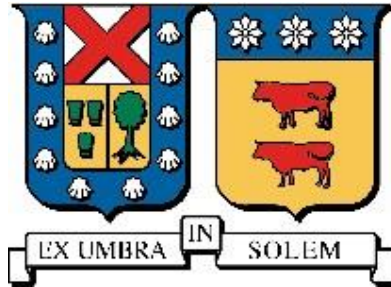


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACION DE
UN PLAN DE MANTENIMIENTO PARA
LAS ZONAS DE RECEPCIÓN Y PREPARACIÓN
DE LA REMOLACHA
PLANTA AZUCARERA IANSA S.A.

FRANCISCO JAVIER MUÑOZ FIGUEROA

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: DR. ING. LUIS PÉREZ POZO.

PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. PABLO VIVEROS GUNCKEL.

JUNIO 2018

Agradecimientos

Agradezco a Dios, a mi familia y amigos. Por todo el apoyo en cada instante de este lindo camino a ser ingeniero de la mejor universidad de país.

Resumen

El objetivo del presente trabajo de título es diseñar y elaborar un plan de mantenimiento, a los equipos de recepción y preparación de materia prima en la fábrica azucarera IANSA S.A.

Hoy en día, las empresas están invirtiendo en estudios e implementación de planes de mantenimiento acotados a su realidad, lo que permite sacar una mayor disponibilidad y fiabilidad de sus equipos, con ello minimizar los costos en la etapa de producción, costos de reparación, costos en compra y almacenamientos de repuestos y costos de horas hombre, entre otros.

El mantenimiento en una empresa es un proceso obligatorio que se debe seguir con responsabilidad y disciplina, esto nos permite evitar el paro imprevisto de los equipos en proceso de producción, por ende, ahorro de costos.

En base a todo lo acotado, se pretende aplicar un plan estratégico que permita la organización del mantenimiento para los equipos analizados. Además, se ha estudiado la frecuencia óptima de inspección y mantención para cada equipo.

Actualmente, en la industria IANSA S.A no se encuentran todas las áreas con planes de mantenimiento, esto se debe a postergación y en algunos casos priorizar trabajos por sobre el diseño de un plan de mantenimiento.

Patio de IANSA S.A es el lugar en el que se va a elaborar y diseñar el plan de mantenimiento. Las zonas de recepción y preparación de remolacha (Patio IANSA S.A) constan de un total de 67 equipos, cada uno con sus subequipos, los cuales serán evaluados e inspeccionados con la finalidad de identificar los equipos críticos. La primera etapa del plan es el análisis de falla y criticidad de los equipos que conforman las zonas a intervenir. Luego de obtener la información necesaria para diagnosticar los equipos críticos, se puede proceder al estudio de costos, con un método apropiado para el caso en estudio. Es necesario una estrategia de mantenimiento programado mediante una planificación con tiempos predeterminados para cumplir con las mantenciones requeridas con el fin de garantizar la inspección, reparación o cambio de los de los equipos si es requerido.

Abstract

The objective of this degree work is to design and develop a maintenance plan for the reception and preparation teams of raw material at the IANSA S.A. sugar factory.

Nowadays, companies are investing in studies and implementation of maintenance plans limited to their reality, which allows a greater availability and reliability of their equipment, thereby minimizing costs in the production stage, repair costs, costs in purchase and storage of spare parts and costs of man hours, among others.

Maintenance in a company is a mandatory process that must be followed with responsibility and discipline, this allows us to avoid unforeseen stoppage of equipment in the production process, therefore, save costs.

Based on everything indicated, it is intended to apply a strategic plan that allows maintenance organization for the analyzed equipment. In addition, the optimum frequency of inspection and maintenance for each equipment has been studied.

Currently, in IANSA S.A industry there are not all the areas with maintenance plans, this is due to the postponement and in some cases, for prioritizing work over the design of a maintenance plan.

The work yard of IANSA S.A is the place where the maintenance plan will be drawn up and designed. The reception and beet preparation areas (work yard IANSA S.A) consist of a total of 67 teams, each with its sub-teams, which will be evaluated and inspected in order to identify critical equipment. The first stage of the plan is the failure and criticality analysis of the teams that make up the zones to be intervened. After obtaining the necessary information to diagnose the critical equipment, you can proceed to the study of costs, with an appropriate method for the case under study. A scheduled maintenance strategy is necessary through a planning with predetermined times to comply with the required maintenance in order to guarantee the inspection, repair or change of the equipment if it is required.

Índice

1	Introducción.....	1
2	Objetivos	2
2.1	Objetivos generales.....	2
2.2	Objetivos específicos	2
3	Antecedentes Generales.....	3
3.1	Composición de la remolacha.....	3
3.1.1	Compuestos orgánicos e inorgánicos.....	4
3.2	Recepción y preparación de la remolacha en la Planta	5
3.3	Extracción.....	6
3.4	Purificación.....	8
3.4.1	I Etapa de Purificación.....	8
3.4.2	II Etapa de Purificación	9
3.4.3	Necesidad de dos Etapas.....	9
3.5	Decantación y filtración.....	9
3.6	Descalificación del jugo claro.....	10
3.7	Sulfitación de jugo claro	10
3.8	Evaporación	11
3.8.1	Conceptos básicos.....	12
3.8.1.1	Conceptos de calor y temperatura	12
3.8.1.1.1	Cantidad de calor.....	12
3.8.1.1.2	Termómetros y escalas de temperatura.....	13
3.8.1.2	Conceptos de energía térmica o calor; entalpía.....	14
3.8.1.3	Punto de ebullición	15
3.8.1.3.1	Aumento del punto de ebullición.....	15
3.8.1.4	Presión	17
3.8.1.5	Calor específico	17
3.8.2	Cantidad de agua a evaporar	18
3.8.3	Estación evaporadora.....	18
3.8.3.1	Descripción general de un evaporador.....	18
3.8.3.2	Estación evaporadora	19
3.8.3.2.1	Estación evaporadora de múltiples efectos	21
3.8.3.2.3.1	Autoexpansión del jugo.....	25
3.8.3.2.3.2	Expansión del condensado	25
3.8.3.2.4	Incondensables.....	26
3.8.4	Factores que influyen sobre la evaporación.....	26

3.8.4.1	Factores de superficie	27
3.8.4.2	Influencia de temperatura.....	27
3.8.4.3	Valor de k	27
3.8.5	Efecto de la evaporación sobre el jugo	28
3.8.5.1	Destrucción térmica de la sacarosa	28
3.8.5.2	Formación de color	29
3.8.6	Equipos de evaporación.....	29
3.8.6.1	Evaporador Robert.....	29
3.8.6.2	Evaporador de film descendente	30
3.8.6.3	Evaporadores Zsigmond	32
3.8.6.4	Evaporadores de Placas.....	33
3.8.7	Problemas más frecuentes en evaporación.....	34
3.9	Cristalización.....	35
3.9.1	Consideraciones preliminares	37
3.9.1.1	Terminología.....	37
3.9.1.2	Generalidades	38
3.9.2	Conceptos básicos.....	38
3.9.2.1	Solubilidad.....	38
3.9.2.2	Soluciones saturadas	39
3.9.2.3	Soluciones sobresaturadas	41
3.9.2.3.1	Grados de sobresaturación.....	42
3.9.2.4	Viscosidad.....	42
3.9.2.5	Variables de cristalización	43
3.9.2.5.1	Grados o zonas de sobresaturación	44
3.9.2.5.2	Velocidad de cristalización.....	45
3.9.2.5.2.1	Factores que afectan la velocidad de cristalización	46
3.9.2.5.2.1.1	Sobresaturación	46
3.9.2.5.2.1.2	Temperatura	47
3.9.2.5.2.1.3	Influencia del pH.....	47
3.9.2.5.2.1.4	Pureza	48
3.9.2.5.2.1.5	Agitación	49
3.9.2.5.3	Métodos de cristalización	50
3.9.2.5.3.1	Cristalización por semillado interno.....	50
3.9.2.5.3.2	Cristalización por semillado externo	50
3.9.2.5.3.2.1	Cantidad de semilla	51
3.9.2.6	Técnica de un cocimiento	52
3.9.2.6.1	Tachos y cocedores.....	53

3.9.2.6.2	Cristalización por evaporación en A.....	54
3.9.2.6.2.1	Formación del pie de conocimiento.....	54
3.9.2.6.2.2	Cristalización o siembra o formación del grano	56
3.9.2.6.2.3	Crecimiento del grano o cristal.....	59
3.9.2.6.2.4	Apriete final.....	61
3.9.2.6.3	Cristalización por evaporación en cocimientos B.....	62
3.9.2.6.4	Cristalización por evaporación en cocimiento C	62
3.9.2.6.5	Cristalización por enfriamiento	63
3.9.2.6.5.1	Tratamiento de cocimiento C	63
3.9.2.7	Cocimientos continuos.....	66
3.9.2.8	Instrumentos para cristalización.....	67
3.9.2.8.1	Conductividad eléctrica	68
3.9.2.9	Cocimientos con semillado	69
3.9.2.9.1	Etapas del sistema.....	69
3.9.2.9.2	Ventajas del sistema	71
3.9.2.10	Algunos problemas comunes en cristalización	72
3.10	Centrifugado	73
3.11	Secado, envasado y almacenamiento de azúcar	73
3.12	Producción de vapor	74
3.13	Producción de energía eléctrica	74
3.14	de Cal.....	75
3.15	Secador de coquetas	76
3.16	Almacenamiento de azúcar.....	76
3.16.1	Problemas de Almacenamiento	76
3.16.1.1	Aspectos Bacteriológicos.....	77
3.16.1.2	Humedad en el almacenamiento	78
3.16.2	Sistemas de almacenamiento de azúcar	79
3.16.2.1	Bodega de azúcar	79
3.16.2.1.1	Características constructivas de las petacas.....	80
3.16.2.2	Silos de azúcar	81
3.16.2.3	Comparación cualitativa entre ambos sistemas.....	84
3.16.3	Problemas en almacenamiento de azúcar.....	85
4	Aspectos del mantenimiento tradicional.....	85
4.1	Definición de mantenimiento	85
4.2	Estrategias de mantenimiento	86
4.3	Análisis de criticidad	87
4.3.1	FMECA	90

4.4	Confiabilidad	91
4.4.1	Conceptos básicos.....	91
4.4.2	Modelo de Weibull	93
4.5	Estructura de costos	94
4.6	Selección de estrategia de mantenimiento	96
4.7	Frecuencia de inspecciones.....	97
5	Metodología.....	98
5.1	Reconocimiento del problema y equipos de la planta (Etapa I).....	98
5.2	Análisis de criticidad y modo de falla (Etapa II)	99
5.2.1	Matriz de criticidad.....	99
5.2.2	FMECA	108
5.3	Plan de Mantenimiento (Etapa III)	109
5.3.1	Parámetros de Weibull.....	109
5.3.2	Selección de estrategia de mantenimiento	110
5.3.3	Frecuencia de inspecciones.....	111
6	Resultados	112
6.1	Resultado matriz de criticidad	112
6.2	Resultados FMECA	123
6.3	Estimación de parámetros de Weibull	131
6.3.1	Rueda Elevadora.....	132
6.3.2	Cinta transportadora a silo	134
6.3.3	Cinta pluma	136
6.3.4	Megaterio.....	138
6.3.5	Cinta de remolacha a fábrica	140
6.3.6	Bomba 1 agua industrial	142
6.3.7	Bomba 1 de remolacha	144
6.3.8	Lavadora final.....	146
6.3.9	Bomba agua lavado final	148
6.4	Selección de estrategia de Mantenimiento.....	150
6.4.1	Rueda elevadora	150
6.4.2	Cinta de remolacha a silo.....	150
6.4.3	Cinta pluma	151
6.4.4	Megaterio.....	151
6.4.5	Cinta de remolacha a fábrica	152
6.4.6	Bomba 1 agua industrial	152
6.4.7	Bomba 1 de remolacha	153
6.4.8	Lavadora final.....	153

6.4.9	Bomba agua lavado final	154
6.5	Frecuencia de Inspecciones	155
6.5.1	Rueda elevadora.	155
6.5.2	Cinta de remolacha a silo.....	156
6.5.3	Cinta pluma.	156
6.5.4	Megaterio.....	156
6.5.5	Cinta de remolacha a fábrica.....	157
6.5.6	Bomba 1 de agua industrial.	157
6.5.7	Bomba 1 de remolacha.	158
6.5.8	Lavadora final.....	158
6.5.9	Bomba agua lavado final.	158
7	Análisis de resultados	159
7.1	Análisis de resultados Matriz de criticidad.....	159
7.2	Análisis de resultados de FMECA.....	160
7.3	Análisis de parámetros de Weibull	160
7.4	Selección de estrategia de mantenimiento	161
7.5	Frecuencia de inspecciones.....	162
8	Conclusiones	163
9	Bibliografía.....	164
10	Anexos.....	165

Índice de Figuras

Fig. 1 Distribución de la sacarosa en la remolacha.....	4
Fig. 2 Fábrica de azúcar IANSA S.A Ñuble, zona de recepción y preparación de remolacha.....	6
Fig. 3 Esquema sistema difusión BMA	7
Fig. 4 Distribución de vapor y vahos en la evaporación.....	11
Fig. 5 Evaporador de tubos cortos	19
Fig. 6 Macrobalance de evaporación en un efecto.....	20
Fig. 7 Balance de evaporación en dos efectos	20
Fig. 8 Balance de evaporación en 4 etapas.	21
Fig. 9 Balance de evaporación en 3 etapas.	21
Fig. 10 Balance de evaporación en 4 etapas.	22
Fig. 11 Balance evaporación con consumidores.....	23
Fig. 12 Balance evaporación traspaso vahos 2 a vahos 3	24
Fig. 13 Flujos vapor a efecto siguiente.	29
Fig. 14 Evaporador Robert.	30
Fig. 15 Evaporador de flujo descendente.....	31
Fig. 16 Evaporadores Zsigmond.....	32
Fig. 17 Etapa de cristalización.....	35
Fig. 18 Solubilidad de la sacarosa en relación con la pureza y temperatura.	40
Fig. 19 Zonas de Sobresaturación.....	43
Fig. 20 Sobresaturación vs velocidad de cristalización para 3 valores de pureza.	45
Fig. 21 Influencia de la temperatura sobre la velocidad de cristalización	46
Fig. 22 Inclusión de partículas extrañas en una copa de cristal.	47
Fig. 23 Tacho con agitación natural.	51
Fig. 24 Tacho con agitación mecánica.....	52
Fig. 25: Manejo típico de la sobresaturación durante el semillado	55
Fig. 26 Cristalizador – mezclador BMA.....	62
Fig. 27 Pureza vs Tiempo de cristalización por enfriamiento.....	64
Fig. 28 Cristalizador enfriador tipo Werkspoor.....	64
Fig. 29 Producción Magma 1 y circuito	69
Fig. 30 Circuito de Magma 2.....	69
Fig. 31 Sistema de amarre de bolsas.....	79
Fig. 32 Silo sistema locks	81
Fig. 33 Sistemas de mantenimiento	86
Fig. 34 Flujo de estructura de información para la construcción de metodología FMECA.....	89
Fig. 35 Esquema representativo de los tiempos del ciclo de un equipo	92

Fig. 36 Gráfico de costos relacionados a la mantención.....	94
Fig. 37 Esquema de método de selección de estrategia de mantenimiento	95
Fig. 38 Matriz de Criticidad de Frecuencia vs Consecuencia.....	107

Índice de Tablas

Tabla 1: Aumento del punto de ebullición para jugos a diferentes presiones, pureza y materia seca.....	16
Tabla 2: Temperatura en °C en los evaporadores y su porcentaje de destrucción	28
Tabla 3: Solubilidad de sacarosa en agua, tabla de Vavrinecz.....	39
Tabla 4: Velocidad lineal y coeficiente de aumento de velocidad.....	48
Tabla 5: Porcentaje de humedad relativa del aire en sectores de almacenamiento	77
Tabla 6: Frecuencia de Fallos de los equipos	88
Tabla 7: Frecuencia de Fallos de los equipos	88
Tabla 8: Flexibilidad operacional	88
Tabla 9: Costos de reparación.....	89
Tabla 10: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha.....	111
Tabla 11: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha.....	112
Tabla 12: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha.....	113
Tabla 13: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha.....	114
Tabla 14: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha.....	115
Tabla 15: Criticidad para los equipos de transporte de agua.....	116
Tabla 16: Criticidad para los equipos de transporte de agua.....	117
Tabla 17: Criticidad para los equipos de transporte de agua.....	118
Tabla 18: Criticidad para los equipos de casa de bombas.....	119
Tabla 19: Criticidad para los equipos de casa de bombas.....	120
Tabla 20: Resumen de equipos críticos	120
Tabla 21: Resultados de análisis FMECA de la rueda elevadora de remolacha.	122
Tabla 22: Resultados análisis FMECA de la cinta transportadora.....	123
Tabla 23: Resultados análisis FMECA de cinta distribuidora (pluma).....	124
Tabla 24: Resultados de análisis FMECA puente desplazable almacenaje de remolacha (Megaterio)	124
Tabla 25: Resultados de análisis FMECA puente desplazable almacenaje de remolacha (Megaterio)	125
Tabla 26: Resultados análisis de FMECA bomba 1 de agua industrial.	126
Tabla 27: Resultados análisis de FMECA bomba 1 de remolacha.	126
Tabla 28: Resultados análisis de FMECA Motor Bomba 1 de remolacha.....	127
Tabla 29: Resultados de análisis de FMECA Lavadora Final.	128
Tabla 30: Resultados de análisis Bomba agua final.....	129
Tabla 31: Resultados de análisis de FMECA a cinta transportadora de remolacha a fábrica.	130
Tabla 32: Parámetros de Weibull para Rueda Elevadora.....	131
Tabla 33: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para rueda elevadora.....	132
Tabla 34: Parámetros de Weibull para Cinta transportadora a silo.....	133
Tabla 35: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para la cinta transportadora a silo	134

Tabla 36: Parámetros de Weibull para Cinta pluma	135
Tabla 37: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para la cinta pluma.	136
Tabla 38: Parámetros de Weibull para Megaterio	137
Tabla 39: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para la Megaterio.....	138
Tabla 40: Parámetros de Weibull para Cinta transportadora a silo.....	139
Tabla 41: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para la Cinta remolacha a fábrica.	140
Tabla 42: Parámetros de Weibull para bomba 1 agua industrial	141
Tabla 43: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para bomba 1 agua industrial.	142
Tabla 44: Parámetros de Weibull para Bomba 1 de remolacha.	143
Tabla 45: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para Bomba 1 de remolacha.	144
Tabla 46: Parámetros de Weibull para Lavadora final.....	145
Tabla 47: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para Lavadora final.	146
Tabla 48: Parámetros de Weibull para bomba agua lavado final.....	147
Tabla 49: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para bomba agua lavado final	148
Tabla 50: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.	149
Tabla 51: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Cinta de remolacha a silo.	150
Tabla 52: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Cinta pluma.	150
Tabla 53: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para el Megaterio	151
Tabla 54: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Cinta de remolacha a fábrica.	151
Tabla 55: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Bomba 1 de agua industrial.	152
Tabla 56: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Bomba 1 de remolacha.	152
Tabla 57: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Lavadora final	153
Tabla 58: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Bomba agua lavado final.....	153
Tabla 59: Parámetros frecuencia de inspecciones.....	154
Tabla 60: Parámetros frecuencia de inspecciones.....	154
Tabla 61: Parámetros frecuencia de inspecciones.....	155
Tabla 62: Parámetros frecuencia de inspecciones.....	155
Tabla 63: Parámetros frecuencia de inspecciones.....	156
Tabla 64: Parámetros frecuencia de inspecciones.....	156
Tabla 65: Parámetros frecuencia de inspecciones.....	157
Tabla 66: Parámetros frecuencia de inspecciones.....	157
Tabla 67: Parámetros frecuencia de inspecciones.....	157

1 Introducción

La necesidad de la industria de asegurar el correcto funcionamiento de los equipos, así como de obtener de ellos la máxima disponibilidad y eficiencia, ha originado una significativa evolución del mantenimiento industrial en el último tiempo. La revolución industrial comprende entre la segunda mitad del siglo XVIII y principios del XIX, esta irrumpe con fuerza el mantenimiento con la aparición de las primeras máquinas, es en este contexto cuando se producen las primeras tareas de reparación y así la mantención comienza a formar parte del mecanismo productivo de la industria, en este periodo histórico las tareas de mantenimiento se limitaban a las averías en periodo de producción, siendo los mismos operarios quienes realizaban la tarea de reparación, y así se crea el mantenimiento correctivo. Esto no ha cambiado con los años y si algo que preocupa a la empresa, son las pérdidas de producción, este hecho gesta los primeros mantenimientos correctivos a cargo de personal de baja calidad, para liberar al personal de producción.

Posteriormente la competitividad industrial, rapidez de fabricación y aumento de los costos llaman a la preocupación por los fallos forzosos que limitan la producción, lo que produce la creación de la ingeniería del mantenimiento, siendo responsable de organizar y planificar el mantenimiento preventivo, así como de analizar las causas y efectos que provocan las fallas en el proceso. Con la mejora de equipos y a través de técnicas de verificación mecánica a través de análisis de vibración y ruidos, se desarrolla la previsión de fallos, logrando la optimización de los equipos y lo que es conocido como mantenimiento predictivo, que en una etapa incipiente permite incluso llegar a determinar la causa raíz del problema, por tanto, llegar a erradicarla.

La posibilidad de que un equipo falle y las consecuencias que conlleva, es un riesgo que hay que gestionar, teniendo como objetivo la disponibilidad en cada caso al coste mínimo. [1]

En un futuro próximo se puede pensar en implementar nuevos tipos de soluciones a nuestras fallas. La realidad aumentada, es una posible herramienta para los técnicos e ingenieros del futuro. En donde a través de una aplicación con un sistema de realidad aumentada, para el mantenimiento y la reparación de máquinas in situ. La aplicación explica cómo realizar la inspección de diagnósticos y la reparación paso a paso, usando una Tablet, o gafas de realidad aumentada. En donde las gafas son más prácticas, permite manejar la aplicación a través de la voz y evitamos el contacto de la Tablet con manos grasientas. Otra función del programa es ir capturando imágenes del procedimiento, para poder verificar que se está haciendo correctamente. Esta sería una solución para disminuir las inspecciones visuales mensuales.

2 Objetivos

2.1 Objetivos generales

Diseñar y elaborar un plan de mantenimiento para los procesos de recepción y preparación de la remolacha. Con el desarrollo de este plan se busca mejorar la eficiencia de los equipos. Disminuyendo los tiempos y costos de mantención.

2.2 Objetivos específicos

En esta perspectiva, para llevar a cabo lo previsto, se detallan los siguientes objetivos específicos:

- Analizar los datos y antecedentes de equipos planta IANSA.
- Identificar la criticidad de los equipos y definir una clasificación para los mismos.
- Analizar las reparaciones que se han realizado anteriormente.
- Conocer en detalle la capacidad y disponibilidad del recurso humano y técnico asociado al mantenimiento.
- Analizar el mantenimiento realizado por la empresa IANSA mediante el procesamiento de data histórica usando herramientas de confiabilidad.
- Analizar una estimación técnica y económica de recambio de equipos.
- Analizar y proponer la ejecución del Plan de Mantenimiento.
- Presentar las conclusiones del trabajo realizado.

3 Antecedentes Generales

A continuación, se exponen ciertos términos a modo de contextualizar el presente estudio.

3.1 Composición de la remolacha

Es importante conocer la composición de la remolacha antes de entrar en el tema de su recepción, preparación y producción.

La remolacha sana está compuesta, aproximadamente, por agua: 76% y Materia seca: 24%, siendo esta última azúcar: 16,5%, marco (orujo): 5,0%, compuestos orgánicos: 2,0% y compuestos inorgánicos: 0,5%.

Todos los organismos vivos están compuestos por una gran cantidad de agua, variable según la especie. Por ejemplo, la carne de vacuno tiene entre 82 y 86% de agua, las manzanas tienen 85% de agua, la pulpa de sandía tiene alrededor de 90%, etc.

Se llama materia seca al residuo que queda al secar totalmente o deshidratar (eliminar el agua), a un producto de origen animal o vegetal, o derivados de ellos.

En el caso de la remolacha este residuo o materia seca está compuesto (como se indica más arriba) por azúcar, marco, compuestos orgánicos y compuestos minerales o inorgánicos.

El azúcar es lo que le da el sabor dulce a la remolacha y a la caña de azúcar, en términos químicos se llama sacarosa, y es la que todos conocemos como producto final del proceso de elaboración. La distribución de azúcar en la remolacha se ve en la Figura 1, la mayor concentración está en el centro y la menor parte en la parte cercana a la corona.

El término no-azúcares, corresponde a los componentes distintos del azúcar o sacarosa.

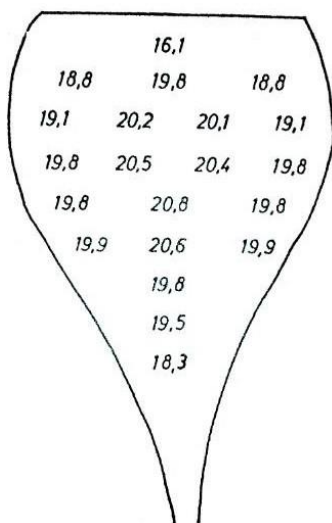


FIG. 1: DISTRIBUCIÓN DE LA SACAROSA EN LA REMOLACHA. EN PORCENTAJES [%]. [2]

El marco u orujo corresponde a la estructura fibrosa (celular) de la remolacha y está compuesto por celulosa (madera), pectinas (gelatina vegetal), saponinas, etc.

En la composición de los no-azúcares orgánicos se encuentran sustancias como azúcar invertido (otro tipo de azúcar que no es sacarosa), ácidos orgánicos, saponinas (producen espuma), proteínas, amidas, etc.

Los compuestos minerales o inorgánicos están formados por sales de potasio (K), sodio (Na), calcio (Ca), fosfatos, etc.

3.1.1 Compuestos orgánicos e inorgánicos

En los compuestos químicos se puede definir dos grandes grupos (aunque se plantea otro grupo) uno corresponde a los compuestos orgánicos y el otro a los compuestos inorgánicos (no orgánicos) o minerales.

Los orgánicos corresponden a compuestos encontrados en el reino animal y vegetal (seres vivos) o derivados de ellos, normalmente en su composición entran diferentes átomos de carbono de hidrógeno. Como por ejemplo se puede señalar: azúcar, almidón, celulosa, acetileno, alcohol, ácido acético (vinagre), etc.

Los compuestos inorgánicos corresponden a los que se encuentran en el reino mineral. Como por ejemplo se puede mencionar el vidrio, agua, minerales, sales, ácido muriático, oxígeno, etc.

3.2 Recepción y preparación de la remolacha en la Planta

La remolacha llega en camiones a IANSA S.A Ñuble, estos toman su lugar para ingresar uno por uno al laboratorio. La materia prima se pesa y se toma muestra de cada uno para determinar el azúcar de entrada. La remolacha es una planta que crece en las zonas frías. Es una raíz que se desarrolla hasta tamaño promedio de 1000 – 15000 gr., si bien se han obtenido remolachas con un peso cercano a los 20.000 gr. El contenido de azúcar de la remolacha está en un promedio de 15 a 17%, aunque hay valores superiores e inferiores, los valores por debajo de 15%, ya indican una remolacha de inferior calidad. Una variable importante es la pureza del jugo, siendo los valores medios 88-90%, por debajo de 87% es una remolacha de baja calidad. Para definir la calidad de la remolacha se toman muestras, y se determina el contenido de azúcar y la pureza del jugo, cuando llega a su punto óptimo. [2]

Los datos obtenidos de la muestra permiten registrar: Peso bruto, tara y en consecuencia el peso neto entregado en planta. Además, tiene un número correlativo que identifica su contenido en azúcar y la muestra.

La materia prima es depositada en silos de almacenamiento. El período entre ésta y la elaboración no debe ser superior a 48 horas ya que la remolacha comienza a deteriorarse rápidamente.

Es importante que la remolacha llegue sin tierra ni pasto a la fábrica, ya que éstos se acumulan y forman cúmulos de maleza en el silo que impiden su ventilación y respiración natural haciendo que suba localmente su temperatura. En esas condiciones los microorganismos se desarrollan en gran medida, consumiendo azúcar; si las condiciones permanecen, terminan por pudrirse las remolachas aportando una importante infección al sistema de difusión donde, en ese caso, se pierde más azúcar.

La preparación involucra varias etapas:

En la primera parte, la remolacha pasa por el separador de piedras para eliminar lo que no corresponde y fluya solo la remolacha. Posteriormente pasa por el separador de pasto con el objetivo de eliminarlo y que la materia prima esté lo más limpia posible, ya que todo lo extra tapa las máquinas cortadoras. Estos equipos deben funcionar en forma continua y el fluido con remolacha con un caudal medido y parejo, para ello hay un dosificador o regulador antes del despedrador.

Luego del separador de pasto, por medio de una bomba de remolacha o una rueda elevadora, se eleva la remolacha hasta la lavadora donde se produce la limpieza con agua, ayudada la lavadora con los brazos agitadores con que cuenta el eje central de este equipo.

En una lavadora se elimina fundamentalmente tierra adherida y piedrecillas que a veces vienen con la remolacha. Este lavado debe hacerse en contra corriente para que sea más eficiente y disminuyan las infecciones en la torre de difusión.

Del macerador y por medio de una bomba se lleva la coqueta fresca a la parte inferior de la Torre de Difusión para extraerle el azúcar.

A la torre entra agua caliente por la parte superior, entonces en contra corriente se va extrayendo el azúcar que tiene sus células. La torre tiene internamente un gusano que ayuda a la elevación de las coquetas, además de la pérdida de peso de ellas. En el esquema indicado a continuación se ve más claro el diagrama general

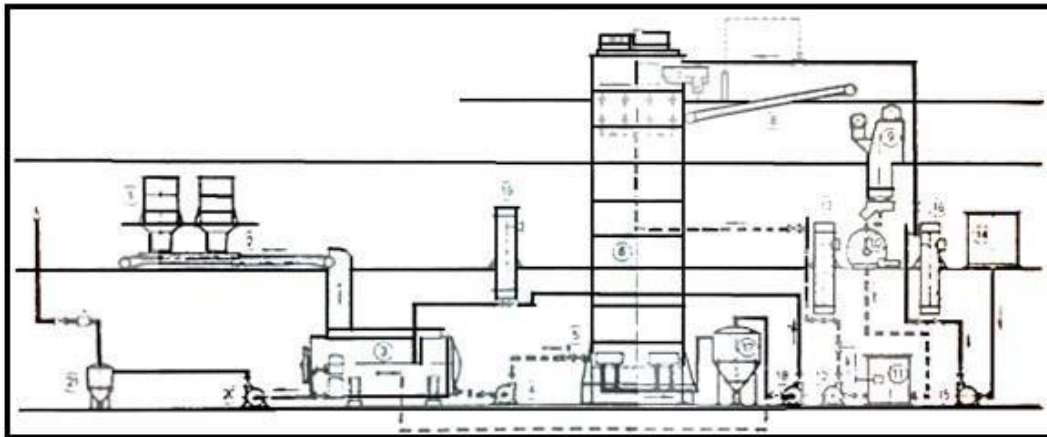


Fig. 3: Esquema sistema difusión BMA

En la figura 2 tenemos, 1) cortadoras; 2) Romana-cinta; 3) Macerador en contracorriente; 4) Bomba de coquetas; 5) Válvula automática cierre rápido; 6) Torre; 7) Gusanos extractores coqueta agotada; 8) Transportador coqueta agotada; 9) Prensa de coqueta; 10) Separador de pulpa; 11) Estanque de agua de prensas; 12) Bomba agua de prensa; 13) Precalentador agua prensa; 14) Estanque de agua difusión; 15) Bomba agua difusión; 16) Precalentador agua difusión; 17) Desarenador jugo circulación; 18) Bomba jugo circulación; 19) Precalentador jugo circulación; 20) Bomba jugo crudo; 21) Separador de arena.

De la parte superior de la torre sale coqueta agotada con muy poca azúcar que no es económico seguir extrayendo y de la parte inferior sale el jugo de circulación que va al macerador, de este equipo sale jugo crudo frío que va al proceso siguiente, previo al calentamiento.

A la salida de las coquetas agotadas, en la parte superior del difusor, se les adiciona yeso, sulfato de calcio, con el objeto de darles más resistencia mecánica, a fin de poder prensarlas en las prensas horizontales de alta materia seca.

