### 6.5.5 Cálculo de las 4 funciones de la confiabilidad

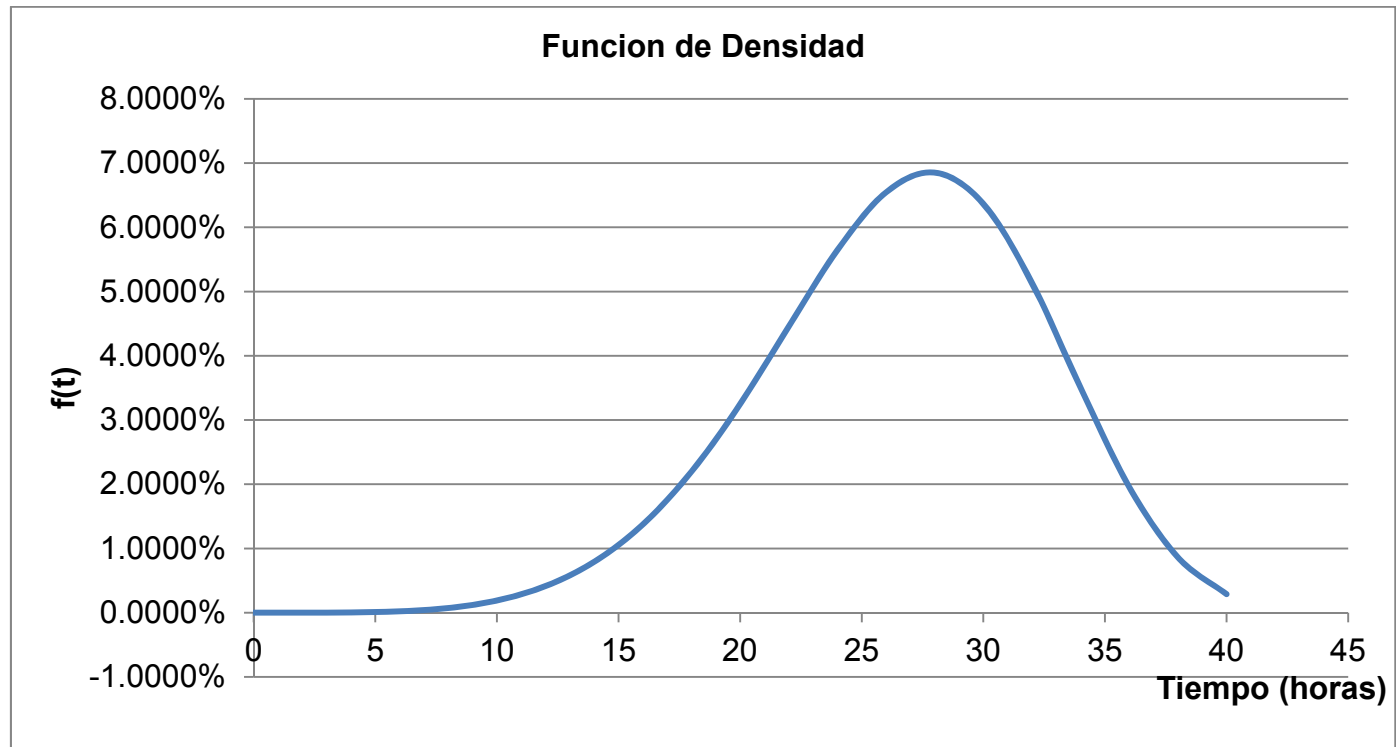
Se aplica un factor de 2 meses, y se utilizan las fórmulas 4.18, 4.19, 4.9 y 4.10 respectivamente.

Tabla 6.22: Funciones de la confiabilidad modos de falla 1A3 y 1B2

t meses	f(t)	f(T)	R(t)	h(t)
0	0.0000%	0.0000%	100.0000%	0.0000%
2	0.0002%	0.0001%	99.9999%	0.0002%
4	0.0037%	0.0028%	99.9972%	0.0037%
6	0.0213%	0.0242%	99.9758%	0.0213%
8	0.0732%	0.1108%	99.8892%	0.0733%
10	0.1903%	0.3603%	99.6397%	0.1910%
12	0.4138%	0.9428%	99.0572%	0.4177%
14	0.7923%	2.1189%	97.8811%	0.8095%
16	1.3748%	4.2485%	95.7515%	1.4358%
18	2.1951%	7.7775%	92.2225%	2.3803%
20	3.2478%	13.1855%	86.8145%	3.7411%
22	4.4561%	20.8748%	79.1252%	5.6317%
24	5.6451%	30.9993%	69.0007%	8.1812%
26	6.5444%	43.2629%	56.7371%	11.5346%
28	6.8519%	56.7802%	43.2198%	15.8536%
30	6.3661%	70.1358%	29.8642%	21.3167%
32	5.1346%	81.7402%	18.2598%	28.1196%
34	3.5008%	90.4023%	9.5977%	36.4757%
36	1.9553%	95.8055%	4.1945%	46.6163%
38	0.8625%	98.5329%	1.4671%	58.7909%
40	0.2882%	99.6067%	0.3933%	73.2677%

Fuente: Elaboración Propia

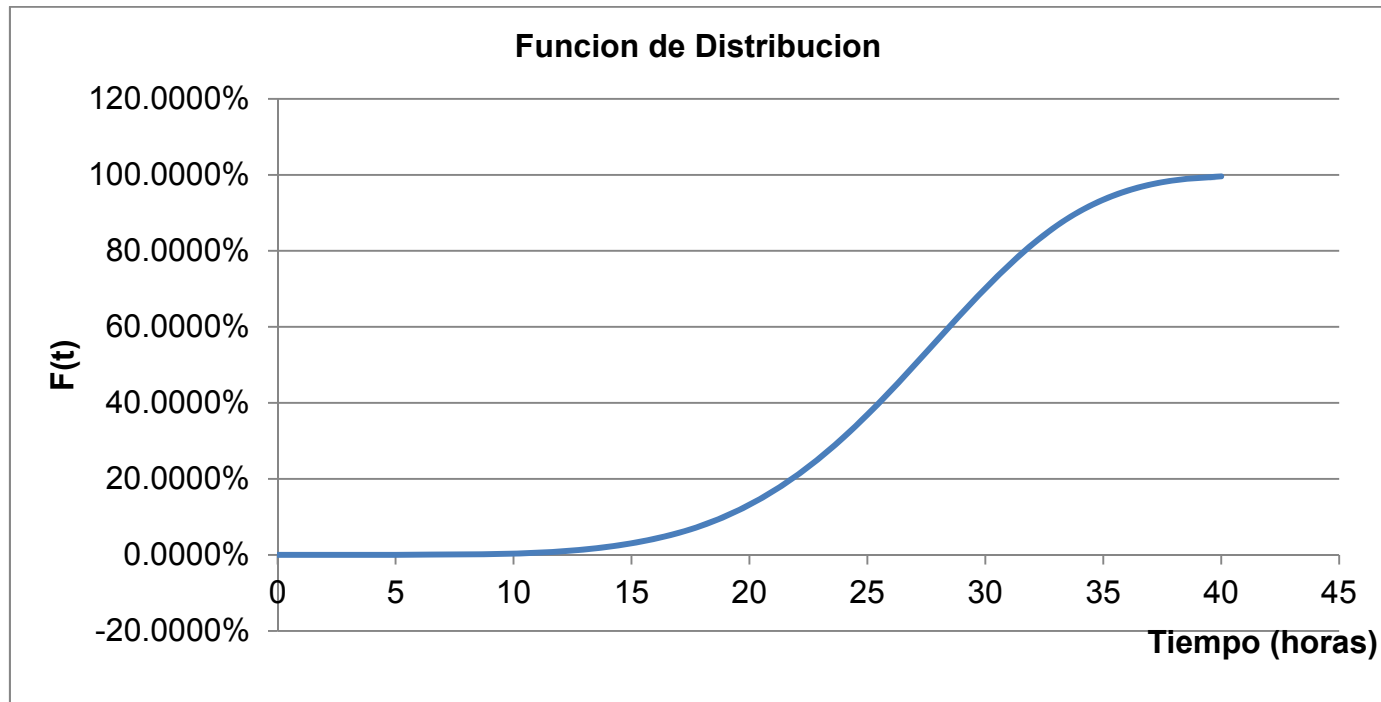
Grafico 6.3: Función de densidad modos de falla 1A3 y 1B2



Fuente: Elaboración Propia



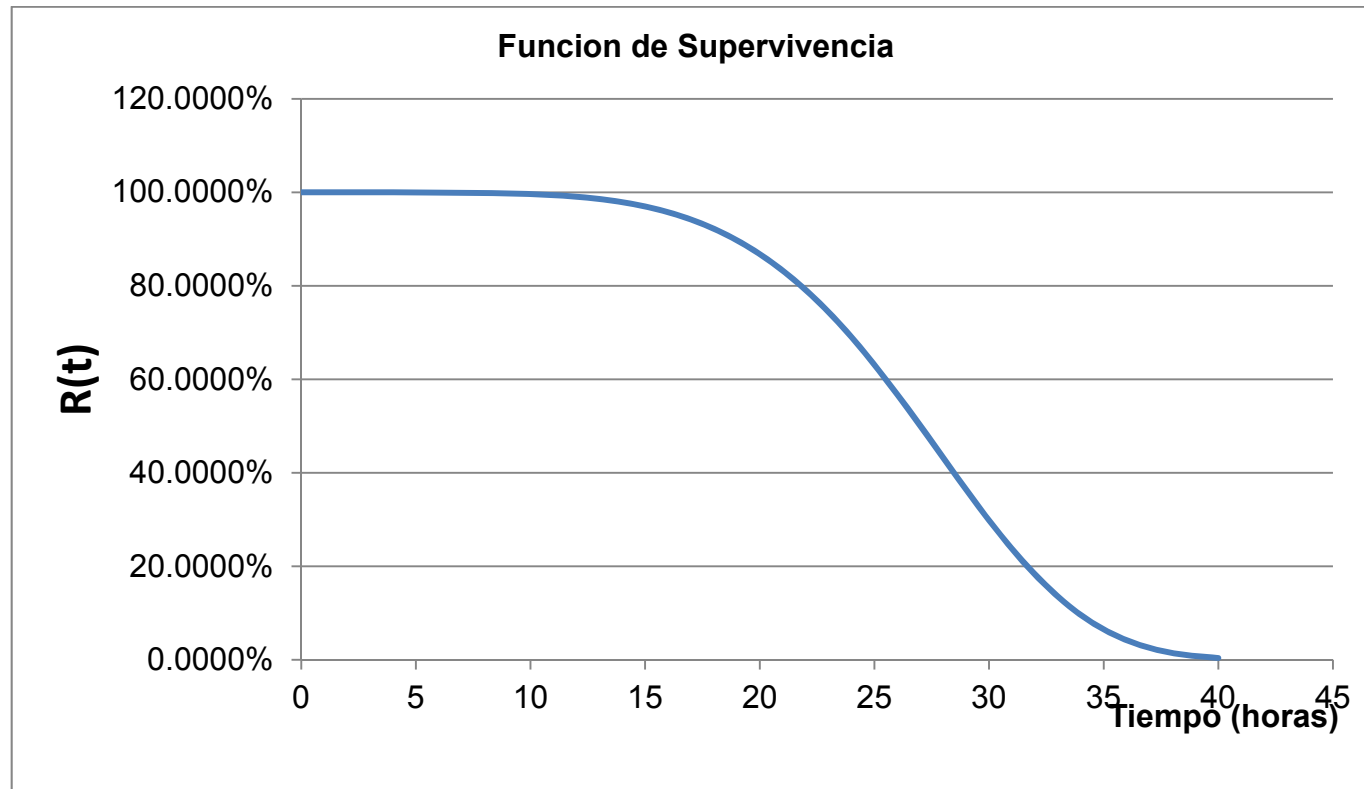
Grafico 6.4: Función de distribución modos de falla 1A3 y 1B2



Fuente: Elaboración Propia



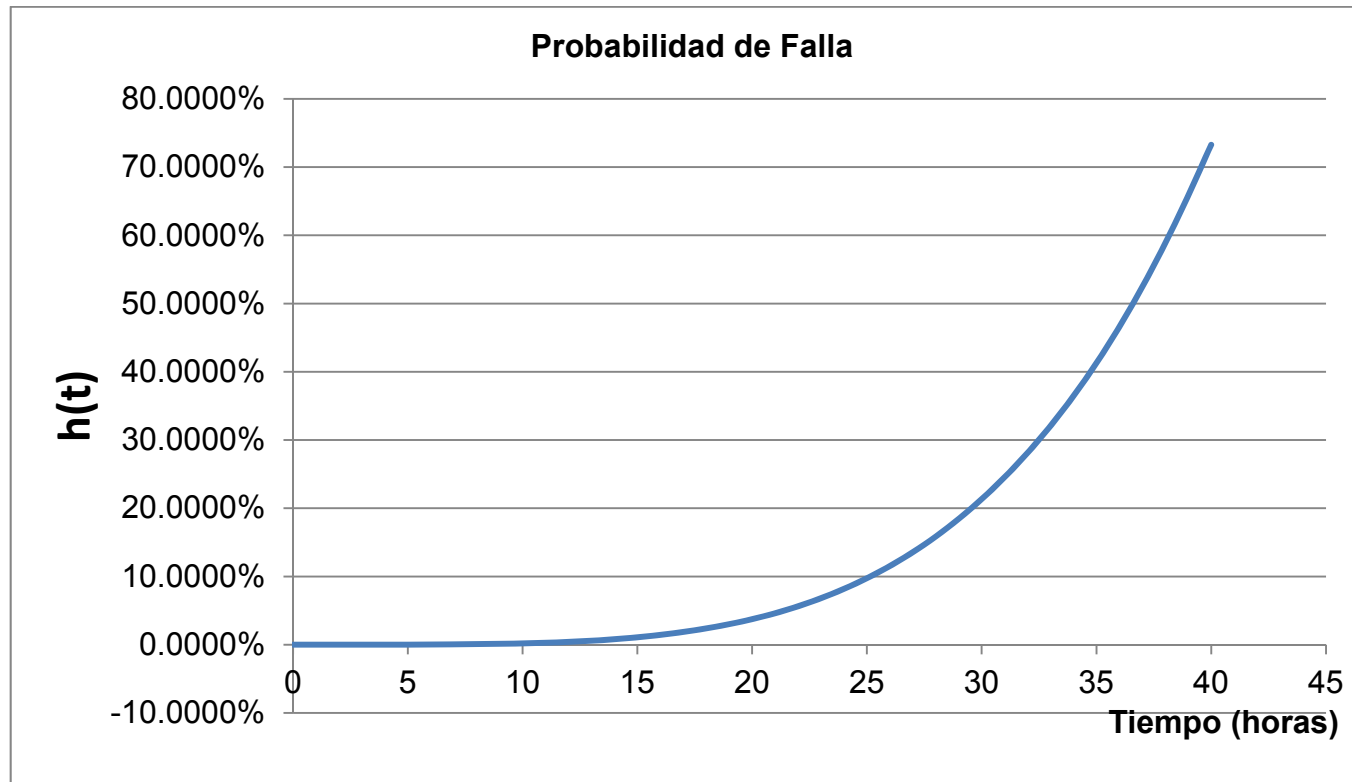
Grafico 6.5: Función de supervivencia modos de falla 1A3 y 1B2



Fuente: Elaboración Propia



Grafico 6.6: Función de riesgo o probabilidad de falla modos de falla 1A3 y 1B2



Fuente: Elaboración Propia



El análisis RCM previo determina que los modos de falla rodamientos del reductor agarrotados tienen consecuencias graves en la operación. La factibilidad económica será el factor predominante en la decisión de la estrategia de mantenimiento a aplicar.

#### **6.5.6 Factibilidad técnica**

El valor  $b = 5.2916$  mayor que 1 indica que si es factible aplicar tareas de reacondicionamiento o sustitución cíclicas, dicha afirmación se verifica por la tendencia creciente de la función riesgo.

#### **6.5.7 Factibilidad económica**

La siguiente tabla resume los datos necesarios para el cálculo del tiempo óptimo para el cambio de componentes.

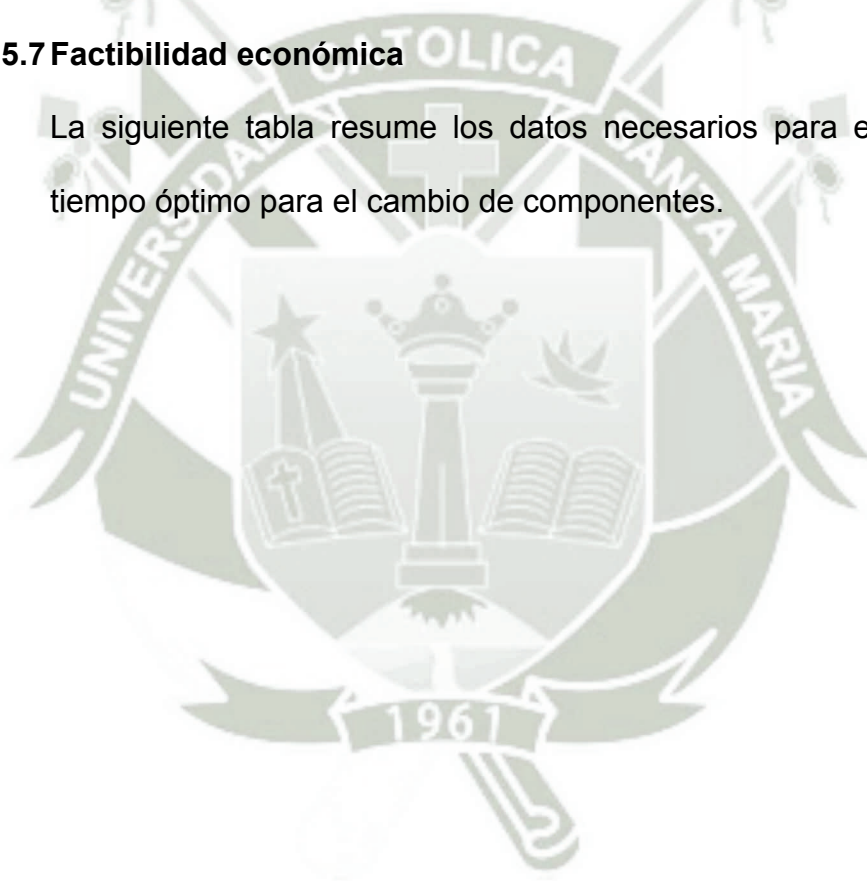


Tabla 6.23: Datos para el cálculo del tiempo óptimo modos de falla 1A3 y 1B2

ITEM	DESCRIPCION		COSTO	UNIDAD
A	Costo de 2 rodamientos SKF (*)		S/. 212,000.00	S/.
B	Costo de insumos (aceite ISO VG 320) (*)		S/. 13,250.00	S/.
C	Costo de maniobras (grúa) (*)		S/. 8,000.00	S/.
D	Costo mano de obra mantenimiento (Personal RENK) (*)		S/. 333,900.00	S/.
E	Costo de lucro cesante (**)		S/. 8,271,529.41	S/.
F	Costo de monitoreo a condición (***)		S/. 315,000.00	S/.
<b>G</b>	<b>Costo de la tarea preventiva (A+B+C+D+F)</b>	Cp	<b>S/. 882,150.00</b>	S/.
<b>H</b>	<b>Costo de la tarea correctiva (E+G)</b>	Cf	<b>S/. 8,838,679.41</b>	S/.
<b>I</b>	<b>Duración de tarea preventiva (7 Días)</b>	Tp	<b>0.23</b>	meses
<b>J</b>	<b>Duración de tarea correctiva (7 Días)</b>	Tf	<b>0.23</b>	meses
<b>K</b>	<b>Tiempo inicial</b>	INICIO Ti	<b>1</b>	meses
<b>L</b>	<b>Diferencial de tiempo</b>	dt	<b>1</b>	meses

(\*) Ver anexo 1.2: Costos de mantenimiento preventivo de modos de fallas críticos.

(\*\*) Ver anexo 1.1: Impacto en la producción durante 7 días de paro.

(\*\*\*) Ver tabla 6.16: Costo total del mantenimiento predictivo de los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3.

Fuente: Elaboración Propia

Con la fórmula 4.20 se ha determinado el tiempo óptimo de mantenimiento para este modo de falla.

Tabla 6.24: Tiempo óptimo para el cambio de rodamientos del reductor

tp	f(tp)	tp*f(tp)*dt	∫(t*f(tp)*dti)	F(tp)	R(tp)	Soles/mes
0	0.00%	0	0	0.00%	100.00%	S/. 3,835,434.78
1	0.00%	9.7598E-08	9.75975E-08	0.00%	100.00%	S/. 717,195.20
2	0.00%	3.8228E-06	3.92041E-06	0.00%	100.00%	S/. 395,585.10
3	0.00%	3.2673E-05	3.65937E-05	0.00%	100.00%	S/. 273,125.14
4	0.00%	0.00014973	0.000186326	0.00%	100.00%	S/. 208,595.72
5	0.01%	0.00048764	0.000673967	0.01%	99.99%	S/. 168,804.45
6	0.02%	0.00127948	0.001953449	0.02%	99.98%	S/. 141,894.50
7	0.04%	0.00289175	0.004845199	0.05%	99.95%	S/. 122,596.73
8	0.07%	0.00585854	0.010703742	0.11%	99.89%	S/. 108,233.83
9	0.12%	0.01091577	0.021619509	0.21%	99.79%	S/. 97,322.27
10	0.19%	0.01903341	0.040652921	0.36%	99.64%	S/. 88,994.07
11	0.29%	0.03144299	0.072095907	0.60%	99.40%	S/. 82,727.38
12	0.41%	0.04965573	0.12175164	0.94%	99.06%	S/. 78,208.81
13	0.58%	0.07546549	0.197217132	1.44%	98.56%	S/. 75,257.50
14	0.79%	0.11092797	0.308145103	2.12%	97.88%	S/. 73,780.18
15	1.06%	0.15830601	0.466451113	3.04%	96.96%	S/. 73,742.57
16	1.37%	0.21996866	0.686419776	4.25%	95.75%	S/. 75,149.65
17	1.75%	0.29823108	0.984650852	5.81%	94.19%	S/. 78,030.65
18	2.20%	0.39512341	1.379774261	7.78%	92.22%	S/. 82,426.54
19	2.70%	0.51208164	1.891855897	10.22%	89.78%	S/. 88,378.79
20	3.25%	0.64956243	2.541418328	13.19%	86.81%	S/. 95,918.59
21	3.84%	0.80659996	3.348018286	16.73%	83.27%	S/. 105,056.59

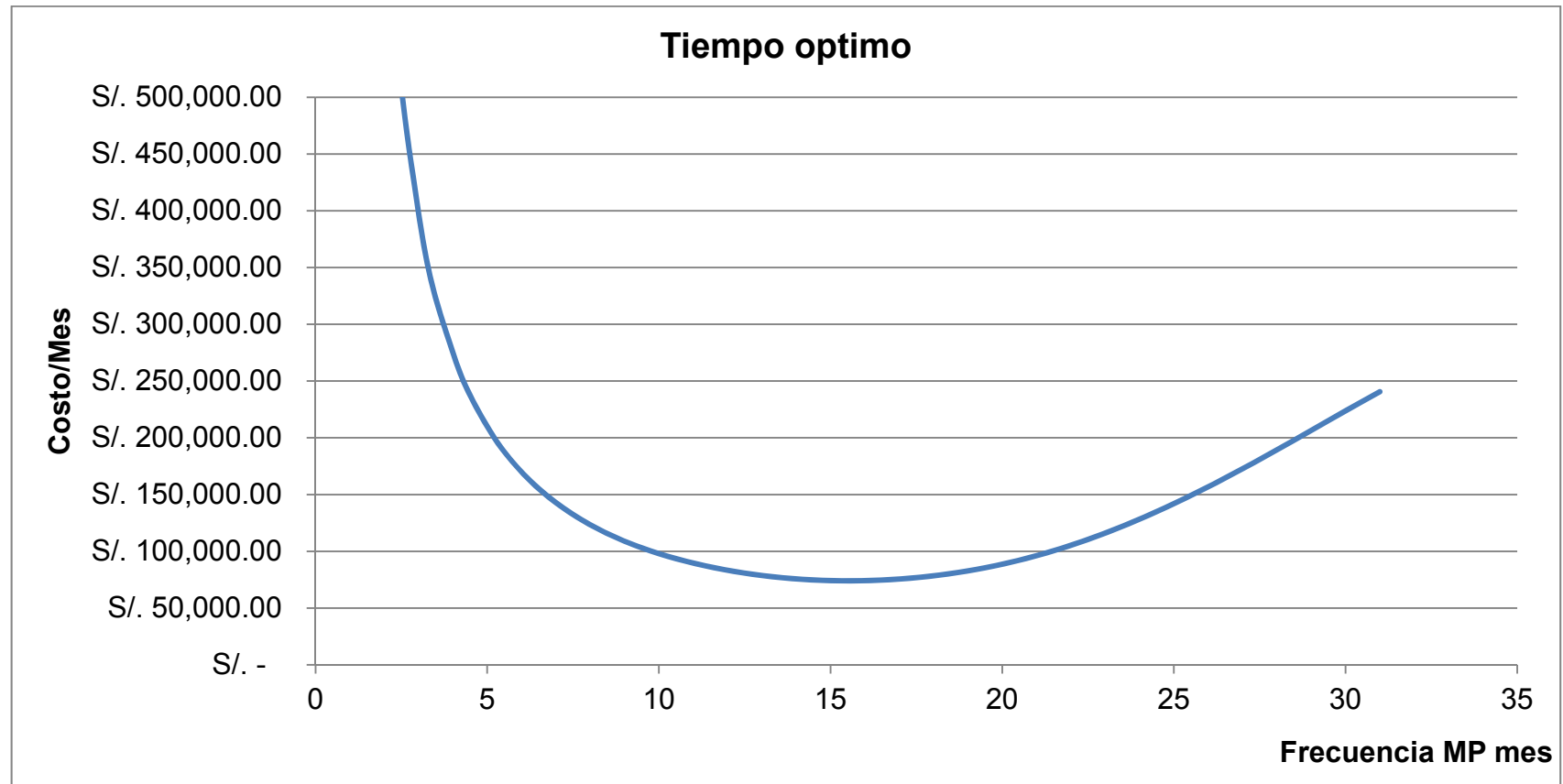
22	4.46%	0.98034463	4.32836292	20.87%	79.13%	S/.	115,772.99
23	5.07%	1.16565183	5.494014751	25.64%	74.36%	S/.	128,008.51
24	5.65%	1.35481809	6.848832842	31.00%	69.00%	S/.	141,656.58
25	6.15%	1.53758596	8.386418806	36.90%	63.10%	S/.	156,557.49
26	6.54%	1.70154449	10.0879633	43.26%	56.74%	S/.	172,494.83
27	6.79%	1.83302628	11.92098957	49.94%	50.06%	S/.	189,195.00
28	6.85%	1.91853155	13.83952112	56.78%	43.22%	S/.	206,330.33
29	6.71%	1.94659013	15.78611125	63.58%	36.42%	S/.	223,526.42
30	6.37%	1.90981708	17.69592833	70.14%	29.86%	S/.	240,375.00

Fuente: Elaboración Propia

En el mes 15 se debe de hacer el cambio de rodamientos a un costo de S/. 73 742.57 teniendo una confiabilidad de 96.96% y una probabilidad de falla de 3.04%.

Ya se ha podido determinar que es factible la sustitución cíclica de estos componentes.

Grafico 6.7: Tiempo óptimo para el cambio de rodamientos del reductor



Fuente: Elaboración Propia

## 6.6 Cálculo del tiempo óptimo de cambio de pieza: Modos de falla 1A4 y 1B3: Rotura de dientes de la piñonería del reductor

### 6.6.1 Obtención de los datos

En el tiempo de operación del reductor RENK se presentó una falla funcional causada por el modo este modo de falla y se tiene el siguiente registro de operación en meses.