La coqueta agotada se prensa y va el secado de coquetas. La materia seca de las coquetas agotadas es de alrededor de 6-8% y por prensado salen las coquetas prensadas con 30-35% de materia seca. El líquido que sale de las prensas, llamado agua de prensas, se calienta y disuelve a la torre ya que tiene azúcar, ésta entra poco más abajo que el agua caliente, es decir, en un sector de concentración de azúcar parecido.

Es común que en la torre se produzcan infecciones que disminuyen la cantidad de azúcar, ya sea porque se consume o porque a consecuencia de la disminución de pH se transforma en azúcar invertido que no es sacarosa o azúcar común. Esto se combate agregando formalina a la torre, macerador y agua de prensas. Además, como prevención es importante un buen trabajo en la lavadora de remolacha. También se combate manteniendo una temperatura de 72° C en la mitad de la torre.

Es necesario aclarar que se permite una “infección controlada” en la torre a pH 5,2-5,5 que contribuye a un mejor prensado junto con el yeso.

3.4 Purificación

El jugo crudo además de azúcar tiene una serie de impurezas que es necesario eliminar para conseguir mayor rendimiento al cristalizarla. Esta eliminación se efectúa por medio de la purificación calco-carbónica haciendo uso de la cal y el gas, CO₂, producido en el Horno de Cal.

Hay muchos sistemas de purificación, todos tienden a conseguir la mayor eliminación de impurezas existentes en el jugo crudo. Todos ellos tienen ventajas y desventajas.

En IANSA se utilizan dos sistemas diferentes:

1. Purificación Dorr, y
2. purificación BMA 65.

En forma general se puede dividir cualquier sistema de purificación en dos etapas bien diferentes.

3.4.1 I Etapa de Purificación

La finalidad de esta etapa es coagular o flocular algunas impurezas y precipitar otras con cal, el máximo de estas reacciones se produce a un pH de 10,6 a 11,0.

En ésta se agrega cal, como lechada de cal, al jugo crudo en una cantidad de alrededor de 1,2-2,0% sobre remolacha, dependiendo de la cantidad de ellas, y luego se carbonata hasta llegar a un pH de 10,6-11,0.

Con la cal existente en el jugo y el agregado de gas del horno se forma carbonato de calcio, que sirve para eliminar algunas sustancias, recubre los coloides y es además ayuda filtrante muy útil en la posterior filtración de este jugo. Este jugo se envía al decantador donde se separa un jugo limpio, jugo decantado, que va a la siguiente etapa de purificación y un jugo fangoso que se filtra en los rotativos y se junta con el jugo decantado. Parte del jugo fangoso va al jugo crudo para iniciar la primera etapa de la purificación.

3.4.2 II Etapa de Purificación

El jugo decantado y el jugo filtrado se juntan, se calienta a 95-98° C y van a la II etapa de carbonatación. Allí se continúa el agregado de gas del horno hasta conseguir el pH óptimo de esta etapa. Este valor se debe determinar en el laboratorio, y corresponde al pH en que las sales solubles de calcio son mínimas, con el objeto de que la estación evaporada se incruste lo menos posible con sales de calcio, disminuyendo así su capacidad.

3.4.3 Necesidad de dos Etapas

Sucede que una parte importante que se debe eliminar son colides de proteínas que coagulan y precipitan con la cal, quedando en ese estado hasta pH de 10,6-11,0 por debajo de éste se redisuelven y siguen con el jugo.

Por esto es que, llegado a ese pH en I Carbonatación, se filtran para separarlos del jugo. Luego con un jugo sin estas sustancias se agrega más CO₂ en la II etapa para eliminar el máximo de compuestos de calcio solubles.

En resumen, se puede decir que la finalidad básica de la primera etapa de purificación es la de eliminar la mayor cantidad de no-azúcares o impurezas, en tanto la segunda etapa es para eliminar el máximo de los compuestos de calcio que incrustan las superficies de calentamiento de los equipos.

3.5 Decantación y filtración

El jugo de I carbonatación va en primer término a un decantador donde se separan dos fracciones de jugo. Por la parte superior sale un jugo prácticamente cristalino y de color amarillento, jugo decantado, por la parte inferior sale un jugo fangoso con todas las impurezas eliminadas y el carbonato de calcio formado en la I Carbonatación. El jugo fangoso se envía a los filtros rotativos al vacío donde se separa el precipitado y sale jugo limpio que se mezcla con el decantado. En este filtro se agrega agua por toberas para recuperar el azúcar que contiene el fango, llamada agua de desazucaramiento, una parte o toda ésta se envía al horno de cal para producir lechada de cal.

El fango que queda retenido en el paño del filtro, normalmente debería enviarse a un pozo para que se seque. Este se usa como fertilizante por su alto contenido de calcio y para mejorar el pH de las tierras muy ácidas.

En los últimos años IANSA ha instalado, en algunas Plantas, filtros-prensa automáticos que entregan un fango de alta materia seca, 70%. Por lo tanto, en esas Plantas el jugo fangoso se envía directa a los agricultores.

El jugo de II Carbonatación tiene mucho menos precipitado y se filtra en los filtros vela donde éste queda retenido y sale un jugo cristalino llamado jugo claro. El fango de estos filtros se envía también al filtro de I Carbonatación para desazucararlo.

3.6 Descalcificación del jugo claro

El jugo claro que sale de los filtros de II Carbonatación tiene cantidades variables de compuestos solubles de calcio. Estos, por efecto del calor y de la evaporación, se depositan en las paredes de calentamiento tal como el sarro en las teteras.

Para evitar esto se somete el jugo a una descalcificación o ablandado del jugo claro, por medio de resinas que intercambian el calcio del jugo por sodio, contenido en la resina. El compuesto de sodio que se forma no produce incrustaciones en las superficies de calentamiento y llega intacto hasta el jugo denso, donde se halla concentrado. Llega el momento en que la capacidad de ablandado de la resina se agota, vale decir se satura con el calcio. Entonces es necesario eliminarle el calcio, esto se hace con el jugo denso que está cargado con compuestos de sodio.

Vale decir, de esta manera se by-pasea el calcio en los equipos que puede incrustar, y se recupera de nuevo para no dejar los compuestos de sodio formados en la resina, ya que éstos ligan más azúcar a la melaza que los compuestos de calcio.

3.7 Sulfitación de jugo claro

La finalidad de sulfitar este jugo, por agregado de SO_2 , es la de evitar la formación de compuestos que oscurecen el jugo, al mismo tiempo que se utiliza para bajar el pH del jugo si éste está alto por efecto de una alcalinidad o pH óptimo alto de II Carbonatación.

El SO_2 se genera en hornos rotatorios especiales en donde se quema azufre, el gas producido se conduce al sistema de sulfitación del jugo claro.

3.8 Evaporación

El jugo claro tiene una concentración de alrededor de 12% de azúcar, para poder cristalizarla es necesario concentrarlo, lo cual se efectúa en dos etapas. La primera etapa de concentración se cumple en la estación evaporadora, la segunda en los tachos cristalizadores, lo que veremos más adelante.

La estación evaporadora consta de cuatro efectos, al primero llega jugo claro calentado en tres precalentadores a 125° C. El primer efecto se calienta con vapor de escape de la turbina mezclado habitualmente con vapor reducido de la caldera. De esta manera hierve el jugo, los vapores que se producen en el primer efecto van a calentar el segundo y a algunos precalentadores. Los vapores que se producen por la ebullición en el segundo van a calentar el tercero, otros precalentadores y tachos cocedores. Los vapores del tercero calientan el cuarto efecto, otros precalentadores y los tachos cocedores.

El cuarto efecto está sometido al vacío con el objeto de que la ebullición se produzca a más o menos 88°-90° C, a fin de que no se caramelize el azúcar; además los vahos se aprovechan en algún precalentador.

En la figura 3 que a continuación se indica se ve la distribución del vapor y vahos en la evaporación.

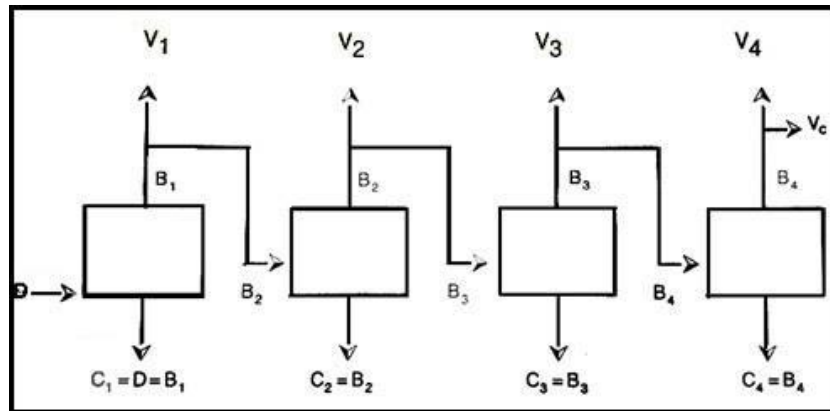


Fig. 4: Distribución de vapor y vahos en la evaporación.

Del cuarto efecto sale el jugo denso que tiene alrededor de 54-56% de azúcar y alrededor de 60-62° Bx ó r, el límite de concentración está dado por los filtros de licor standard.

Como se ha descrito, el único efecto que recibe vapor directo es el primero, por lo tanto, es el único consumidor directo. El resto se calefacciona con los vahos del que le antecede. Esto es importante, en la economía de la fábrica.

La estación evaporadora es el motor térmico de la Planta, la forma de aprovechar los vahos y los condensados (jugo crudo frío) es lo que define el consumo de vapor y por lo tanto el consumo de combustible.

3.8.1 Conceptos básicos

Antes de entrar al tema propiamente tal se revisarán conceptos generales relacionados con el tema.

3.8.1.1 Conceptos de calor y temperatura

El calor es una de las formas en que se manifiesta la energía, y se considera debido al movimiento vibratorio de las moléculas (la menor unidad en que puede dividirse una sustancia o cuerpo).

El calor produce una serie de modificaciones sobre los cuerpos:

- De orden físico, como la evaporación del agua,
- de orden mecánico, como la dilatación o encogimiento de los metales, y
- de orden químico, como la descomposición del azúcar.

La temperatura de un cuerpo es una medida de su estado calorífico. Cuando tocamos un cuerpo nuestro sentido del tacto nos permite hacer una estimación aproximada de su temperatura.

Cuando ponemos una tetera con agua sobre una llama ésta le aporta calor, la temperatura del agua comienza a subir y seguirá subiendo mientras le aportemos calor. Si la sacamos de la fuente de calor la temperatura no sigue subiendo y comienza lentamente a bajar porque el agua y la tetera traspasan calor al medio ambiente. Mientras mayor sea la cantidad de agua más tiempo se demorará en subir y en bajar la temperatura. O sea, la temperatura es una resultante del calor aportado y depende de la cantidad que se aporte, para una misma cantidad de material.
[3]

3.8.1.1.1 Cantidad de calor

Para expresar la cantidad de energía térmica se usa el término caloría (cal). Corresponde a la cantidad de calor que es necesario aplicar a 1 [gr] de agua, a la presión normal, para elevar su temperatura de 14,5 a 15,5°. Normalmente, a escala industrial, se usa la kilocaloría [kcal] que es el calor necesario para aplicar a 1 [kg] de agua para producir el mismo cambio de temperatura. Por lo tanto, 1 [kcal] = 1.000 [cal].

Es importante mencionar, deduciéndolo de lo dicho más arriba, que para subir la temperatura de 2 [kg] de agua de 14,5 a 15,5° C, se requerirán 2 [kcal], para 3 [kg] de agua se requerirán 3 [kcal], etc. La fórmula general que relaciona esto es:

$$Q = m \times c \times (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Donde,

Q, es la cantidad de calor, en kcal.

M, es la masa del material que se calentará, kg.

C, es el calor específico del material m, hay tablas.

t1, es la temperatura inicial del material, °C.

Aplicando esta fórmula se podrá ver más claramente lo indicado anteriormente, siendo el calor específico del agua = 1.

Entonces,

$$Q = 1 \times 1 \times (15,5 - 14,5) = 1 \text{ [kcal]}$$

$$Q1 = 2 \times 1 \times (15,5 - 14,5) = 2 \text{ [kcal]}$$

3.8.1.1.2 Termómetros y escalas de temperatura

La temperatura se mide con los instrumentos llamados termómetros. Hay de diferentes tipos; en Chile normalmente están graduados en grados Celsius, que se representa así: °C.

Existen otras escalas como la Fahrenheit [°F] usada en USA e Inglaterra y la escala absoluta o Kelvin [°K]. Las relaciones entre una y otra son:

$$^{\circ}\text{C} = 5/9(^{\circ}\text{F} - 32) \quad (2)$$

$$^{\circ}\text{K} = 273 + ^{\circ}\text{C} \quad \text{ó} \quad ^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{K} - 273 \quad (3)$$

Es necesario ahora aclarar un concepto errado que se escucha con alguna frecuencia, como la caloría del jugo es 70, debiéndose que la temperatura del jugo es de 70°C, como lo indica el termómetro que se está mirando. No olvidar que la caloría indica cantidad de calor y no temperatura.

3.8.1.2 Conceptos de energía térmica o calor; entalpía

La entalpía corresponde al contenido de energía térmica (calorías) en un líquido o gas, medio con relación al agua, como testigo, a una temperatura de 0°C y a presión atmosférica normal.

Así la entalpía de 1 [kg] de agua a 0° = 0 [kcal]

Así la entalpía de 1 [kg] de agua a 100° = 100 [kcal]

Esto significa que es necesario aplicar 100 [kcal] a 1[kg] de agua a 0° para llevarlo a 100°C.

El agua se mantiene en estado líquido justo hasta los 100°C a presión normal. Para convertirla en vapor, evaporarla, es necesario aplicar una mayor cantidad de calor. Se produce en ese momento lo que se llama un cambio de estado: de líquido a vapor. Al calor necesario para ese cambio de estado del agua se le llama calor de vaporización del agua, existen tablas que dan el calor de vaporización de diferentes líquidos.

El vapor producido al aplicar sólo una cantidad de calor corresponde al calor de vaporización produce vapor a 100°C. A continuación se calcula la entalpía o cantidad de calor contenida en 1 [kg] de vapor a 100°C:

$$\text{Entalpía del agua a } 100^{\circ}\text{C} = 100 \text{ [kcal/kg]} \quad (4)$$

$$\text{Calor de vaporización del agua} = 539 \text{ [kcal/kg]} \quad (5)$$

$$\text{Entonces, sumando (4) y (5)} \quad \text{Entalpía vapor a } 100^{\circ}\text{C} = 639 \text{ [kcal/kg]} \quad (6)$$

Lo cual significa, en términos concretos, que se requiere 5,39 veces más calorías para evaporar 1 [kg] de agua para llevarla justo al punto de ebullición, sin que haya evaporación.

Esto es para el caso de vapor saturado, el cual es un vapor que está a una temperatura de ebullición correspondiente a la presión reinante. En algunos casos el vapor puede tener una temperatura mayor aplicando mayor calor al vapor, entonces se denomina vapor sobresaturado o recalentado; el que por supuesto tiene una entalpía mayor que el saturado, del orden de 0,42 [kcal/kg] y por °C de recalentamiento.

Al subir la temperatura de vapor de 100°C a 120°C, a la misma presión que el de 100°C, tiene la entalpía o cantidad de calor a esa otra condición según:

$$\text{Vapor saturado a } 100^{\circ}\text{C} = 639 \text{ [kcal/kg]} \quad (7)$$

$$\text{Vapor recalentado a } 120^{\circ}\text{C}: (20 \times 0,42) = 8,4 \text{ [kcal/kg]} \quad (8)$$

$$\text{Entonces, Sumando (7) y (8)} \quad 647,4 \text{ [kcal/kg]} \quad (9)$$

Al condensarse se produce el proceso inverso, el vapor saturado entrega en forma inmediata su calor al medio, calor latente. En cambio, el vapor recalentado debe entregar primero las calorías que lo tienen en ese estado térmico, calor sensible, pasando a la condición de saturado para en ese momento entregar la cantidad de calor correspondiente al calor latente, igual al calor de vaporización. Por esta causa al usar vapor reducido de calderas se enfría previamente a la temperatura de saturación correspondiente a la presión.

En cualquier intercambiador de calor, recalentador evaporador, etc. para conseguir la mayor ventaja de toda la superficie de intercambio, es necesario hacerle llegar vapor saturado a fin de condense en forma inmediata entregando la gran cantidad de calor, y disponiendo de toda la superficie para ello. [4]

3.8.1.3 Punto de ebullición

Se llama así a la temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido (agua) se iguala con la presión que existe entre la superficie del líquido, es decir, justo en el momento previo a la ebullición, y depende directamente de la presión; cuanto más se eleva la presión, mayor es el punto de ebullición. En esta estación de evaporación se ve hervir o ebullición al jugo en temperaturas y presión diferente en cada etapa.

Cuando el agua llega al punto de ebullición y se continúa agregando calor como para producir el cambio de estado, el agua comienza a evaporarse y se mantiene constante la temperatura mientras dura la ebullición, o evaporación de toda el agua.

Todo esto es válido para agua pura; para soluciones la situación es diferente, ya que se produce un aumento del punto de ebullición debido a las sustancias disueltas.

3.8.1.3.1 Aumento del punto de ebullición

Desde el punto de vista que nos interesa en este tema, el jugo que entra a evaporación es una solución de sacarosa y no-azúcares, por este hecho hierve a una temperatura mayor que la del agua pura. La elevación del punto de ebullición depende de la materia seca contenida en el jugo, de su pureza y de la presión a que está sometido.

La siguiente fórmula permite calcular la temperatura de ebullición de soluciones de azúcar a 1 [atm] = 760 [torr]:

$$t_2 = t_w + t \text{ [C]} \quad (10)$$

donde,

t_2 , es la temperatura de ebullición del jugo.

tw, es la temperatura de ebullición del agua a la misma presión.

t, es el aumento del punto de ebullición, APE, en tabla x.

En la Tabla 5 se puede ver la relación de aumento del punto de ebullición de soluciones de azúcar o jugos en relación con la pureza, materia seca y presión.

CUADRO 1 - AUMENTO PUNTO EBULLICION t(C) PARA JUGOS A DIFERENTES PRESIONES, PUREZAS Y MATERIA SECA											
tw °C		65.3	81.7	92.1	100.0	106.4	111.8	116.5	120.6	127.9	
r (%)	Presión atm	0.26	0.52	0.77	1.03	1.29	1.55	1.81	2.07	2.58	
Torr (mm. Hg.)		190	380	570	760	950	1140	1330	1520	1900	
15	p	100	0.16	0.18	0.19	0.21	0.23	0.25	0.26	0.27	0.29
	-	90	0.18	0.21	0.23	0.24	0.26	0.28	0.29	0.31	0.33
	-	80	0.21	0.24	0.26	0.29	0.31	0.33	0.35	0.36	0.39
	-	70	0.26	0.30	0.33	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46
25	p	100	0.36	0.41	0.44	0.48	0.51	0.54	0.56	0.58	0.62
	-	90	0.39	0.44	0.48	0.53	0.55	0.58	0.60	0.62	0.66
	-	80	0.45	0.52	0.57	0.61	0.65	0.68	0.70	0.73	0.77
	-	70	0.54	0.62	0.66	0.73	0.77	0.81	0.84	0.87	0.92
35	p	100	0.64	0.72	0.76	0.82	0.86	0.90	0.94	0.97	1.02
	-	90	0.70	0.79	0.86	0.92	0.97	1.01	1.05	1.08	1.14
	-	80	0.81	0.93	1.01	1.07	1.13	1.18	1.22	1.27	1.33
	-	70	0.95	1.08	1.17	1.26	1.33	1.39	1.45	1.50	1.57
45	p	100	1.11	1.21	1.29	1.36	1.41	1.46	1.51	1.56	1.62
	-	90	1.25	1.38	1.48	1.56	1.64	1.70	1.76	1.80	1.88
	-	80	1.46	1.65	1.76	1.87	1.95	2.04	2.12	2.20	2.31
	-	70	1.73	1.94	2.11	2.27	2.39	2.50	2.61	2.70	2.82
55	p	100	1.97	2.12	2.24	2.35	2.44	2.52	2.59	2.67	2.76
	-	90	2.19	2.39	2.55	2.68	2.80	2.90	2.99	3.09	3.21
	-	80	2.55	2.83	3.04	3.20	3.35	3.46	3.58	3.68	3.84
	-	70	3.02	3.30	3.57	3.82	4.00	4.18	4.34	4.49	4.69
65	p	100	3.36	3.64	3.88	4.08	4.25	4.42	4.58	4.74	4.94
	-	90	3.62	4.02	4.30	4.54	4.76	4.94	5.12	5.29	5.50
	-	80	4.16	4.58	4.95	5.18	5.42	5.65	5.82	6.04	6.28
	-	70	4.82	5.25	5.62	5.98	6.26	6.54	6.74	6.98	7.24
75	p	100	5.75	6.28	6.70	7.06	7.28	7.56	7.78	8.04	8.30
	-	90	6.16	6.72	7.22	7.66	7.95	8.28	8.56	8.84	9.15
	-	80	6.90	7.58	8.15	8.60	8.98	9.34	9.65	9.98	10.32
	-	70	7.86	8.60	9.26	9.80	10.24	10.64	10.98	11.32	11.80
80	p	100	7.82	8.40	8.86	9.38	9.70	10.02	10.30	10.58	10.94
	-	90	8.32	9.12	9.75	10.34	10.72	11.08	11.42	11.78	12.30
	-	80	9.34	10.30	11.06	11.72	12.18	12.64	13.08	13.56	14.20
	-	70	10.62	11.80	12.74	13.48	13.96	14.44	14.90	15.58	16.40
85	p	100	-	-	-	13.21	13.76	14.30	14.74	15.18	15.70
	-	90	11.84	12.84	13.65	14.40	15.00	15.56	16.05	16.72	17.56
	-	80	13.08	14.40	15.40	16.30	16.96	17.54	18.18	19.02	20.00
	-	70	14.80	16.30	17.60	18.70	19.55	20.20	20.85	21.90	23.30
90	P	100	-	-	-	19.40	20.25	21.00	21.89	22.55	-
	-	90	-	18.30	19.55	20.70	21.55	22.45	23.25	24.40	25.75
	-	80	18.45	20.05	21.40	22.75	23.70	24.65	25.60	26.80	28.45
	-	70	20.20	22.00	23.60	25.25	26.50	27.65	28.80	30.30	-

Tabla 1: Aumento del punto de ebullición para jugos a diferentes presiones, pureza y materia seca.

Esto es muy importante ya que significa que el jugo está hirviendo a una temperatura superior a la de los vapores generados, y ese valor es APE que en el caso de jugos es r = 65% significa del orden de 5 C.

3.8.1.4 Presión

Este término se define como la fuerza que actúa sobre una superficie. La unidad más comúnmente empleada es [kg/cm²]. La presión atmosférica es aquella que ejerce una columna de 760 [mm]. de Hg al nivel del mar, a 0°C. La presión a nivel del mar se considera como presión standard.

La presión se expresa normalmente en valores absolutos, la cual es la presión manométrica más la presión atmosférica (barométrica). Normalmente se agrega una unidad de valor que indica el manómetro, por ejemplo: caldera a 15 [kg/cm] = 16 [kg/cm] de presión absoluta.

Hay muchas unidades de presión, algunas se han dejado de usar, por esto a continuación se indicará la relación entre las más usadas:

$$1[\text{kg/cm}] = 1 [\text{at}] = 0,9807 [\text{bar}] = 14,22 [\text{psi}] \quad (11)$$

3.8.1.5 Calor específico

Corresponde a la relación entre el calor necesario para elevar la temperatura de una sustancia a un grado y el calor necesario para elevar la temperatura de un peso idéntico de agua de 14,5 a 15,5°C. Normalmente se expresa como c. Para el agua “c” es bastante parecido a 1.

Existen tablas que nos indican el calor específico de diferentes sustancias.

El valor de c permite calcular la cantidad de calor necesaria para llevar un jugo de una temperatura a otra, por medio de la siguiente fórmula elemental de calorimetría:

$$Q = m \times c \times (t_2 - t_1) \quad (12)$$

Donde,

m, es la cantidad de jugo, kg.

c, es el calor específico jugo, [kcal/(kgx°C)]

t1, es la temperatura inicial, °C.

t2, es la temperatura final, °C.

3.8.2 Cantidad de agua a evaporar

Una vez hecha la revisión de algunos conceptos básicos, se puede destacar la importancia de la evaporación que se ve al calcular la cantidad de agua que se debe evaporar para cumplir con el fin de ella. La fórmula permite hacer el cálculo:

$$\frac{W}{F} = \frac{W_1}{F_1} \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right) \text{ [kg/100kgxrem]} \quad (13)$$

Donde,

$\frac{W}{F}$, es la cantidad de agua por evaporar, kg/100kgxrem.

$\frac{W_1}{F_1}$, es la cantidad de jugo claro y jugo denso, expresada en kg.

r_1 ; r_2 , es la materia seca de jugo claro y denso [%].

En el caso de contar con jugo claro de $r = 15\%$, debido concentrarse a jugo denso con 65% de materia seca, y teniendo $\frac{W_1}{F_1} = 125\%$ s.R. se tendrá:

$$\frac{W}{F} = 125 \left(1 - \frac{15}{65}\right) = 96 \text{ [kg/100kgxrem]} \text{ ó } 96 \text{ [Ton/100tonxrem]}$$

De donde $\frac{W}{F} = 125 - 96 = 29 \text{ [Kg/100kgxrem]} \text{ ó } 29 \text{ [Ton/100Tonxrem]}$

Esto significa que una planta que elabora 5.000 [ton] de remolacha por día debe eliminar en la evaporación, para las condiciones del ejemplo, 4.800 [ton] de agua/día. Esto es 200 [ton/h] ó 55,6 [l/s]. En números gruesos se puede considerar que se requiere evaporar 1 [ton] de agua, por cada tonelada de remolacha elaborada, al pasar de jugo claro a jugo denso, con los datos del ejemplo.

3.8.3 Estación evaporadora

3.8.3.1 Descripción general de un evaporador

A continuación, se describe un evaporador de los más usados en la industria azucarera, con los tubos verticales tipo Robert.

Este tipo de equipo está fundamentalmente constituido por el cilindro vertical, en el cual un tercio más o menos de él está atravesado verticalmente por un haz de tubos, cuya superficie total constituye la superficie de

intercambio y se le llama cámara de vapor. El haz tubular está encerrado entre las dos placas perforadas perpendiculares a aquél, en las perforaciones se expanden los extremos superiores e inferiores de los tubos, a este conjunto se le llama calandria.

El jugo circula por el interior de los tubos y el vapor por fuera de ellos, condensándose y entregando su calor latente, haciendo hervir el jugo y de esta forma evaporando el agua.

La parte superior del equipo es la cámara de vahos. En la zona superior de esta cámara, habitualmente, va un separador de gotas (anillos, esponja metálica, etc.).

En la Figura 5 se puede apreciar el croquis de un evaporador de tubos cortos, con calandria.

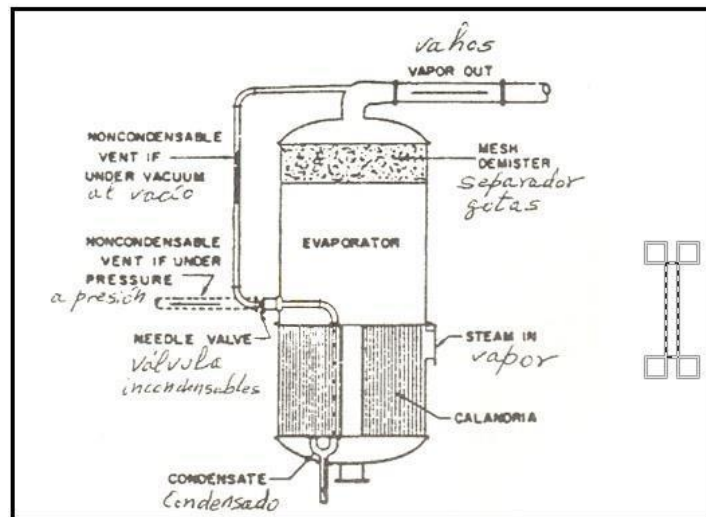


Fig. 5: Evaporador de tubos cortos

3.8.3.2 Estación evaporadora

Esta sección de la fábrica es de vital importancia para la economía térmica o economía de combustible, ya que a ella llega el vapor de escape de la turbina y el vapor reducido de caldera, y a la vez debe entregar vapores o vahos para calentar diferentes precalentadores en las distintas etapas del proceso.

En buenas cuentas la estación evaporadora puede ser considerada como un sistema de transformación del calor de escape de turbinas y del directo generado en calderas, y de un aprovechamiento económico de sus vahos.

En un sistema cerrado, idealmente, se puede suponer que un Kg. de vapor evapora 1 [kg] de agua, o lo que es lo mismo, genera un kg de vahos y a su vez 1 [kg] de condensado. Para el ejemplo del punto anterior se tendría un consumo de vapor, en la evaporación en una etapa, según la figura 6.

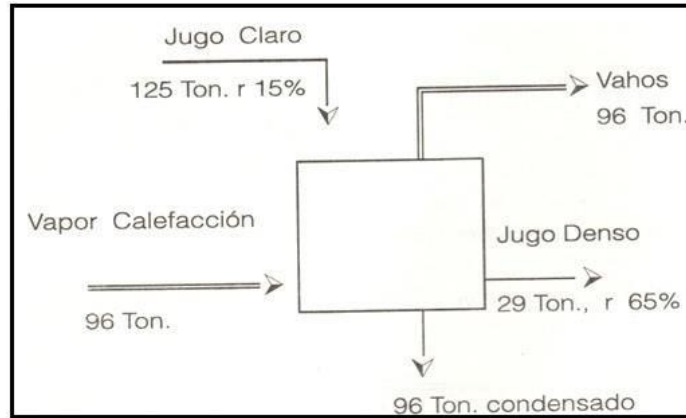


Fig. 6: Macrobalance de evaporación en un efecto.

Como se aprecia, se requiere de 96 [ton] de vapor para evaporar los 96 [ton] de agua en el jugo, al fin de llevarlo de 15 a 65% de M.S., según el ejemplo indicado en el punto anterior. Además entrega 96 [ton] de vahos y 29 [ton] de jugo denso, por cada 100 [ton] de remolacha.

Si estos vahos que se producen en un efecto a un segundo evaporador en serie tanto por el jugo como por el vapor, y manteniendo la misma suposición de que 1 [kg] de vapor o vahos evapora 1 [kg] de agua del jugo, se requerirá evaporar sólo la mitad encada uno. Por lo tanto, en la figura 7 se observa:

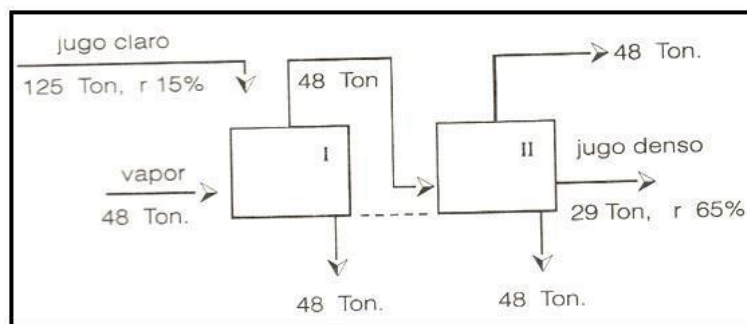


Fig. 7: Balance de evaporación en dos efectos.

I cuerpo evapora 48 [ton]

II cuerpo evapora 48 [ton]

Total evaporación = 96 [ton]

De esto resulta que para concentrar las mismas 125 [ton] de jugo claro con 15% de materia seca, a un jugo denso con $r = 65\%$, se necesitan sólo 48 [ton] de vapor en esta evaporación en dos etapas, y se evaporan 96 [ton] de agua.

3.8.3.2.1 Estación evaporadora de múltiples efectos

Las consideraciones que se indican a continuación se basan en la teoría de evaporación en múltiples efectos. La evaporación es un proceso en el que se llega a condiciones en equilibrio, cada vez que varían los parámetros que intervienen: flujo, toma de vahos, concentración, etc.

Como se vio anteriormente, si se aumenta el número de efectos o tapas, se requiere menos cantidad de vapor vivo para producir la misma concentración en J.D.

Así una estación de 3 etapas requerirá $1/3$ del vapor. Una de 4 efectos $1/4$ del vapor vivo, o dicho de otra forma: con 1 [ton] de vapor vivo el primer efecto se lograría a una evaporación total de 4 [ton] de agua, como se ve en la figura 8.