Tabla 6.25: Tiempos de operación del reductor falla 1A4 y 1B3

i	TO	Tipo
1	22	F
2	28	F

(\*) Ver anexo 1.5: Tiempos de operación del reductor

Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.2 Cálculo de los parámetros de Weibull: Método de los mínimos cuadrados

Tabla 6.26: Parámetros de Weibull modos de falla 1A4 y 1B3

	TO	RANGO MEDIANA	X	Y RANGO MEDIANA				
	h	$(i-0.3)/(N+0.4)$	$\ln(t_i)$	$\ln(\ln(1/(1-F)T_i))$				
	i	Ti	F(Ti)	Xi	Yi	X2	Y2	XiYi
	1	22	0.2917	3.0910	-1.0647	9.5545	1.1335	-3.2910
	2	28	0.7083	3.3322	0.2088	11.1036	0.0436	0.6956
<b>SUMA</b>			1	6.4232	-0.8559	20.6581	1.1771	-2.5953
<b>N</b>	2							

Fuente: Elaboración Propia

Con los resultados de la tabla se estiman los valores de a, b, la ecuación de la recta y el parámetro de la escala n, mediante las formulas 4.13, 4.14 y 4.15.

$$a = -17.3866$$

$$b = 5.2804$$

$$y = 5.2804x - 17.3866$$

n = 26.9146 meses.

### 6.6.3 Calculo del coeficiente de correlación

Tabla 6.27: Coeficiente de correlación modos de falla 1A4 y 1B3

											Xi - X prom *
	TO	RANGO MEDIANA	X	Y RANGO MEDIANA	X PROM	Xi - X prom	(Xi - X prom) 2	Y PROM	Yi - Y prom	(Yi - Y prom)2	Yi - Y prom
	h	$(i-0.3)/(N+0.4)$	ln (ti)	$\ln(\ln(1/(1-F)Ti))$							
i	Ti	F(Ti)	Xi	Yi							
1	22	0.2917	3.0910	-1.0647	3.2116	-0.1206	0.0145	-0.4280	-0.6367	0.4054	0.0768
2	28	0.7083	3.3322	0.2088	3.2116	0.1206	0.0145	-0.4280	0.6367	0.4054	0.0768
<b>Sum</b>		1.0000	6.4232	-0.8559	6.4232	0.0000	0.0291	-0.8559	0.0000	0.8108	0.1536
<b>N</b>	<b>2</b>										
<b>COEFICIENTE DE CORRELACION</b>		<b>r</b>	1	100%	FORMULA 4.17						
<b>COEFICIENTE DE CORRELACION</b>		<b>r</b>	1	100%	POR FUNCION EXCEL						

Fuente: Elaboración Propia

Los parámetros estimados son los siguientes:

- Parámetro de forma  $\beta = 5.2804$
- Parámetro de escala  $\eta = 26.9146$
- Parámetro de localización  $\gamma = 0$

El parámetro de localización es 0 porque el coeficiente de correlación se ajusta a la ecuación de la recta.

#### 6.6.4 Cálculo de la vida media o tiempo medio entre fallas

Para este cálculo ha sido necesario usar el anexo 1.3 Tabla de valores de la función gamma y la fórmula 4.11.

Tabla 6.28: MTBF modos de falla 1A4 y 1B3

	$1+(1/\beta)$	1.1894		
	F. Gamma	0.9209	tiempo	F. Gamma Tabla
Vida media	<b>MTBF</b>	<b>24.7854229</b>	horas	Con tablas
Vida media	<b>MTBF</b>	<b>24.7899328</b>	horas	Con función Excel

Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.5 Cálculo de las 4 funciones de la confiabilidad

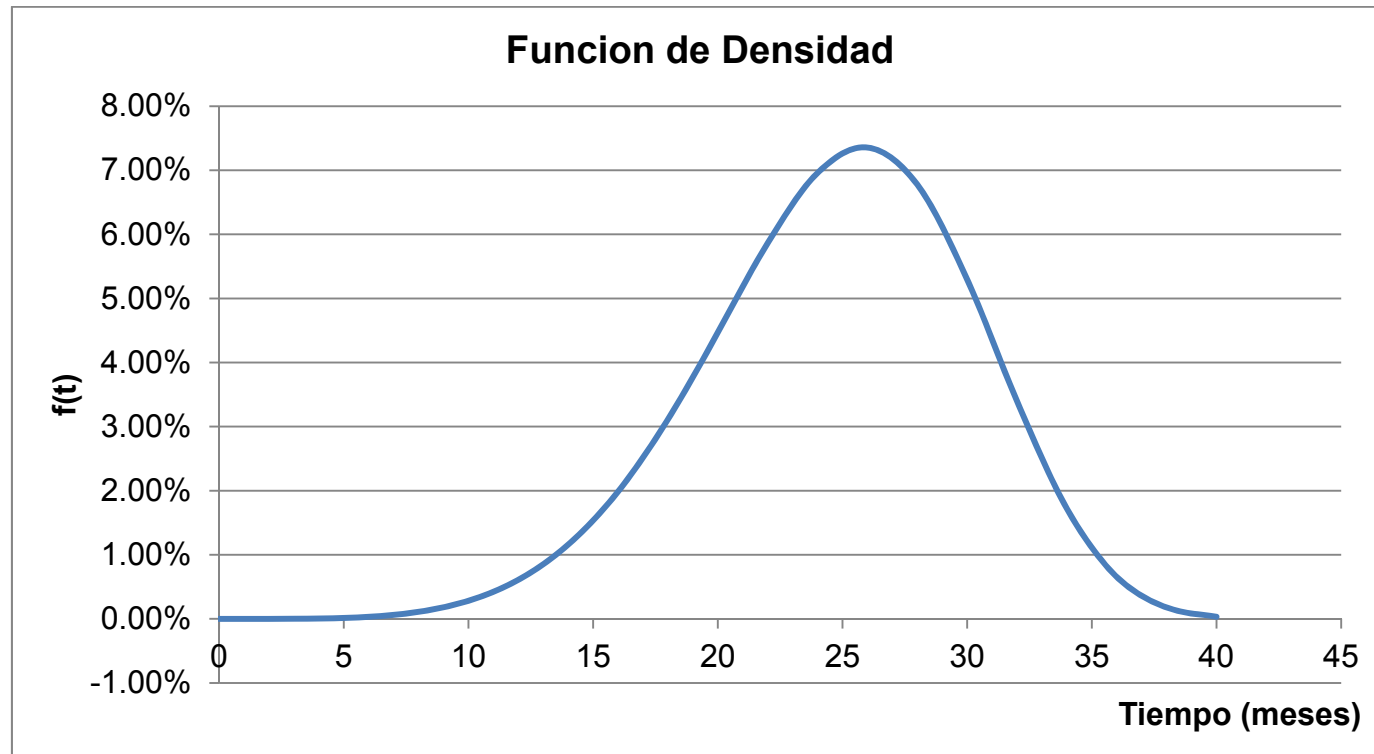
Se aplica un factor de 2 meses y se utilizan las formulas 4.18, 4.19, 4.9 y 4.10 respectivamente.

Tabla 6.29: Funciones de la confiabilidad modos de falla 1A4 y 1B3

t meses	f(t)	f(T)	R(t)	h(t)
0	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
2	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
4	0.01%	0.00%	100.00%	0.01%
6	0.03%	0.04%	99.96%	0.03%
8	0.11%	0.16%	99.84%	0.11%
10	0.28%	0.53%	99.47%	0.28%
12	0.61%	1.39%	98.61%	0.62%
14	1.16%	3.12%	96.88%	1.20%
16	1.99%	6.22%	93.78%	2.12%
18	3.11%	11.27%	88.73%	3.51%
20	4.47%	18.82%	81.18%	5.50%
22	5.86%	29.17%	70.83%	8.28%
24	6.96%	42.07%	57.93%	12.01%
26	7.35%	56.53%	43.47%	16.92%
28	6.78%	70.83%	29.17%	23.24%
30	5.30%	83.03%	16.97%	31.22%
32	3.40%	91.74%	8.26%	41.15%
34	1.72%	96.78%	3.22%	53.35%
36	0.65%	99.04%	0.96%	68.13%
38	0.18%	99.79%	0.21%	85.87%
40	0.03%	99.97%	0.03%	106.96%

Fuente: Elaboración Propia

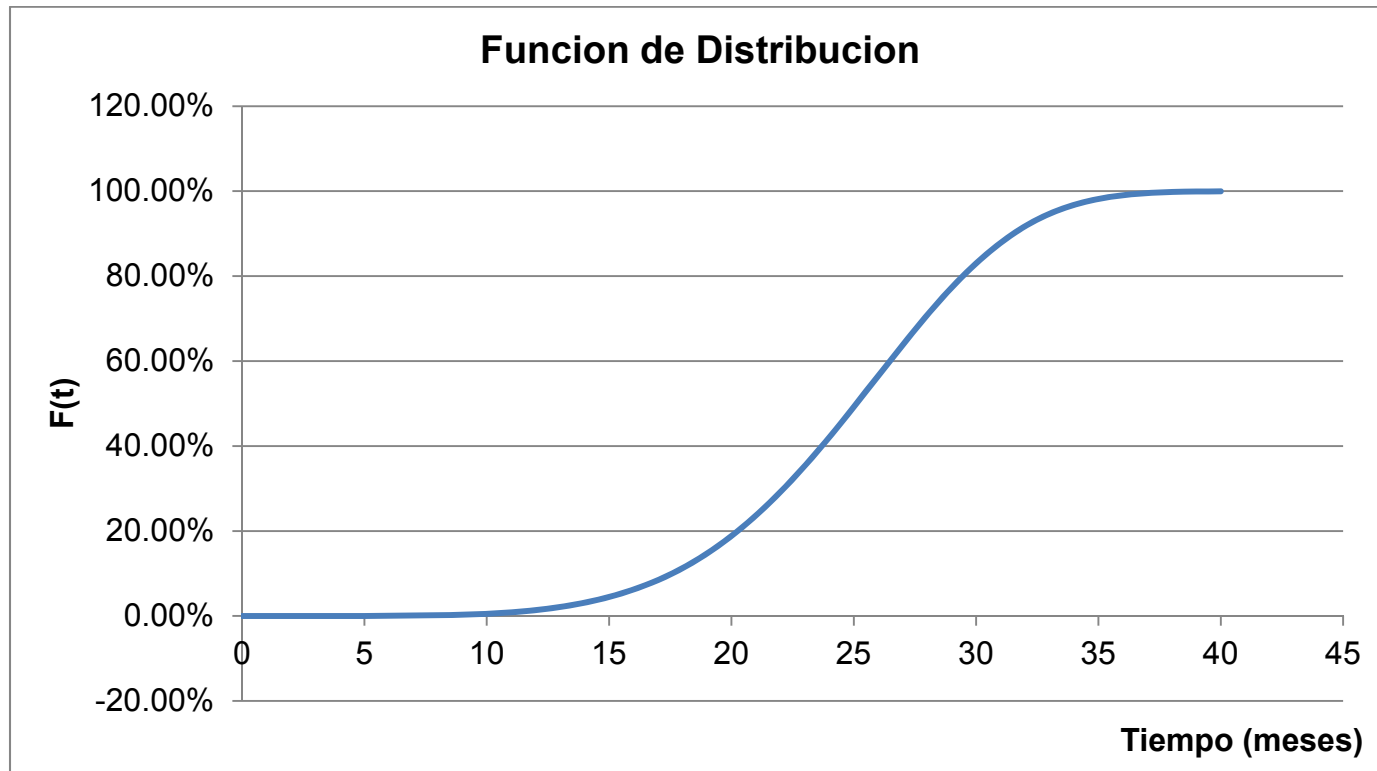
Grafico 6.8: Función de densidad modos de falla 1A4 y 1B3



Fuente: Elaboración Propia



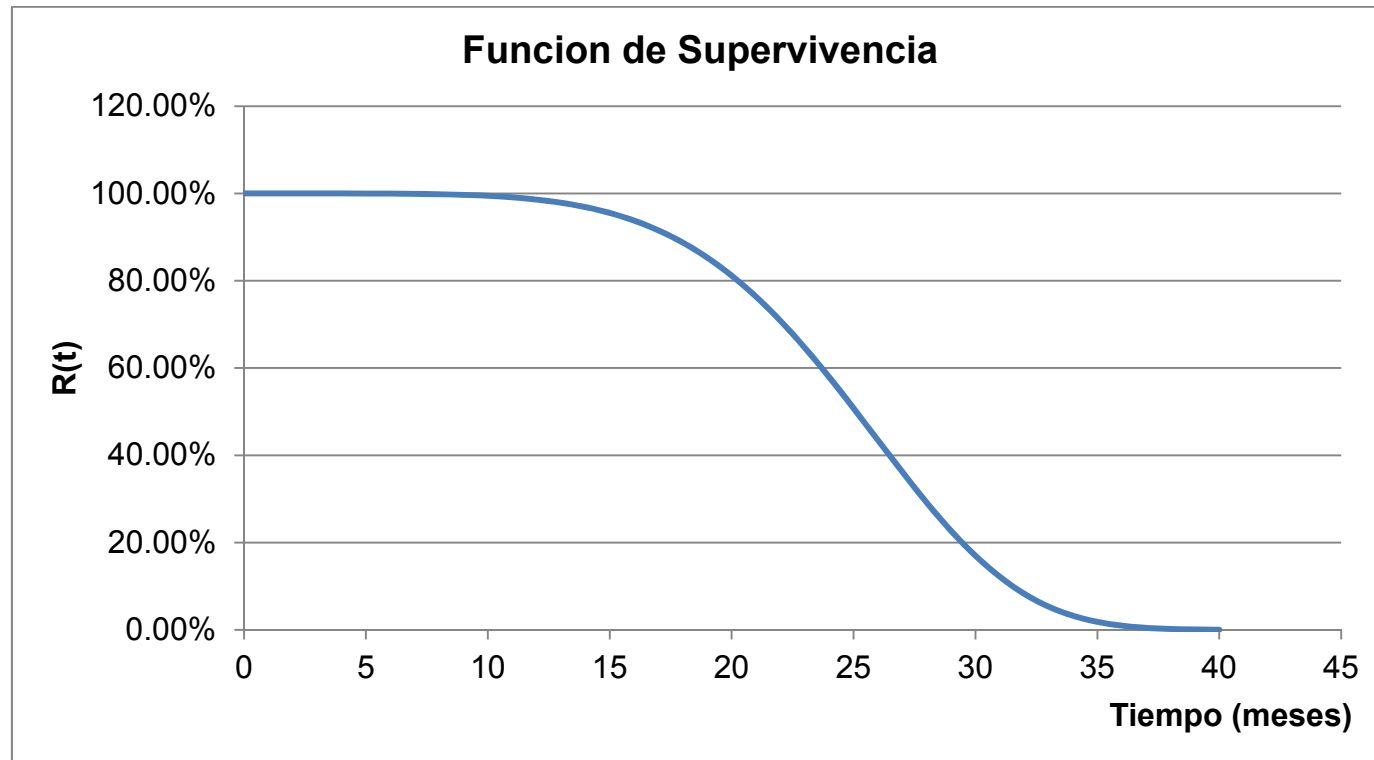
Grafico 6.9: Función de distribución modos de falla 1A4 y 1B3