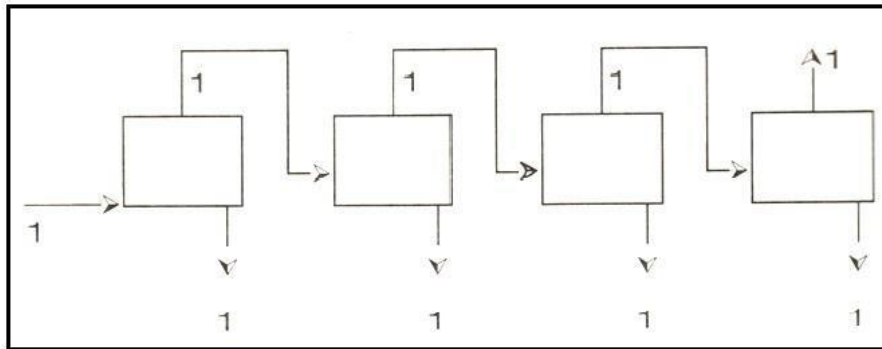


Fig. 8: Balance de evaporación en 4 etapas.

Volviendo al mismo ejemplo numérico, sucede que con una evaporación de 3 efectos se tiene:

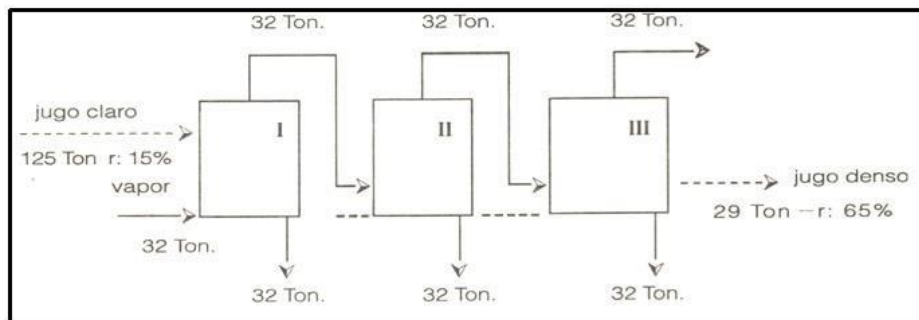


Fig. 9: Balance de evaporación en 3 etapas.

En este caso se cumple la misma tarea de evaporación, con sólo 32 [ton] de vapor.

En el caso de una estación evaporadora de cuatro efectos, como las hay en las Plantas de IANSA, se tendrá:

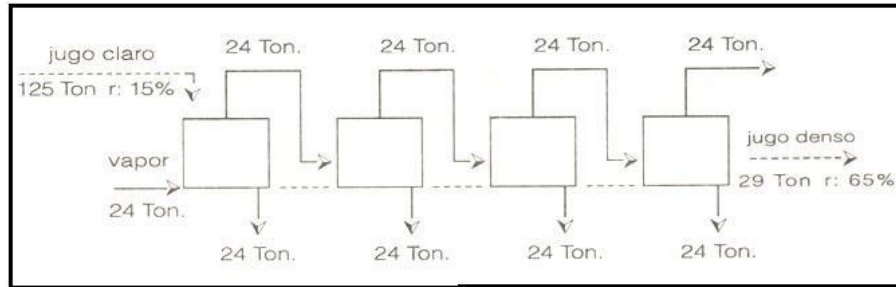


Fig. 10: Balance evaporación en 4 etapas.

Está clara la influencia de aumentar las etapas, ya que un cuádruple efecto se requerirá solamente 24 [ton] de vapor para cumplir con la misma tarea planteado en el ejemplo.

Esto es válido para el esquema indicado en la Figura 10, en donde no hay consideraciones respecto de tomas de vapores intermedios para otros consumidores, ni la expansión del jugo y del condensado generado por cada etapa.

Lo que queda claro teóricamente es que mientras más etapas tenga la estación evaporadora, se tendrá un menor consumo de vapor para un mismo valor de r en J.D. Lo que en realidad sucede en la práctica, es que el valor de r en J.D puede aumentar hasta el límite de filtración de licor standard a la saturación de la solución, para evitar cristalización espontánea.

Usualmente se ha utilizado evaporadores de cuádruples efecto. En ellos el vapor y el jugo van en con corriente y en serie. El primer cuerpo de la estación evaporadora recibe vapor de escape de la turbina más algo de vapor reducido de calderas, en él la temperatura del jugo y del vapor son las más altas, 120 – 130 °C, disminuyendo hacia el último efecto y el último, lo que se traduce en una diferencia de presión en cada etapa.

En los últimos veinte años han adoptado estaciones evaporadoras de 5 e incluso de 6 efectos. Hasta los años 70 (Planta Curicó, Chile) se consideraban generalmente 4 efectos.

3.8.3.2.2 Múltiples efectos con consumidores intermedios

En el caso normal en una planta azucarera, ya que se deben calentar jugos en diferentes etapas del proceso, para lo cual se utilizan precalentadores que consumen vapor de diferentes etapas de la estación evaporadora de múltiples efectos. Además, se requiere vapor para cristalización, secado de azúcar, etc.

En las estaciones evaporadoras el vapor generado en un cuerpo se utiliza para calefaccionar al siguiente, y además se extrae una cierta cantidad para otros consumidores, como los indicados anteriormente.

Suponiendo el caso actual de las azucareras chilenas, el vapor que se libera en el cuarto efecto, al vacío, en lo posible debería ser aprovechado en su totalidad para precalentamiento y no ser enviado directamente a la columna en donde se perdería, representando un consumo adicional de vapor vivo al primer efecto.

Esto podemos verlo en el ejemplo siguiente, en donde se han supuesto consumos vahos del I al IV efecto. Además, se podrá ver como se calcula tanto el agua evaporada en cada cuerpo, como el vapor consumido.

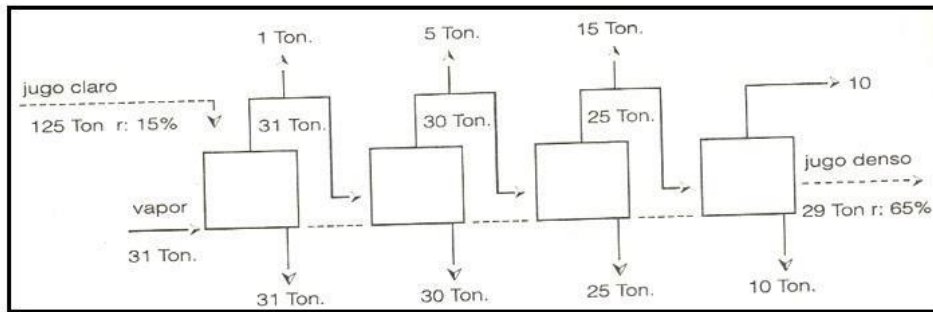


Fig. 11: Balance evaporación con consumidores.

$$\text{IV Evapora: } 10 \text{ [ton]} = 10 \quad (14)$$

$$\text{III Evapora: } 25 \text{ [ton]} = 10 + 15 \quad (15)$$

$$\text{II Evapora: } 30 \text{ [ton]} = 10 + 15 + 5 \quad (16)$$

$$\text{I Evapora: } 31 \text{ [ton]} = 10 + 15 + 5 + 1 = 31 \text{ [ton] vapor consumido} \quad (17)$$

$$96 \text{ [ton]} = 40 + 45 + 10 + 1 = 96 \text{ [ton] agua evaporada} \quad (18)$$

Esta forma de representación es la más simple para calcular las cantidades de agua evaporada y el consumo de vapor en una estación evaporada.

Con este esquema se pueden hacer algunas deducciones:

El consumo de vapor vivo al primer efecto está dado por la suma de los consumos de los vahos de cada etapa:

$$1 + 5 + 15 + 10 = 31 \quad (19)$$

El consumo está influenciado por los vahos del cuarto efecto. Si parte de esas 10 [ton] se van a la columna de vacío, digamos 3 [ton], estamos creando un consumo que finalmente lo perdemos en la columna; en la medida que esa pérdida a la columna disminuye, en esa misma medida disminuirá el consumo de vapor.

La cantidad de agua evaporada en la estación es igual a la suma del agua evaporada en los cuatro efectos, y la cantidad total depende de cómo se distribuya.

La suma de los condensados producidos es igual al agua evaporada.

Ahora se observa qué sucede al traspasar el consumo de vahos II a vahos III, tachos cocedores. Utilizaremos el mismo esquema planteado anteriormente.

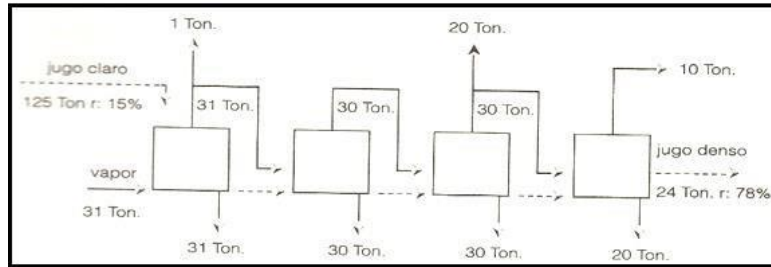


Fig. 12: Balance evaporación traspaso vahos 2 a vahos 3.

$$\text{IV Evapora: } 10 \text{ [ton]} = 10 \quad (20)$$

$$\text{III Evapora: } 30 \text{ [ton]} = 10 + 20 \quad (21)$$

$$\text{II Evapora: } 30 \text{ [ton]} = 10 + 20 + 0 \quad (22)$$

$$\text{I Evapora: } 31 \text{ [ton]} = 10 + 20 + 0 + 1 = 31 \text{ [ton]} \text{ consumo vapor} \quad (23)$$

$$\text{Entonces, } 101 \text{ [ton]} = 40 + 60 + 0 + 1 = 101 \text{ [ton]} \text{ agua evaporada.} \quad (24)$$

Con este ejemplo queda claro que en una estación evaporadora aumenta el agua evaporada al traspasar consumos a los efectos últimos o posteriores. Con esto aumenta el valor de r en J.D y en ese caso se mantiene el consumo de vapor vivo en la evaporación; si por el contrario se desea mantener el valor de r en el J.D tiene la limitante de la filtración de L.S que se produce con ese jugo, a mayor concentración, mayor viscosidad y menor caudal en filtración. Con los filtros modernos actuales se puede filtrar L. St. a $r = 75\%$, lo que permite usar estaciones evaporadoras de 5 y 6 efectos.

3.8.3.2.3 Economía de vapor por expansión

Al hablar de un múltiple efecto hasta ahora se ha referido a una batería de evaporadores con o sin tomas intermedias, pero se ha considerado tácticamente que el condensado que se genera se elimina y que no existe evaporación espontánea del jugo al pasar de una etapa a la otra, de una presión superior a una menor.

Esto se ha hecho a propósito con el fin de simplificar las demostraciones relativas al consumo de vapor y el agua evaporada.

3.8.3.2.3.1 Autoexpansión del jugo

El jugo sale de un efecto de la estación evaporadora y entra al efecto siguiente pasa de una presión de trabajo a otra menor. Este cambio de presión que se verifica después de la válvula reguladora de flujo ubicada entre los dos evaporadores, hace que el jugo experimente una autoevaporación o autoexpansión. El jugo alcanza entonces las condiciones de temperatura y presión correspondientes al efecto en que entra. A esto se llama autoevaporación del jugo, y constituye un ahorro de vapor vivo que se puede calcular con tablas y fórmulas.

Esta autoevaporación del jugo es tan importante en algunas plantas que, existen algunas cámaras de expansión del jugo instaladas entre dos efectos sucesivos, con una conexión de vapores de expansión hacia el efecto siguiente.

3.8.3.2.3.2 Expansión del condensado

Los condensados que se producen en los evaporadores, tachos cocedores y precalentadores deben ser extraídos de esos equipos sin dificultad y continuamente. Como en una planta azucarera se producen condensados de diferentes presiones y temperaturas, es de la mayor importancia evacuarlos de tal manera que no se produzcan mezclas de ellos en las cañerías, y conducirlos a estanques colectores en donde se produce la expansión (Niessner, expandidores horizontales, etc.).

Es necesario considerar que para calcular el vapor de expansión, como también para definir el aprovechamiento de los condensados, se requiere conocer la temperatura de ellos.

Con el objeto de aprovechar el calor del condensado se expande a una presión menor que el vapor del cual se generó, con lo cual libera una cierta cantidad de vahos que habitualmente se adicionan al vaho correspondiente en la estación evaporadora, o en otros casos van a algún precalentador, generado con ello un ahorro de vapor vivo igual a la cantidad expandida.

El condensado del primer efecto y parte del segundo se envía como agua de alimentación para las calderas, (agua destilada y caliente). El resto de los condensados se utilizan para precalentar algunos jugos cuya diferencia de temperatura aún lo permite, y finalmente se va al estanque de agua tibia para diferentes usos.

3.8.3.2.4 Incondensables

En la evaporación del jugo se desprenden también algunos gases que no se condensan como el vapor, éstos son anhídrido carbónico (CO₂), amoníaco (NH₃), etc.

Como no se condensan se van acumulando en la cámara de vapor del efecto siguiente, formando una “burbuja” que crece y va dejando algún sector de tubos sin transferencia de calor. Por este hecho se eliminan continuamente a la atmósfera, al vacío o al efecto siguiente.

3.8.4 Factores que influyen sobre la evaporación

Se ha mencionado que los evaporadores tienen como función hacer hervir el jugo para evaporarlo. Esta ebullición se produce por el traspaso de calor, a través de los tubos o placas de los evaporadores, del vapor que se introduce a la parte externa de ellos y que condensa entregando todo su calor latente.

La capacidad en un evaporador o de una batería de evaporadores depende de la velocidad de evaporación, la que a su vez depende de la velocidad de transmisión del calor entre el vapor que calefacciona y el líquido que ebulle en el interior de los tubos del evaporador.

La relación que regula la transmisión de calor es:

$$Q = K \times S \times t \text{ [kcal/h]} \quad (25)$$

en que:

Q, es el calor a transferir en kcal por unidad de tiempo.

K, es el coeficiente global de transmisión del calor en kcal/m²Ch

S, es la superficie de transferencia, m, dada por la totalidad de los tubos.

t, es la diferencia media efectiva de temperatura en °C, entre el vapor de calefacción y el líquido en el tubo.

El calor que es necesario traspasar el jugo, para hacerlo hervir y evaporar, depende de la cantidad de jugo y este calor que se debe traspasar está influenciado por los tres factores que se mencionan en la fórmula anterior, y que influyen en forma directa.

3.8.4.1 Factores de superficie

Esto significa que depende de la superficie de intercambio, vale decir, la suma de la superficie de todos los tubos o la de las placas. Mientras mayor es la superficie mayor cantidad de calor se puede transferir.

3.8.4.2 Influencia de temperatura

El otro factor que influencia ese traspaso es la diferencia media efectiva de temperatura entre el vapor que se está usando para calentar y el jugo que se desea evaporar o calentar (precalentadores).

Para calcular la diferencia media efectiva o logarítmica hay tablas y fórmulas.

La temperatura a la que hierve el jugo está influenciada por la presión a que está sometido. Hay dos factores adicionales que influyen la temperatura de ebullición del jugo:

- Aumento del punto de ebullición por efecto de la concentración del jugo, lo cual se ve en la Tabla x indicada al inicio del tema.
- Aumento del punto de ebullición debido a la altura del jugo dentro del tubo, lo cual se define como la presión hidrostática. Mientras mayor es la altura y concentración (Bx) del jugo hierve a mayor temperatura. Por esto es que la altura del jugo, en los evaporadores, está bastante por debajo de la placa superior de la calandria. Debe mantenerse la premisa de que el tubo debe estar siempre mojado, con las burbujas de vapor que suben con el jugo, a fin de evitar la caramelización.

3.8.4.3 Valor de k

El tercer factor que influye el traspaso de calor es el coeficiente de transmisión de calor ó k. Este factor está influenciado a su vez fundamentalmente por:

- La limpieza y lo isa que sean las paredes del tubo tanto interna como externamente. La presencia de incrustaciones desmejora o disminuyen bastante el valor de k aumentando el consumo de vapor, por ello hay que lavar seguido la estación evaporadora en las Plantas que no tienen ablandado de jugo.
- El espesor y material del tubo tienen un efecto relativamente bajo sobre k.
- La velocidad de circulación del jugo dentro del tubo también influye en k, a mayor velocidad mayor k. Por esto es que algunos evaporadores se han colocado aceleradores de jugo dentro del tubo, para conseguir un flujo turbulento. En este sentido es importante mencionar que en los evaporadores de placa la velocidad del jugo es muy alta. Por ello que el valor de k es bastante alto. La viscosidad del jugo influye sobre k

fundamentalmente por la influencia de la viscosidad sobre la circulación del jugo, a mayor viscosidad (III y IV efectos) disminuye la velocidad de circulación.

Los valores de k se han encontrado experimentalmente para las condiciones de la estación evaporadora y hay tablas que los dan. A mayor valor de k se puede transmitir una mayor cantidad de calor. Si la cantidad de calor ya está definida, un mayor k permite disminuir la superficie de calentamiento.

3.8.5 Efecto de la evaporación sobre el jugo

En el paso por la estación evaporadora el jugo sufre algunos trastornos que se pueden condensar en lo siguiente.

3.8.5.1 Destrucción térmica de la sacarosa

En la estación evaporadora se produce una destrucción térmica de la sacarosa por un doble efecto, producto de la temperatura a la cual hierve el jugo y su pH.

En síntesis, se puede mencionar en forma resumida la destrucción de sacarosa expresada en % sobre sacarosa en el jugo claro y por hora.

Temperatura [°C]
100 °C = 0,114%
110 °C = 0,163%
115 °C = 0,175%
120 °C = 0,280%
125 °C = 0,530%
130 °C = 2,050%

Tabla 2: Temperatura en °C en los evaporadores y su porcentaje de destrucción.

Como se ve, ya sobre los 120 °C comienza una destrucción importante. Por esto es que se trata de mantener como máximo 125 °C en el primer cuerpo de la estación.

Esta destrucción produce sustancias de naturaleza indefinida y fuertemente coloreadas tipo caramelo.

3.8.5.2 Formación de color

Esta es, quizá, la consecuencia más importante de la evaporación del jugo. Por efecto de la destrucción térmica hay un aumento de color [8]. Además de ello, la mayor o menor formación de color depende, entre otras causas, de la estadía del jugo en la evaporación, altura del jugo en los tubos, calidad de la purificación (jugo claro) en cuanto al % de destrucción de algunos compuestos químicos, como amidas y azúcar invertido.

Las amidas son compuestos que se descomponen en la evaporación. Estos productos reaccionan con el invertido dando compuestos fuertemente coloreados difíciles de eliminar y van a pasar el azúcar, disminuyendo su calidad. El azúcar invertido se descompone también, en la evaporación dando compuesto de color intenso.

3.8.6 Equipos de evaporación

Hay una gran variedad de equipos para evaporar soluciones líquidas. Algunos equipos han sido usados desde mucho tiempo en otras industrias (Zsigmond, falling film, de placas, etc.), y en el último tiempo se han desarrollado y fabricado industria azucarera.

A continuación, se describen los equipos usados en IANSA. Todos los evaporadores constan de una superficie de calentamiento para transferir el calor del medio calefactor al fluido que se debe evaporar, y de un medio de separación efectiva de los vapores generados.

3.8.6.1 Evaporador Robert

Este es el equipo que tiene todas las Plantas excepto Curicó, que tiene una evaporación Zsigmond, modificada posteriormente en la misma Planta.

El evaporador Robert corresponde a lo que se denomina también evaporador de calandria. Es el flujo ascendente con los tubos cortos y recirculación natural, interna. Figura x. Han sido los más utilizados desde antiguo en la industria azucarera remolacha.

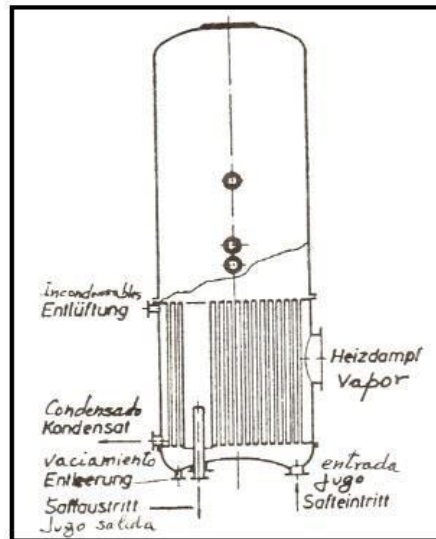


Fig. 14: Evaporador Robert.

Constan de un haz tubular vertical, con dos tubos de 1,2 – 2,5 [m] de largo, expandidos en sus extremos a sendas placas perforadas, circulares; cubierto externamente con un cilindro del diámetro de las placas y que conforma la calandria. El haz tubular tiene una perforación de mayor diámetro 200 – 300 [mm], que puede ser concéntrica a la placa o no, por donde se produce la recirculación interna del jugo; mezclándose una cantidad apreciable al jugo concentrado con el que va ingresando, de menor concentración.

Sobre la calandria va otro cilindro donde se produce el desprendimiento de los vahos generados por la ebullición llamada cámara de vapor, con un separador de gotas en la parte más alta de ella. Hay algunos diseños en que la calandria va separada del domo.

Las ventajas del evaporador Robert son: valores de k altos con diferencias altas de temperatura; baja altura hidrostática; fácil limpieza mecánica; costos relativamente bajos; simple operación y fácil automatización.

Las desventajas principales son: transferencia de calor pobre a bajas temperaturas y bajos t ; requieren de mayor espacio; mala transferencia de calor para líquidos viscosos; alta permanencia del jugo en el equipo, 30 – 45 [min].

3.8.6.2 Evaporador de film descendente

Este tipo de evaporador se encuentra en el IV efecto de Curicó, hay estaciones evaporadoras formadas sólo por este tipo.

En estos equipos el haz de tubos, generalmente 8 – 12 [m] está en la parte superior del equipo, y la cámara de vahos en la parte inferior, o a veces está unida lateralmente en la parte inferior del haz de tubos entrando los vahos en forma tangencial a la cámara.

En este vaporador el jugo ingresa por la parte superior del haz de tubos, y desciende por las paredes del tubo como un film. Este desciende, por efecto de la gravedad, en una capa fina moviéndose a cierta velocidad, dando como resultado un buen k, y además un reducido tiempo de contacto.

No tiene una presión hidrostática que aumente un punto de ebullición; esto permite usar menores diferencias de temperaturas, con una ventaja desde el punto de vista del color.

La separación líquida/vahos se produce normalmente en la cámara inferior del vapor.

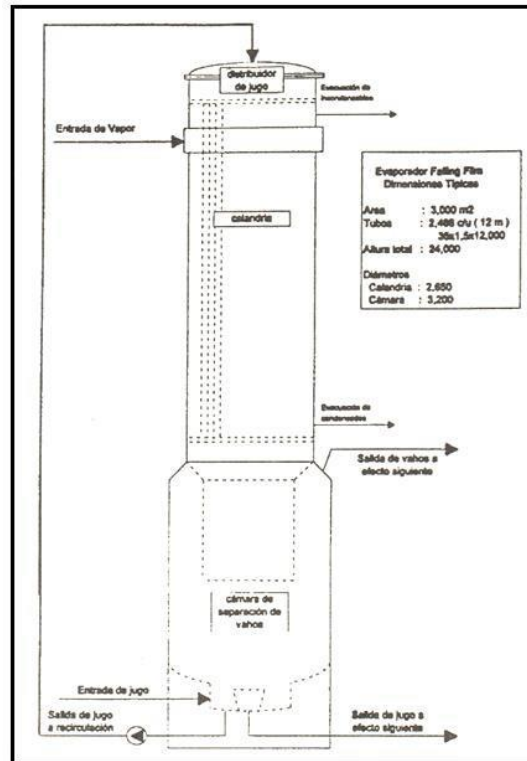


Fig. 15: Evaporador de flujo descendente.

Lo más importante en un evaporador falling-film o de un flujo descendente es mantener una capa de jugo uniforme y continuo a lo largo del tubo, a fin de evitar sectores no mojados que significan quemar el jugo y disminuir la superficie de vaporación. Para evitar este problema, en primer término, el haz de tubos debe estar absolutamente vertical, además el jugo debe ser distribuido uniformemente alrededor de la periferia de cada tubo y el flujo a cada tubo debe ser uniforme. Para cumplir con una buena distribución se han ideado una serie de soluciones mecánicas. Además, también hay recirculación con bombas, y algún sistema automático de control de flujo.

Las ventajas más interesantes de estos evaporadores son: buen valor de k ; operación satisfactoria a bajos t , buen manejo de jugos termosensibles y viscosos; no hay presión hidrostática; baja necesidad de espacio de acuerdo a superficie de calentamiento.

La desventaja fundamental es conseguir una buena y homogénea distribución del jugo en cada tubo; no son recomendables para flujos variables, a no ser que esté automatizada la posibilidad de inyectar jugo directo o agua.

3.8.6.3 Evaporadores Zsigmond

Se han desarrollado algunos evaporadores en el último tiempo, que aprovechan las ventajas de unos y otros tipos para conformar un equipo con mejores características.

Uno de ellos es el evaporador Zsigmond. El cual se ha instalado una pieza helicoidal dentro de cada tubo en todas las etapas a fin de mantener siempre alta la velocidad del jugo, aumentando la turbulencia y con ello el k que llega a ser 30 – 60% mayor que en los Robert. Estos se usaban para concentrar jugo de tomate y se adaptaron a la industria azucarera por Zsigmond en Hungría. [8]

En este sistema se ha combinado evaporadores de tubos cortos, en que el jugo está obligado a pasar por varios haces de tubos, comunicados en serie, en los que está subdividida la calandria de cada etapa. Habitualmente el último efecto, o cuando el jugo ya está más viscoso, se usa un evaporador de flujo descendente con un helicoide en cada tubo, con recirculación.

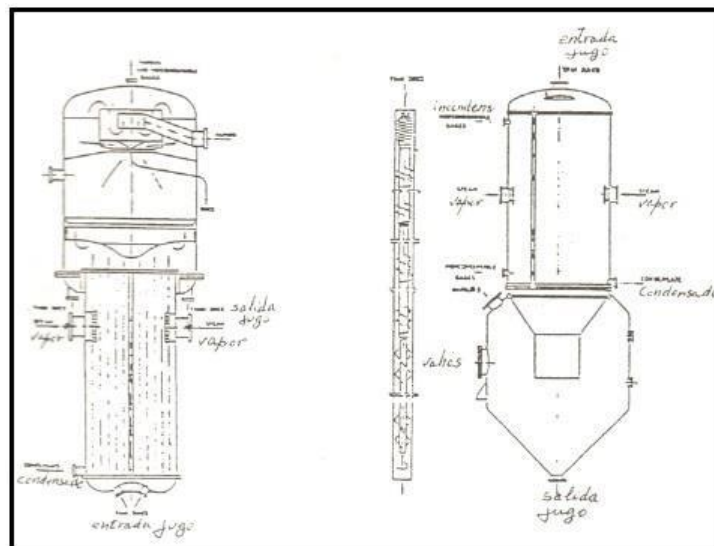


Fig. 16: Evaporadores Zsigmond.

Debido a la mayor concentración media del jugo, su menor nivel de los tubos y la mayor circulación en ellos, la permanencia del jugo en el evaporador es muy corta, del orden de 7 minutos. Por este hecho la destrucción térmica de sacarosa en ellos es de 0,02% s.R contra 0,15% s.R en un Robert, y el aumento de color es de sólo 1/6 comparado con el Robert.

Tiene el inconveniente de un mayor costo de inversión, y la susceptibilidad de ensuciamiento de la superficie de calentamiento con los problemas consecuentes para efectuar limpieza mecánica, ya que significa sacar todos los helicoides.

La Planta de Curicó se inició con una evaporación Zsigmond típica, pero debido a problemas presentados en la operación de ellos fue modificada, construyendo incluso 4 efectos, de flujo descendente, en el país.

3.8.6.4 Evaporadores de Placas

Otro equipo de más reciente es el evaporador de placas. En éste la superficie de calentamiento no es un haz tubular, sino que es un tipo de intercambiador de placas corrugadas de un espesor muy bajo 0,6 – 0,8 [mm] y una capa de jugo también muy pequeña. La mezcla de jugo y vapor producida en el intercambiador es expandida en una cámara de vapor contigua, en donde se produce la separación de vahos y jugo concentrado. El paso del jugo por las placas se produce por medio de una bomba, que le da a su vez una gran velocidad de paso con un k excepcional.

Las ventajas del evaporador de placas son: bajo costo de instalación incluso en inoxidable comparado con Robert y Falling-film; la capacidad es muy flexible, se agregan o sacan placas; áreas importantes de transferencia se puede disponer en un pequeño volumen; excelentes k ; son menos susceptibles al ensuciamiento e incrustaciones debido a la velocidad del jugo; ocupan poco espacio; bajo tiempo de retención.

Las principales desventajas son: el punto débil está constituido por las empaquetaduras entre placas, las que se pueden romper, o morder con alguna frecuencia, por lo cual consume un poco más de mano de obra y repuestos que otros.

Estos evaporadores se pueden instalar para complementar alguna etapa deficitaria en superficie, es una buena solución para aumentar la capacidad de instalaciones existentes. En el caso el evaporador se instala al lado del evaporador existente (Robert), conectado al fondo de éste para traspasar el jugo y usar la cámara para separar el jugo y vahos. Esta es la forma en que se ha instalado en la Planta de Ñuble.

3.8.7 Problemas más frecuentes en evaporación

Algunos problemas que se producen en la operación de la Estación Evaporadora se muestran a continuación:

Se detiene la bomba de jugo claro por problemas mecánico o eléctrico y no parte bomba de reserva. En este caso el peligro es que como no hay ingreso de jugo a la estación se queme el azúcar del jugo y además aumenta la presión, especialmente en el primer efecto. [4]

Para evitar lo anterior es necesario botar a la atmósfera el vapor de ingreso al primer efecto y cerrar el adicional a las calderas. Si el problema es para largo debe, además, abrirse los otros cuerpos también a la atmósfera, tratando de mantener la presión y cerrar consumos de vahos para evitar que disminuya peligrosamente el nivel de jugo en los evaporadores.

En caso de una disminución muy importante del jugo en el evaporador se puede agregar agua, con mucho cuidado, directamente de él interior de él por medio del circuito que tiene cada efecto. Una vez que se pone nuevamente en servicio la bomba de jugo claro se reinicia la evaporación.

Caída de servicio, se produce un problema semejante al anterior, pero agravado porque se detiene toda la fábrica y bajan violentamente los consumos de vahos. La solución es parecida a la anterior, pero desde el inicio se conectan todos los efectos a la atmósfera y se abre la válvula de escape de turbina a la atmósfera. Se espera hasta que se reinicie la generación en turbinas, momento en el cual se comienza a cerrar la válvula de escape de turbina a la atmósfera lentamente hasta que se restablece todo el sistema.

Disminución del vacío, este problema se traduce en aumento de la temperatura y presión en el IV efecto, lo cual hace aumentar también estas mismas variables en los otros cuerpos de la Estación Evaporadora, con la consecuencia de caramelización del azúcar en el jugo (color), especialmente en el cuarto efecto. Al mismo tiempo la concentración del jugo denso baja porque el agua evaporada es menor.

Es preciso disminuir el ingreso de vapor al primer efecto a fin de normalizar las presiones. Puede existir el peligro de caída de turbinas por sobrepresión en el primer efecto. Es necesario buscar la causa y solucionar rápidamente el problema.

Falla de jugo, si es un problema momentáneo, en ese caso es necesario agregar la cantidad justa de agua al estanque de jugo claro. En algunas plantas hay un sistema automático de agregado de agua al tanque de jugo claro cuando éste baja de cierto nivel.

Golpes de ariete, este ruido característico se produce porque no se evacúa adecuadamente el condensado producido en los evaporadores, precalentadores o tachos cocedores. Es necesario ubicar el lugar donde se produce este problema revisando las trampas de vapor y sistemas de evacuación de condensado. Estos golpes pueden ser tan fuertes que pueden romper cañerías e incluso equipos si es que aumentan su intensidad.

3.9 Cristalización

Esta etapa es muy importante porque en ella la azúcar disuelta se cristaliza al estado que todos la conocemos. La finalidad del proceso de cristalización en la industria azucarera, es separar en forma cristalina el azúcar de los jugos o siropos que la contienen, por medio de la evaporación del agua, tratando de obtener un

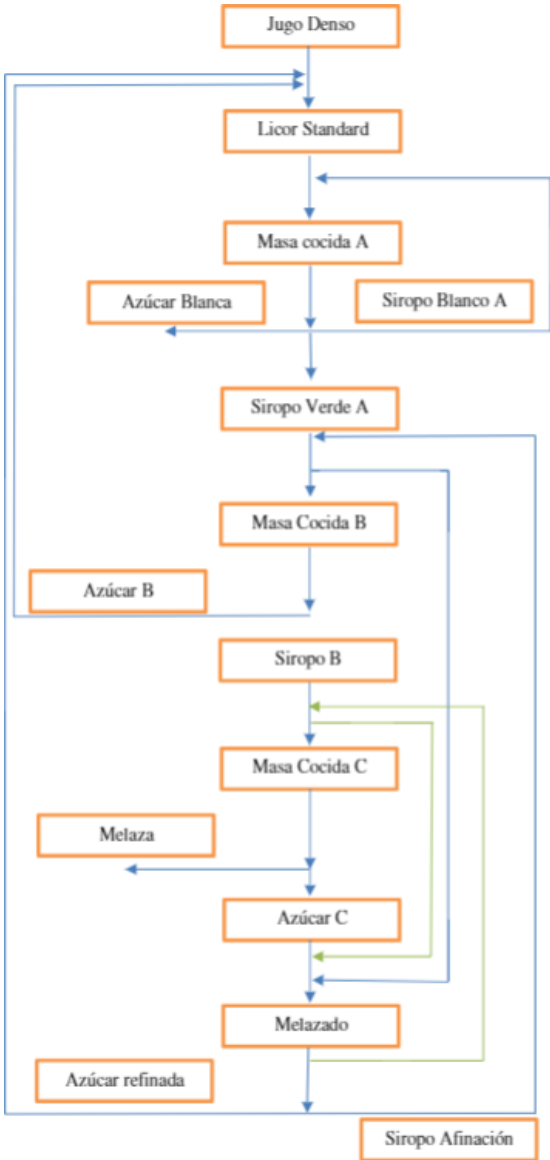


Fig. 17: Etapa de cristalización.

Flujo normal

Flujo eventual

rendimiento lo más alto posible. Esta cristalización se hace en tres etapas sucesivas, con centrifugaciones intermedias. En términos amplios se puede decir que este proceso corresponde a una purificación por cristalización. [En la Figura 4 siguiente se puede visualizar esta etapa.

El jugo concentrado o jugo denso que sale del último cuerpo de la estación evaporadora, se mezcla con un azúcar amarillo. Que ya veremos de donde ale, ésta se disuelve en él y forma el licor standard que tiene habitualmente 62 a 66% Bx. Se filtra para eliminar el material en suspensión en los filtros bujías, o filtros vela monofilamentos. Este licor o jarabe standard se introduce en los tachos de cocimiento A. En ellos continúa la evaporación con un fuerte vacío para evitar que se caramelicé el azúcar, además de agitación interna que ayuda a la evaporación.

La evaporación se continúa y se concentra hasta un punto tal que introduciendo unos cristales muy finitos de azúcar, slurry u otra forma, se comienza a depositar el azúcar del L. St. Se vuelve a chupar un poco más de éste al tacho cocedor, se concentra y vuelve a depositarse azúcar en los cristalitas. Sigue así el proceso hasta llegar al tamaño deseado de cristales. En ese momento se detiene el conocimiento, se corta vapor y vacío y se baja la masa cocida (mezcla de cristales de azúcar y jarabe) al cristalizador.

Desde allí pasa a las centrífugas A donde se separan los cristales del jarabe. El azúcar se seca y envasa.

Con el jarabe separado en las centrífugas A se vuelve a cristalizar azúcar en una forma similar a la anterior, dando el cocimiento B cuya azúcar es amarilla y se disuelve en el jugo denso.

El siropo o jarabe del cocimiento B, separado en las centrífugas correspondientes, se vuelve a cristalizar dando la masa cocida C, cuya azúcar es más amarilla que la anterior. Esta mezcla con siropo para “lavarla”, haciendo una masa cocida artificial, luego se centrifuga dando azúcar C afinada que se disuelve en el jugo denso, y siropo de afinación, el que se cristaliza en C.

El siropo o jarabe que entrega el cocimiento C a centrifugarse es la melaza, lo que es otro de los subproductos de la fabricación. Esta se usa para hacer alcohol, levadura, complemento de forraje, etc. [5]

3.9.1 Consideraciones preliminares

3.9.1.1 Terminología

A fin de comprender mejor los términos que se usarán en este tema, se definirán algunos de ellos:

- Cocimiento [8]: Proceso de cristalización de azúcar. En la práctica se efectúa en varias etapas o cocimientos, generalmente tres A, B, C. Los siropos separados se recristalizan repetidamente hasta dar melaza.
- Masa cocida [8]: Producto resultante del cocimiento compuesto por cristales de azúcar y aguas madres o siropo.
- Licor Standard [8]: Mezcla de jugo denso donde se ha disuelto azúcar B y azúcar C afinada, en algunos casos también siropo B.A.
- Tacho Cocedor [8]: Es el equipo donde se realiza el proceso de cristalización por evaporación, al vacío.
- Cristalizador [8]: Equipo donde se recibe la masa cocida, y se produce una cristalización por enfriamiento, especialmente con cocimiento C.
- Cocedor: Operador del tacho cocedor y conductor de cocimiento.
- Siropo verde [8]: Corresponde a la solución saturada que resulta al separar el azúcar de las aguas madres, en la centrífuga, antes del agregado de agua. Normalmente, en IANSA, sólo en cocimiento A.
- Siropo blanco [8]: Siropo que resulta al centrifugar a la masa cocida, después del agregado del agua. Normalmente, en IANSA, sólo en cocimiento A.
- Afinación [8]: Mezcla de azúcar del cocimiento C con siropo B, a fin de aumentar la pureza del azúcar C. También se le llama malaxado.
- Malaxador [8]: Equipo donde se efectúa la mezcla anterior; se produce una “masa cocida” por mezclado.
- Siropo de afinación [8]: Corresponde a las aguas madres o siropo resultante al centrifugar la afinación.
- Melaza [8]: Siropo correspondiente a la centrifugación del cocimiento C. Se han concentrado todos los azúcares remanentes en el proceso.
-

3.9.1.2 Generalidades

La cristalización del azúcar es un proceso complejo y debe ser conducido cuidadosamente para conseguir buenos resultados. Son tantas las variables que inciden en él que es necesario disponer de un período suficiente de práctica para manejarlo en buena forma.

Pero, a pesar de ello, siempre hay variaciones en la calidad de los siropos que interfieren con el buen desarrollo y resultado de un cocimiento, haciéndolo un poco más complicado de manejar. Como, por ejemplo: si por circunstancias especiales varía la viscosidad normal de los siropos, como el control ha sido sólo de tipo visual y táctil, se falsea la apreciación y con ellos los resultados no son los óptimos para esas condiciones. [8]

Felizmente los avances técnicos en materia de instrumentación y automatización han venido también a cooperar con el trabajo del cocedor. Este tiene ahora en ellos una ayuda valiosísima para desarrollar y controlar mejor su proceso. Para esto es importante comprender la parte teórica de los cocimientos y cómo los instrumentos colaboran en la conducción de ellos.

Como se ha mencionado anteriormente, el producto obtenido al fin del cocimiento se llama masa cocida y consiste en una mezcla de cristales de azúcar y un siropo madre. El siropo madre es agua remanente en la cual quedan disueltos los no azúcares y además está saturada de azúcar. En este proceso se ha separado azúcar del siropo o L.S. original y el siropo que queda luego de la centrifugación, tiene una menor pureza debido a que quedan todos los no azúcares en él con lo cual la relación no-azúcares/azúcar aumenta. Lo mismo sucede con los cocimientos B y C.

3.9.2 Conceptos básicos

3.9.2.1 Solubilidad

Cuando una sustancia se disuelve en un líquido, se forma una solución de esa sustancia o soluto, en el líquido o disolvente o solvente.

Así cuando se disuelve sal común en agua, se produce una solución de sal. Lo mismo sucede al revolver azúcar con agua, la primera se disuelve en el agua y forma una solución de azúcar. En estos casos decimos que las sustancias o solutos son solubles en agua.

Cuando revolvemos piedra caliza molida con agua, vemos que no se disuelve y se dice que esa sustancia es insoluble en agua.

Se llama solubilidad de una sustancia o soluto en un líquido, agua para nuestro caso, a la cantidad de esa sustancia que es capaz de disolver una determinada cantidad de agua a una temperatura determinada. Normalmente la cantidad de sustancia que se puede disolver en una misma cantidad de agua, o solubilidad, aumenta al aumentar la temperatura y disminuye al bajar la temperatura.

Con el azúcar pasa exactamente lo indicado anteriormente, y su solubilidad aumenta considerablemente al aumentar la temperatura. Así se habla de coeficiente de solubilidad para expresar los gramos de azúcar que se pueden disolver por 100 gr. de agua, o por gramo de agua.

En la tabla 11 se indican los valores de solubilidad de azúcar pura, preparados por Vavrincez, expresados en gr. de azúcar pura por 100 gr. de agua.

CUADRO 1 - SOLUBILIDAD DE SACAROSA EN AGUA TABLA DE VAVRINECZ, ADOPTADA TENTATIVAMENTE POR ICUMSA								
t°C	S gr.		t°C	S gr.		t°C	S gr.	
	A	100 gr.		A	100 gr.		A	100 gr.
-4	178.89		31	217.07		66	309.66	
-3	179.44		32	218.62		67	313.43	
-2	180.03		33	220.62		68	317.27	
-1	180.64		34	222.46		69	321.17	
0	181.27		35	224.36		70	325.15	
1	181.93		36	226.29		71	329.20	
2	182.62		37	228.27		72	333.33	
3	183.35		38	230.28		73	337.52	
4	184.11		39	232.37		74	341.79	
5	184.89		40	234.50		75	346.15	
6	185.70		41	236.68		76	350.58	
7	186.54		42	238.90		77	355.08	
8	187.41		43	241.16		78	359.64	
9	188.32		44	243.50		79	364.27	
10	189.26		45	245.89		80	368.99	
11	190.23		46	248.32		81	373.78	
12	191.23		47	250.82		82	378.65	
13	192.27		48	253.37		83	383.58	
14	193.33		49	255.97		84	388.59	
15	194.44		50	258.63		85	393.68	
16	195.58		51	261.34		86	398.82	
17	196.75		52	264.11		87	404.01	
18	197.95		53	266.96		88	409.26	
19	199.19		54	269.86		89	414.64	
20	200.47		55	272.81		90	420.04	
21	201.79		56	275.84		91	425.48	
22	203.13		57	278.92		92	430.96	
23	204.52		58	282.07		93	436.51	
24	205.94		59	285.28		94	442.12	
25	207.43		60	288.56		95	447.75	
26	208.93		61	291.90		96	453.40	
27	210.47		62	295.32		97	459.09	
28	212.06		63	298.82		98	464.84	
29	213.68		64	302.36		99	470.59	
30	215.35		65	305.96		100	467.34	

Tabla 3: Solubilidad de sacarosa en agua, tabla de Vavrincez.

En este cuadro se puede ver claramente la influencia de la temperatura sobre la solubilidad del azúcar.

3.9.2.2 Soluciones saturadas

Se dice que una solución de azúcar, pura o impura, está saturada cuando al colocar cristales de azúcar en ella, éstos no se disuelven ni aumentan de tamaño, o dicho de otra manera, la capacidad que tiene el agua para disolver azúcar a esa temperatura está copada.

Ahora bien, es interesante aclarar en este momento que la solubilidad del azúcar es diferente en soluciones puras (agua + azúcar) que en soluciones impuras (jugos, siropos, etc.), o sea cuando es sólo agua + azúcar, hablando siempre de soluciones saturadas.

En la Figura 18 se indica un gráfico con las curvas de solubilidad de azúcar [8] a diferentes temperaturas y purezas, en el que se puede ver claramente la influencia de la pureza y de la temperatura sobre la solubilidad del azúcar.

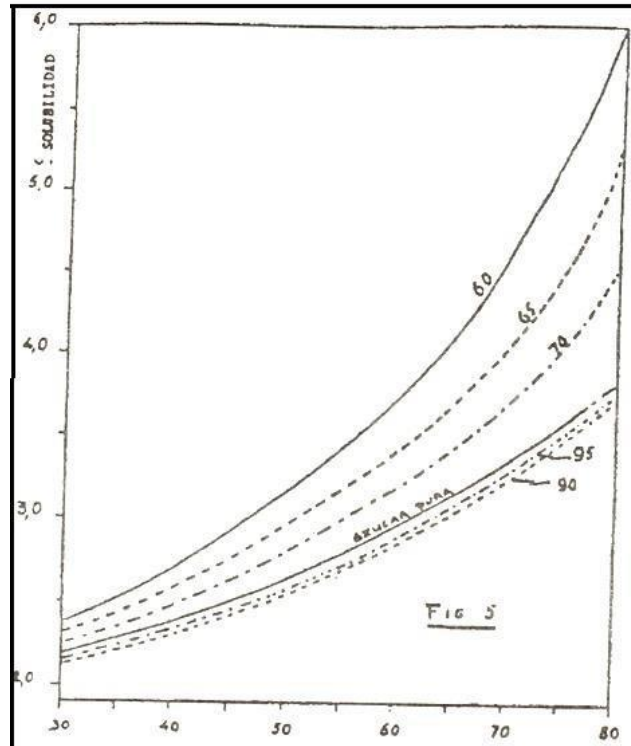


Fig. 18: Solubilidad de la sacarosa en relación con la pureza y temperatura.

De las curvas se deduce que hay una disminución de la solubilidad de purezas entre 80% y 100%; por debajo de 80% aumenta considerablemente la solubilidad del azúcar, alcanzando valores bastantes mayores a purezas de 60%. Esto explica una parte de la dificultad de cristalizar más las masas a medida que disminuye la pureza.

Por medio de un ejemplo se explica mejor lo que sucede con una solución saturada al variar la temperatura.

Si se tiene una solución de azúcar saturada a 20° C y se calienta hasta 50° C, y se va agregando azúcar y revolviendo, vemos que se sigue disolviendo, y se disuelve hasta que esta solución a 50° C alcance su nuevo nivel de saturación. Si esta medida solución se calienta a 70° C podemos seguir disolviendo azúcar hasta alcanzar el nuevo nivel de saturación, o el nivel de saturación correspondiente a esa temperatura.

Esto quiere decir en términos reales, y de acuerdo a la figura X, que en las soluciones saturadas mencionadas la materia seca, Bx ó r, es a:

$$20^{\circ} \text{ C} = 66,7\%$$

$$50^{\circ} \text{ C} = 72,1\%$$

$$70^{\circ} \text{ C} = 76,5\%$$

Y la cantidad de azúcar disuelta por kg. de agua es:

$$\text{a } 20^{\circ} \text{ C} = 2,005 \text{ [kg]}$$

$$50^{\circ} \text{ C} = 2,586 \text{ [kg]}$$

$$70^{\circ} \text{ C} = 3,252 \text{ [kg]}$$

Ahora bien, si esta misma solución que está saturada a 70° C se enfría hasta 50° , teóricamente se produce el proceso inverso, o sea parte del azúcar abandonada la solución y cristaliza, esto quiere decir que por cada kg. de agua presente debe cristalizar $(3,252 - 2,586) = 0,666 \text{ [kg]}$ de azúcar, y la solución que queda está saturada a 50° C ; si ésta se sigue enfriando más, entregará más azúcar cristalizada. Para llegar a obtener toda la azúcar cristalizada teórica, transcurre un cierto tiempo, en el cual a pesar de estar a 50° C hay en solución más que $2,586 \text{ [kg]}$ de azúcar por kg. de agua, a esta solución se le llama sobresaturada. Ese tiempo depende fundamentalmente de la viscosidad de la solución.

Esto es muy importante y es la etapa de cristalización por enfriamiento que se produce en los cristalizadores en todas las Plantas.

3.9.2.3 Soluciones sobresaturadas

Una solución sobresaturada contiene más azúcar disuelta que una saturada. Este fenómeno se presenta en las soluciones de azúcar como se vio más arriba. En este tipo de solución, un cristal puesto en contacto con ella no se disuelve, sino que crece. Este es el método de cristalizar en los tachos de vacío. O sea, que para permitir la cristalización del azúcar del L.S. o siropos tiene que existir una “fuerza impulsora” que se llama sobresaturación. Los cristales no pueden formarse ni crecer a no ser que la solución esté sobresaturada, si está solamente saturada ya se ha mencionado que el cristal no aumenta de tamaño. Si está subsaturada, menos que saturada, los cristales se disuelven ya que el agua aún puede disolver una mayor cantidad de azúcar.

En este tipo de disolución también influye la temperatura; una solución que está sobresaturada a 40° C si se calienta a 60° C ya no está sobresaturada; de igual manera una solución que no está sobresaturada al bajar la temperatura se convierte en sobresaturada, dependiendo indudablemente de la concentración que tenga.

3.9.2.3.1 Grados de sobresaturación

Hay diversos niveles de sobresaturación y a estos se les llama grado de sobresaturación.

Este es menor que 1 cuando la solución es subsaturada; es igual a 1 para soluciones saturadas, y mayor que 1 para soluciones sobresaturadas.

Aclarando más el concepto, el grado de sobresaturación se expresa en forma de relación con una solución o sirope saturado de las mismas condiciones. Es decir, se compara la cantidad real de azúcar disuelta que contiene un sirope, contra la cantidad de azúcar que tendría un sirope de esa misma pureza y temperatura, pero saturado con azúcar. Para la saturación se da valor 1, y el grado de sobresaturación indica las veces que hay más azúcar disuelta en el sirope sobresaturado que en el saturado. Por ejemplo, un sirope con sobresaturación de 1,2 indica que hay 20% más de azúcar disuelta que si estuviese saturado y para los siguientes valores indica:

0,9 Subsaturada

1,0 Saturada

1,1 0% más que saturada

1,3 30% más que saturada

1,4 40% más que saturada

Posteriormente se verá la importancia de este concepto.

3.9.2.4 Viscosidad

Se define como la resistencia que ofrece una parte del fluido para deslizarse sobre otra parte de él. Se expresa como η . La viscosidad es producida por el esfuerzo de corte al mover una capa de fluido sobre otra. Se expresa en diferentes unidades que no vienen al caso. [5]

La viscosidad juega un papel importante en diferentes etapas de la producción de azúcar como filtración, cristalización, centrifugación y agotamiento de melaza.

La viscosidad disminuye está influenciada también por la temperatura, a mayor temperatura la viscosidad disminuye, a menor temperatura la viscosidad aumenta considerablemente. Al bajar la masa cocida C influye relativamente bien, alrededor 65 – 70° C, en cambio cuando está en los cristalizadores/enfriadores fluye mucho más lentamente debido a la menor temperatura que tiene.

3.9.2.5 Variables de cristalización

La producción de cristales de azúcar a partir de las soluciones se basa en la capacidad que tiene la sacarosa para cristalizar a concentraciones suficientemente altas.

En esta cristalización se produce en primera instancia un núcleo de cristal, el crecimiento de él se produce cuando el licor standard o siropo tiene una concentración tan alta que comienza a traspasar sacarosa al cristal. La diferencia de concentración es la fuerza motora que produce esta transferencia de azúcar. Una diferencia positiva sobresaturación, hace crecer al cristal; una diferencia negativa, subsaturación, lo disuelve.

3.9.2.5.1 Grados o zonas de sobresaturación

La definición de este concepto ya ha sido dada. De acuerdo a ello en el gráfico de solubilidad se puede identificar cuatro importantes y que tiene diferentes características en relación directa con la nucleación o cristalización del azúcar. En la Figura 19 se señala en un gráfico las zonas de sobresaturación.

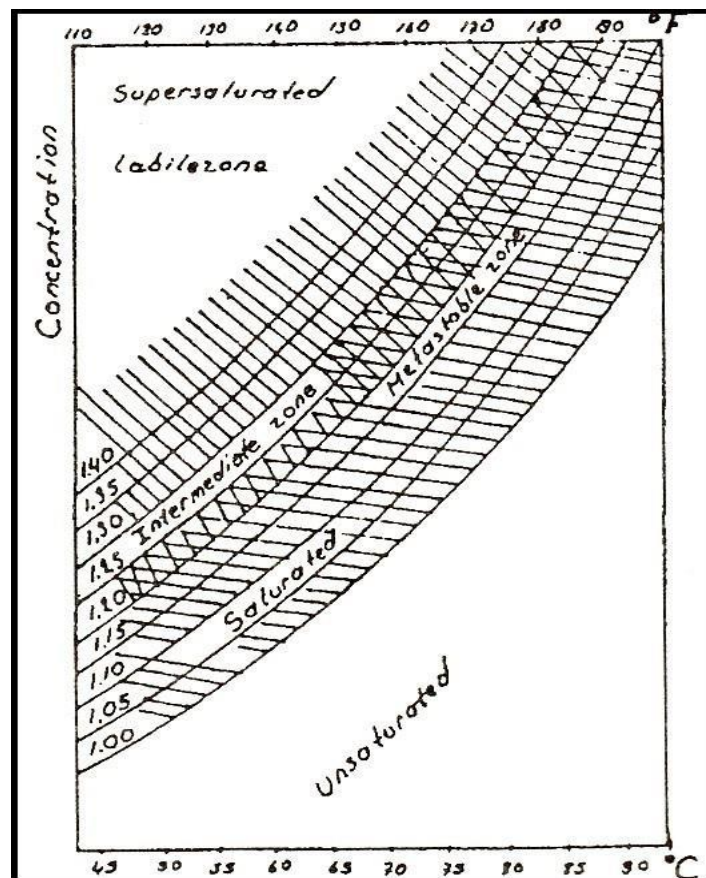


Fig. 19: Zonas de sobresaturación.

En el gráfico se puede diferenciar las cuatro zonas siguientes:

Zona 1 subsaturada: Sobre saturación menor que 1,0. Los cristales de azúcar se disuelven, no hay nucleación o cristalización.

Zona 2 metaestable: Sobresaturación entre 1,0 y 1,2. La nucleación no se produce espontáneamente. Los cristales existentes crecen a expensas del azúcar en solución. El número de cristales finales es igual a la cantidad sembrada. Es la zona ideal para conducir un cocimiento.

Zona 3 intermedia: Sobresaturación entre 1,2 y 1,3. La solución contiene 20 a 30% más azúcar que una saturada. No hay formación espontánea de cristales, sólo un shock o cristales agregados actúan como la fuerza dirigida para formar nuevos cristales.

Zona 4 lábil: Sobresaturación mayor que 1,3. En esta zona se produce cristalización espontánea.

Los estudios efectuados sobre la cristalización demuestran que el cuadro es bastante más complejo. Las zonas están realmente presentes, pero no se producen separaciones nítidas entre ellas, lo cual es dependiente de las sustancias cristalizables, la densidad o población de semilla, la velocidad de cambio de saturación, la calidad y cantidad de no-azúcares, la agitación, etc.

Los tachos cocedores modernos operan en la región metaestable.

Algunos cocimientos continuos operan en la zona intermedia. Otros procedimientos para cocimientos continuos se han diseñado para condiciones totalmente metaestables. Hay otros tipos de sistemas que utilizan ambas zonas.

Algunos cocedores (operador de cocimiento) producen un deliberado estado de desequilibrio a fin de formar espontáneamente cristales.

De los que se ha dicho anteriormente queda claro que la zona más cómoda, segura eficiente para desarrollar el proceso de cristalización de azúcar, es la zona metaestable, cantidad necesaria de semilla homogénea y se puede obtener un cristal bastante uniforme y del tamaño programado.

3.9.2.5.2 Velocidad de cristalización

La velocidad a la cual se deposita el azúcar en solución sobre los cristales en suspensión depende de dos fenómenos diferentes:

- Velocidad de difusión de las moléculas de sacarosa a través de la capa de licor standard o sirope en contacto con la superficie del sólido.
- Velocidad media de crecimiento de cristal. Introducción de moléculas de sacarosa en el cristal.

Se han efectuado experiencias para determinar la velocidad de crecimiento de los cristales de azúcar a diferentes concentraciones de azúcar pura, y a distintas temperaturas. Los resultados muestran que para una misma concentración de azúcar la velocidad de crecimiento aumenta a medida que disminuye la temperatura.

3.9.2.5.2.1 Factores que afectan la velocidad de cristalización

Existen diversos que afectan de una u otra manera la velocidad de cristalización de la sacarosa. A continuación, se indicarán algunos de ellos.

3.9.2.5.2.1.1 Sobresaturación

De acuerdo con lo indicado precedentemente en, y la experiencia de muchas investigaciones es claro que la velocidad de cristalización se incrementa proporcionalmente con la sobresaturación, lo cual se puede apreciar en la figura 20 donde se señalan velocidades de cristalización en función de la sobresaturación para tres diferentes purezas de jugo.

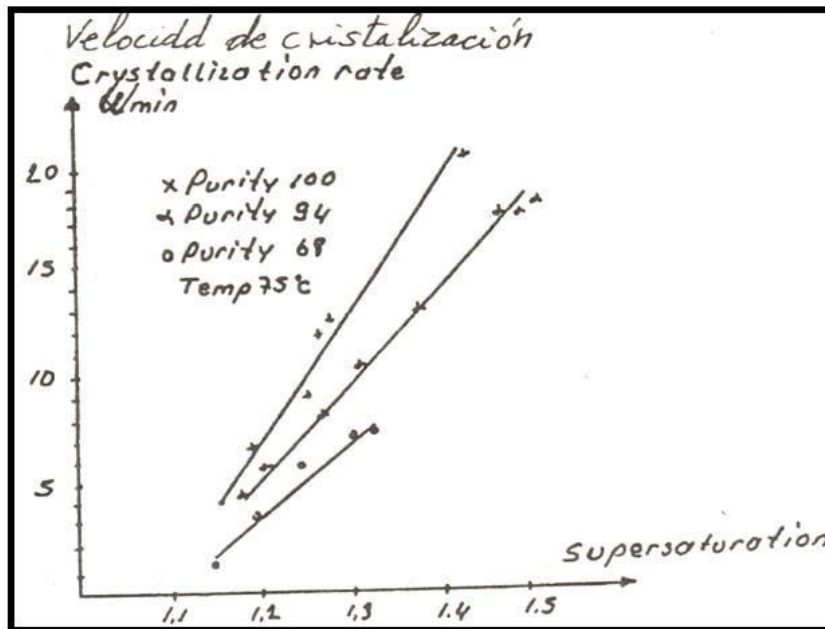


Fig. 20: Sobresaturación vs velocidad de cristalización para 3 valores de pureza.

En la figura 21 se ve claramente que al aumentar el grado de sobresaturación la velocidad de cristalización también se incrementa. Por otra parte, el siropo o jarabe alrededor del cristal pierde azúcar con lo cual baja la sobresaturación; por esto es importante que los cristales de azúcar estén continuamente en contacto con siropo sobresaturado que le permita tener altas velocidades de cristalización. [5]

Si la sobresaturación aumenta mucho, por evaporación o por enfriamiento, se llega a la zona lábil con formación espontánea de cristales, y los existentes crecen a menor velocidad, produciéndose así cristales desuniformes y con el polvillo.

3.9.2.5.2.1.2 Temperatura

En la Figura 22 se señala la influencia de la temperatura sobre la velocidad e cristalización para dos diferentes curvas de sobresaturación, para soluciones de sacarosa pura.

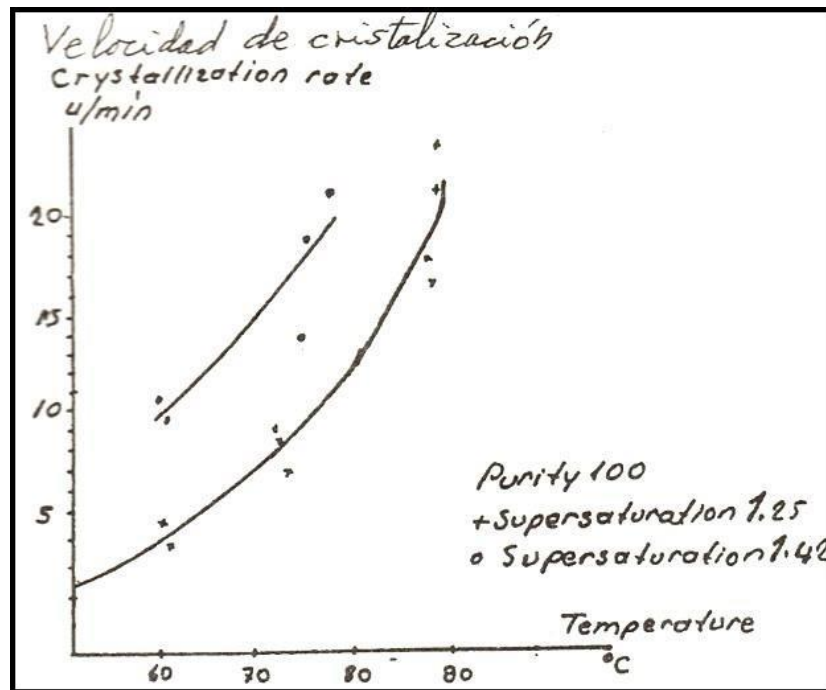


Fig. 21: Influencia de la temperatura sobre la velocidad de cristalización.

De las curvas se deduce que, para una sobresaturación dada, al aumentar la temperatura la viscosidad disminuye y con ello aumenta la velocidad de cristalización. Este aumento de temperatura tiene un límite, que está dado por el aumento de color en azúcar, por ello que no se debería subir de los 75 – 80 ° C en los tachos de vacío.

3.9.2.5.2.1.3 Influencia del pH

Se ha determinado un efecto desfavorable de la alcalinidad sobre la cristalización. A un pH de 7,0 se consigue una buena velocidad de cristalización. A pH 8,0 disminuye, aunque todavía tiene una velocidad razonable; a pH 9,0 disminuye más aún y sigue disminuyendo a un pH superior.

3.9.2.5.2.1.4 Pureza

Los no-azúcares o no-sacarosa contenidos en los siropos aumentan la solubilidad del azúcar y aumentan la viscosidad de los siropos; por lo tanto a medida que la pureza disminuye se debe conseguir una mayor sobresaturación para cristalizar el azúcar, masas B y C.

Al mismo tiempo la velocidad de cristalización disminuye al disminuir la pureza relacionada también con el aumento de la viscosidad.

Algunas impurezas sólidas quedan incorporadas dentro del cristal de azúcar, el desarrollo de ello se ven en la figura 22.

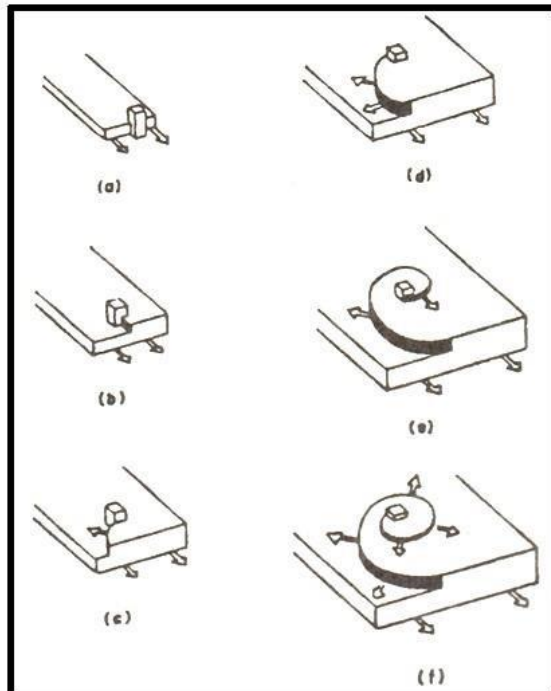


Fig. 22: Inclusión de partículas extrañas en una copa de cristal.

La cristalización es una forma de purificación y provee un factor de eliminación de 99,5 a 99,7% para la mayoría de las impurezas. Hay que recordar que a refinería ingresa jugo denso con alrededor de 93% de pureza y sale azúcar cristalizada con 100% de pureza prácticamente.

3.9.2.5.2.1.5 Agitación

La agitación del sirope en la zona de contacto con el cristal, tiene por efecto facilitar la renovación de la capa de sirope menos concentrado.

Esta agitación del sirope en la zona de contacto con el cristal, tiene por efecto facilitar la renovación de la capa de sirope menos concentrado.

Esta agitación es eficaz sólo si se produce un movimiento diferente entre el sirope y los cristales. Esta es una condición difícil de realizar en la práctica, pues estando los cristales en suspensión en el sirope son arrastrados por éste, lo que disminuye bastante el efecto de la agitación sin suprimir, por otra parte, su eficacia.