Fuente: Elaboración Propia



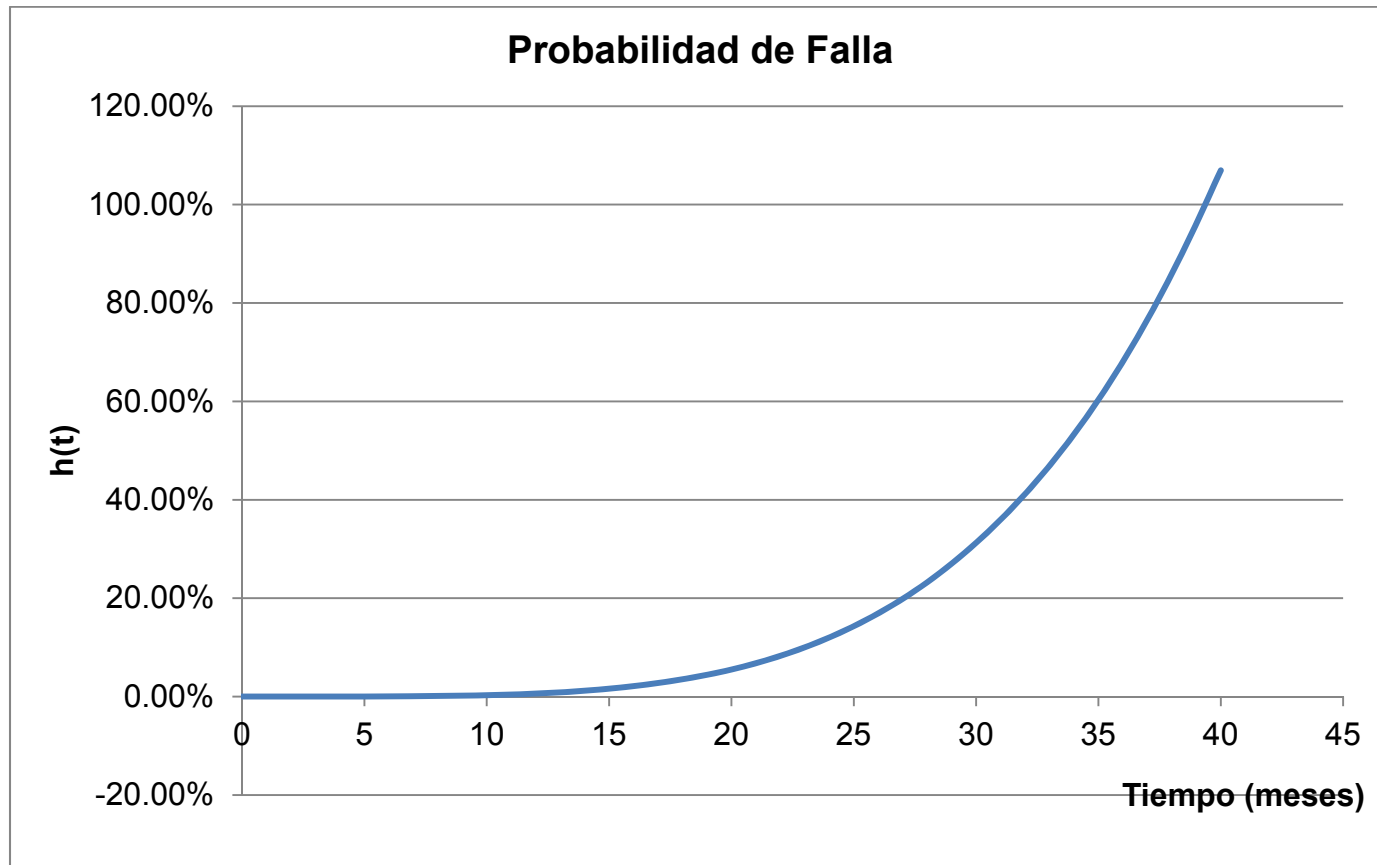
Grafico 6.10: Función de supervivencia modos de falla 1A4 y 1B3



Fuente: Elaboración Propia



Grafico 6.11: Función de riesgo o probabilidad de falla modos de falla 1A4 y 1B3



Fuente: Elaboración Propia

El análisis RCM previo determina que los modos de falla rodamientos del reductor agarrotados tienen consecuencias graves en la operación. La factibilidad económica será el factor predominante en la decisión de la estrategia de mantenimiento a aplicar.

#### **6.6.6 Factibilidad técnica**

El valor  $b = 5.2804$  mayor que 1 indica que si es factible aplicar tareas de reacondicionamiento o sustitución cíclicas, dicha afirmación se verifica por la tendencia creciente de la función riesgo.

#### **6.6.7 Factibilidad económica**

La siguiente tabla resume los datos necesarios para el cálculo del tiempo óptimo para el cambio de componentes.

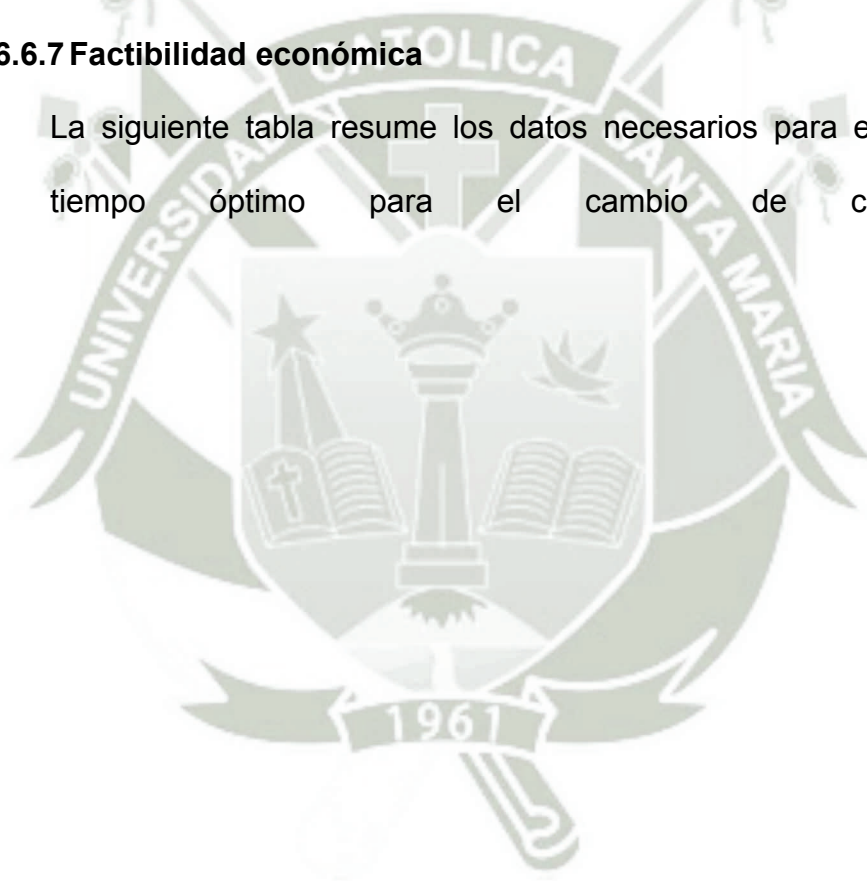


Tabla 6.30: Datos para el cálculo del tiempo óptimo modos de falla 1A4 y 1B3

ITEM	DESCRIPCION		COSTO	UNIDAD
A	Costo de 2 piñones RENK (*)		S/. 265,000.00	S/.
B	Costo de insumos (aceite ISO VG 320) (*)		S/. 132,500.00	S/.
C	Costo de maniobras (grúa) (*)		S/. 10,000.00	S/.
D	Costo mano de obra mantenimiento (Personal RENK) (*)		S/. 333,900.00	S/.
E	Costo de lucro cesante (**)		S/. 8,271,529.41	S/.
F	Costo mano de monitoreo a condición (***)		S/. 315,000.00	S/.
<b>G</b>	<b>Costo de la tarea preventiva (A+B+C+D+F)</b>	Cp	<b>S/. 1,056,400.00</b>	S/.
<b>H</b>	<b>Costo de la tarea correctiva (E+G)</b>	Cf	<b>S/. 9,012,929.41</b>	S/.
<b>I</b>	<b>Duración de tarea preventiva (7 Días)</b>	Tp	<b>0.23</b>	meses
<b>J</b>	<b>Duración de tarea correctiva (7 Días)</b>	Tf	<b>0.23</b>	meses
<b>K</b>	<b>Tiempo inicial</b>	INICIO Ti	<b>1</b>	meses
<b>L</b>	<b>Diferencial de tiempo</b>	dt	<b>1</b>	meses

(\*) Ver anexo 1.2: Costos de mantenimiento correctivo de modos de fallas críticos.

(\*\*) Ver anexo 1.1: Impacto en la producción durante 7 días de paro.

(\*\*\*) Ver tabla 6.16: Costo total del mantenimiento predictivo de los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3.

Fuente: Elaboración Propia

Con la fórmula 4.20 se ha determinado el tiempo óptimo de mantenimiento para este modo de falla.

Tabla 6.31: Tiempo óptimo para el cambio de piñones desgastados

tp	f(tp)	tp*f(tp)*dt	∫(t*f(tp)*dti)	F(tp)	R(tp)	Soles/mes
0	0.00%	0	0	0.00%	100.00%	S/. 4,593,043.48
1	0.00%	1.4852E-07	1.4852E-07	0.00%	100.00%	S/. 858,861.89
2	0.00%	5.772E-06	5.9205E-06	0.00%	100.00%	S/. 473,725.08
3	0.00%	4.9108E-05	5.5029E-05	0.00%	100.00%	S/. 327,078.99
4	0.01%	0.00022432	0.00027935	0.00%	100.00%	S/. 249,813.40
5	0.01%	0.00072869	0.00100804	0.01%	99.99%	S/. 202,186.19
6	0.03%	0.0019079	0.00291594	0.04%	99.96%	S/. 170,007.75
7	0.06%	0.00430391	0.00721986	0.08%	99.92%	S/. 146,980.03
8	0.11%	0.00870403	0.01592389	0.16%	99.84%	S/. 129,911.54
9	0.18%	0.01618852	0.03211241	0.31%	99.69%	S/. 117,042.95
10	0.28%	0.02817282	0.06028523	0.53%	99.47%	S/. 107,354.48
11	0.42%	0.04643825	0.10672348	0.88%	99.12%	S/. 100,242.85
12	0.61%	0.07314198	0.17986546	1.39%	98.61%	S/. 95,355.63
13	0.85%	0.11079368	0.29065913	2.12%	97.88%	S/. 92,499.20
14	1.16%	0.16218241	0.45284155	3.12%	96.88%	S/. 91,583.39
15	1.53%	0.23023406	0.6830756	4.46%	95.54%	S/. 92,585.04
16	1.99%	0.31777809	1.00085369	6.22%	93.78%	S/. 95,521.68
17	2.51%	0.42720501	1.4280587	8.46%	91.54%	S/. 100,430.35
18	3.11%	0.56000453	1.98806323	11.27%	88.73%	S/. 107,349.06
19	3.77%	0.71619288	2.70425611	14.70%	85.30%	S/. 116,299.70
20	4.47%	0.89366777	3.59792388	18.82%	81.18%	S/. 127,271.91
21	5.18%	1.08757204	4.68549593	23.64%	76.36%	S/. 140,208.32