Se han realizado experiencias sobre la velocidad lineal de crecimiento con un cristal inmóvil y un sirope puro agitado con una temperatura de 50° C. El resultado se indica a continuación:

	Velocidad lineal	Coefficiente de aumento de velocidad
En reposo	0,20	1,0
Agitación lenta	0,36	1,8
Agitación rápida	0,64	3,2

Tabla 4: Velocidad lineal y coeficiente de aumento de velocidad.

La agitación más eficaz es la que se produce por efecto de la ebullición, debido al movimiento que producen las burbujas de vapor en el seno del cocimiento al ascender. En los tachos con revolvedores mecánicos, estos mejoran la agitación del cocimiento, más que nada por aumentar el intercambio calórico k , en la superficie de calentamiento de los equipos de cocción, con lo cual aumenta la evaporación y el movimiento interno de la masa. Además, está bastante claro que esta agitación hace disminuir notablemente la cantidad de conglomerados. [5]

Los conglomerados corresponden al crecimiento de dos o más cristales unidos. En esa unión se forman ángulos en donde queda sirope acumulado, el que a pesar del lavado en centrífugas permanece y hace aumentar color y cenizas en el producto final. Si la cantidad es importante además desmejora el aspecto visual y calidad del azúcar blanco.

3.9.2.5.3 Métodos de cristalización

Este tema se relaciona con la forma en que se producen cristales en el licor standard o siropo.

En general hay dos sistemas, hablando en forma muy general. Uno es por formación espontánea de cristales, o semillado interno, en la zona lábil, y el otro sistema es por semillado o agregado de cristales al cocimiento

3.9.2.5.3.1 Cristalización por semillado interno

Este sistema requiere una alta sobresaturación del siropo o L.S. y es poco manejable, por lo que no es práctica habitual en la industria azucarera. En este caso, como los cristales se forman espontáneamente, se producen dos inconvenientes: no se puede controlar la cantidad ni tampoco el tamaño, con lo cual los cristales que se obtienen de un cocimiento de esta naturaleza son muy irregulares.

En este caso sólo la experiencia de un buen cocedor permite manejar un cocimiento semillado de esta manera, o una ayuda instrumental, con este sistema es inevitable la formación de conglomerados; este esquema es posible manejar sólo en purezas altas, no en cocimientos B ó C.

3.9.2.5.3.2 Cristalización por semillado externo

Esto se efectúa inyectando una pequeña cantidad de polvos de azúcar cuando el siropo L.S. ha alcanzado una sobresaturación correspondiente apenas a la zona intermedia que es más fácil manejo, en este caso asegurando sólo el crecimiento de los cristales inyectados, lo que se traduce en un cristal uniforme y de buena calidad. Posteriormente el crecimiento se sigue en la zona metaestable, con inyecciones de jugo o siropo y la consiguiente evaporación.

A este tipo de semillado se le llama inoculación o semillado de choque, haciéndose en la zona intermedia.

El mayor problema del semillado externo es la preparación de una semilla uniforme. Se han efectuado muchos desarrollos para obtener semilla adecuada. Existen molinos especiales que producen cristales muy finos, los que con un tamizado dan una semilla uniforme ± 10 [μm]. El problema de este producto es la tendencia a formar terrones uniformes de ± 10 [μm]. El problema de este producto es la tendencia a formar terrones con la humedad ambiente, lo cual se soluciona, en parte, adicionándose 1% de fosfato tricálcico.

Otro sistema de semillado es con “slurry”, el que se produce por molienda de azúcar blanca, mezclada con alcohol isopropílico, en molinos de bola. Normalmente se muele por un período de a lo menos 4 horas para

conseguir un tamaño uniforme. Después de la molienda se mantiene en botellas de plástico rotativas. Antes de agregar el slurry, éste se mezcla con glicerina saturada en azúcar.

El slurry es ampliamente utilizado por la uniformidad de cristales y casi ausencia de conglomerado. Además, por estar en alcohol se dispersa rápidamente en todo el pie de cocimiento. Normalmente se siembra en la zona metaestable.

Posteriormente se tratará el sistema actual con semillado manejado automáticamente en forma computacional.

3.9.2.5.3.2.1 Cantidad de semilla

Este es un punto importante de definir ya que, conduciendo el cocimiento en la zona metaestable, de él depende el número y tamaño de los cristales finales.

Determinando con un microscopio el tamaño de las semillas es posible calcular la relación entre tamaño medio de las semillas y la cantidad necesaria de ellas.

La cantidad de semilla se puede calcular con la fórmula siguiente:

$$m = \frac{K a^3}{B^3} [kg] \quad (26)$$

donde,

m, es la cantidad de semilla, [kg]

k, es el peso de cristales de azúcar en la masa cocida, [kg]. Se considera, habitualmente, como 50% de la capacidad del tacho cocedor.

a, es el tamaño del cristal de semilla, [mm]. Se determina en laboratorio con microscopio.

B, es el tamaño final del cristal de azúcar, [mm]. Se predefine.

Para simplicidad de aplicación de la fórmula se asume que los cristales son cúbicos.

Para:

$$A = 0,01 \text{ [mm]}$$

$$B = 1,0 \text{ [mm]}$$

$$K = 25.000 \text{ [kg]}$$

$$a = \frac{25000 \cdot 0,012^3}{1} = 0,025 \text{ [mm]}$$

Para $a = 0,02$ [mm] se requiere 200 [gr] de semilla con el fin de obtener la cantidad deseada de cristales.

El tema del sembrado es uno de los importantes en el proceso de cristalización si se quiere obtener un buen producto final, al menor costo y con un fácil manejo. Es habitual en algunas plantas utilizar polvillo de azúcar de la casa de azúcar con los siguientes inconvenientes:

No hay uniformidad de tamaño en la siembra.

Se siembra con una cantidad fijada “a ojo” por el cocedor, por lo tanto, lo más probable es que haya una cantidad mayor o menor que la necesaria.

El polvillo de azúcar lleva normalmente mucha cantidad de polvo y pelusas quedando incorporados muchas veces en el cristal.

Como la cantidad y el tamaño no son controlados el cocedor debe recurrir a crear la cantidad adicional de cristales que le faltan, o a disolver el exceso lo cual muchas veces se hace con agua aumentando el consumo de vapor.

3.9.2.6 Técnica de un cocimiento

A continuación, se revisa el operatorio general seguida para efectuar un cocimiento en tachos discontinuos, como los que hay en IANSA.

3.9.2.6.1 Tachos y cocedores

En las figuras 23 y 24 se señala esquemáticamente un tacho cocedor con circulación natural y otro con circulación forzada por medio de un agitador mecánico.

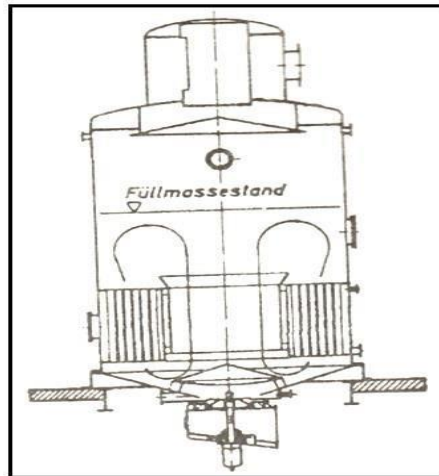


Fig. 23: Tacho con agitación natural.

El tacho cocedor discontinuo es en esencia un evaporador al vacío, esto con el fin de que el L.S. o sirope hierva a una temperatura baja y evitar caramelizaciones de azúcar. Además, tiene un sistema de descarga inferior para la masa cocida.

Incluye una toma muestra a fin de que el cocedor pueda ir extrayendo muestras del cocimiento para ver sobre un vidrio el avance de él.

Existen tachos con calandria flotante y con calandria fija. La idea de la calandria flotante, no adosada al manto del tacho, es aumentar la agitación y calentamiento creando un espacio anular entre manto y carcaza para el ingreso de los vahos, ahora se han modificado eliminando el muelle flotante, haciéndolo fijo. Los cocedores antiguos en IANSA recordarán los problemas derivados del fuelle.

En los de la circulación natural ésta se establece por la convección y por la ebullición de la masa.

Los tachos con agitación mecánica disponen de un revolvedor interno, con accionamiento externo, que mueve la masa completa mejorando notablemente la circulación de aquélla, y con ello la evaporación y cristalización.

Hay una gran cantidad de diseños tanto para los de circulación natural como en los tachos con agitación mecánica.

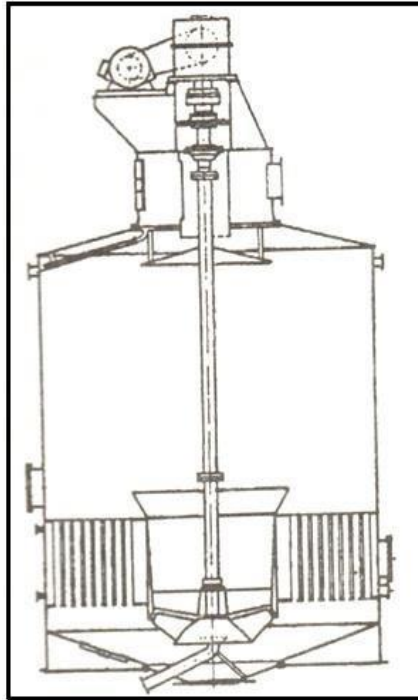


Fig. 24: Tacho con agitación mecánica.

3.9.2.6.2 Cristalización por evaporación en A

Corresponde a la cristalización producida en el tacho cocedor por evaporación al vacío. Se pueden distinguir las etapas siguientes para un cocimiento A:

- Formación del pie de cocimiento.
- Cristalización o siembra.
- Crecimiento del cristal.
- Apriete o concentración final.

3.9.2.6.2.1 Formación del pie de conocimiento

Esta etapa tiene por objeto concentrar el L.S. o sirope hasta la sobresaturación adecuada para la siembra. En esta etapa, una vez limpio y cerrado se hace el vacío, cuando éste está entre 300 – 500 [mm] se succiona L.S.

en una cantidad tal que cuando se haya concentrado hasta la sobresaturación adecuada quede un poco por sobre la calandria. También se puede hacer por medio de varias chupadas, consiguiéndose al final lo mismo. En esta etapa no se hace funcionar el agitador. [5]

En el comienzo de la succión debe abrirse de poco el vacío para evitar una violenta ebullición del L.S. que está caliente; una vez llenado el tacho a la altura conveniente se termina de abrir todo el vacío, y se le da vapor al tacho.

También es importante que el vacío se abra lentamente, para no afectar los otros tachos conectados a la misma columna. Para ello, los tachos automáticos disponen de una válvula de pre-vacío chica, de 50 a 100 mm, que llega hasta un vacío de 0,5 [atm sólo entonces se abre la válvula grande (lentamente)].

El vapor debe regularse de acuerdo al consumo total que haya en la estación de cocción en ese momento. Esta etapa de la concentración es la que mayor vaho consume, por lo cual debe ajustarse y combinarse los consumos de todos los tachos al vapor prefijado para la fábrica, lo que asegura mantener en equilibrio todo el consumo de vapor de la Planta, y por lo tanto la estación puede entregar un jugo denso de concentración pareja, lo que al mismo tiempo asegura una concentración pareja en L.S.

La concentración se hace con todo el vacío abierto, para asegurarse una temperatura bastante baja al comienzo $\pm 60^{\circ}\text{C}$, y que sube hasta $70 - 75^{\circ}\text{C}$, que es la temperatura de cristalización.

En tachos automáticos, el vacío es regulado en 0,2 a 0,25 [atm].

Es interesante ahora definir algunos puntos:

- La temperatura en un tacho se puede variar con el vacío cerrándolo (sube) o abriéndolo (baja).
- En condiciones normales la válvula de vacío se mantiene siempre total abierta. En tachos automáticos se regula al vacío.
- La temperatura en un tacho se puede variar con el vapor, abriendo la válvula (sube) o cerrándola (baja). Lo normal es regular con esta válvula, teniendo siempre a la vista mantener el equilibrio en el consumo de vapor de la estación de cocción. En tachos automáticos también se regula la presión en la calandria.
- La temperatura del L.S. o siropo que entre al tacho debe estar a lo menos unos 5°C sobre la temperatura del tacho, para asegurarse una autoevaluación (flash), lo que produce una agitación adicional dentro del tacho. Si entra más frío que lo que hay dentro del tacho, se produce un shock térmico, que si es importante puede formar cristales no deseados.

Volviendo a la formación del pie, la concentración se continúa hasta un punto adecuado de sobresaturación. Cuando la concentración está avanzando va disminuyendo el consumo de vapor del tacho con lo cual se puede ir abriendo paulatinamente la válvula de acuerdo al equilibrio.

3.9.2.6.2.2 Cristalización o siembra o formación del grano

Cuando la sobresaturación del pie es la adecuada se procede a la cristalización, o sea a introducir los núcleos cristalinos que luego crecerán a expensas de nuevos agregados de L.S. o sirope.

Para juzgar el punto adecuado de la sobresaturación para la cristalización existen varios criterios que son visuales o de tacto y dependen de cada cocedor:

- Por la forma de las burbujas.
- Por el escurrimiento del jugo en las mirillas del tacho.
- Por la “prueba del hilo”, etc.

El problema de esto es que son apreciaciones personales y probablemente dos cocedores darán un punto parecido, pero no igual. Por este hecho es que actualmente se utilizan instrumentos que midiendo la conductividad eléctrica permiten determinar el punto óptimo de la siembra, y esto es reproducible para cualquier cocedor, constituyendo una gran ayuda en el trabajo. Además del conductómetro hay otros instrumentos que se han desarrollado para el mismo fin. En IANSA, para los cocimientos, se usan los densímetros radiométricos.

Determinado, entonces, el momento de la siembra se agrega una cantidad adecuada de cristales de azúcar, ya sea en forma de slurry o en seco; cada fábrica determinará la cantidad a agregarse, de acuerdo con la capacidad de sus tachos, y según lo visto en el uso del slurry tiene por objeto conseguir una mayor dispersión de los cristales en el seno del cocimiento, antes de evaporarse el líquido que sirve de vehículo. Este método es el más adecuado, cuando no se tiene semillero, ya que se puede manejar bastante mejor el tamaño, la uniformidad y la cantidad de cristales, que en la siembra con cristales en seco.

En fábricas con sistema de semillado, se agrega una cantidad de magma (del orden de 5 a 10 [ton]) con cristales bien formados de tamaño grande, 0,20 a 0,30 [mm], los que crecen en el tacho, determinando el tamaño final. Idealmente, no aparece grano falso.

Con el objeto de entender y poder visualizar mejor esta importante etapa del cocimiento se mostrará en la figura 25 tres diferentes formas de siembra y sembrado o nucleación, considerando el tiempo y sobresaturación. [5]

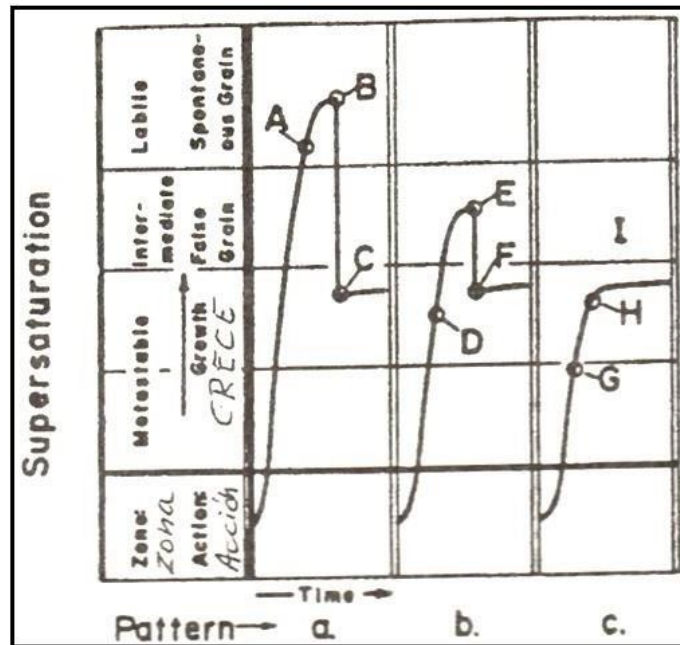


Fig. 25: Manejo típico de la sobresaturación durante el sembrado.

- a) Forma espontánea en zona lábil
- b) Sembrado por choque, con azúcar en polvo
- c) Sembrado total, con slurry.

A continuación, se detallan los tres diferentes sistemas de sembrado:

Sistema a: Se produce una concentración alta de L.S. o sirope de tal manera que se llega a la zona lábil de sobresaturación. En el punto A se comienzan a formar espontáneamente los cristales y aumentan rápidamente en cantidad. La sobresaturación sigue aumentando levemente hasta B, que es el punto donde el cocedor determina que ya hay suficientes cristales firmes, y da por finalizado el período de nucleación. Luego disminuye la sobresaturación al punto C, zona metaestable, succionando una cantidad de jarabe o L.S. o sirope. Los cristales continúan creciendo en la zona metaestable.

Sistema b: Consiste en concentrar el sirope o L.S. hasta una sobresaturación correspondiente a la zona metaestable alta, en ese punto D se introduce una cierta cantidad (400 [gr]) de azúcar en polvo. Se sigue concentrando hasta que los cristales se hacen evidentes visualmente (en el vidrio de control del cocedor). Nuevamente el operador debe definir cuándo poner término a la nucleación, punto E. En ese momento succiona nuevamente un poco de sirope o L.S. y pasa a la zona metaestable típica.

En este caso es importante sembrar en cuanto se alcance a la sobresaturación adecuada, a fin de dar tiempo a crecer a los cristales y hacerlos visibles antes de que se concentre más a la cuenta, lo cual puede acarrear granos falsos.

Sistema c: Con la introducción de diferentes sistemas de medición y control de la sobresaturación. Se ha podido desarrollar un sistema de medición y control de la sobresaturación, se ha podido desarrollar un sistema de semillado total a un grado de sobresaturación menor.

De esta manera se agrega mucha cantidad de cristales cuidadosamente tamizados en un tacho cocedor conteniendo un siropo sobresaturado, punto G. Cada cristal es una semilla que comienza inmediatamente a crecer hasta llegar a un tamaño visible.

Con la molienda húmeda de cristales de azúcar, dando una suspensión de cristales muy finos, se ha llegado a obtener semilla muy homogénea, estabilizada y reproducible. Con esta semilla fina, se utiliza una pequeña cantidad y se introduce en un punto de sobresaturación algo mayor, el punto I, donde los cristales crecen hasta hacerse visibles en el vidrio que los introducidos con la semilla.

En cualquiera de los tres sistemas el cocedor controla constantemente el número de cristales formados, pues siempre hay una cierta formación de cristales aparte de los agregados, el ideal sería que se agregara la cantidad justa de cristales para que no se formaran nuevos, pero esto es difícil de conseguir y el método consiste siempre en agregar una cantidad de cristales de siembra y formar la diferencia en el tacho. A excepción del sistema c en que se adiciona la cantidad total de semilla necesaria para conseguir la cristalización final pre-fijada.

Al sembrar con magma, los cristales son claramente visibles siempre. El cocedor (o el sistema automático) sólo debe preocuparse de mantener el cocimiento en la zona metaestable.

Cuando se logra agregar la cantidad justa de cristales se puede llegar a una sobresaturación del orden de 1,10 solamente, con lo cual la viscosidad es menor.

El período de nucleación (crecimiento de la semilla) es bastante corto. La sobresaturación en este punto es muy importante ya que tiene que ser tal que permita formarse nuevos granos a una velocidad que pueda controlar el cocedor para conseguir cristales de tamaño parejo con los de la siembra, salvo en c; si fuera una mayor sobresaturación la formación de nuevos cristales sería muy rápida y daría una cantidad muy alta de cristales, dando lugar a aglomerados tamaños variables. Si por el contrario la sobresaturación es baja, la formación de los nuevos cristales sería tan baja que al término del período de “cristalización”, los cristales de la siembra serían de mayor tamaño que los formados en el tacho, dando lugar a una mezcla de tamaños.

Tan pronto como el cocedor juzga que la cantidad de cristales es la adecuada, debe prevenir la formación de nuevos cristales, por lo que se baja rápidamente la sobresaturación haciendo una o más chupadas de siropo o L.S. (abriendo el cocimiento)

La sobresaturación baja porque el siropo o L.S. está como máximo saturado o subsaturado y esta mezcla da por resultado una sobresaturación menor.

La sobresaturación que se debe conseguir aquí es para el cocimiento A entre 1,05 y 1,10, zona metaestable, lo que asegura sólo el crecimiento de los cristales existentes. A este período se le llama “afirmar el grano”, o sea “endurecerlo”. Este período dura algunos minutos.

En este aspecto es importante definir que el grano “blando” se debe a una mala cristalización, en que se ha formado grano falso que pega a dos cristales y que al frotarlos entre el pulgar y el índice se rompen. La dureza de cada cristal de azúcar es la misma, por lo que la única explicación posible a este problema del grano blando es la anteriormente dicha. Cuando se ha hecho una buena cristalización, controlada convenientemente para evitar formación de grano falso, los cristales son siempre “duros”.

La temperatura del siropo o L.S. agregado para interrumpir la cristalización, debe estar a unos 5° C por sobre la temperatura del tacho, ya que si fuera más frío se produce un shock térmico (aumento de la sobresaturación por enfriamiento), que se traduciría en la aparición del grano falso.

La temperatura durante el período de cristalización debe ser mantenida constante, pues como ya se había visto la sobresaturación varía al variar la temperatura, y lo que se trata de mantener constante la sobresaturación en esta etapa. [5]

La etapa de siembra es la más importante del proceso de cristalización y depende exclusivamente de siembra es la más importante del proceso de cristalización t depende exclusivamente de la habilidad del cocedor. Se puede ayudar con un cristaloscopio o sacaroscopio, lo que permite visualizar más claramente lo que sucede en ese momento dentro del tacho; este instrumento permite una conservación visual durante todo el cocimiento.

3.9.2.6.2.3 Crecimiento del grano o cristal

Durante este período de la cocción, se trata de obtener el crecimiento de los cristales formados, evitando tanto una disolución, como la formación de cristales nuevos (grano falso). La masa se concentra hasta que la miel madre tenga una sobresaturación determinada que evite la formación de cristales nuevos, pero sí el depósito de azúcar sobre los cristales ya formados.

El proceso de cocción es la combinación de dos operaciones independientes en el mismo tacho, evaporación y cristalización. La evaporación significa consumo de vapor y evaporación de agua del siropo, el que se concentra. La cristalización hace perder azúcar al siropo, lo que lo hace menos concentrado. Para conseguir un proceso estable, es necesario que la concentración del siropo permanezca constante (sobresaturación constante). De esta manera el compromiso es equilibrar la velocidad de evaporación con la velocidad de cristalización, a fin de mantener la sobresaturación en la zona metaestable, esto se consigue manteniendo la alimentación del siropo y

la evaporación al mismo nivel. Fluctuaciones en cualquiera de ellos produce granos falsos y formación de conglomerados.

Si la evaporación es mayor, el aumento de la sobresaturación de la miel madre puede llegar al punto que origine la formación de cristales nuevos en forma de polvo de azúcar lo que debe impedirse por la oportuna introducción de una nueva cantidad de jarabe. La que al mezclarse con la miel madre, la diluye disminuyendo su sobresaturación, evitándose la formación de dicho polvo. En este momento es importante regular la evaporación con el consumo de vapor del tacho.

El trabajo de la cocción es aquí, una repetida concentración y dilución de la masa, hasta que ésta llega a llenar el espacio útil del tacho. Más eficiente es trabajar con adiciones de jarabe lo más seguidos posible o mejor aún con una adición continua y en lo posible con baja sobresaturación. Bajo estas condiciones, la viscosidad es baja y la cocción avanza más rápidamente.

La cocción automática utiliza este principio, con una entrada continua de L.S. manteniendo una relación lineal nivel/brix. Para cada nivel, debe haber un brix determinado. Si la evaporación es alta, aumenta el brix y baja el nivel, lo que es corregido por el sistema agregando más L.S. hasta llegar a un punto nivel-brix en la relación lineal. Como la evaporación continúa, el sistema agrega L.S., hasta el final.

En esta etapa es importante tener presente los siguientes aspectos:

La velocidad de cristalización es pequeña al comienzo, cuando la superficie y volumen de los cristales es pequeña. Al crecer éstos aumenta la velocidad por disponer de mayor superficie para que la sacarosa del L.S. se deposite en los cristales. Por lo que no se debe forzar la concentración al inicio del cocimiento.

La pureza del siropo madre en el inicio del cocimiento es casi la misma que la del siropo de alimentación, cuando la masa de cristales aumenta, la pureza del siropo madre disminuye. Con ello se incrementa la viscosidad y produce una disminución en la velocidad de cristalización.

En esta etapa del proceso es muy importante el contar con agitación mecánica en los tachos.

Hay diferentes maneras de conducir esta etapa en relación al contenido de cristales de la masa. Con un bajo contenido de cristales es demasiado lenta. Resulta una masa cocida con bajo contenido de cristales y mucha miel que debe ser concentrada en la etapa de cristalización siguiente. El azúcar no tiene tiempo a cristalizarse totalmente sobre la pequeña superficie total de cristales y se forma falso grano de manera abundante. Lo más adecuado es proceder con un porcentaje medio de cristales (25 – 30%) esto significa ir subiendo paulatinamente r (materia seca) de la masa cocida.

En las consideraciones anteriores el trabajar con bajo contenido de cristales, significa llevar el cocimiento a una materia seca, Bx ó r de 85 – 86% para luego apretarlo en la última etapa a 90 – 92 %. En el caso del trabajo con

alto contenido de cristales significa concentrar, inmediatamente después de cristalizar a $r = 87 - 88\%$ y trabajar casi todo el cocimiento a esta concentración. La forma inmediata es subir lentamente r desde la cristalización, hasta el punto en que debe hacerse el “apretado final”.

El cocimiento automático se lleva por una curva brix-nivel pre-establecida y que el sistema mantiene.

En las etapas finales de un cocimiento se puede agregar siropos de pureza más baja que la del jarabe inicial sin que esto signifique una disminución de la pureza de la masa cocida final, ya que la pureza de la miel madre en ese momento es aproximadamente la misma del siropo que se adiciona.

El agregado de siropo B.A., por ejemplo, al cocimiento A se debe hacer generalmente al final del cocimiento para evitar problemas con las “gomas” que éste contiene. La temperatura de este siropo es importante que esté unos 10°C sobre la temperatura del tacho y al mismo tiempo lo suficientemente alta para que no traiga cristallitos de azúcar ($85 - 90^{\circ}\text{C}$) que se depositan sobre los cristales formados, restándoles brillo o produciendo grano falso. Las Plantas que tienen filtros monofilamentos para L.S., simplemente devuelven el B.A. a la paila para formar L.S.

3.9.2.6.2.4 Apriete final

Cuando la masa ha alcanzado una altura suficiente en el tacho de cocción, se suspende la carga de jarabe y se procede a concentrar la masa hasta $r = 91 - 92\%$, en los A. El objeto de esta concentración es disminuir la cantidad de siropos que se producen durante la centrifugación de la masa cocida. Subir la concentración sobre 92% en A, no es conveniente pues la evaporación del agua de una masa tan concentrada es muy lenta, y además la centrifugación misma se dificulta. Una prueba práctica de que la masa cocida está lista para vaciarse del tacho consiste en formar con la masa una bola del tamaño de una nuez y colocarla sobre un dedo, si se mantiene sin deshacerse fácilmente es signo de que está suficientemente concentrada. Otra forma es la medición indirecta de la viscosidad, utilizando el amperímetro del agitador.

Como última etapa del cocimiento viene el vaciamiento del tacho, el que debe tratar de hacerse lo más rápidamente posible. Como al descargar la masa su temperatura baja rápidamente, la sobre saturación sube a veces hasta 0,1 puntos. La masa descargada en el mezclador debe centrifugarse lo más rápidamente posible para evitar su enfriamiento y cristalización que significaría grano falso y cristales aglomerados. Además, como la viscosidad de la masa A es baja, tiende a decantar dando problemas serios. Este tratamiento sube lógicamente un poco la pureza del siropo pero así las centrifugas reciben una masa cocida más móvil y caliente, libre de falso grano, lo que mejora notablemente las condiciones del lavado y acelera la centrifugación en A.

El tiempo total para efectuar un cocimiento A varía entre $2 - 3$ [hr] en los tachos cocedores, sin sistema de semillado.

3.9.2.6.3 Cristalización por evaporación en cocimientos B

Este cocimiento se hace con sirope V.A. Fundamentalmente todo el trabajo se efectúa semejante a los A. La diferencia está en que se agrega una cantidad mayor de siembra, y una sobresaturación de 1,3 a 1,35 para la cristalización. Esta mayor sobresaturación a que se puede llegar en B es posible debido a la mayor viscosidad dada por la concentración de los no-azúcares que disminuye la velocidad de cristalización. El tiempo del cocimiento también aumenta 4 a 7 [hr] y la concentración final se lleva hasta 92 – 93% de materia seca ®.

La siembra se efectúa con una cantidad un poco mayor de cristales que en A, a fin de compensar la menor velocidad de cristalización debido a la mayor viscosidad.

La masa cocida se baja a cristalizadores y se centrifuga también más o menos rápidamente, no con la urgencia de los A.

En algunos países, incluso en IANSA, se han efectuado muchos ensayos utilizado como pie para el cocimiento B, el azúcar C malaxado; lo cual significa hacer crecer el grano de azúcar C, evitarse la centrifugación del malaxado y teóricamente un “lavado” de los cristales C. No ha sido clara la ventaja de este sistema.

3.9.2.6.4 Cristalización por evaporación en cocimiento C

En el esquema de tres cocimientos planteado antes, esta masa cocida se contiene a partir de la cristalización del sirope B y el sirope de afinación. A veces en el pie se le mezcla algo de sirope V.A., a fin de cristalizar con una pureza un poco mayor y conseguir un grano más firme, asegurando además la presencia de cristales, en cantidad y tamaño suficientes.

El método de conducir este cocimiento es igual que los anteriores, sólo que la sobre saturación en este caso es de 1,4 y la cristalización se efectúa con una mayor cantidad de semilla. Esto con el fin de disponer una mayor superficie de cristalización para evitar la formación de grano falso.

El tiempo de cocimiento es alrededor de 10 a 14 [hr]. Aquí la viscosidad juega un papel muy importante en la cocción; como en este cocimiento la cantidad de no-azúcares es la mayor, la viscosidad también es alta y la velocidad de cristalización real es baja, por lo que la evaporación también lo es y es más, esta última debe mantenerse de acuerdo a la velocidad de cristalización, si no se corre el peligro de tener el tacho lleno de un cocimiento sólo con cristales pequeños y en poca cantidad.

El apriete final en este caso se da hasta 94% de materia seca (r), para conseguir el máximo agotamiento de los siropos. Hay que recordar que el sirope que da este cocimiento es la melaza que se va como subproducto, y es necesario que su contenido de azúcar sea lo más bajo posible.

3.9.2.6.5 Cristalización por enfriamiento

Esta etapa se cumple en los cristalizadores donde la masa se enfría lentamente con lo que aumenta de la misma manera la sobresaturación y esto hace que se deposite más azúcar sobre los cristales.

Esto es muy importante en los cocimientos B y B especialmente. En los A como la viscosidad es menor, este enfriamiento es corto y se centrifuga la masa rápidamente, pues si no se corre el peligro de que la sobresaturación aumente mucho y se forme grano falso, al mismo tiempo que puede decantar la masa. Por este hecho es que el cristalizador A es un eje con un revolovedor solamente.

En la figura 26 se puede ver el croquis de un cristalizador típico utilizado para masas cocidas A, y en algunos casos para B.

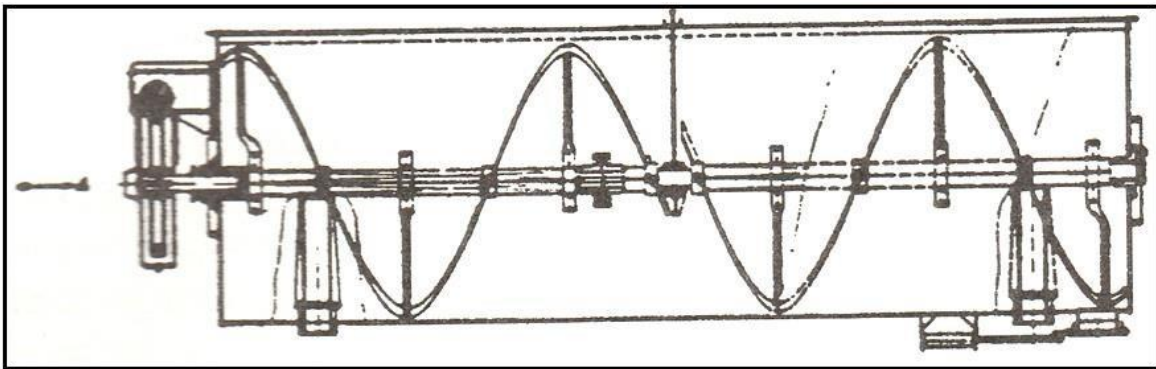


Fig. 26: Cristalizador – mezclador BMA.

En un depósito en forma de U provisto de un eje con cinta en espiral que cumple la función de mezclar.

En los cristalizadores B se usan los mezcladores – enfriadores, aunque en muchos casos no se ha visto la necesidad de enfriar artificialmente en B, en esa situación se usan cristalizadores del tipo de la figura 26.

En los cristalizadores C, sí que funcionan los mezcladores – enfriadores, para enfriar artificialmente la masa y conseguir el máximo agotamiento.

3.9.2.6.5.1 Tratamiento de cocimiento C

Es importante destacar en forma especial el tratamiento que se hace a la masa C, con el objeto de agotar al máximo la melaza que resultará de ella.

La MC se baja del tacho de cocción con una concentración $r = 94$ a 95% . De inmediato se le agrega una cantidad de agua determinada a priori para bajar su viscosidad, y así obtener la concentración adecuada al final del proceso de cristalización en los cristalizadores, conforme a datos proporcionados por laboratorio. [7]

El hecho de llevar la concentración tan elevada en el tacho tiene objeto de cristalizar en esa etapa la mayor parte de los cristales, dejando para los cristalizadores el trabajo de aumentar el tamaño de los cristales por el depósito sucesivo de azúcar de la miel madre sobre los cristales ya formados. Con el agregado de agua que se hace inmediatamente de bajar el cocimiento, se trata de bajar la viscosidad de la miel o siropo madre, para permitir una mayor cristalización pues de lo contrario esta sería muy lenta debido a la alta viscosidad, incrementada por el enfriamiento de la masa. Además, con este agregado de agua y un buen mezclado en el cristizador – receptor, se consigue eliminar todo el “grano falso” que pudiera haberse formado en el cocimiento. Con este agregado de agua se trata de mantener una sobresaturación de 1,10. Si no se agregara agua la sobresaturación aumentaría aún más y daría una mayor cantidad de grano falso.

La cristalización se realiza mediante el enfriamiento progresivo de la masa cocida en 4 – 6 cristalizadores montados en serie, durante un tiempo que va de las 24 a las 48 horas, considerándose que 36 horas es un tiempo bastante adecuado para lograr el máximo de rendimiento en la cristalización; esto depende del tipo de equipos. La masa pasa de un cristizador a otro y el agua de enfriamiento que circula por el interior de los segmentos, pasa en contracorriente. La razón de la contracorriente es no producir un descenso demasiado violento de temperatura que produciría falso grano, y poder mantener durante todo el tratamiento una diferencia de temperatura de 10 a 20°C que es la más adecuada. [5]

Por el enfriamiento la sobresaturación sube, ya que la solubilidad del azúcar disminuye bastante (A 80°C la solubilidad del azúcar es 3,703 [kg/kgH₂O], en cambio a 40°C es sólo 2.370) por lo que una gran cantidad de azúcar cristaliza con el descenso de la temperatura. Claro que se opone a la cristalización la viscosidad del siropo madre que va aumentando al bajar la temperatura. Para contrarrestar su efecto se agrega el agua al finalizar el cocimiento.

El proceso de cristalización por enfriamiento se lleva a una temperatura tan baja como sea posible ($35 - 40^{\circ}\text{C}$). A esta temperatura el siropo madre (melaza) está sobresaturado, al igual que durante todo el proceso de cristalización; pero para la centrifugación esta sobresaturación es inútil ya que sólo aumenta la viscosidad de la melaza y retarda su separación, por eso después del enfriamiento final, la masa cocida se vuelve a calentar a 45°C aproximadamente, pasando condensado caliente por los últimos discos del cristizador y distribuidor sobre centrífugas. Así la melaza queda saturada solamente y su viscosidad disminuye en un 25%.

De acuerdo a la experiencia la centrifugación de una masa cocida de tercer producto (MC) se realiza bien cuando la concentración del siropo madre a 45°C es de $r = 84\%$. Como no es aconsejable un agregado excesivo de agua, porque se produciría una disolución de cristales de azúcar, el laboratorio realiza análisis del siropo madre

del cocimiento para determinar la cantidad exacta de agua por agregar. Pero como el resultado de laboratorio debe esperarse, se agrega en la fábrica de inmediato una cantidad determinada de agua (siempre inferior a la necesaria) y luego con el valor calculado por el laboratorio se agrega la cantidad faltante en los cristalizadores.

En los cristalizadores tienen lugar dos procesos: enfriamiento de la masa cocida y crecimiento de los cristales como consecuencia.

Si no hubiese cristalización la sobresaturación subiría considerablemente, pero la cristalización que saca azúcar del sirope madre baja la sobresaturación, lo importante es mantener estas variables en equilibrio, como ya mencionamos para lograr durante todo el proceso una sobresaturación de 1,10.

En ensayos efectuados en el Laboratorio de Investigaciones de IANSA [8] se determina la curva de pureza versus el tiempo de cristalización, sacando muestras del mismo cocimiento a lo largo de los 6 cristalizadores C y además en el distribuidor sobre centrífugas. En la figura 27 se puede ver el resultado del ensayo, en donde además se indica la temperatura alcanzada en el lugar del muestreo

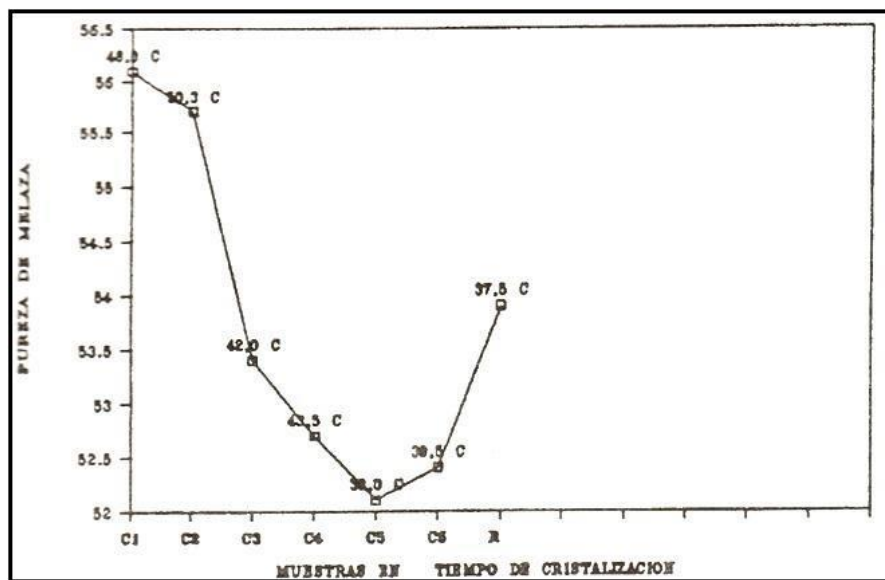


Fig. 27: Pureza vs Tiempo de cristalización por enfriamiento.

Los cristalizadores enfriadores más usados son los tipos Werkspoor que se construyen en muchas fábricas de equipos azucareros. En la figura 28 se muestra esquemáticamente uno de ellos.

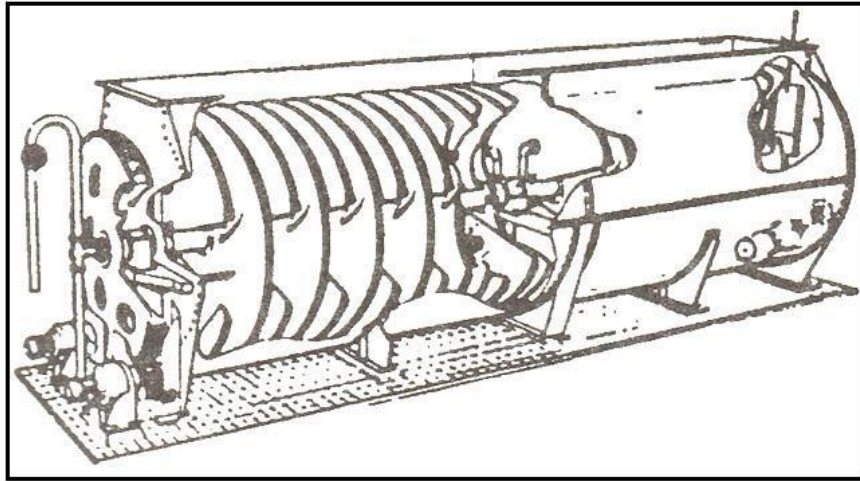


Fig. 28: Cristalizador enfriador tipo Werkspoor.

Es importante hacer notar que por los discos rotantes se hace circular el agua de enfriamiento, y en la última parte agua caliente. Algunos diseños más recientes usan elementos estacionarios de enfriamiento a lo largo, con elementos rotantes sólo para conseguir un buen mezclado y su temperatura.

3.9.2.7 Cocimientos continuos

Aunque en IANSA aún no hay equipos para hacer cocimientos continuos, debido a que esto constituye un avance importante en este proceso.

Desde hace muchos años se ha estudiado el tema de hacer el proceso de cristalización en forma continua ya que tiene muchos aspectos positivos en la operación, general de la planta. Algunos de ellos son:

Como consecuencia del trabajo continuo no es necesario almacenar volúmenes importantes de L.S. o sirope y masas cocidas, con lo cual se reduce las pérdidas indeterminadas, por efecto de la destrucción de sacarosa a las temperaturas y tiempo de almacenamiento.

El consumo de vapor en la cristalización se hace bastante uniforme y continuo, consiguiendo un jugo denso con r bastante uniforme. Además, el consumo uniforme de vahos se convierte en alguna medida en un ahorro de vapor.

La salida continua de masa cocida de estos equipos va directamente a centrifugación sin pasar por cristalizadores, salvo los cocimientos C ó B, eventualmente. Esto significa, al mismo tiempo, que se eliminan los lavados con agua y vapor de los tachos.

La operación de centrifugas se hace continua, debido al flujo continuo de masa. Esto se traduce a un flujo continuo al secador de azúcar, pailas disolvedores, filtración de L.S., etc.; todas las operaciones en la refinería se hacen con un flujo continuo consiguiéndose menores flujos por unidad de tiempo y un trabajo más parejo de los equipos con menor demanda de energía.

Manejo más estable de la calidad y granulometría de azúcar blanco, debido a un mejor control sobre la sobresaturación.

Posibilidad más clara y efectiva de automatizar y controlar toda la operación, incluso computarizarla.

Se les ha llamado también evapo-cristalizadores. En consideración a su fácil control, automatización a las ventajas anteriormente señaladas, la cristalización continua ha ido ganando importancia en la industria azucarera para todos los cocimientos.

Casi la mayoría de las nuevas Plantas o ampliaciones importantes consideran evapocristalizadores continuos.

Esto ha tenido como consecuencia el desarrollo de numerosos sistemas y equipos, habiéndolos de tipo horizontal compartimentados y de tipo vertical en una sola unidad o en serie.

Un punto importante en este sistema es conseguir una buena semilla, prefijada de acuerdo al cocimiento de que se trate. Por este hecho es que los sistemas continuos consideran un equipo especial para hacer slurry o cristales para sembrado; en alguno de los sistemas existe un tacho cocedor especial para cristalizar la semilla en condiciones estrictamente controladas.

Todos los tachos continuos son alimentados con magma de semilla. Para cada tipo de cocimiento, debe haber un sistema de producción de magma adecuado.

3.9.2.8 Instrumentos para cristalización

Cada método de cristalización se basa por lo general en la experiencia de una generación de cocedores. Mientras al operador del tacho de cocción no se le pueda proporcionar un instrumento de medición capaz de indicar exactamente el proceso de cristalización, se dependerá siempre de la experiencia y de la habilidad de él, constituyéndose más bien en un arte que en una operación industrial.

Los primeros instrumentos auxiliares para el cocedor fueron los termómetros y los manómetros, para la cámara de calefacción y la cámara de vahos. Aún hoy en día -180 años después de la introducción del tacho de vacío, son ellos los únicos instrumentos auxiliares en muchas de las fábricas. Ya que estos instrumentos insuficientes para un proceso de cristalización dirigido, hubo preocupación, en los últimos decenios, por desarrollar instrumentos de medición que capten e indiquen al cocedor el proceso de concentración del sirope antes de la

siembra de cristales, como asimismo el estado real de la mezcla cristal-siropo durante el proceso de cristalización.

Se han desarrollado varios sistemas para conducir los cocimientos, entre ellos el método de conductividad eléctrica, medición del aumento del punto de ebullición, control por “viscosidad”, etc- En algunas Plantas de IANSA se usa el primer sistema por ellos se le detallará a continuación, resumidamente.

3.9.2.8.1 Conductividad eléctrica

Este sistema fue desarrollado teniendo como base las relaciones entre conductividad eléctrica y contenido de ceniza de los jugos azucarados a distintas concentraciones. Estas relaciones fueron determinadas por diferentes investigadores.

El control por medio de la variación de la conductividad eléctrica de la solución azucarada, está basada en que a medida que aumenta la concentración (por lo tanto la viscosidad) disminuye la conductividad eléctrica de la solución. La corriente eléctrica no es conducida por la solución de azúcar sino que las sales (no-azúcares) que están presentes en la solución. Por esto es que estos instrumentos son aplicables más bien a los bajos productos en que la cantidad de sales es mayor que en cocimiento A.

Lo más importante es que, de acuerdo a investigaciones, se acepta una relación bastante estricta ente el grado de sobresaturación y la conductividad.

Es importante mencionar que las variaciones de la concentración de iones (contenido de ceniza) ocasionan, cambios en la conductividad, la que se ha tomado como magnitud de la medición. El contenido de ceniza se ve influido por:

- Variaciones de la intensidad de intercambio del intercambiador-iónico. (ablandado de jugo)
- Adición de lechada de cal en los cristalizadores para valores de pH decrecientes.
- Variaciones en la calidad de la remolacha (remolachas sanas o alteradas, fertilización diferente).
- Métodos de purificación diferentes.
- Adición de ceniza de soda y otros reactivos químicos, como SO_2 , $CaSO_4$, etc.

Este aspecto hay que tenerlo en cuenta, a fin de ajustar el instrumento según las variaciones que se produzcan a lo largo de la campaña.

Los instrumentos son sencillos. El conductímetro consiste de dos electrodos de acero inoxidable colocados en el inferior del tacho en un lugar donde haya bastante circulación de masa, y un aparato inscriptor transmisor.

Al comienzo del cocimiento la lectura del amperímetro es la mayor. Gradualmente disminuye mientras el licor se concentra hasta que llega a un mínimo en el momento de la granulación. Sube después de cada carga con siropo y baja nuevamente al seguir concentrándose. Lo importante es conseguir, después de la granulación una curva de conductividad lo más pareja posible sin saltos bruscos, lo que se consigue idealmente con el cocimiento por agregado continuo de jarabe.

Al tener el gráfico de un buen cocimiento es posible repetirlo fácilmente y en forma exacta siguiendo las lecturas del conductómetro. Este hace más exacto el trabajo del cocedor especialmente en la granulación.

3.9.2.9 Cocimientos con semillado

En la Planta Ñuble se instaló el año 95 un sistema de semillado para conducir los cocimientos en A. En el año 96 se complementa todo el sistema para incluir los cocimientos B y además se incorpora un sistema de control automático de evaporación y toda la refinería.

3.9.2.9.1 Etapas del sistema

En primer término, hay un sistema de molienda de azúcar en alcohol isopropílico para la preparación de slurry por un período mínimo de 4 horas. Así se obtienen cristales muy finos y parejos (10 [μm]). Una vez efectuada la molienda se vacía a botellones los que se mantienen girando hasta su uso, a fin de evitar que sedimenten.

Al mismo tiempo se mezcla glicerina con azúcar y se mantiene girando, esto con el fin de conseguir glicerina saturada con azúcar.

Con el slurry más la glicerina, los que se mezclan justo antes del uso, se siembra un tacho cocedor por enfriamiento. En él se ha introducido Licor Standard que se evapora hasta un Bx definido. Luego se comienza a bajar la temperatura, por medio de un serpentín interior por donde circula agua fría, hasta alcanzar el punto de semillado, con una sobresaturación de 1,1 aproximadamente. En este punto se siembra con la mezcla de slurry y de glicerina saturada con azúcar. Se continúa el enfriamiento del “cocimiento” hasta una temperatura de 25 – 30° C. Los cristales crecen hasta un tamaño de 0,1 [mm].

El magma 1 obtenido al final del ciclo tiene un contenido de cristales de 20% aprox. Se descarga a un cristalizador con movimiento. Desde allí se alimentan los tachos B con una cantidad predeterminada y un tacho de siembra. En la figura 29 se puede ver un croquis de esta primera etapa.

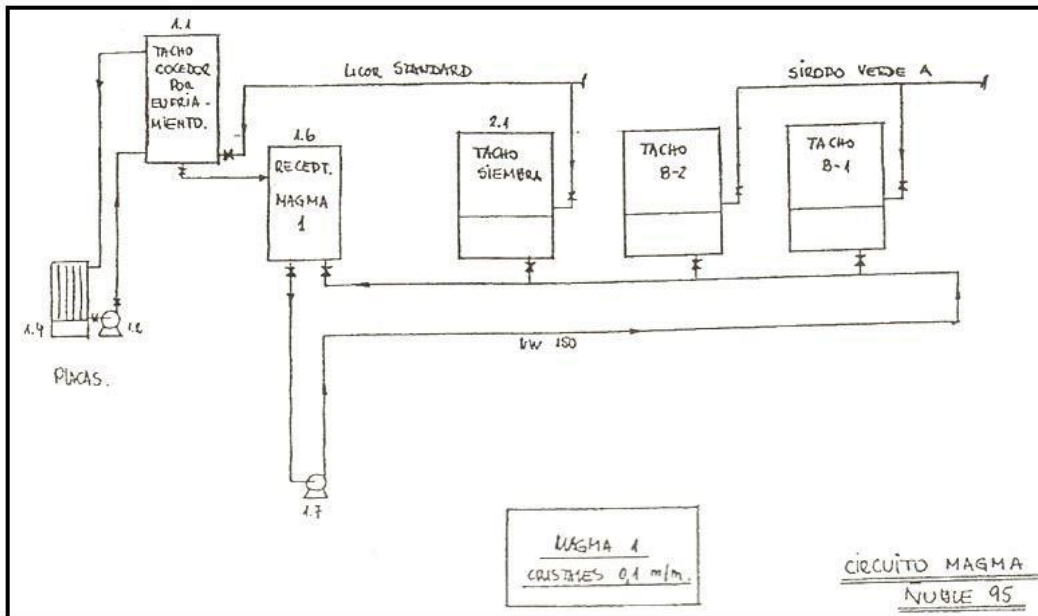


Fig. 29: Producción magma 1 y circuito.

El tacho de siembra (2.1), está con Licor Standard con una sobresaturación de 1,1. Debido a la cristalización por evaporación en él, los cristales aumentan de tamaño hasta 0,3 [mm] y representan aproximadamente un 45 a 50% del cocimiento. Llegando a ese punto se descarga un malaxador (2.2) constituyendo el magma 2. Con este se alimentan los tachos A para producir azúcar blanca. [8]

En la figura 30 se indica el circuito de magma 2.

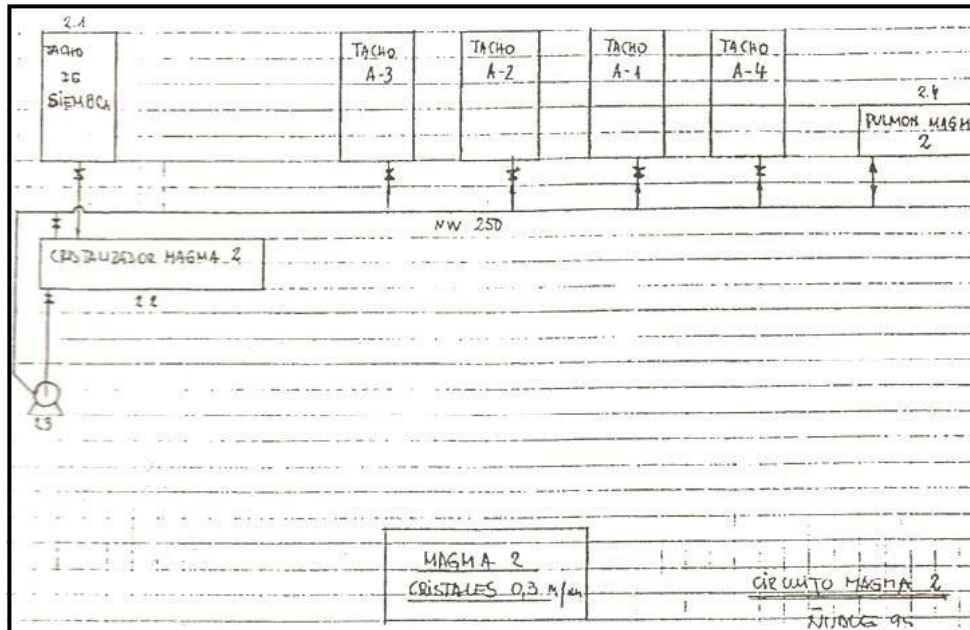


Fig. 30: Circuito de Magma 2.

Para poder conducir esta operación adecuadamente es necesario poder manejar las variables que afectan los cocimientos, como vacío, presión de vapor de calentamiento, concentración del cocimiento en todo su desarrollo, etc. Evidentemente que esto es más sencillo con un sistema automático programable como el que tiene Ñuble.

3.9.2.9.2 Ventajas del sistema

La ventaja especial de este procedimiento es que:

- la fase de formación de los cristales se realiza en el cristizador-enfriador a un nivel de baja temperatura que puede dominarse bien por medio de la regulación, de manera que no se presenten sobresaturaciones altas implicando el riesgo de formación de conglomerados y de granos secundarios;
- la conducción del proceso está adaptada de forma óptima a las exigencias de la velocidad de crecimiento de los cristales dentro de los límites de la zona de sobresaturación metaestable;
- el agitador especial instalado en el cristizador-enfriador garantiza una transmisión de materia y de calor continuo y uniforme.
- La cristalización sobre los finos cristales del slurry se realiza en forma lenta y controlada. La concentración de cristales por unidad de volumen es altísima, mucho mayor que en el pie de cualquier tacho, lo que impide que aparezca grano falso.

Las ventajas que resultan en la práctica del trabajo con el pie de cocimiento son las siguientes:

- Mejor calidad de los cristales del producto con una buena facilidad de centrifugación del producto;
- Reducción de la cantidad de agua de lavado en las centrífugas;
- Supresión de la aspiración de agua en la producción del producto, en particular si se trata de L.S. o siropos de alta pureza;
- Reducción del tiempo de cocción en el tacho, lo que ofrece la posibilidad de ampliar la capacidad actual de ellos;
- Trabajo de cristalización limitado a la fase de crecimiento de los cristales con aspiración simultánea de líquido de aspiración, por lo tanto, proceso relativamente fácil;
- Posibilidad de utilizar licor de alimentación de alta consistencia, es decir adaptación óptima de la muestra seca de licor de alimentación a aspectos termo-económicos.

3.9.2.10 Algunos problemas comunes en cristalización

Falla de vacío: Esto significa que disminuye el vacío dentro del tacho, con lo cual comienza a subir la temperatura disminuyendo la sobresaturación y pudiendo llegar a disolver total o parcialmente el cocimiento.

La solución es disminuir o cerrar totalmente la entrada de vapor, tratando de mantener la temperatura de conducción del cocimiento. Al mismo tiempo debe buscarse y solucionarse a la brevedad el problema, el que puede estar originado por falta de agua a la columna, detención de bombas de vacío, pérdida del sello barométrico, etc.

Falta de vapor: En este caso conviene seguir con los tachos que se pueda de acuerdo a la cantidad de vapor disponible. Al mismo tiempo se hace necesario mantener las temperaturas adecuadas en los otros tachos, para lo cual se va cerrando vacío de acuerdo a las necesidades.

Se disuelve cocimiento: El tacho está bajo todavía se puede volver a semillar, en caso contrario se puede traspasar a otros tachos como alimentación.

Caída de servicio: En este caso se detienen todos los motores, al mismo tiempo en evaporación se ha conectado cada efecto a la atmósfera por lo tanto no hay vapor. En este caso, idealmente, se debiera cerrar vapor y vacío a cada tacho a fin de mantener las condiciones de temperatura en los tachos, lo cual no es fácil si se demora mucho la puesta nuevamente en servicio.

Al mismo tiempo se detienen los cristalizadores y repartidores de masa sobre centrífugas. Es importante mover a mano los que tienen masa A, ya que por su bajada viscosidad los cristales tienden a decantar con mucha facilidad, de tal manera que se acumulan en la parte inferior impidiendo que el elemento de agitación gire, produciendo serias torceduras en los sistemas. En el caso de la masa B este problema es bastante menor, si la

detención es larga conviene moverlo a mano de vez en cuando. En los cocimientos C el problema es mucho menos importante, ya que por la gran viscosidad de la masa los cristales prácticamente no decantan más que el largo plazo.

- Formación del grano falso: Este puede ser causado especialmente por algunas de las causas siguientes.
- Excesiva sobresaturación.
- Entrada de aire lo que produce un enfriamiento de la masa.
- Siembra con pocos cristales, lo que produce una gran “presión” del azúcar por cristalizar.
- Baja temperatura en el momento de la siembra.
- Cristalitos en el licor standard o siropos de alimentación a los tachos, lo cual se produce por baja temperatura en los estanques de almacenamiento, y/o por roturas en las mallas de centrífugas.

3.10 Centrifugado

Cada cocimiento descrito anteriormente debe someterse a la centrifugación en donde, por la fuerza centrífuga, queda retenida el azúcar en la malla del canasto giratorio, y por los orificios de éste sale el siropo o jarabe.

Las centrífugas A son del tipo automático, es decir, hacen todo el ciclo de carga: centrifugación, lavados y descarga, automáticamente, sólo hay que iniciar el ciclo. En estas centrífugas el azúcar recibe un lavado con agua y luego con vapor para lavar y secar el azúcar, en alguna medida.

Esta centrifugación da dos siropos A: verde A que corresponde al siropo de la masa cocida y va al cocimiento B; blanco A que corresponde al siropo de los lavados con agua y vapor, por este hecho se disuelve algo de azúcar dando un siropo de mayor pureza que el verde, se devuelve al cocimiento A.

Las centrífugas B son del tipo continuas, dando un siropo B que va al cocimiento C y azúcar algo amarillo que se disuelve en el jugo denso.

Las centrífugas C también son continuas, entregando melaza, subproducto, y azúcar C la que se malaxa con siropo B.

La masa artificial del malaxado de azúcar C se trata en centrífugas de afinación continuas, dando siropo de afinación que va al cocimiento C y azúcar afinada la que se disuelve en jugo denso para dar Licor Standard.

3.11 Secado, envasado y almacenamiento de azúcar

El azúcar que sale de las centrífugas A tiene una humedad de alrededor de 2%, en esta condición no se puede guardar ya que se endurece.

Por esto es necesario secarla para bajar su humedad a 0,015 a 0,020%. Para ello se seca en un tambor rotativo donde entra la azúcar húmeda y se pone en contacto con una corriente de aire caliente a 95° C. En el trayecto por el tambor sale la azúcar seca y va a la tolva de almacenamiento sobre el envasado, o al silo de azúcar desde donde se envía al envasado según pedidos.

Las máquinas envasadoras o ensacadoras son del tipo automáticas que entregan directamente los 40 [kg] a las bolsas de papel. El azúcar envasado se lleva a la bodega donde se almacena en perchas de hasta 50 ó 60 bolsas de altura, para bolsas de papel, o se entrega directamente.

También existen envasadoras automáticas para envases menores de 5 [kg] y 1 [kg]. Además, hay una Planta con equipo para hacer azúcar pan.

La ventaja del silo es justamente que se va secando azúcar de él a medida que se va requiriendo para los diferentes tipos de envases. Además, que los envases se compran de acuerdo al programa de ventas.

3.12 Producción de vapor

El vapor necesario se genera en la Planta con calderas de alta presión, 32 – 42 [at]. Es necesario producir vapor sobrecalentado a esa presión porque son las características del vapor que requieren las turbinas para la generación eléctrica.

Una parte del vapor se reduce a 2,5 [kg/cm²], se junta con el escape de las turbinas y va a calentar el primer cuerpo de evaporación y algunos precalentadores.

Existe otra parte del vapor de la caldera que se reduce a 5,0 [kg/cm²] para diferentes usos en la fábrica, lavado, centrífugas, etc. El combustible utilizado es carboncillo o carbón de piedra. Normalmente el agua de alimentación de calderas es condensada del primer cuerpo y una parte del segundo cuerpo de evaporación, los que no deben contener azúcar.

3.13 Producción de energía eléctrica

La corriente eléctrica necesaria para mover todos los motores de la Planta se genera en las turbinas accionadas por el vapor de alta presión que les llega de las calderas.

Es importante vigilar la presión y temperatura del vapor de entrada a las turbinas a fin de evitar su deterioro.

En el paso por la turbina el vapor pierde presión y sale a 2,5 [kg/cm²] que es la presión máxima de escape.

Cada turbina tiene una caja de reducción que disminuye la velocidad a 1.500 [rpm] siendo ésta la velocidad de giro del generador.

Para el sistema de lubricación en la turbina de descansos, caga, etc., tiene una bomba que distribuye el aceite por todos los lugares necesarios. El sistema de lubricación tiene además un enfriador con agua y filtros para eliminar posibles suciedades.

La energía eléctrica generada está en relación directa con la demanda de la Planta, lo cual a su vez requiere de una determinada cantidad de vapor. Todo esto está comandado por un sistema automático que mantiene en equilibrio la demanda de energía eléctrica y vapor en relación con una definida demanda de la Planta.

3.14 de Cal

Para la producción de la cal y el CO₂ necesarios en la purificación del jugo, las plantas cuentan con Hornos de Cal.

En éste se introduce por la parte superior una mezcla de piedra caliza y coke. La combustión del coke produce la calcinación o descomposición térmica de la caliza en cal y CO₂, la combustión del coke produce CO₂.

El CO₂ que proviene de la caliza representa alrededor del 60% y el coke produce el 40% restante.

Por la parte inferior del horno sale cal viva que se apaga en un tambor rotativo con agua de desazucaramiento de los filtros de jugo fangoso, produciendo lechada de cal a 20 – 22° Bé. Se separan los solubles y arenillas en equipos especiales para evitar que las bombas se deterioren con esos elementos, y se da un tiempo de maduración. El gas del horno pasa previamente por un lavador con agua, succionando por unas bombas especiales que lo envían a I y II Carbonatación en las etapas de purificación.

La calidad y tamaño de la piedra caliza es importante para conseguir una buena calcinación. El tamaño del coke debe estar en relación a la caliza para conseguir un buen mezclado, la relación habitual es de 1 a 0,6, es decir, caliza más o menos 120 [mm] y coke 70 [mm].

3.15 Secador de cosetas

La coseta prensada que sale de las prensas tiene 30 – 40% de materia seca, es decir, 70 – 66% de agua. En estas condiciones se puede usar como forraje sólo en forma inmediata, si no entra en descomposición a no ser que se ensile.

Para guardarla y disminuir su costo de transporte se seca en un secador hasta un valor de 86 – 88% de materia seca, es decir 14 – 12% de agua.

El secador de cosetas cuenta con un horno donde se quema el carboncillo. Los gases calientes del horno, 800° a 900° C aproximadamente, entran al tambor secador giratorio encontrándose con la coseta prensada que cae justo a la entrada de los gases. El tambor tiene una serie de elementos en cruz, que al girar este hace una especie de lluvia de cosetas poniéndola en íntimo contacto con los gases calientes.

De esta manera se evapora el agua de las cosetas saliendo por la parte final del tambor coseta seca con 85 – 88% de materia seca, y el vapor escapa por las chimeneas.

La coseta seca antes de enviarla a bodega se peletea o briquetea en forma cilíndrica de diferentes diámetros, esto con el objeto de disminuir su volumen y su costo de transporte. El volumen disminuye más o menos a 1/3 con respecto al volumen de la coseta seca a granel. Se la utiliza fundamentalmente como forraje para animales.

3.16 Almacenamiento de azúcar

La mayor parte del azúcar producido debe quedar almacenada en la planta durante un tiempo más o menos prolongado, debido a que las ventanas se prolongan fuera de la campaña.