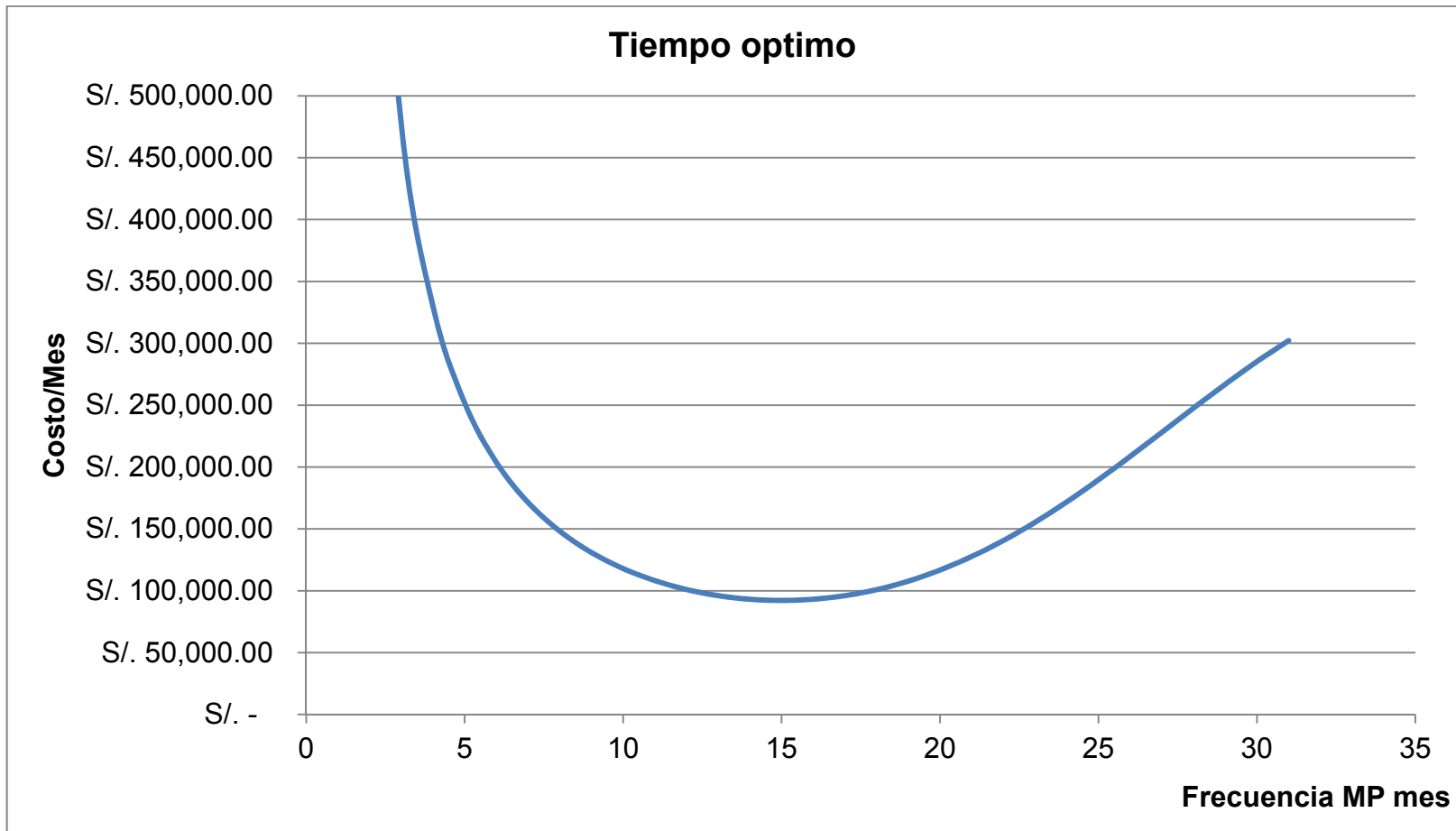
22	5.86%	1.28979777	5.97529369	29.17%	70.83%	S/.	154,991.61
23	6.47%	1.4888108	7.46410449	35.34%	64.66%	S/.	171,434.33
24	6.96%	1.67000247	9.13410696	42.07%	57.93%	S/.	189,272.21
25	7.27%	1.81675315	10.9508601	49.20%	50.80%	S/.	208,161.86
26	7.35%	1.91229493	12.863155	56.53%	43.47%	S/.	227,683.67
27	7.19%	1.94227251	14.8054276	63.83%	36.17%	S/.	247,350.99
28	6.78%	1.89764008	16.7030676	70.83%	29.17%	S/.	266,627.32
29	6.13%	1.77726199	18.4803296	77.30%	22.70%	S/.	284,953.69
30	5.30%	1.58942058	20.0697502	83.03%	16.97%	S/.	301,787.97

Fuente: Elaboración Propia

En el mes 14 se debe de hacer el cambio de piñones a un costo de S/. 91 583.39 teniendo una confiabilidad de 96.88% y una probabilidad de falla de 3.12%.

Ya se ha podido determinar que es factible la sustitución cíclica de estos componentes.

Grafico 6.12: Tiempo óptimo para el cambio de piñonería del reductor



Fuente: Elaboración Propia

## 6.7 Plan de mantenimiento preventivo y predictivo

Al haber determinado mediante el análisis Weibull que es factible la sustitución cíclica de los componentes en los modos de falla analizados, se puede establecer finalmente el plan de mantenimiento predictivo y preventivo con claridad. Se va a incluir los equipos semi críticos y críticos que fueron determinados por el análisis de criticidad en el capítulo VI.

En la tabla 6.32 se muestra el plan de mantenimiento para los equipos semi críticos y en la tabla 6.33 se muestra el plan de mantenimiento para los equipos críticos.

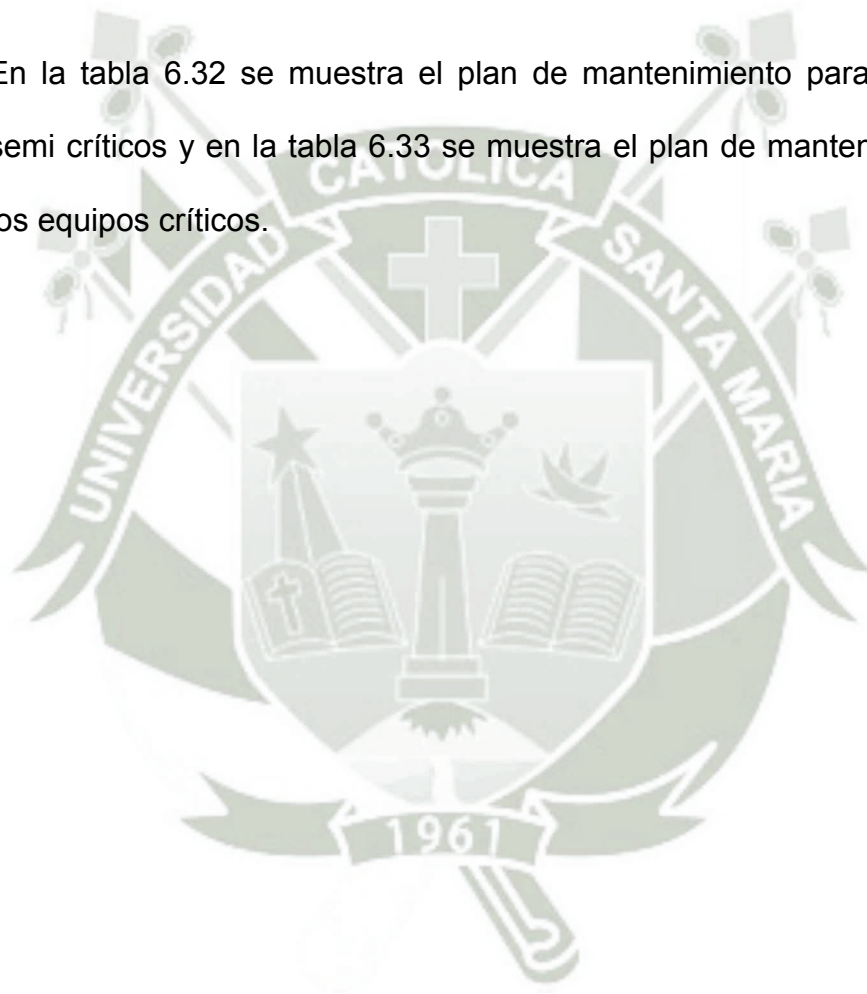


Tabla 6.32: Plan de mantenimiento preventivo y predictivo de los equipos semi críticos

Equipo	Componente	Actividad	Estado	Frecuencia	Mantenimiento
<b>Faja transportadora</b>	Guarderas	Inspección de estado de Guarderas	P	1M	INSPECCION
	Estructura	Inspección de estructura metálica	P	1M	INSPECCION
	Polea de cola	Inspección de polea de cola	P	1M	INSPECCION
	Polea motriz	Inspección de polea motriz	P	1M	INSPECCION
	Polea tensora	Inspección de polea tensora	P	1M	INSPECCION
	Polea deflectora	Inspección de poleas deflectoras	P	1M	INSPECCION
	Rodamientos	Engrase de rodamientos de chumaceras de poleas	M	1S	PREVENTIVO
	Rodamientos	Monitoreo de temperaturas de chumaceras de poleas	M	1M	PREDICTIVO
Polines	Verificación de estado de polines de carga y de retorno	M	1S	INSPECCION	

	Polines	Verificación de estado de polines autoalineantes	M	1S	INSPECCION
	Polines	Cambio de polines	P	1M	PREVENTIVO
	Banda	Verificación de estado de superficie	M	1D	INSPECCION
	Banda	Verificación de alineamiento de banda	M	1D	PREVENTIVO
	Banda	Verificación de estado de empalme	P	1S	INSPECCION
	Banda	Medir espesor de banda	P	2M	PREDICTIVO
	Contrapeso	Verificación de estado de cable	M	1D	INSPECCION
	Cuerda de emergencia	Verificación de estado de y operatividad de cuerda de emergencia	P	1S	INSPECCION
	Sensor de alineamiento	Verificación de estado y operatividad de sensor de desalineamiento	P	1S	INSPECCION
	Chutes (carga y	Verificación de estado de chutes	M	1D	INSPECCION

	descarga)	(fugas, agujeros)			
	Limpiadores	Verificación de estado de elemento tensor (resorte o contrapeso)	P	1S	INSPECCION
	Limpiadores	Verificación de estado de elemento limpiador (caucho)	P	1S	INSPECCION
	Despolvorizador	Verificación la presencia de presión negativa en los ductos de succión	M	1S	INSPECCION
	Reductor	Monitoreo de temperaturas de reductor, chumacera y acoplamiento	M	1S	PREDICTIVO
	Reductor	Monitorear vibraciones de reductor y chumaceras	M	1M	PREDICTIVO
	Reductor	Verificación de estado de pernos de anclajes y bases	M	1S	INSPECCION
	Reductor	Verificación de nivel y color de aceite	M	1S	PREVENTIVO
	Reductor	Verificación de la presencia de	M	1S	INSPECCION

		ruidos extraños e identificación de la fuente			
	Reductor	Inspección de componentes internos	P	1A	INSPECCION
	Reductor	Verificación de limpieza del respiradero de aceite	M	1S	PREVENTIVO
	Reductor	Muestreo de aceite	P	6M	PREDICTIVO
	Reductor	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION
	Reductor	Cambio de aceite	P	1A	PREVENTIVO
	Transmisión	Verificación del tensado de la cadena	M	1S	PREVENTIVO
	Transmisión	Verificar lubricación de la cadena	M	1S	PREVENTIVO
	Transmisión	Verificación de la presencia de ruidos extraños e identificación de la fuente	M	1S	INSPECCION
	Transmisión	Verificación de estado de sprocket	P	1M	INSPECCION

		motriz			
	Transmisión	Verificación de estado de sprocket conducido	P	1M	INSPECCION
	Transmisión	Toma y registro de la elongación de la cadena	P	1M	PREDICTIVO
	Transmisión	Verificar estado de dientes de los sprockets	P	3M	PREDICTIVO
	Transmisión	Verificación de alineamiento	P	3M	PREDICTIVO
<b>Balanza de dosificación</b>	Tambores (Motriz, cola)	Verificación de estado de eje y superficie de tambor	P	1S	INSPECCION
	Tambores (Motriz, cola)	Monitoreo de temperatura y vibración de las chumaceras	M	1S	PREDICTIVO
	Rodamientos	Engrasar chumaceras de poleas motriz y cola	M	1S	PREVENTIVO

	Polines	Verificación de estado de polines de carga y de retorno	M	1D	INSPECCION
	Polines	Cambio de polines	P	1S	PREVENTIVO
	Polines	Verificación de estado de polines autoalineantes	M	1D	INSPECCION
	Banda	Verificación de estado de superficie	M	1D	INSPECCION
	Banda	Verificación de alineamiento de banda	M	1D	PREVENTIVO
	Banda	Verificación de estado de empalme	P	1S	INSPECCION
	Sensor de alineamiento	Verificación de estado y operatividad de sensor de desalineamiento	P	1S	INSPECCION
	Chutes (carga y descarga)	Verificación de estado de chutes (fugas, agujeros)	M	1D	INSPECCION
	Chutes (carga y descarga)	Verificación de estado de guardas (presencia y correcta posición)	M	1D	INSPECCION

	Limpiadores	Verificación de estado de elemento tensor (resorte o contrapeso)	P	1S	INSPECCION
	Limpiadores	Verificación de estado de elemento limpiador (caucho)	P	1S	INSPECCION
	Despolvorizador	Verificación la presencia de presión negativa en los ductos de succión	M	1S	INSPECCION
	Reductor	Monitorear temperatura y vibración en rodamientos	M	1S	PREDICTIVO
	Reductor	Verificación de estado de pernos de anclajes y bases	M	1S	INSPECCION
	Reductor	Verificación de nivel y color de aceite	M	1S	PREVENTIVO
	Reductor	Verificación de la presencia de ruidos extraños e identificación de la fuente	M	1S	INSPECCION
	Reductor	Muestreo de aceite	P	6M	PREDICTIVO

	Reductor	Cambio de aceite	P	1A	PREVENTIVO
	Reductor	Inspección de componentes internos	P	1A	INSPECCION
	Reductor	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION
	Reductor	Verificación de limpieza del respiradero de aceite	M	1S	PREVENTIVO
<b>Válvula rotativa</b>	Reductor	Monitorear temperatura y vibración en rodamientos	M	1S	PREDICTIVO
	Reductor	Verificación de estado de pernos de anclajes y bases	M	1S	INSPECCION
	Reductor	Verificación de nivel y color de aceite	M	1S	PREVENTIVO
	Reductor	Verificación de la presencia de ruidos extraños e identificación de la fuente	M	1S	INSPECCION
	Reductor	Muestreo de aceite	P	6M	PREDICTIVO
	Reductor	Cambio de aceite	P	1A	PREVENTIVO

	Reductor	Inspección de componentes internos	P	1A	INSPECCION
	Reductor	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION
	Reductor	Verificación de limpieza del respiradero de aceite	M	1S	PREVENTIVO
	Válvula	Toma y registro de temperatura en rodamientos	M	1S	PREDICTIVO
	Válvula	Verificación de estado de chutes (fugas, agujeros)	M	1S	INSPECCION
	Válvula	Toma y registro de espacio entre barra reajutable y cuerpo de la válvula	P	1M	PREDICTIVO
<b>Clasificador dinámico</b>	Alabes móviles	Verificación de estado de alabes móviles (360 Piezas) (medir los más desgastados)	P	1S	INSPECCION

	Alabes móviles	Verificación de estado de topes de alabes móviles	P	1S	INSPECCION
	Alabes fijos	Verificación de estado de alabes fijos 30 piezas	P	1S	INSPECCION
	Alabes fijos	Verificación de estado de cubos soporte y pines	P	1S	INSPECCION
<b>Sistemas hidráulicos y de lubricación</b>	Hidráulico RE	Verificación de nivel y color de aceite en deposito	M	1D	PREVENTIVO
	Hidráulico RE	Registro de presión de aceite	M	1D	INSPECCION
	Hidráulico RE	Verificación de limpieza del respiradero del deposito	M	1D	PREVENTIVO
	Hidráulico RE	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION

	Hidráulico RE	Verificación de la saturación del filtro de aceite	M	1S	INSPECCION
	Hidráulico RE	Verificación de la limpieza de las válvulas	P	1M	INSPECCION
	Hidráulico RE	Verificación de elementos internos de bomba(s).	P	3M	INSPECCION
	Hidráulico RM	Verificación de nivel y color de aceite en deposito	M	1D	PREVENTIVO
	Hidráulico RM	Registro de presión en marcha	M	1D	INSPECCION
	Hidráulico RM	Registro de presión de la bomba	M	1D	INSPECCION
	Hidráulico RM	Registro de contrapresión	M	1D	INSPECCION
	Hidráulico RM	Verificación de limpieza del respiradero del deposito	M	1D	PREVENTIVO

	Hidráulico RM	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION
	Hidráulico RM	Verificación de la saturación del filtro de aceite	M	1S	INSPECCION
	Hidráulico RM	Verificación de la limpieza de las válvulas	P	1M	INSPECCION
	Hidráulico RM	Verificación de elementos internos de bomba(s).	P	3M	INSPECCION
	Lubricación RM	Verificación de estado de pernos de anclajes y bases	M	1S	INSPECCION
	Lubricación RM	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION
	Lubricación RM	Verificación de la presencia de ruidos extraños e identificación de la fuente	M	1S	INSPECCION

	Lubricación RM	Verificación de la saturación del filtro de aceite	M	1S	INSPECCION
	Lubricación RM	Verificación de la limpieza de las válvulas	P	1M	INSPECCION
	Lubricación RM	Verificación de elementos internos de bomba(s).	P	3M	INSPECCION
	Lubricación RM	Verificación de nivel y color de aceite en deposito	M	1D	PREVENTIVO
	Lubricación RM	Registro de presión de succión	M	1S	INSPECCION
	Lubricación RM	Registro de presión de la bomba	M	1S	INSPECCION
	Lubricación RM	Registro de la temperatura del aceite	M	1S	INSPECCION
	Lubricación RM	Verificación de flujo de aceite en mirillas (debe retornar en borbotones)	M	1D	INSPECCION

	Lubricación RM	Verificación de limpieza del respiradero del deposito	M	1D	PREVENTIVO
	Lubricación Reductor	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION
	Lubricación Reductor	Verificación de fugas de agua	M	1D	INSPECCION
	Lubricación Reductor	Registro de presión de agua	M	1D	INSPECCION
	Lubricación Reductor	Registro de temperatura de aceite después del enfriador	M	1D	INSPECCION
	Lubricación Reductor	Registro de temperatura a la salida del reductor	M	1D	INSPECCION
	Lubricación Reductor	Verificación de posición de válvula antes de la bomba (normalmente abierta)	M	1D	INSPECCION

Lubricación Reductor	Registro de presión de aceite entre bomba y filtro.	M	1D	INSPECCION
Lubricación Reductor	Registro de posición de filtro dual	M	1D	INSPECCION
Lubricación Reductor	Registro de presión del aceite en piñón y corona	M	1D	INSPECCION
Lubricación Reductor	Monitorear flujo de aceite de enfriamiento de PADS	M	1S	INSPECCION
Circuito de filtración fina	Verificación de estado del saturación del filtro (cambiar cuando el color rojo alcance el 70%)	M	1S	INSPECCION
Circuito de filtración fina	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION
Circuito de filtración fina	Verificación de elementos internos de bomba(s).	P	3M	INSPECCION

<b>Filtro principal</b>	Filtro	Verificación de estado de elementos filtrantes (Por sectores, cubrir todo el filtro en 3 meses)	P	3M	INSPECCION
	Filtro	Verificación de estado de sistemas de limpieza (fugas y correcto accionamiento)	M	1D	INSPECCION
	Filtro	Verificación de estado de unidades de mantenimiento (purgar, verificar nivel de aceite)	M	1D	INSPECCION
	Filtro	Purga de tanques acumuladores	M	1D	INSPECCION
	Filtro	Verificar estado de aislamiento térmico	P	3M	INSPECCION
<b>Canaleta aerodeslizador</b>	Chutes	Verificación de estado de chutes (fugas, agujeros, acumulación de material)	M	1S	INSPECCION

	Cámara de aire	Verificación de ausencia de material (prueba de sonido por golpeo)	M	1S	INSPECCION
	Estructura	Verificación de ausencia de fugas, agujeros, acumulación de material	M	1S	INSPECCION
	Estructura	Verificación de cierre hermético de tapas de inspección	M	1S	INSPECCION
	Cámara de material	Verificación de estado de lona (retirar tapas de inspección y ver roturas, desgastes)	P	1M	INSPECCION
	Tuberías de aire	Verificación de fugas	M	1S	INSPECCION
	Ventilador	Verificación de estado de filtro de succión (presencia, ausencia, saturación)	M	1S	INSPECCION

	Ventilador	Verificación de estado de alabes (desgaste, deformaciones, limpieza)	P	3M	INSPECCION
	Ventilador	Verificación de balanceo de rotor (dar giro manual)	P	3M	INSPECCION

Fuente: Elaboración Propia



Tabla 6.33: Plan de mantenimiento preventivo y predictivo de los equipos críticos

Equipo	Componente	Actividad	Estado	Frecuencia	Mantenimiento
<b>Reductor</b>	Acoplamiento	Verificación de alineamiento	P	3M	PREVENTIVO
<b>RENK</b>	Acoplamiento	Verificación de estado de elementos de acople	P	3M	INSPECCION
	Reductor	Cambio de aceite	P	1A	PREVENTIVO
	Reductor	Monitoreo de componentes con cámara Termográfica	M	2S	PREDICTIVO
	Reductor	Monitoreo de temperaturas en rodamientos	M	2S	PREDICTIVO
	Reductor	Monitoreo de vibraciones en rodamientos	M	2S	PREDICTIVO
	Reductor	Análisis de aceite	P	2S	PREDICTIVO
	Reductor	Cambio de piñonería del reductor	P	14M	PREVENTIVO
	Reductor	Cambio de rodamientos del reductor	P	15M	PREVENTIVO

Reductor	Verificación de nivel y color de aceite en tina superior	M	1D	PREVENTIVO
Reductor	Verificación de nivel y color de aceite en deposito	M	1D	PREVENTIVO
Reductor	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION
Reductor	Registro de flujo de aceite	M	1D	INSPECCION
Reductor	Verificación de la presencia de ruidos extraños e identificación de la fuente	M	1D	INSPECCION
Reductor	Toma y registro de temperatura en tina del reductor (ver termómetro)	M	1D	INSPECCION
Reductor	Verificación de estado de pernos de anclajes y bases (usar calibrador de laines)	M	1S	PREDICTIVO
Reductor	Verificación de ajuste de cuñas en la base del reductor	P	1M	INSPECCION

	Reductor	Inspección de primer planetario (programada con técnico RENK)	P	2A	INSPECCION
	Reductor	Inspección de segundo planetario (programada con técnico RENK)	P	2A	INSPECCION
	Reductor	Inspección del piñón de ataque y rodamientos (programada con técnico RENK)	P	1A	INSPECCION
<b>Cámara de molienda</b>	Rodillos Master	Verificación de estado de pernos de los forros de los rodillos master	P	1S	INSPECCION
	Rodillos Master	Verificación de estado de pernos de pedestal de brazos de rodillos (solturas)	P	1S	INSPECCION
	Rodillos Master	Verificación de estado de fundas protectoras del eje de los rodillos master	P	1S	INSPECCION

Rodillos Master	Verificación de sello de aire de rodillos master (calibrar holgura)	P	2S	INSPECCION
Rodillos Master	Verificación de operatividad de sello de aire de rodillos master	P	2S	INSPECCION
Rodillos Master	Verificación de estado de sello de jebe del rocker arm	P	2S	INSPECCION
Rodillos Master	Medición de desgaste de forro de rodillos	P	3S	PREDICTIVO
Rodillos Master	Verificación de ajuste de pivote (axle pin)	P	2M	INSPECCION
Rodillos Master	Cambio de llantas	P	6M	PREVENTIVO
Rodillos Master	Cambio de pistones	P	2A	PREVENTIVO
Rodillos Esclavos	Verificación de estado de pernos de los forros de los rodillos esclavos	P	1S	INSPECCION

Rodillos Esclavos	Verificación de operatividad de sello de aire de rodillos esclavos	P	2S	INSPECCION
Rodillos Esclavos	Verificación de estado de fundas protectoras del eje de los rodillos esclavos	P	2S	INSPECCION
Rodillos Esclavos	Verificación de sello de aire de rodillos esclavos (calibrar holgura)	P	2S	PREVENTIVO
Rodillos Esclavos	Verificación de nivel y color de aceite en rodillos esclavos	P	2S	PREVENTIVO
Rodillos Esclavos	Medición de desgaste de forro de rodillos	P	3S	PREDICTIVO
Rodillos Esclavos	Cambio de llantas	P	1A	PREVENTIVO
Rodillos Esclavos	Cambio de pistones	P	2A	PREVENTIVO

<b>Sistema de lubricación del reductor</b>	Sistema de alta presión reductor	Verificación de fugas de aceite	M	1D	INSPECCION
	Sistema de alta presión reductor	Verificación de la presencia de ruidos extraños e identificación de la fuente	M	1D	INSPECCION
	Sistema de alta presión reductor	Toma y registro de presión en las líneas hacia los PADS	M	1D	INSPECCION
	Sistema de alta presión reductor	Registro de presión de la línea de enfriamiento de PADS	M	1D	INSPECCION
	Sistema de alta presión reductor	Inspección de los PADS	P	1A	INSPECCION

Fuente: Elaboración Propia

Se ha establecido que se ejecutara el cambio de piñonería del reductor cada 14 meses y el cambio de rodamientos cada 15 meses.

Tabla 6.34: Fecha aproximada del mantenimiento preventivo de los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3

Descripción	Marca	Tarea	Responsable	Asistencia	Día aproximado	Duración de la tarea	Costo de la tarea
REDUCTOR	RENK	Cambio de rodamientos	Personal YURA	Personal RENK	25/02/2014	7 días	(*) S/. 567, 150.00
REDUCTOR	RENK	Cambio de piñones	Personal YURA	Personal RENK	25/02/2014	7 días	(*) S/. 741, 400.00
						<b>TOTAL</b>	<b>S/. 1, 323, 383.33</b>

(\*) Ver anexo 1.2: Costos de mantenimiento preventivo de modos de fallas críticos.

Fuente: Elaboración Propia

## CAPITULO VII

### EVALUACION ECONOMICA DE LA METODOLOGIA RCM EN EL SISTEMA DE MOLIENDA VERTICAL LM 56 2 + 2



### 7.1 Comparación de costos de los dos sistemas de mantenimiento

Para establecer que la metodología es factible económicamente, se debe determinar el costo total de mantenimiento que supone la implementación de la metodología, este costo, como indica la teoría descrita en el capítulo IV, es la suma principalmente de todos los costos incurridos en el mantenimiento, en el caso de esta investigación, es la suma del costo de mantenimiento preventivo y predictivo; los cuales se pueden visualizar en la tabla 6.16: Costo total del mantenimiento predictivo de los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3 y en el anexo 1.2: Costos de mantenimiento preventivo de modos de fallas críticos.

Con la tabla 7.1 se observa que se tendrá un ahorro de S/. 8, 132,929.41 al aplicar la metodología de mantenimiento RCM.

Tabla 7.1: Comparación de costos en el cambio de sistema de mantenimiento

FILOSOFIA ACTUAL		FILOSOFIA RCM	
Descripción	Costo	Descripción	Costo
(A) Mantenimiento preventivo (B+C+D+E)	S/. 3,752,050.00	(A) Mantenimiento preventivo (B+C+D+E)	S/. 3,752,050.00

<b>(B) Repuestos (*)</b>	<b>S/. 2,817,000.00</b>	<b>(B) Repuestos (*)</b>	<b>S/. 2,817,000.00</b>
Rodamientos (*)	S/. 212,000.00	Rodamientos (*)	S/. 212,000.00
Piñones (*)	S/. 265,000.00	Piñones (*)	S/. 265,000.00
Pistones hidráulicos rodillos Master y esclavos (*)	S/. 220,000.00	Pistones hidráulicos rodillos Master y esclavos (*)	S/. 220,000.00
Llantas rodillos Master y esclavos (*)	S/. 2,120,000.00	Llantas rodillos Master y esclavos (*)	S/. 2,120,000.00
<b>(C) Insumos (*)</b>	<b>S/. 225,250.00</b>	<b>(C) Costo de insumos (*)</b>	<b>S/. 225,250.00</b>
Aceite ISO VG 320 (*)	S/. 145,750.00	Aceite ISO VG 320 (*)	<b>S/. 145,750.00</b>
Aceite hidráulico ISO VG 32 (*)	S/. 79,500.00	Aceite hidráulico ISO VG 32 (*)	<b>S/. 79,500.00</b>
<b>(D) Maniobras (grúa) (*)</b>	<b>S/. 42,000.00</b>	<b>(D) Maniobras (grúa) (*)</b>	<b>S/. 42,000.00</b>
<b>(E) Mano de obra (*)</b>	<b>S/. 667,800.00</b>	<b>(E) Mano de obra (*)</b>	<b>S/. 667,800.00</b>
Personal RENK (*)	S/. 667,800.00	Personal RENK (*)	S/. 667,800.00
<b>(F) Mantenimiento predictivo</b>	<b>S/. 176,400.00</b>	<b>(F) Mantenimiento predictivo (**)</b>	<b>S/. 315,000.00</b>
<b>(G+H)</b>			

(G) Monitoreo a condición contrato SKF (***)	S/. 56,400.00	Monitoreo a condición YURA y MOBIL (**)	S/. 180,000.00
(H) Monitoreo a condición contrato MOBIL (***)	S/. 120,000.00	Adquisición de Microlog Inspector con software (**)	S/. 81,000.00
		Adquisición de equipo termográfico(**)	S/. 54,000.00
<b>(A+F) Costo de parada por falla anticipada</b>	<b>S/. 3,928,450.00</b>	<b>(A+F) Costo de parada falla por anticipada</b>	<b>S/. 4,067,050.00</b>
(****) Tiempo de parada por falla no anticipada	7 días	(****) Tiempo de parada por falla no anticipada	0 días
<b>(G) (****) Costo falla no anticipada</b>	<b>S/. 8,271,529.41</b>	<b>(G) Costo falla no anticipada</b>	<b>S/. -</b>
<b>(A+F) + (G) Costo de parada falla no anticipada</b>	<b>S/. 12,199,979.41</b>	<b>(A+F) + (G) Costo de parada falla no anticipada</b>	<b>S/. 4,067,050.00</b>
		<b>AHORRO</b>	<b>S/. 8,132,929.41</b>

(\*) Ver Anexo 1.2: Costos de mantenimiento preventivo de los modos de falla críticos. Se ha sumado el total de los costos de mantenimiento preventivo de los 6 modos de falla descritos en este anexo, eso incluye repuestos, insumos (en este caso los 2 tipos de aceite), maniobras con grúa y el personal técnico de la empresa proveedora del reductor.