Este almacenamiento se puede realizar en dos formas: en sacos o a granel. En el primer caso, se ensaca y se guarda en bodegas a medida que se va realizando la producción. Estas operaciones exigen una importante mano de obra de la temporada. En el segundo caso, el azúcar se almacena a granel en silos horizontales o verticales, a partir de los cuales se ensaca o se envasa según las ventas. Luego veremos que, para una óptima conservación en el momento de almacenarla, el azúcar como para la conservación a granel, aún más, exigente.

3.16.1 Problemas de Almacenamiento

Fundamentalmente existen dos tipos de problemas tecnológicos en el almacenamiento del azúcar y que influyen en su calidad; uno es el aspecto bacteriológico y el otro es toda la problemática del factor humedad. Ambos son de importancia, como problemas de descomposición de los productos elaborados con esa azúcar.

3.16.1.1 Aspectos Bacteriológicos

Definiendo bacteriología [5] corresponde exactamente al estudio de las bacterias, las que son un tipo de microorganismo. En general se habla de problemas bacteriológicos a los causados por microorganismos.

Cuando se habla de microorganismos nos estamos refiriendo a organismos vivos muy pequeños, visibles individualmente sólo con el microscopio. Cuando se desarrollan y aumentan en cantidad forman colonias que se ven a simple vista.

Los microorganismos que pueden estar presentes en el azúcar son: bacterias, levaduras, mohos. Cada uno de ellos forman grupos o familias de varios tipos con características diferentes, como distintas temperaturas de desarrollo, necesidad o no de aire para desarrollarse, etc.

Es importante contar con el menor número de microorganismos, ya que las fábricas que producen por ejemplo, mermelada, o en general conservas azucaradas, pueden llegar a tener problemas de fermentación en sus productos, dependiendo de la importancia del número de microorganismos presentes.

Ahora bien, estos microorganismos se encuentran en el azúcar recién elaborada en un nivel generalmente bajo, pero en el período de almacenamiento se van incorporando otros que hacen aumentar la cantidad a límites incluso no adecuados para el consumo. La humedad juega en esto un papel importante.

Por lo anteriormente expuesto y a objeto de entregar un producto de la mejor calidad es que se ha estudiado extensamente el problema bacteriológico del azúcar durante el período de almacenamiento.

Existen numerosos estudios e investigaciones sobre el comportamiento bacteriológico del azúcar durante el almacenamiento.

De ellos se puede concluir que, desde el punto de vista bacteriológico, el almacenamiento de azúcar en sacos en una bodega no da resultados satisfactorios si el azúcar no ha estado suficientemente seco; en cambio, el almacenamiento en un silo como el descrito posteriormente da resultados excelentes.

Este éxito no es extraño, ya que el aire previamente secado que se insufla a través de la capa de azúcar en el silo pasa a través de un filtro bacteriológico, por lo que se puede decir que va estéril y no aporta nuevos microorganismos: sino que incluso hace disminuir los ya existentes que se van incorporando al aire y de esta manera se eliminan.

3.16.1.2 Humedad en el almacenamiento

En este sentido, en el secado de azúcar, existen tres tipos de humedad que se presentan en los cristales del azúcar al ingresar al secador.

De todas las humedades ya señaladas, la que influye fundamentalmente sobre la calidad del azúcar durante el almacenamiento es la humedad ligada, ya que se va liberando precisamente durante esta etapa, o al menos durante la fase inicial de ella, acumulándose y formando terrones e incluso bloques, incrementando en algunos casos los problemas bacteriológicos. Es importante por este hecho que esta humedad sea la más baja posible, consiguiendo pocos conglomerados en el cocimiento y además bajando un poco más la humedad a la salida del secador.

Es interesante mencionar que la humedad ambiente juega un papel importante también en el almacenamiento, como se ve en los resultados siguientes de investigación efectuadas:

Humedad relativa de aire	Zona	Efecto sobre azúcar almacenada
100%	Punto de rocío	Se moja
80 – 90%	Zona peligrosa	Se humedece
60 – 70%	Zona segura	No hay variación
30 – 50%	Zona seca	Se puede endurecer si se sobrepasó de 70% H.R

Tabla 5: Porcentaje de humedad relativa del aire en sectores de almacenamiento.

A continuación, se analiza la influencia de esta humedad sobre los dos sistemas de almacenamiento.

Bodega: La única alternativa de eliminar este problema totalmente es con un acondicionador de azúcar, que es un tipo de alto costo que encarece la instalación de almacenamiento. Indudablemente que hay una serie de medidas que tienden a disminuir la existencia de esta humedad ligada, pero esto es válido para ambas alternativas.

Silo: En el silo también se produce este problema de la humedad ligada que se transforma en humedad libre, y en este caso esto traería fatales consecuencias, ya que el agua despreñida disuelve una parte pequeña de azúcar, pero suficiente para soldar los cristales entre sí, y esto unido a la presión a q está sometida el azúcar dentro del

silo, formaría unos bloques que podrían alcanzar grandes tamaños. El silo normalmente cuenta con un sistema de insuflación de aire seco a través de toda la capa de azúcar, con lo cual se asegura la eliminación de este tipo de humedad a medida que se va formando, lo cual garantiza absolutamente la buena calidad del azúcar en el momento de su venta.

Queda de esta manera claramente establecida que desde el punto de vista tecnológico la alternativa de almacenamiento de azúcar en un silo es mejor que la alternativa bodega. Esto quiere decir que el azúcar en un silo es mejor que la alternativa bodega. Esto quiere decir que el azúcar se cuida y se conserva mejor en un silo que petacas en bodegas.

3.16.2 Sistemas de almacenamiento de azúcar

A continuación, se describirán someramente los dos sistemas tradicionales de almacenamiento de azúcar, y una comparación entre ellos.

3.16.2.1 Bodega de azúcar

Tradicionalmente el almacenamiento de azúcar envasada para las plantas de mediana capacidad se efectúa en bodegas, mediante el empleo de cintas transportadoras y cintas aperchadoras que operan a nivel del suelo.

El transporte de las bolsas de azúcar se verifica por una cinta longitudinal lateral que recorre la longitud total de la bodega y que a su vez entrega a una cinta móvil desplazable, ubicada en sentido perpendicular.

El aperchaje se verifica mediante cintas inclinadas de altura regulable, que entregan las bolsas al borde de la petaca, desde donde son transportadas a mano hasta la posición definitiva de almacenamiento por la cuadrilla de aperchadores.

El transporte de las bolsas con este sistema implica un continuo traslado de los equipos aperchadores, de acuerdo a la relativa capacidad de las petacas (superficie y altura) y a la variedad de azúcar que se desee almacenar. Las cintas mismas ocupan cierta superficie de operación, lo que impide el aprovechamiento total de las bodegas.

En las fábricas que elaboran sobre 2.500 toneladas de remolacha por día, las bodegas de este tipo no son prácticas para aperchar la totalidad de la producción de bolsas de azúcar, debido al elevado número de hombres que deben moverse sobre petacas.

La solución más conveniente desde el punto de vista operacional, para fábricas con 2.500 [toneladas/día] de elaboración de remolacha y con almacenamiento de azúcar en petacas consiste en la aplicación de puentes-cinta en las bodegas de azúcar. [9]

Gracias a esta combinación de cintas, los sacos pueden ser entregados sobre la petaca directamente en el punto de aperchaje. El empleo de mano de obra es menor que en las bodegas tradicionales y la rotura o desgaste de las bolsas en la petaca es muy reducido por cuanto prácticamente se elimina el desplazamiento sobre las petacas.

El despacho de azúcar se efectúa fácilmente invirtiendo el sistema, con un mínimo de esfuerzo físico para los aperchadores.

3.16.2.1.1 Características constructivas de las petacas

Estas son las mismas que para cualquier tipo de bodega que maneje productos ensacados. Las caras deben ser planas y la forma de las petacas debe ser como un tronco de pirámide. [5]

Una colocación apresurada y poco cuidadosa de las bolsas, da lugar inevitablemente a petacas inseguras, con caras convexas y con separaciones entre las bolsas que pueden transformarse en verdaderas grietas verticales muy peligrosas. Más de algún accidente mortal se ha originado por esta causa.

Las bolsas de “planchado” de base deben descansar sobre el piso de la bodega. Debajo de ellas pueden colocarse bolsas usadas, pero en ningún caso tablonés para facilitar la circulación de aire. Los tablonés generalmente no son totalmente parejos y lisos, así cualquier diferencia pequeña en la base se convierte en una diferencia muy importante a medida que la altura de la petaca aumenta.

En la figura 31 se muestra un sistema de amarre de bolsas para una petaca o pila.

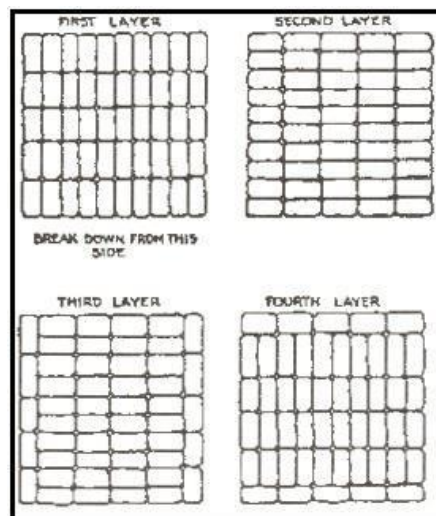


Fig. 31: Sistema de amarre de bolsas.

Es importante considerar que las bodegas deben ser herméticas al agua de lluvia o de cualquier otra fuente, a fin de no humedecer el azúcar guardado en ellas.

Las caras externas de las petacas no deben ser verticales. Por ejemplo, los lados base superior de una petaca de 10 [m] debe tener aproximadamente 40 [m] menos longitud que las de la base inferior. Al ser las caras planas, por cada metro de altura de la petaca deberá reducirse en 4[cm] el lado de la petaca.

Las bolsas deben colocarse adecuadamente hasta una cierta altura en que es necesario eliminar una corrida de bolsas. La petaca debe comenzarse distanciando un poco las bolsas en el centro del “planchado”. A medida que aumenta la altura de la petaca, la distancia entre las bolsas debe disminuir para que la superficie sea menor. Llegando a un cierto límite esta operación, se elimina una corrida de bolsas reiniciándose el proceso.

Las bolsas periféricas deberán estar siempre apretadas para lograr una buena amarra y evitar de este modo que las caras tiendan a abrirse (grietas).

La forma de una petaca al aperchaje debe anotarse rigurosamente, de tal modo que se conozca con toda exactitud el número de planchados por petaca, la cantidad de bolsas por planchado, el número de cocimiento que se está apretando y la fecha y el turno.

Es una bodega con buen control, en todo momento puede individualizarse cualquier cocimiento.

3.16.2.2 Silos de azúcar

La adopción de silos para almacenar la azúcar granulada, se ha difundido en la industria azucarera, principalmente como consecuencia de la diversificación de la producción de azúcar (granulada, pan flor) y de la adopción de variados tipos de envases (20, 40, 50.5, 2 y 1 kg.). Además del aumento de tonelaje de las plantas que dificulta y encarece mucho el manejo en bodegas tradicionales.

Los silos de azúcar pueden proveer indistintamente a las envasadoras de azúcar granulada, a las plantas reelaboradoras de azúcar panificadoras y molinos de azúcar flor de acuerdo a la demanda del mercado en el momento de la venta.

Los silos de azúcar son cilíndricos y se construyen en hormigón posteando con el sistema de moldes deslizantes, o en planchas de acero. En este último sistema se incorpora una cámara de aire de la periferia por donde circula el aire, además de tener aislación adecuada a las condiciones climáticas del lugar.

Las capacidades son enormes: 10 – 20 – 30.000 [ton] o más. Se puede construir en el sistema celular cuando es necesario segregar o como único elemento.

Hay varios tipos de diferentes empresas como Weibull, Lucks-Meyer, Ostefeld, etc. Difieren en la forma constructiva, en el manejo interno del azúcar y en la forma de acondicionar el azúcar almacenado. En la figura 32 se muestra esquemáticamente un silo sistema Lucks en hormigón, como los que hay en IANSA.

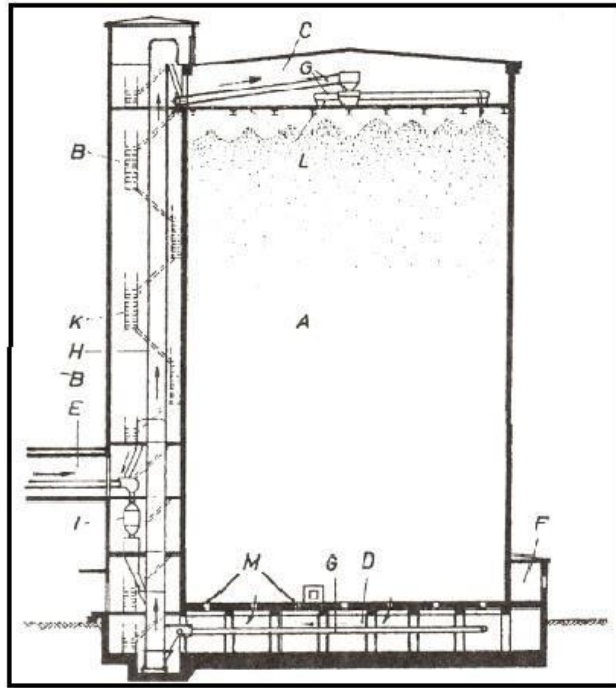


Fig. 32: Silo sistema lucks.

A continuación, se describirá un silo sistema Lucks:

Constan básicamente de tres cámaras:

- Cámara superior de carguío.
- Cámara de almacenamiento.
- Cámara inferior de descarga.

El carguío debe efectuarse de modo que el azúcar llene la cámara de almacenamiento en forma pareja.

La cámara de almacenamiento tiene por objeto acumular el producto. Cuando existen varias calidades de azúcar se suele dividir esta cámara construyendo dentro de ella una pared cilíndrica concéntrica a la pared exterior. El fondo de esta cámara tiene una serie de perforaciones por las que se efectúa la descarga del producto.

La cámara de descarga queda debajo del fondo de la cámara de almacenamiento. Operando las válvulas de descarga, se deja fluir el azúcar hacia un sistema de cintas transportadoras que la conducen hacia el elevador de salida.

Los terrones se eliminan porque contiene exceso de humedad.

El polvo se separa para facilitar posteriormente el paso del aire acondicionado a través de la capa de azúcar.

La azúcar tratada es enviada al silo mediante cintas transportadoras. El silo pasa por una romana automática y es conducida a un elevador de capachos que lleva el azúcar hasta la cámara de carguío, donde el sistema de cintas transporta el producto hasta una de las bocas de carga.

El azúcar proveniente de la cámara de descarga es llevado mediante cintas y un elevador de capachos hasta un clasificador que separa los terrones formados durante el almacenamiento. Los terrones siguen hacia un desintegrador y de ahí se devuelven a la línea de azúcar granulada que ya pasó por el separador de terrones.

El azúcar libre de terrones pasa por una romana automática y es conducida hasta el ensacado o hacia las unidades que elaboran azúcar pan o azúcar flor, mediante la cinta reversible.

La capacidad de un silo se determina por la cantidad de azúcar que la planta deberá vender entre las campañas.

Durante la campaña se desvía el azúcar que debe ser despachada o elaborada hacia respectivas secciones, el saldo se envía al silo.

Anexo al silo existe una instalación para el acondicionamiento del aire. Este se purifica a través de filtros bactericidas (eliminan bacterias), se enfría (para condensar el agua) a través del sistema de refrigeración, se precalienta en el condensador del sistema de refrigeración y luego se calienta en un calefactor con vapor. Con este tratamiento el aire, previo paso por un regulador de contra-presión, es insuflado a través de la masa de azúcar por un collarín periférico ubicado en el fondo del silo.

El regulador de contra-presión tiene como finalidad, por un lado vencer la pérdida de presión que tendría el aire al pasar a través de toda la masa de azúcar y por otro, evitar que durante el vaciado del silo, llegue a levantar una nube de polvo de azúcar realmente peligrosa. El aire es insuflado también en la torre de carguío y descarguío. Esto significa que todo el sistema está sometido a una leve sobrepresión, de tal manera que si hay alguna abertura sale el aire insuflado y se evita que entre aire del exterior que puede estar contaminado.

Las condiciones de humedad en el silo deben mantenerse constantes. Para lograr esto, la humedad relativa del aire que se hace circular debe ser 70 – 80%. Si ésta aumenta, el azúcar se humedece los rincones del silo; si disminuye, el azúcar se endurece progresivamente. Muchas veces durante la descarga, el azúcar deja de fluir por la presencia de estas capas endurecidas locales. Esto es muy conveniente porque detrás de estas capas pueden formarse huecos en el interior de la masa de azúcar. Por desprendimiento brusco del azúcar que envuelve

estos huecos, se puede formar corrientes inducidas, polvo y el silo se somete a remecimientos más o menos violentos.

Cuando el azúcar se endurece, lo mejor es dejar pasar a través de éste por un tiempo, aire frío filtrado con la humedad del ambiente exterior hasta que de nuevo adquiriera la fluidez necesaria para poder escurrir.

3.16.2.3 Comparación cualitativa entre ambos sistemas

De los antecedentes anteriormente expuestos se pueden desprender algunos elementos que indican las ventajas del silo sobre la bodega:

La utilización del espacio en un silo es mejor y más compacto, ya que se ocupa todo el volumen. Máxima capacidad de almacenamiento por unidad de volumen.

Las condiciones tecnológicas de almacenamiento son óptimas en el silo debido al acondicionamiento del aire que rodea el azúcar.

Los procesos posteriores (azúcar pan y flor) reciben el azúcar en condiciones más higiénicas. Al abrir los envases y vaciarlos no puede evitarse que trazas del polvo depositado sobre los sacos durante el almacenamiento, lleguen a mezclarse con el azúcar.

La seguridad de almacenamiento del azúcar es mayor en el silo que en la bodega, ya que el producto queda depositado en una cámara cerrada.

El silo elimina toda la manipulación de envases, típico del sistema de bodega. Esta simplificación representa un menor empleo de mano de obra, la eliminación de la rotura de envases durante esta manipulación y una mejor presentación y duración del envase despachado, ya que éste va directamente al lugar del carguío.

En las plantas que elaboran azúcar granulada a azúcar pan o azúcar flor, el silo elimina el almacenamiento intermedio en sacos, lo que traduce en una reducción de costos por concepto de estos envases y su manipulación.

El silo de azúcar permite una gran flexibilidad al envasado y despacho de azúcar. EL tipo de envase puede ser cambiado durante el año sin tropiezos. Se puede variar la proporción de los diferentes tipos de envase sin problemas. De acuerdo a las necesidades de ventas. En la bodega de azúcar sólo puede alterarse el tipo de envase de un año para el otro. }

El silo permite postergar la adquisición de los envases de acuerdo al programa de ventas. En el caso de la bodega es necesario adquirir estos envases acuerdo al programa de producción. Lo cual se traduce en un ahorro importante.

La desventaja principal del silo es su alta inversión inicial.

3.16.3 Problemas en almacenamiento de azúcar

La gran mayoría de los problemas durante el almacenamiento de azúcar se derivan de dos causas bien definidas, ellos son:

Calidad de azúcar inadecuada, esto se refiere especialmente a los valores máximos de humedad y de azúcar invertido necesarios a un buen almacenamiento.

Mal acondicionamiento durante el almacenamiento, una causa importante de deterioro de azúcar se debe a este hecho.

En el caso de una bodega es más difícil manejar las condiciones de almacenamiento, ya que en ese caso corresponde a la atmósfera circundante. Todo lo que se puede hacer es evitar las goteras.

El almacenamiento de azúcar en silos permite manejar muy bien los parámetros de almacenamiento, mediante el insuflado de aire descontaminado a temperatura y humedad adecuadas. En este caso el problema se puede presentar porque el equipo de acondicionamiento no funciona bien.

4 Aspectos del mantenimiento tradicional

4.1 Definición de mantenimiento

“El conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta confiabilidad) y con el mayor rendimiento”. [6]

Con esta definición se marca de manera clara la acción del mantenimiento de una empresa. El mantenimiento debe abarcar la administración, ejecución, control y calidad de todas las actividades que aseguren niveles adecuados de disponibilidad y un funcionamiento adecuado de sus equipos para cumplir con los objetivos planteados. Entendiendo como administración del mantenimiento, como el conjunto de planear, organizar y controlar las medidas necesarias para conservar los activos fijos de la empresa, de tal manera que vayan

mejorando sus rendimientos. Para lograr un buen resultado es importante establecer estrategias de mantenimiento que garanticen un buen cuidado de los mismos.

La parte de control del mantenimiento permite asegurar un buen funcionamiento de los activos, mediante una supervisión de actividades, que garanticen que se está logrando lo planeado.

Para establecer un programa de mantenimiento de calidad, lo primero es crear conciencia en los trabajadores a través de programas de motivación, capacitación e información que contribuyan a la atmósfera adecuada para realizar los cambios necesarios. Lo anterior clarifica que el mantenimiento a desarrollar debe ser un proceso bien organizado, el cual permite que la empresa logre los niveles óptimos de desempeño, es decir, lograr una utilización de recursos materiales y físicos de primer nivel.

4.2 Estrategias de mantenimiento

Existen diversas estrategias de mantenimiento, las cuales se clasifican dependiendo de los momentos en que se lleva a cabo el proceso de mantención óptimo y objetivo que este tiene. Además, es de importancia señalar que no existe una misma estrategia de mantención óptima para los procesos productivos, dependiendo de cada caso en particular. En cada uno de los casos, influyen diversos factores que abarcan el ámbito operacional, seguridad ambiental y de los trabajadores, los costos de la mantención, frecuencia de fallas, entre otras; estos factores cobrarán mayor o menor importancia considerando el factor acorde a la empresa para la mantención. Esta estrategia puede estar enfocada en asegurar la operación de un equipo o en la minimización de costos que corresponden a la falla por la disminución de cantidad de fallas.

En estos términos, las estrategias de mantenimiento estudiadas son las siguientes: [6]

Mantenimiento Preventivo: La característica principal de este tipo de mantenimiento es inspección los equipos, con la finalidad de encontrar fallas en su fase inicial y corregirlas en el momento oportuno. Esta inspección se lleva a cabo con una programación basada en las horas de operación de las actividades, tanto de funcionamiento como de limpieza, lubricación y calibración. Con un buen mantenimiento preventivo se obtiene experiencia en el diagnóstico de las fallas y del tiempo de operación de un equipo.

Mantenimiento Predictivo: Este tipo de mantenimiento se basa en el monitoreo de estado del equipo. Se utiliza donde el equipo es crítico para operar y donde el monitoreo es confiable. Para ello se emplean mediciones y análisis de tendencia de parámetros físicos con el fin de detectar, analizar y corregir problemas en los equipos antes que se produzca la falla, esto requiere de un sistema de monitoreo que permita la entrega de información y evaluaciones continuas.

Mantenimiento Proactivo: Para evitar la aparición o concurrencia de fallas. Esta estrategia de mantenimiento se basa en atacar la causa de la falla y no el efecto de esta. Una vez localizada la falla que causa el deterioro del

equipo, no se debe permitir que éstas continúen presentes en la máquina. Por ende, se debe aplicar a lo largo de toda la vida del equipo.

Mantenimiento Correctivo: Conjunto de reparación y sustituciones de elemento deteriorados por repuestos al momento en que se produce el fallo. Es la habitual reparación tras una avería que obliga a detener la instalación o máquina producida por el fallo. En caso de que no se produzca ninguna falla, este tipo de mantenimiento es nulo.

La figura 33 muestra un esquema de las estrategias de mantenimiento, ordenadas de acuerdo de si se realiza antes o después que se presenta la falla.

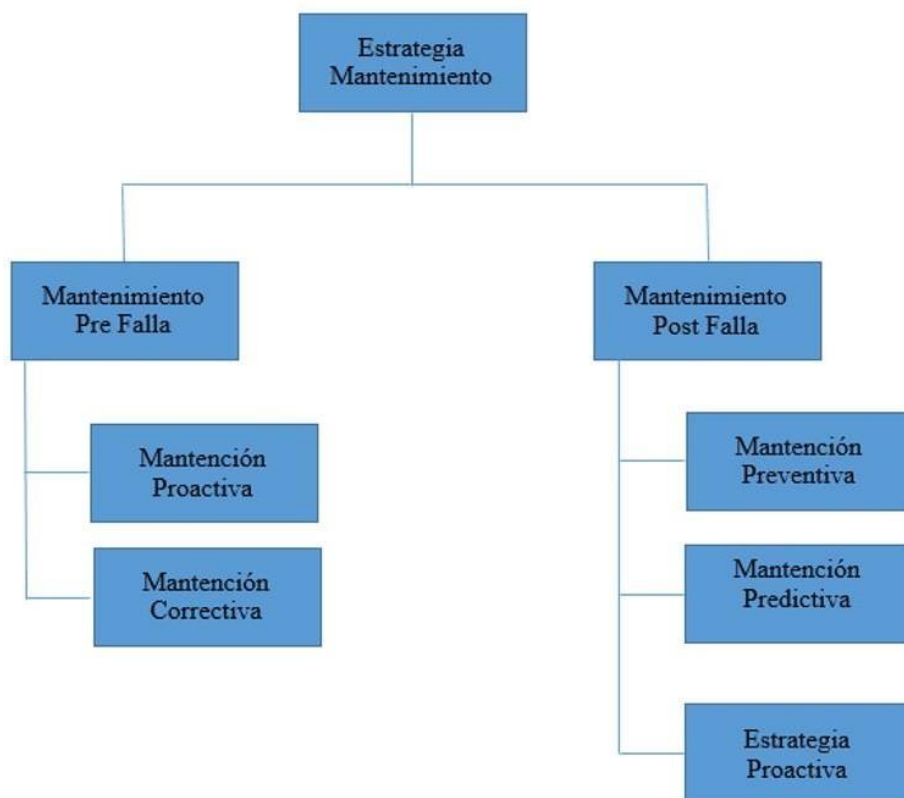


Fig. 33: Estrategias de mantenimiento

4.3 Análisis de criticidad

Existe una variada cantidad de métodos de análisis de criticidad empleados a los sistemas y equipos, para obtener un buen plan de mantenimiento es de vital importancia que se realice un análisis de criticidad.

Analizando cada equipo individualmente y definiendo de manera correcta los equipos críticos con sus modos de falla, con esto enfocar de manera correcta la mantención.

Este análisis es una metodología que nos brinda un indicador proporcional al riesgo, cuya finalidad es de jerarquizar los equipos, en función de criterios técnicos y financieros.

Los criterios tomados en cuenta para desarrollar el análisis son:

- Frecuencia de fallas
- Efectos en la Producción
- Flexibilidad Operacional
- Costo de Mantenimiento

El modelo de criticidad por riesgo (CTR) es bastante sencillo y práctico, empleando el concepto de riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia por la severidad de este. A continuación, se detallarán las expresiones para considerar en la jerarquización de los equipos a partir del modelo CRT.

$$CRT = FF \times C \quad (27)$$

donde,

CTR, es la Criticidad Total por Riesgo

FF, es la Frecuencia de fallos (Fallos ocurridos en un determinado tiempo, Fallos/año)

y C, es la Consecuencia de los eventos de fallos

La expresión de consecuencia está determinada por los siguientes factores:

$$C = (IO \times FO) + CR \quad (28)$$

donde,

IO, es el Factor de Impacto Operacional

FO, es el Factor de Flexibilidad Operacional

y CR, es el Factor de costes de reparación.

La ecuación final para el modelo de criticidad por riesgo CTR será la siguiente:

$$CTR = FF \times [(IO \times FO) + CR] \quad (29)$$

Los factores correspondientes a cada una de las expresiones, se detallarán a continuación:

- Factor de Frecuencia de Fallos (FF):

Frecuencia de Fallos (FF)	Puntaje
Excelente: menos de 1 fallo por año	1
Bueno: De 1 a 2 fallos por año	2
Promedio: Entre 2 a 4 fallos por año	3
Frecuente: Mayor a 5 fallos por año	4

Tabla 6: Frecuencia de Fallos de los equipos

- Factor de Consecuencia (C).
- Impacto Operacional (IO): Definido como los efectos causados en la producción.

Factor de consecuencia (C)	
Impacto Operacional (IO)	Puntaje
No genera ningún efecto significativo sobre la producción, las operaciones o calidad	1
Repercute en costos operativos adicionales asociados a la disponibilidad del equipo	2
Impacta los niveles de Producción o Calidad	4
Parada inmediata de un sector	6
Parada inmediata de línea de producción	10

Tabla 7: Frecuencia de Fallos de los equipos

- Factor de Flexibilidad Operacional (FO): Definida como la posibilidad de realizar un cambio rápido para continuar con la producción sin incurrir en costos o pérdidas considerables.

Factor de consecuencia (C)	
Flexibilidad operacional (FO)	Puntaje
Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística bajos	1

Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios	2
No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la mantención, tiempos de reparación y logística grandes	4

Tabla 8: Flexibilidad operacional

- Impacto por Costos de Reparación (CR): Se refiere a todos los costos que implica la labor de mantenimiento, dejando fuera los costos de producción sufridos por falla.

Factor de consecuencia (C)	
Impacto por Costos de Reparación (CR)	Puntaje
Costes de reparación, materiales y mano de obra menores desde 0 a 1.000.000	1
Costes de reparación, materiales y mano de obra entre 1.000.000 y 2.000.0000	5
Costes de reparación, materiales y mano de obra entre 2.000.000 y 5.000.0000	5
Costes de reparación, materiales y mano de obra entre 5.000.000 y 10.000.0000	20

Tabla 9: Costos de reparación

4.3.1 FMECA

Este tipo de análisis de criticidad corresponde a una metodología diseñada para identificar los posibles modos de fallas de un proceso o equipo, para cada componente se analiza los modos de fallas, causas y efectos en el proceso. Teniendo en cuenta que el nivel de detalle en la identificación de modos de fallas, va a permitir relacionar una acción de prevención y/o mitigación de riesgo, para una actividad de mantenimiento. El objetivo detrás de FMECA, es en lo posible abarcar la mayor cantidad de escenarios posibles en los modos de fallas que se pueden presentar en el equipo, estudiando cuidadosamente los distintos componentes. La idea es aplicar esta metodología a los equipos considerados críticos, antes analizados por una matriz de criticidad con puntuaciones de segmentación, para así generar un barrido de sistema y sub-sistema detallados pasando por cada componente y contemplando todos los modos de fallas. Lo primordial es que este método no solo nombra los modos de falla, sino que analiza su causa, efectos y las tareas que se deben llevar a cabo para minimizar la posibilidad que ocurra o su consecuencia. Por otra parte, esta metodología nos permite jerarquizar las posibles fallas, así tener en cuenta que modo de falla es más crítico dentro del equipo, entregando directrices para posibles estudios futuros más detallados.

En la figura 34, podemos observar el flujo de estructura de información para la construcción de FMECA.

Fig. 34: Flujo de estructura de información para la construcción de metodología FMECA.

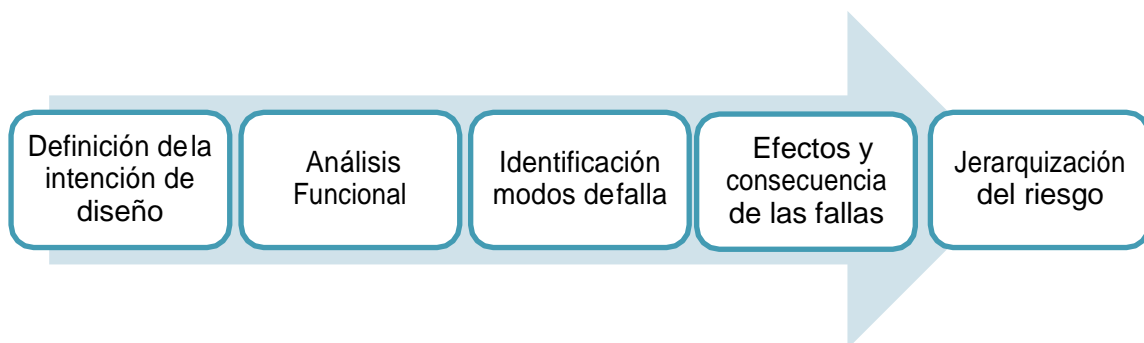
4.4 Confiabilidad

La confiabilidad (denotada por la letra $R(t)$) en mantenimiento se define como la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las que fue diseñado, durante el período de tiempo especificado y bajo las condiciones de operación dadas. Una vez que los equipos han sido cuidadosamente seleccionados y en el estudio se ha considerado e incorporado la experiencia operacional que asegure la mantenibilidad y la operatividad, entonces el desafío es lograr la mayor confiabilidad operacional posible. [3] El primer recurso necesario de gestionar adecuadamente en todas sus dimensiones son las personas. Al contar con un equipo humano adecuado y motivado, permite una alta probabilidad de una gestión de personas exitosa, con los beneficios económicos y sociales que esto conlleva.