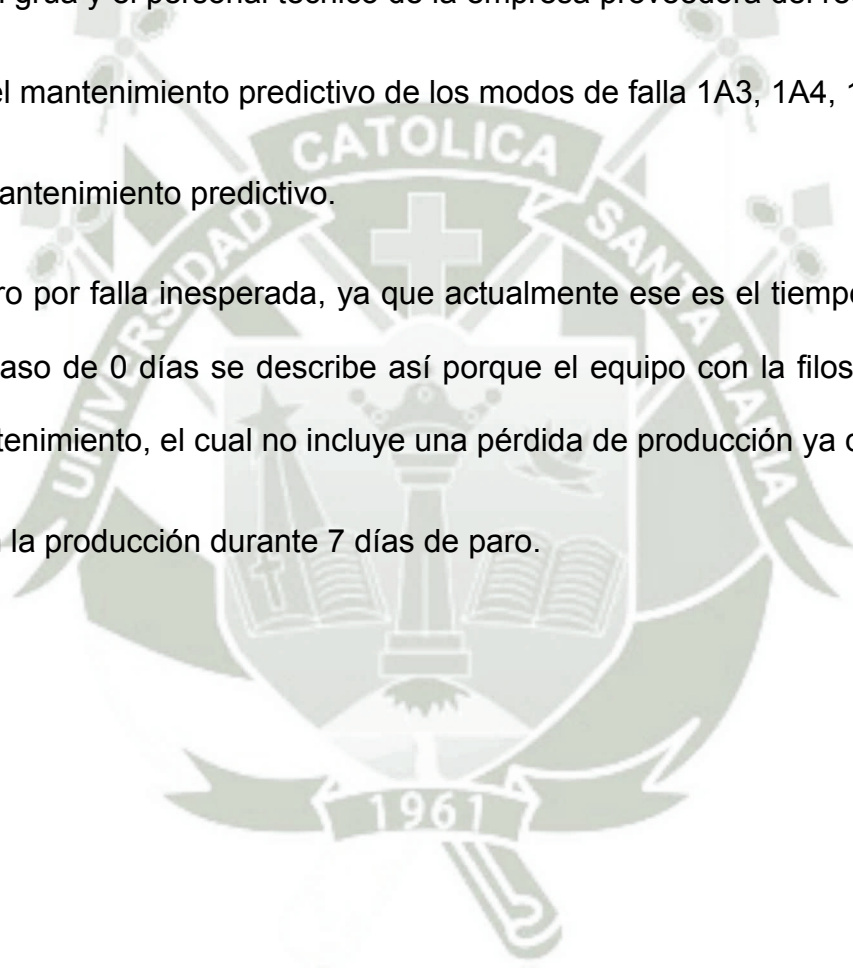
(\*\*) Ver tabla 6.16: Costo total del mantenimiento predictivo de los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3.

(\*\*\*) Ver anexo 1.4: Costos de mantenimiento predictivo.

(\*\*\*\*) Se describen 7 días de paro por falla inesperada, ya que actualmente ese es el tiempo promedio en el cual se reparan los equipos en la planta, en el caso de 0 días se describe así porque el equipo con la filosofía propuesta no va a parar por fallas inesperadas, solo por mantenimiento, el cual no incluye una pérdida de producción ya que el paro es programado.

(\*\*\*\*\*) Ver anexo 1.1: Impacto en la producción durante 7 días de paro.

Fuente: Elaboración Propia



## 7.2 Calculo del VAN

Para el cálculo del VAN se ha determinado un periodo de 5 años, ya que a posterior es posible un cambio tecnológico y de estructura organizacional.

Para hallar el costo de capital propio se ha utilizado la metodología CAPM.

Tabla 7.2: Calculo del costo de capital propio

Indicador	Símbolo	Valor
Costo de capital propio	rE	<b>11.39%</b>
Tasa libre de riesgo	Rf	<b>4.97%</b>
Beta del sector	b	<b>1</b>
Prima por riesgo país	RP	<b>2.13%</b>
Prima por riesgo de mercado	(Rm-Rf)	<b>4.29%</b>
<b><math>rE = Rf + \beta (Rm - Rf) + RP</math></b>		

Fuente: Leiva, Paredes, BBVA Banco Continental; 2010.

Para el cálculo se tienen en cuenta los costos de implementación, el ahorro del cambio de filosofías de mantenimiento y el valor de recupero de los equipos adquiridos para realizar el monitoreo a condición.

Ya que los valores son en gran parte costos (con excepción del valor de recupero), es mejor usar el VAC en vez del VAN y el CAE en vez del VAE, y son calculados con las formulas 4.21 y 4.22 respectivamente.

Tabla 7.3: Costos de implementación

<b>COSTO TOTAL IMPLEMENTACIÓN RCM</b>	<b>S/. 4,067,050.00</b>
<b>(*) Costos de mantenimiento predictivo</b>	<b>S/. 315,000.00</b>
Costo monitoreo a condición YURA y MOBIL	S/. 180,000.00
Adquisición de MICROLOG Inspector con software SKF	S/. 81,000.00
Adquisición de cámara Termográfica SKF	S/. 54,000.00
<b>(**) Costos de mantenimiento preventivo</b>	<b>S/. 3,752,050.00</b>
Rodamientos del reductor agarrotado 1A3- 1B2	S/. 567,150.00
Rotura de dientes de la piñonera del reductor 1A4 - 1B3	S/. 741,400.00
Daño en pistones hidráulicos de rodillos Master 3A8	S/. 164,750.00
Rotura de llantas de rodillos Master 5D10	S/. 1,067,000.00
Daño en pistones hidráulicos de rodillos Esclavos 6A6	S/. 144,750.00
Rotura en llantas de rodillos esclavos 8B4	S/. 1,067,000.00

(\*) Ver tabla 6.16: Costo total del mantenimiento predictivo de los modos de falla 1A3, 1A4, 1B2 y 1B3.

(\*\*) Ver anexo 1.2: Costos de mantenimiento preventivo de modos de fallas críticos.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7.4: Valor de recupero de los equipos para realizar el monitoreo a condición

<b>TOTAL</b>		<b>S/. 67,500.00</b>
<b>MICROLOG Inspector con software</b>		
A	Valor del equipo	S/. 81,000.00
B	Tasa de depreciación	10.00%
C	Vida útil	5
D	Depreciación (A*B)	S/. 8,100.00
<b>E</b>	<b>Valor de recupero (A-(C*D))</b>	<b>S/. 40,500.00</b>
<b>Cámara Termográfica</b>		
A	Valor del equipo	S/. 54,000.00
B	Tasa de depreciación	10.00%
C	Vida útil	5
D	Depreciación (A*B)	S/. 5,400.00
<b>E</b>	<b>Valor de recupero (A-(C*D))</b>	<b>S/. 27,000.00</b>

Fuente: SAP Yura S.A.2012, elaboración Propia.

En la tabla 7.5 se realiza el planteamiento de los datos para el cálculo del VAC y el CAE.

Tabla 7.5: Planteamiento de los datos

<b>CON SISTEMA DE MANTENIMIENTO RCM</b>	
(*)Implementación	S/. -4,067,050.00
(**) Costo anual	S/. -4,067,050.00
(***)Valor de recupero	S/. 67,500.00
Periodos (años)	5
(****)Interés (Re)	11.39%
<b>CON SISTEMA DE MANTENIMIENTO ACTUAL</b>	
(**) Costo anual	S/. -12,199,979.41
Periodos (años)	5
(****)Interés (Re)	11.39%

(\*) Ver tabla 7.3: Costos de implementación.

(\*\*) Ver tabla 7.1: Comparación de costos en el cambio de sistema de mantenimiento.

(\*\*\*) Ver tabla 7.4: Valor de recupero de los equipos para realizar el monitoreo a condición.

(\*\*\*\*) Ver tabla 7.2: Calculo del costo de capital propio.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7.6: Calculo del VAC y del CAE

<b>CON SISTEMA DE MANTENIMIENTO RCM</b>					
<b>Periodo</b>	1	2	3	4	5
<b>Costo anual</b>	S/. -8,134,100.00	S/. -4,067,050.00	S/. -4,067,050.00	S/. -4,067,050.00	S/. -3,999,550.00
<b>VAC</b>	<b>S/. -18,496,906.73</b>				
<b>CAE</b>	<b>S/. -5,053,906.67</b>				
<b>SISTEMA ACTUAL DE MANTENIMIENTO</b>					
<b>Periodo</b>	1	2	3	4	5
<b>Costo anual</b>	S/. -12,199,979.41	S/. -12,199,979.41	S/. -12,199,979.41	S/. -12,199,979.41	S/. -12,199,979.41
<b>VAC</b>	<b>S/. -44,650,979.11</b>				
<b>CAE</b>	<b>S/. -12,199,979.41</b>				

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa menor VAC y CAE con la filosofía RCM, la cual es la mejor alternativa de solución.

## CONCLUSIONES

- Mediante los análisis técnicos y económicos fue factible aplicar la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad en el molino vertical LM 56 2 + 2 de la planta cementera y se redujeron los costos de mantenimiento en S/. 8,132,929.41.
- Se determinaron los equipos de mayor criticidad del sistema de molienda, los cuales son el reductor, los rodillos master, los rodillos esclavos y el sistema de alta presión del reductor.
- Se determinaron los modos de falla con mayor criticidad de los equipos críticos, los efectos y consecuencias mediante el número de prioridad de riesgo siendo el orden de riesgo, rotura de dientes de la piñonería del reductor, rodamientos del reductor agarrotados, la rotura de llantas de los rodillos master, el daño en los pistones hidráulicos de los rodillos master, la rotura de llantas de los rodillos esclavos y el daño en los pistones hidráulicos de los rodillos esclavos.
- Se determinó que es factible realizar sustituciones cíclicas con las llantas y pistones hidráulicos de los rodillos de acuerdo al contexto operacional; cada 6 meses cambio de llantas de rodillos master, cada año cambio de llantas de rodillos esclavos, cada 2 años cambio de pistones hidráulicos de ambos tipos de rodillos, asimismo se determinó que se debe hacer monitoreo a condición de los rodamientos y piñonería del reductor RENK, mediante análisis de aceite, análisis vibracional y análisis termográfico cada dos semanas; y mediante el análisis Weibull se determinó que es factible la sustitución cíclica para los modos de falla

en donde la tarea de mantenimiento es monitoreo a condición, es decir el daño en los rodamientos del reductor y la rotura de dientes de la piñonería del reductor; en el primer caso se debe realizar cada 15 meses con costos de S/. 567,150.00 y en el segundo caso se debe realizar cada 14 meses con costos de S/. 741,400.00.

- Se estableció un plan de mantenimiento predictivo y preventivo para los equipos semi críticos y críticos del sistema de molienda con las frecuencias previamente determinadas.
- Se determinó que se pueden disminuir los costos de mantenimiento en S/. 8,132,929.41 aplicando la metodología de mantenimiento RCM en vez del sistema actual de mantenimiento y el análisis del VAC con un valor de S/. -18,496,906.73 y CAE con un valor de S/. -5,053,906.67 (menores que los valores de la opción de no cambiar el sistema de mantenimiento) determinaron que la metodología de mantenimiento RCM es la mejor opción.

## RECOMENDACIONES

- En investigaciones similares a la presentada se recomienda siempre poner énfasis en las partes y funcionamiento de los equipos para poder realizar el análisis RCM con la mayor objetividad.
- La metodología RCM es recomendable en casos donde el equipo a analizar ha trabajado en periodos mayores a 1 año y haya presentado varias fallas durante su funcionamiento.
- El análisis Weibull se usa para determinar tareas de reacondicionamiento cíclico o sustitución cíclica a partir de tareas de mantenimiento a condición, por eso son necesarios los tiempos de operación del equipo.
- Para futuras investigaciones esta metodología de mantenimiento RCM puede ser aplicable a otros procesos productivos de la industria peruana.
- Se podría analizar nuevos sistemas de molienda o clinkerización de plantas cementeras con la metodología RCM para determinar los puntos críticos y hacer énfasis en su mantenimiento.
- Se podrían alcanzar resultados importantes comparando técnica y económicamente varias filosofías de mantenimiento para un mismo sistema productivo.

## BIBLIOGRAFIA

- ANGULO, F. Diseño de un molino vertical pendular. España, 2002.
- AYALA, V. Guía de mantenimiento preventivo, desarme y armado de reductores de velocidad tipo KMP marca FLENDER utilizados en el accionamiento de molinos verticales para la fabricación de cemento. Guatemala. 2010.
- BABU, R. Alto mantenimiento a bajo riesgo. India, 2005.
- BERNARDO, J. Haciendo que el RCM trabaje para su empresa. Inglaterra, 1993.
- BRUGAN, M. Newsletter of the Americas. Estados Unidos, 2009.
- BUEZO, J. Selección y montaje para un sistema de monitoreo en línea a reductores verticales FLENDER KMP para molinos verticales de rodillos. Guatemala, 2007.
- BUJOSA, E. Plan de mantenimiento para molinos verticales de carbón. España, 2009.
- DEMING, E. Calidad, productividad y competitividad; la salida de la crisis. Estados Unidos, 1986.
- DIAZ, C; QUIMBIURCO, M. Automatización del análisis de modos de falla y efectos FMEA en la ingeniería de mantenimiento aplicada a la industria ecuatoriana. Ecuador, 2008.
- DICCIONARIO DE LA REAL ACADEMIA DE LA LENGUA, edición 2001.
- DIN 1164-10. Cemento especial – Parte 10: Composición, requisitos, y evaluación de la conformidad para el cemento común especial. 2004.
- DIN 4188. Determinación del tamaño de partícula.1977.
- DIN 24100-2. Edificación y construcción, trituración mecánica, los conceptos de la máquina, tamaño de los datos. 1983.
- DUDA, W. Manual tecnológico del cemento. España, 1977.

- DUFFUAA, S.; RAOUF, A.; DIXON, J. Sistemas de mantenimiento Planeación y control. México, 2009.
- DUNN, S. Monitoreo de condición en el siglo 21. Australia, 2005.
- FRANCO, J. Manual de refrigeración. España. 2006.
- GARCIA, J. Mejora en la confiabilidad de las plantas de energía eléctrica. España, 2004.
- GITMAN, L. Principios de administración financiera. México, 2007.
- GITS, C, W. Diseños de conceptos de mantenimiento. Holanda, 1992.
- HOLDERBANK, Seminario del cemento, tecnología del proceso. Separadores de aire. Suiza, 1995.
- HUERTA, R. El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. Venezuela, 2001.
- JUNG, O. Protección contra el desgaste de molinos verticales. Alemania, 2000.
- KAPUR, K; LAMBERSON, L. Confiabilidad en ingeniería de diseño. Estados Unidos, 1977.
- KESYNNER, M; ABRAHAM, C. Una década de progreso de molinos verticales para LOESCHE. Alemania, 2005.
- KRIST, R. Balanzas dosificadoras de rotor para materiales en polvo en la industria del cemento. Alemania, 2009.
- LABAHN, O. Prontuario del cemento. España, 1985.
- LEIVA, M; PAREDES, D. Cementos Lima: Preparada para aprovechar el crecimiento del sector. Informe del BBVA Banco Continental. Perú, 2010.
- LUIZ, J. Metodología para incorporar conocimientos intensivos a las tareas de mantenimiento centrado en la confiabilidad aplicada en activos de sistemas eléctricos. Brasil, 2003.

- LYNCH, A.; ROWLAND, C. La historia de la molienda. Estados Unidos, 2005.
- MANUAL DE INSTRUCCIONES OPERACIÓN DEL REDUCTOR RENK. Alemania, 2000.
- MARIANI, A. Confiabilidad eléctrica y electrónica. Argentina, 2007.
- MARTINEZ, L. Organización y planificación de sistemas de mantenimiento. Venezuela, 2007.
- MISCHORR, F.; DELGADO, D. Mantenimiento mecánico para molinos verticales Loesche. Perú, 2009.
- MISCHORR, F. Operación de molinos verticales Loesche. Perú, 2010.
- MOUBRAY, J. RCM II Mantenimiento centrado en la confiabilidad. Inglaterra, 2004.
- MURILLO, W. Confiabilidad y análisis estadístico para la predicción de fallas, seguridad, supervivencia, riesgo, costo y garantías de los equipos. Colombia, 2001.
- PFEIFFER, G. Competentes en cuestiones de cemento. Alemania, 2005.
- PIEDRA, M. Gerencia estratégica de mantenimiento de la empresa plásticos del litoral. Ecuador, 2005.
- PRASATH, B.; RECKE, U; CHIDAMBARAM, M; JORGENSEN, J. Aplicación de un modelo de control predictivo en un sistema de molienda. Bélgica, 2010.
- RAEBER, R.; WELLER, U; AMATO, A. Una nueva generación de reductores para molinos verticales. Alemania, 2010.
- REICHARDT, Y. El uso de molinos verticales MPS en la producción de cemento y escoria. Alemania, 2005.
- REICHARDT, Y. El nuevo molino vertical MVR de PFEIFFER: Tecnología de molienda confiable para altas tasas de rendimiento. Alemania, 2010.

- REPORTES DE DALOG PARA YURA S.A. Alemania, 2009.
- SALARDI, J; SOLIS, B. Actualización del costo promedio ponderado del capital (WACC) aplicando los supuestos del marco macroeconómico multianual (2010 – 2012). Perú, 2009.
- SCADA. Pantallas de operación del molino Loesche Yura. Perú, 2011.
- SIMMONS, M.; GORBY, L; TEREEMBULA, J. Experiencia Operacional del primer molino vertical de rodillos para molienda de cemento en Estados Unidos. Estados Unidos, 2002.
- UREÑA, A. Gestión estratégica de la calidad. España, 1998.
- VII, Coloquios. VII Coloquios de directores y técnicos de fábricas de cemento. España, 2009.
- ZAPATA, A.; LUDDEY, J; MOLINA, J. Recuperación de un molino vertical ATOX 32.5 para la molienda de caliza por medio de soldadura. Colombia, 2007.

## ANEXOS

Anexo 1.1: Impacto en la producción durante 7 días de paro

Ítem	Descripción	Unidad	Valor	Fuente
A	Costo de producción (*)	S/. TM	S/. 150.00	SAP YURA 2012
B	Peso de Bolsa de cemento (**)	TM	0.0425	
C	Ingreso unitario	S/.	S/. 18.00	SAP YURA 2012
D	Ingreso por tonelada (C / B)	S/. TM	S/. 423.53	
E	Margen por tonelada (D - A)	S/. TM	S/. 273.53	
F	Rendimiento por hora del molino	TM/h	180	VALOR NOMINAL
G	Horas de parada	h	24	
H	TM dejadas de producir (F * G)	TM	4320	
I	Lucro cesante (E * H)	S/.	S/. 1,181,647.06	
J	Días de parada	#	7	
K	<b>Total</b>	<b>S/.</b>	<b>S/. 8,271,529.41</b>	

(\*) Se considera CP = Mano de obra directa + materia prima + consumo de energía eléctrica + insumos + gastos administrativos.

(\*\*) 0.0425 TM = 42.5 Kg.

Fuente: Elaboración propia, SAP Yura 2012.



## Anexo 1.2: Costos de mantenimiento preventivo de los modos de falla críticos

<b>Caso Rodamientos del reductor agarrotado 1A3- 1B2</b>					
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo / día</b>	<b>Costo / parada</b>	<b>Fuente</b>
A	<b>Costo 2 rodamientos SKF</b>	S/.	S/. 212,000.00	<b>S/. 212,000.00</b>	SAP Yura 2012
B	<b>Costo de insumos (aceite ISO VG 320)</b>	S/.	S/. 13,250.00	<b>S/. 13,250.00</b>	SAP Yura 2012
C	<b>Costo de maniobras (grúa)</b>	S/.	S/. 8,000.00	<b>S/. 8,000.00</b>	SAP Yura 2012
D	<b>Costo personal RENK (E*F)</b>	S/.	S/. 47,700.00	<b>S/. 333,900.00</b>	
E	Técnico RENK	S/. H	S/. 3,975.00		SAP Yura 2012
F	Horas técnico RENK	horas	12		
G	<b>Costo total</b>		S/. 280,950.00	<b>S/. 567,150.00</b>	
<b>Caso Rotura de dientes de la piñonería del reductor 1A4 - 1B3</b>					
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo / día</b>	<b>Costo / parada</b>	<b>Fuente</b>
A	<b>Costo de 2 piñones RENK</b>	S/.	S/. 265,000.00	<b>S/. 265,000.00</b>	SAP Yura 2012
B	<b>Costo de insumos (aceite ISO VG 320)</b>	S/.	S/. 132,500.00	<b>S/. 132,500.00</b>	SAP Yura 2012

C	<b>Costo de maniobras (grúa)</b>	S/.	S/. 10,000.00	<b>S/. 10,000.00</b>	SAP Yura 2012
D	<b>Costo personal RENK (E*F)</b>	S/.	S/. 47,700.00	<b>S/. 333,900.00</b>	
E	Técnico RENK	S/. H	S/. 3,975.00		SAP Yura 2012
F	Horas trabajadas	horas	12		
G	<b>Costo total</b>		S/. 455,200.00	<b>S/. 741,400.00</b>	
<b>Daño en pistones hidráulicos de rodillos Master 3A8</b>					
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo / día</b>	<b>Costo / parada</b>	<b>Fuente</b>
A	<b>Costo de dos pistones hidráulicos</b>	S/.	S/. 120,000.00	<b>S/. 120,000.00</b>	SAP Yura 2012
B	<b>Costo de insumos (aceite ISO VG 32)</b>	S/.	S/. 39,750.00	<b>S/. 39,750.00</b>	SAP Yura 2012
C	<b>Costo de maniobras (grúa)</b>	S/.	S/. 5,000.00	<b>S/. 5,000.00</b>	SAP Yura 2012
D	<b>Costo total</b>		S/. 164,750.00	<b>S/. 164,750.00</b>	
<b>Daño en pistones hidráulicos de rodillos Esclavos 6A6</b>					
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo / día</b>	<b>Costo / parada</b>	<b>Fuente</b>
A	<b>Costo de dos pistones hidráulicos</b>	S/.	S/. 100,000.00	<b>S/. 100,000.00</b>	SAP Yura 2012
B	<b>Costo de insumos (aceite ISO VG 32)</b>	S/.	S/. 39,750.00	<b>S/. 39,750.00</b>	SAP Yura 2012

C	<b>Costo de maniobras (grúa)</b>	S/.	S/. 5,000.00	<b>S/. 5,000.00</b>	SAP Yura 2012
D	<b>Costo total</b>		S/. 144,750.00	<b>S/. 144,750.00</b>	
<b>Rotura de llantas de rodillos Master 5D10</b>					
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo / día</b>	<b>Costo / parada</b>	<b>Fuente</b>
A	<b>Costo de dos llantas LOESCHE</b>	S/.	S/. 1,060,000.00	<b>S/. 1,060,000.00</b>	SAP Yura 2012
B	<b>Costo de maniobras (grúa)</b>	S/.	S/. 7,000.00	<b>S/. 7,000.00</b>	SAP Yura 2012
C	<b>Costo total</b>		S/. 1,067,000.00	<b>S/. 1,067,000.00</b>	
<b>Rotura en llantas de rodillos esclavos 8B4</b>					
<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo / día</b>	<b>Costo / parada</b>	<b>Fuente</b>
A	<b>Costo de dos llantas LOESCHE</b>	S/.	S/. 1,060,000.00	<b>S/. 1,060,000.00</b>	SAP Yura 2012
B	<b>Costo de maniobras (grúa)</b>	S/.	S/. 7,000.00	<b>S/. 7,000.00</b>	SAP Yura 2012
C	<b>Costo total</b>		S/. 1,067,000.00	<b>S/. 1,067,000.00</b>	

Fuente: Elaboración propia, SAP Yura 2012.

Anexo 1.3: Tabla de valores de la función Gamma

Apéndice:  
Tabla de Valores de la Función Gamma

$n$	$\Gamma(n)$	$n$	$\Gamma(n)$	$n$	$\Gamma(n)$	$n$	$\Gamma(n)$
1.00	1.00000	1.25	0.90640	1.50	0.88623	1.75	0.91906
1.01	0.99433	1.26	0.90440	1.51	0.88559	1.76	0.92137
1.02	0.98884	1.27	0.90250	1.52	0.88704	1.77	0.92376
1.03	0.98355	1.28	0.90072	1.53	0.88757	1.78	0.92623
1.04	0.97844	1.29	0.89904	1.54	0.88818	1.79	0.92877
1.05	0.97350	1.30	0.89747	1.55	0.88887	1.80	0.93138
1.06	0.96874	1.31	0.89600	1.56	0.88964	1.81	0.93408
1.07	0.96415	1.32	0.89464	1.57	0.89049	1.82	0.93685
1.08	0.95973	1.33	0.89338	1.58	0.89142	1.83	0.93969
1.09	0.95546	1.34	0.89222	1.59	0.89243	1.84	0.94261
1.10	0.95135	1.35	0.89115	1.60	0.89352	1.85	0.94561
1.11	0.94740	1.36	0.89018	1.61	0.89468	1.86	0.94869
1.12	0.94359	1.37	0.88931	1.62	0.89592	1.87	0.95184
1.13	0.93993	1.38	0.88854	1.63	0.89724	1.88	0.95507
1.14	0.93642	1.39	0.88785	1.64	0.89864	1.89	0.95838
1.15	0.93304	1.40	0.88726	1.65	0.90012	1.90	0.96177
1.16	0.92980	1.41	0.88676	1.66	0.90167	1.91	0.96523
1.17	0.92670	1.42	0.88636	1.67	0.90330	1.92	0.96877
1.18	0.92373	1.43	0.88604	1.68	0.90500	1.93	0.97240
1.19	0.92089	1.44	0.88581	1.69	0.90678	1.94	0.97610
1.20	0.91817	1.45	0.88566	1.70	0.90864	1.95	0.97988
1.21	0.91558	1.46	0.88560	1.71	0.91057	1.96	0.98374
1.22	0.91311	1.47	0.88563	1.72	0.91258	1.97	0.98768
1.23	0.91075	1.48	0.88575	1.73	0.91467	1.98	0.99171
1.24	0.90852	1.49	0.88595	1.74	0.91683	1.99	0.99581
						2.00	1.00000

Fuente: Kapur, Lamberson; 1977.

## Anexo 1.4: Costos de mantenimiento predictivo

Descripción	Costo anual	Fuente	Costo quincenal
Contrato MOBIL	S/. 120,000.00	SAP YURA 2012	S/. 5,000.00
Salario de un inspector mecánico	S/. 30,000.00	SAP YURA 2012	S/. 1,250.00
Contrato SKF (*)	S/. 56,400.00	SAP YURA 2012	

(\*) Se tiene en cuenta que se paga el contrato SKF con la filosofía actual de mantenimiento, ya que con la metodología propuesta se tiene inspectores mecánicos capacitados en análisis predictivo que eliminan la necesidad de un contrato con SKF.

Fuente: Elaboración propia, SAP Yura 2012.

## Anexo 1.5: Tiempos de operación del reductor en meses

Fecha	Tiempos de operación de los modos de falla		Comentarios
	1A3 y 1B2	1A4 y 1B3	
jul-08		22	Por decisión conjunta de las jefaturas de mantenimiento y producción, no se paró equipo, no se dio importancia al impacto que podía generar la falla porque el equipo seguía trabajando.
sep-08	23.67		Equipo paro por falla en los rodamientos del reductor y ya no volvió a arrancar.
ene-09		28	Se repararon los piñones del reductor.
mar-09	30.11		Se terminó de cambiar los rodamientos, se hicieron todas las pruebas del caso y se arrancó equipo.

Fuente: Elaboración propia, SAP Yura 2012.