El siguiente paso para este estudio antes de definir los parámetros de confiabilidad, es hacer bien lo básico, referido con esto a lograr un buen desempeño no solo en la estrategia de mantenimiento preventivo, sino que, incluyendo el mantenimiento correctivo y proactivo, lo cual requiere una disciplina de criterios de aceptabilidad.

Para continuar con el estudio basándose en la confiabilidad de los equipos se debe hacer la siguiente pregunta: ¿Cuántas fallas podría haber en el período de producción de la remolacha, el primer mes, en los siguientes seis meses y en toda la temporada anual? Para esto se debe incluir aristas de confiabilidad y costos globales. Las aristas pronostican el tiempo en que ocurrirán las fallas, cuanta demora en repararse, costo de reparación y mantención, recambio de componentes de los equipos, entre otros factores. A continuación, se definen los conceptos bases para la confiabilidad.

4.4.1 Conceptos básicos



Disponibilidad: Es la razón entre las horas de funcionamiento productivo de una planta o máquina, respetando los estándares cualitativos y cuantitativos, y el tiempo de funcionamiento programado y esperado. Este

parámetro entrega una medida de la eficacia de las operaciones del mantenimiento. [4] La disponibilidad de un equipo se define con la siguiente ecuación.

$$A = \left(\frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \right) \quad (30)$$

En donde,

MTBF: Tiempo medio entre fallas.

MTTR: Tiempo medio para reparar.

A : Disponibilidad

Al obtener el valor de disponibilidad, podemos saber cuál es el tiempo de ineficiencia que tendrán los equipos estudiados, de esta manera sabremos cuanto tiempo están los equipos sin utilización.

Probabilidad acumulada de falla F(t): Se define como la probabilidad que un equipo falle en un intervalo de tiempo (0,t). [7] Entonces:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (31)$$

Densidad de probabilidad de falla f (t): Es la probabilidad de que un equipo que no ha fallado en un intervalo (0, t) si lo haga en un intervalo (t, t + dt). [1]

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (32)$$

Tasa de Falla $\lambda(t)$: Se define como el número esperado de fallas del sistema o equipo en un intervalo de tiempo (t, t + dt). Se expresa en [fallas/t], es una probabilidad condicional que se expresa: [7]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (33)$$

Tiempo medio para fallar (MTBF): Definido como el tiempo promedio en que el equipo no falla.

Vida media (MTTF): Corresponde al tiempo esperado para que un equipo falle o tiempo medio para fallar.

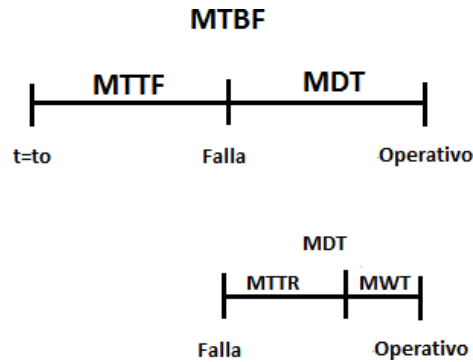
Mean Time To Failure. [7]

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (34)$$

Tiempo de detención (MDT): En inglés Mean Detention Time, corresponde al tiempo que tarda cada detención. A su vez MDT se compone del tiempo en que tarda la reparación y el tiempo de espera de por ejemplo, retrasos en entrega de repuestos (MTTR: Mean Time To Repair y MWT: Mean Waiting Time).

Entonces, el ciclo de un componente utilizando los conceptos básicos sería el siguiente:

Fig. 35: Esquema representativo de los tiempos del ciclo de un equipo.



4.4.2 Modelo de Weibull

La función de confiabilidad de tasa de falla Weibull se expresa en la ecuación:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} \quad (35)$$

donde,

$(t - \gamma) \geq 0$ y γ es el parámetro de inicio (en unidades temporales).

$\beta > 0$ es el parámetro de la forma.

$\eta > 0$ es el parámetro de la escala (en unidades temporales).

Además, se tienen las siguientes expresiones:

Confiabilidad $R(t)$:

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (36)$$

Probabilidad Acumulada de la Falla (F(t)):

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (37)$$

Densidad de Probabilidad de la Falla (f(t)):

$$f(t) = \frac{\lambda}{\tau} * \left(\frac{t - \tau}{\tau} \right)^{\lambda - 1} * \lambda * \tau^{-\lambda} e^{-\left(\frac{t - \tau}{\tau}\right)^\lambda} \quad (38)$$

Tiempo Medio de Falla - Mean Time To Failure (MTTF):

$$MTTF = \tau + \tau \Gamma(1 + \frac{1}{\lambda}) \quad (39)$$

donde, Γ corresponde a la función Gamma.

4.5 Estructura de costos

Para realizar el estudio es necesario establecer la estructura de los costos asociados al plan de mantenimiento.

De esta manera, los costos relacionados en el proceso de mantención son los siguientes:

Costos de intervención (Ci): Incluye los costos de mano de obra, costos de materiales deteriorados, entre otros.

Costos de fallas (Cf): Costo de falla al producirse una detención en momento de producción, debido a una ocurrencia de falla en particular. Esta falla puede ser una detención total de la planta o una zona específica. Incluye los costos que implicar la detención de producción, como las horas que se ha dejado de producir.

Costos de almacenamiento (Ca): Corresponde al costo de mantener en stock los repuestos, que serán utilizados al momento de reparar la falla.

Costos por sobreinversión (Csi): Corresponde a inversiones realizadas en etapa de diseño de un equipo para disminuir la probabilidad de falla futura.

Costo global (Cg): Corresponde a la suma de todos los costos anteriormente mencionados.

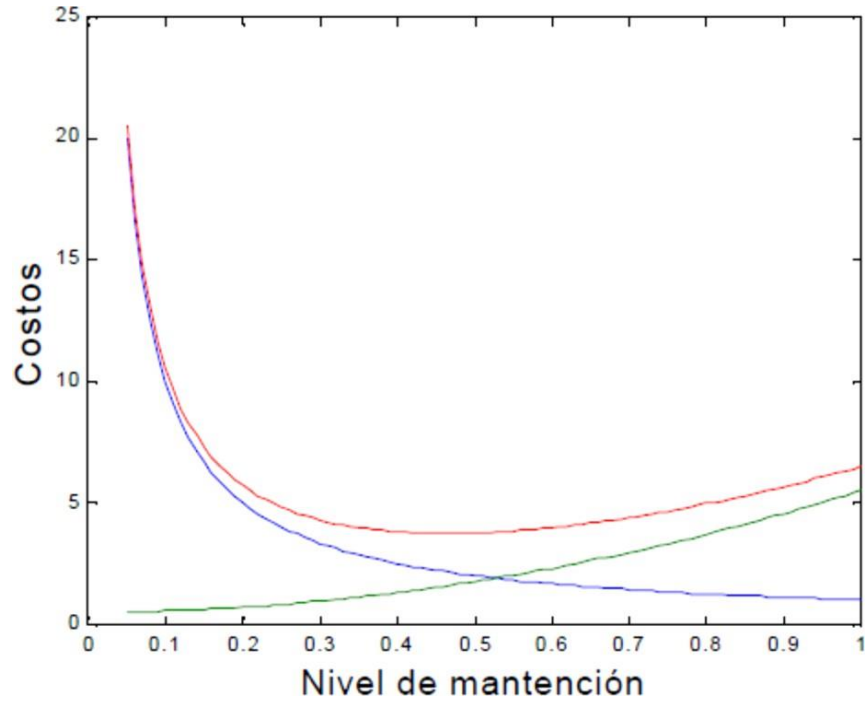


Fig.36: Gráfico de costos relacionados a la mantención.

Costo global (curva roja), costo de falla (curva azul) y costo de intervención (curva verde)

4.6 Selección de estrategia de mantenimiento

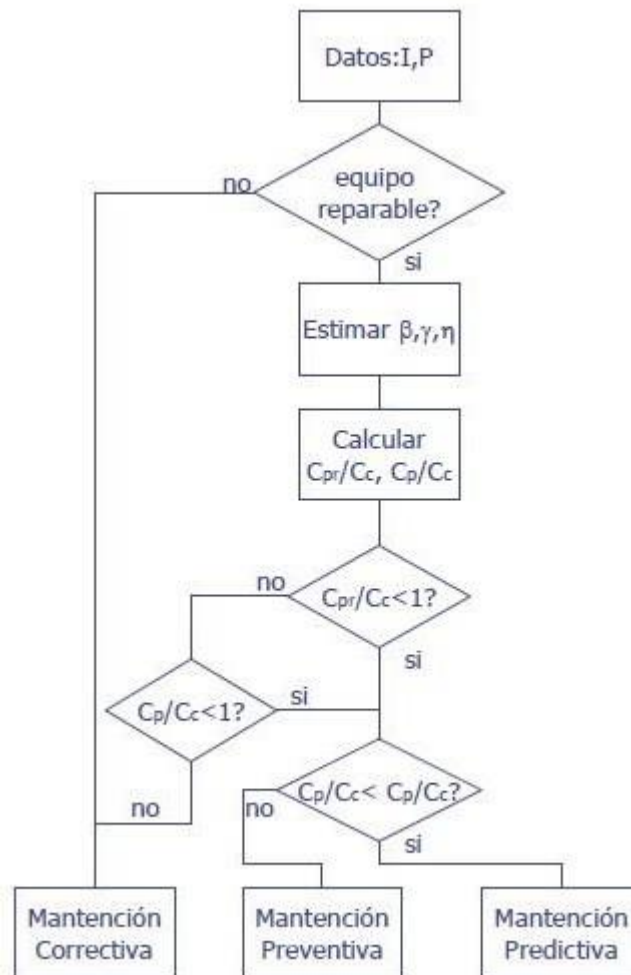


Fig. 37: Esquema de método de selección de estrategia de mantenimiento. [7]

La figura 37 muestra el flujo de decisiones que permiten identificar la estrategia de mantenimiento adecuada para realizar la mantención pertinente a la reparación del equipo. En este esquema C_{pr} , C_c , C_p , corresponde al costo predictivo, costo correctivo y costo preventivo, respectivamente. La selección de estrategia de mantenimiento depende de los factores como las frecuencias de fallas y parámetros de Weibull (β , γ y η).

Cabe destacar que cada una de las estrategias tiene sus tiempos y momentos para realizar dicha mantención, los cuales son limitantes al momento de decidir a qué estrategia recurrir.

Para elegir una política es necesario unir todos los resultados, tanto del estudio cuantitativo como cualitativo.

La importancia de la política de abastecimiento dentro del estudio realizado es la determinación del “cómo”; “cuándo” y por “cuánto” deben realizarse las adquisiciones de los componentes de los equipos. Junto con el esquema planteado, la estrategia de mantenimiento se selecciona por el comportamiento del componente crítico, además de variables cualitativas como la criticidad del proceso, dependencia de la configuración de equipos y por ende componentes de éste.

Por otra parte, se tiene:

$$C_{total} = \left(\frac{C_i + C_f}{\lambda} \right) \quad (40)$$

4.7 Frecuencia de inspecciones

El propósito básico de las inspecciones es determinar el estado de un equipo. Conocidos los valores de los síntomas que presenta este se pueden tomar acciones como la selección de estrategia de mantenimiento.

Los factores que afectan la frecuencia de inspecciones son: [7]

- Costo global de inspección (intervención, falla).
- Beneficios de la inspección, tales como la detención y corrección de defectos incipientes antes de la falla catastrófica.

Se considera el costo global mínimo a la hora de tener una detención o inspección, para ello se toman las siguientes consideraciones:

1. Los equipos fallan de tiempo en tiempo, y su reparación requiere de mano de obra y materiales (C_i).
2. Implementar programa de inspecciones.
3. Las inspecciones tienen costos por materiales y mano de obra (C_i) y por la detención del equipo en horario de producción (C_f).

Para la distribución de Weibull, la frecuencia óptima de inspección está representada por la siguiente expresión: [7]

$$t^* = \sqrt{\frac{1}{\lambda} \frac{C_i + C_f}{C_i \lambda}} \quad (41)$$

donde,

MTTR, es el Tiempo medio para reparar.

MTTI, es el Tiempo medio de intervención.

Cf, es el Costo de falla

Ci,i, es el Costo de intervenciones de inspección

Además, el parámetro Weibull η (parámetro de escala) se considera pendiente de la frecuencia de fallas. Este parámetro es dado por la siguiente expresión:

$$\eta = \lambda * \lambda \quad (42)$$

5 Metodología

En este apartado se exponen las condiciones y consideraciones tomadas para realizar el estudio de plan de mantenimiento.

Este estudio se centra en el análisis de 67 equipos ubicados en la zona de recepción y preparación de la remolacha en la empresa IANSA S.A Ñuble. Los cuales se encuentran sin un plan de inspecciones y mantención, provocando altos costos y desinformación del estado de los equipos en cuestión. A continuación, se detallan cada uno de los puntos con los cuales se describe el trabajo.

5.1 Reconocimiento del problema y equipos de la planta (Etapa I)

Para comprender y llevar a cabalidad el estudio, es de vital importancia conocer el problema en cuestión. En primer lugar, se conoce el proceso de recepción y preparación de remolacha, con reuniones agendadas con los encargados. Para ello, se generan distintas instancias: visitas a terreno, estudio de equipos, revisión de fichas técnicas (planos e imágenes), revisión de manual de fabricantes y estudio de cada equipo. Una vez entendido los problemas, se llega al acuerdo de realizar un estudio para la implementación de un plan de mantenimiento para estos 67 equipos, de los cuales se seleccionan los equipos críticos para un análisis en detalle.

En esta etapa se muestran los equipos de la zona de recepción y preparación de remolacha:

5.2 Análisis de criticidad y modo de falla (Etapa II)

Luego de conocer el procedimiento productivo general de la planta, sus líneas de producción e inducciones correspondientes a inocuidad y seguridad, es posible interiorizarse en el área de mantención. Una vez ya conocido los equipos y sus componentes, es posible comenzar con el análisis de criticidad y fallas de estos. En el ámbito de mantención, tener plenamente jerarquizados los equipos permite establecer de manera más eficiente la priorización de los sistemas en la ejecución del trabajo.

5.2.1 Matriz de criticidad

En primera instancia, se analizará cada equipo en cuestión con una matriz de criticidad, para así poder identificar la criticidad de los equipos estudiados.

El análisis de la criticidad de los sistemas ayuda a toma decisiones más acertadas sobre el nivel de los equipos y piezas de repuestos que deben estar en stock, así también como el requerimiento de las partes, materiales y herramientas que deben estar disponibles en los almacenes de la planta.

Posteriormente a la jerarquización de los activos físicos de la planta en función a su criticidad (equipos críticos, semi-críticos y no críticos), se realiza una inspección de técnica visual a detalle de todos los equipos clasificados como críticos y medianamente críticos para la planta. Los equipos no críticos serán inspeccionados con un nivel menor de detalle.

Primer paso, corresponde a analizar la criticidad de los 67 equipos correspondientes al área a trabajar, e identificar los equipos críticos. Para esto se ha generado una matriz de criticidad basada en diversos factores.

Para comenzar, se pide en área técnica de la empresa un histórico de fallas con una extensión temporal de 1 año atrás. En este archivo “Excel” de Microsoft Office se encuentran las órdenes de trabajo con especificaciones de fecha de falla y reparación, ubicación técnica, denominación del objeto, descripción del material, encargado de realizar la reparación y costos globales. A cada uno de estos equipos se le asigna un puntaje, según su frecuencia, costos, flexibilidad operacional y efecto en la producción. Luego se genera el modelo para definir la criticidad.

Lista de equipos y subequipos de Zona de Recepción y Preparación de la remolacha en Iansa S.A:

Sector 1: Transporte y almacenamiento de remolacha

1. Descargador de camiones
- 1.1 Pitones
2. Despastador 1 a silo

- 2.1 Despastador
- 2.2 Motor
- 3. Despastador 2 a silo
 - 3.1 Despastador
 - 3.2 Motor
- 4. Compuerta oscilante a silo
 - 4.1 Motoreductor
 - 4.2 Compuerta oscilante
 - 4.3 Motor
- 5. Compuerta oscilante a fábrica
 - 5.1 Motoreductor
 - 5.2 Motoreductor
 - 5.3 Compuerta oscilante
- 6. Compuerta desviadora
- 7. Despedrador a silo
 - 7.1 Tambor
 - 7.2 Variador de frecuencia
 - 7.3 Motoreductor
- 8. Cinta transportadora de piedras
 - 8.1 Motoreductor
 - 8.2 Cinta transportadora
- 9. Bomba achique despedrador a silo
 - 9.1 Bomba
 - 9.2 Motor
- 10. Compuerta neumática a rueda
- 11. Rueda elevadora a silo
 - 11.1 Reductor
 - 11.2 Motor
 - 11.3 Rueda elevadora
 - 11.4 Acoplamiento
- 12. Cinta de remolacha a silos
 - 12.1 Reductor
 - 12.2 Motor
 - 12.3 Cinta transportadora
 - 12.4 Variador de frecuencia
- 13. Cinta pluma

- 13.1 Cinta transportadora
- 13.2 Motor
- 14. Megaterio
 - 14.1 Reductor
 - 14.2 Motor
 - 14.3 Motor
 - 14.4 Motor
 - 14.5 Motor
 - 14.6 Motor
 - 14.7 Huinche
 - 14.8 Huinche
 - 14.9 Puente desplazable
 - 14.10 Motorreductor
 - 14.11 Motorreductor
- 15. Silos de descarga
- 16. Pitones y válvulas en silos
 - 16.1 Pitones
 - 16.2 Válvulas
 - 16.3 Pitón recto
- 17. Compuertas desviadoras
 - 17.1 Compuerta 1
 - 17.2 Compuerta 2
- 18. Bomba 1 de remolacha
 - 18.1 Bomba
 - 18.2 Variador de frecuencia
 - 18.3 Motor
- 19. Bomba 2 de remolacha
 - 19.1 Bomba
 - 19.2 Variador de frecuencia
 - 19.3 Motor
- 20. Separador de flotantes
 - 20.1 Separador de flotantes
 - 20.2 Sistema neumático
 - 20.3 Motorreductor
 - 20.4 Variador de frecuencia
 - 20.5 Motorreductor

- 21. Ventilador despastador a fábrica
 - 21.1 Ventilador
 - 21.2 Motor
- 22. Despastador GKA
 - 22.1 Despastador
 - 22.2 Motor
- 23. Despedrador a fábrica
 - 23.1 Despedrador
 - 23.2 Reductor
 - 23.3 Variador de frecuencia
 - 23.4 Motor
- 24. Lavadora final
 - 24.1 Lavadora
 - 24.2 Motor
 - 24.3 Motor
 - 24.4 Reductor
 - 24.5 Reductor
 - 24.6 Variador de frecuencia
- 25. Harnero 3 separador de finos
 - 25.1 Tamiz vibratorio
 - 25.2 Motor
- 26. Cinta de descarte
 - 26.1 Cinta transportadora
 - 26.2 Motorreductor
- 27. Harnero separador de colillas
 - 27.1 Motor
 - 27.2 Tamiz vibratorio
- 28. Separador balístico
 - 28.1 Separador balístico
 - 28.2 Motor
 - 28.3 Reductor
 - 28.4 Convertidor de frecuencia
- 29. Cinta inclinada de pasto
 - 29.1 Cinta transportadora
 - 29.2 Motorreductor
- 30. Gusano de colillas

- 30.1 Motorreductor
- 31. Elevador de colillas
 - 31.1 Elevador de capachos
 - 31.2 Motorreductor
- 32. Bomba de agua lavado final
 - 32.1 Bomba
 - 32.2 Motor
- 33. Electroimán
- 34. Cinta de remolacha a fábrica
 - 34.1 Motor
 - 34.2 Acoplamiento
 - 34.3 Cinta transportadora
 - 34.4 Reductor

Sector 2: Transporte de agua

- 35. Bomba 1 relevadora agua sucia
 - 35.1 Bomba
 - 35.2 Motor
- 36. Variador de frecuencia
- 37. Bomba 2 relevadora agua sucia
 - 37.1 Bomba
 - 37.2 Motor
 - 37.3 Variador de frecuencia
- 38. Bomba 1 achique de cisterna agua sucia
 - 38.1 Bomba
 - 38.2 Bomba
- 39. Harnero 1
 - 39.1 Tamiz vibratorio
 - 39.2 Motor
- 40. Harnero 2
 - 40.1 Tamiz vibratorio
 - 40.2 Motor
- 41. Decantador de lamelas
- 42. Bomba 1 extractora de lodos
 - 42.1 Bomba
 - 42.2 Motor

- 42.3 Variador de frecuencia
- 43. Bomba 2 extractora de lodos
 - 43.1 Bomba
 - 43.2 Motor
 - 43.3 Variador de frecuencia
- 44. Bomba 3 extractora de lodos
 - 44.1 Bomba
 - 44.2 Motor
 - 44.3 Variador de frecuencia
- 45. Bomba 4 extractora de lodos
 - 45.1 Bomba
 - 45.2 Motor
 - 45.3 Variador de frecuencia
- 46. Bomba 5 extractora de lodos
 - 46.1 Bomba
 - 46.2 Motor
 - 46.3 Variador de frecuencia
- 47. Bomba 6 extractora de lodos
 - 47.1 Bomba
 - 47.2 Motor
 - 47.3 Variador de frecuencia
- 48. Bomba 7 extractora de lodos
 - 48.1 Bomba
 - 48.2 Motor
 - 48.3 Variador de frecuencia
- 49. Bomba 8 extractora de lodos
 - 49.1 Bomba
 - 49.2 Motor
 - 49.3 Variador de frecuencia
- 50. Bomba achique de lodos
- 51. Válvulas
- 52. Tolva receptora de cal
- 53. Triturador de cal
 - 53.1 Triturador
 - 53.2 Motorreductor
- 54. Gusano alimentador a tambor apagador

- 54.1 Gusano inclinado
- 54.2 Motor
- 55. Apagador de cal
 - 55.1 Motor
 - 55.2 Tablero sistema
 - 55.3 Tambor apagador
- 56. Estanque lechada de cal
 - 56.1 Depósito de cal
 - 56.2 Agitador
- 57. Bomba lechada de cal
 - 57.1 Motor eléctrico
 - 57.2 Bomba
- 58. Bomba 1 lodos a lagunas
 - 58.1 Bomba
 - 58.2 Motor
 - 58.3 Variador de frecuencia
- 59. Bomba 2 lodos a lagunas
 - 59.1 Bomba
 - 59.2 Motor
 - 59.3 Variador de frecuencia
- 60. Compuerta de agua fresca
 - 60.1 Válvula
 - 60.2 Motor
 - 60.3 Variador de frecuencia
 - 60.4 Compuerta
- 61. Bomba 1 de agua industrial
 - 61.1 Variador de frecuencia
 - 61.2 Bomba
 - 61.3 Motor
- 62. Bomba 2 de agua industrial
 - 62.1 Variador de frecuencia
 - 62.2 Bomba
 - 62.3 Motor
- 63. Bomba 3 de agua industrial
 - 63.1 Variador de frecuencia
 - 63.2 Bomba

- 63.3 Motor
- 64. Pozo de agua 1
- 65. Pozo de agua 2
- 66. Pozo de agua 3
- 67. Pozo de agua 4
- 68. Bomba de pozo 1
- 68.1 Bomba
- 68.2 Motor
- 69. Bomba relevadora 1 agua de pozo
- 69.1 Bomba
- 69.2 Motor
- 70. Filtros de agua potable
- 71. Estanque concreto de agua potable
- 72. Estanque concreto de agua potable
- 73. Estanque para agua fresca
- 74. Estanque de agua caliente

Sector 3: Casa de bombas

- 75. Bomba 1 descarga húmeda (elfa)
- 75.1 Bomba
- 75.2 Motor
- 75.3 Variador de frecuencia
- 76. Bomba 2 descarga húmeda (elfa)
- 76.1 Bomba
- 76.2 Motor
- 76.3 Variador de frecuencia
- 77. Bomba refrigerante prensa estopa
- 77.1 Bomba
- 77.2 Motor
- 78. Filtros de agua potable
- 78.1 Filtro de succión
- 78.2 Filtro de descarga
- 79. Bomba 1 control de espuma
- 79.1 Bomba
- 79.2 Motor
- 80. Bomba 1 agua flotación a silos

- 80.1 Motor
- 80.2 Bomba
- 81. Bomba 2 agua flotación a silos
 - 81.1 Motor
 - 81.2 Bomba
- 82. Bomba achique
 - 82.1 Bomba
 - 82.2 Motor
- 83. Válvulas casa de bombas

Es necesario para realizar el análisis de criticidad realizarlo a cada uno de los equipos y sus subequipos. Para un mejor detalle se trabaja con los equipos llamados críticos.

Modelo Frecuencia x Consecuencia:

Este modelo fue descrito y planteado en Antecedentes Generales, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} * \text{Criticidad} \quad (43)$$

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} * [(\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CR}] \quad (44)$$

Donde,

IO = Factor de Impacto Operacional

FO = Factor de Flexibilidad Operacional

CR = Factor de costes de reparación

Los factores frecuencia de fallas se encuentran en Tabla N°1, los de Impacto Operacional están especificados en Tabla N°2, este factor nos muestra el impacto en producción que provoca la falla de un equipo. Los factores de Flexibilidad Operacional en Tabla N°3, están directamente relacionado con el stock en bodega de los repuestos para que el equipo vuelva a funcionar sin mayores problemas, tiempos de reparación y logísticas para la sustitución. El factor de Coste de Reparación correspondiente a cada equipo se encuentra especificado por rangos en Tabla N°4, incluye los costos de mano de obra, costos de materiales, excluyendo costos de producción.

Los valores de productividad y margen son confidenciales, no se expondrán con números exactos en este trabajo.

Posteriormente, según los puntajes definidos para cada criterio y fórmula que rige el modelo, es posible generar la siguiente matriz de criticidad.

En la figura N° 9 se observa la matriz de criticidad, donde ubicados por color nos muestra el criterio que genera. Siendo el color Blanco (C) equipo no – crítico, color amarillo (B) equipo semi – crítico y el color rojo (A) equipo crítico.



Fig. 38: Matriz de Criticidad de Frecuencia vs Consecuencia.

5.2.2 FMECA

Luego de analizar cada equipo mediante el análisis de criticidad, obtenemos los equipos definidos como críticos. A los cuales se les someterá a un segundo análisis de modo de falla. La metodología de este método llamado FMECA consiste en subdividir los equipos críticos en subsistemas teniendo en consideración la función de cada componente, con esto identificar las fallas de cada parte las cuales pueden ocasionarse por pérdida de función. Para esto tenemos que tener en cuenta los modos en que puede fallar y los efectos que causa en el proceso. Finalmente se recomienda una tarea específica para prevenir esta falla en su defecto, realizar la mantención correctiva para reparar la falla.

5.3 Plan de Mantenimiento (Etapa III)

La planeación del plan de mantenimiento permite programar las tareas a mediano y largo plazo con la finalidad de darle dirección a la industria.

Se desarrolla una serie de tareas las cuales darán como resultado la elaboración del protocolo de mantenimiento acorde a la instalación se genera una lista completa y detallada que en conjunto a los trabajadores y operadores generan las acciones de mantenimiento preventivo a realizar.

Esto permite anticiparse a los fallos que se pueden presentar, para atacarlos a tiempo y así lograr el mínimo impacto de funcionamiento del sistema.

Junto con el protocolo de cada equipo del plan matriz, se obtienen los parámetros de Weibull que nos permiten circunscribir la confiabilidad.

Posteriormente se agrupan en sistemas, especialidad y frecuencia. La dificultad presente es elaborar un protocolo para cada uno de los equipos de forma rigurosa y eficaz. Para ello, es necesario contar con una numerosa documentación y apoyo de los operadores, personal e ingenieros de la planta. Cabe destacar que este modelo se genera en factores en base a frecuencia de falla, costos de mantención, objetivos de la empresa y factores operacionales.

5.3.1 Parámetros de Weibull

Para la metodología a utilizar para la estimación de parámetros de Weibull, el siguiente método es el apropiado [8]:

Se considera para este caso $\gamma=0$, queremos estimar los valores de η y β de la función.

Posteriormente, hacer los ajustes lineales correspondientes.

$$F(t) = 1 - \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \quad (45)$$

$$X = \ln\left(\frac{t}{\eta}\right) \quad (46)$$

$$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) \quad (47)$$

Luego, se pretende graficar X vs Y. Para ello es necesario tener que definir la función F(t), la cual puede ser establecida por el método de rangos medios o el método de rangos medianos.

- Métodos de los Rangos Medios: (48)

$$\hat{\theta} = \frac{n}{n+1}$$

- Método de los Rangos Medianos: (49)

$$\hat{\theta} = \frac{n - 0,3}{n + 0,4}$$

Donde “n” se representa como la cantidad de datos.

Al obtener los valores de X e Y se deben graficar los valores y se deben obtener los valores lineales con su ajuste lineal correspondiente. De esta forma se obtienen la pendiente “A” y el coeficiente de posición “B” de la recta.

Se calculan los parámetros de Weibull Beta (β) y Eta (η) según las expresiones siguientes:

- Parámetro Beta: (50)

$$\beta = \frac{1}{A}$$

- Parámetro Eta: (51)

$$\eta = \frac{1}{\beta} \left(\frac{1}{\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

Posteriormente a calcular los parámetros Beta y Eta se procede a calcular la confiabilidad según fórmula de Weibull. Para esto se calcula con la expresión:

- Confiabilidad: (52)

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right)$$

Luego se calcula la probabilidad acumulada de falla F(t) y se obtiene la diferencia con el valor Fi. Con ello se obtiene el módulo de la diferencia calculada y se optimiza mediante la herramienta “solver” de Microsoft Excel minimizando la suma de las diferencias y variando los parámetros de Weibull.

Para la certeza de los resultados a obtener, es necesario aplicar un test de validación. Para ello se utiliza la prueba de Kolmogorov – Smirnov para la distribución de probabilidades entre lo teórico y lo práctico.

5.3.2 Selección de estrategia de mantenimiento

Para la selección de la estrategia de mantenimiento a utilizar se tomarán en cuenta los costos asociados a las intervenciones de mantenciones preventiva o correctiva para cada equipo crítico.

Los costos de las mantenciones han sido considerados según las órdenes de trabajo proporcionadas por los encargados de mantención de la empresa azucarera IANSA S.A.

Primero se deben calcular los costos de las mantenciones preventivas y correctivas, obtenidos estos valores se calcula un parámetro “Sigma” correspondiente a la razón entre el costo de intervención preventiva y correctiva.

Siguiendo con el valor obtenido “sigma” y tomando en cuenta los valores de Weibull para los equipos críticos obtenidos anteriormente, se procede a definir la estrategia de mantenimiento buscando el mínimo en el gráfico generado por la razón entre el costo global preventivo y correctivo y el parámetro “Xp”. Este parámetro corresponde a una variable auxiliar en base a los parámetros de Weibull calculados, definida por la expresión (14).

Cuando el valor mínimo de la curva del gráfico es menor que 1, se selecciona la estrategia de mantenimiento preventiva. Si el valor es mayor que 1, la estrategia es correctiva. En el caso de que el valor sea igual a 1 o muy similar, el ensayo no es concluyente.

Para concluir, en el caso de que la estrategia de mantenimiento sea preventiva se procede a estimar el tiempo óptimo de intervenciones preventivas para el equipo. Esto despejando el tiempo “t” de la expresión (14) para el mínimo obtenido anteriormente.

5.3.3 Frecuencia de inspecciones

Para estimar el valor de la frecuencia de inspecciones se consideran los costos de falla y los costos de intervención de mantenimiento correctivo y los costos de intervención debidos a la inspección. Se propone sólo considerar los costos de intervención de inspección debido a que la estrategia es para una inspección visual o, cualquier tipo de inspección que no conlleve al detenimiento del equipo en cuestión.

La obtención de los costos asociados al mantenimiento correctivo de los equipos, se han obtenido a partir de las órdenes de trabajos facilitadas en el archivo técnico de la planta azucarera. En tanto los costos de intervenciones de inspección se han calculado al considerar el costo de Hora Hombre (HH) y un porcentaje del costo de intervención de la mantención correctiva (porcentaje estimado de 33,33%).

Luego de estar definidos los costos de las intervenciones e inspecciones, se procede a estimar los tiempos necesarios para llevar a cabo estos trabajos. Primero se procede a calcular los parámetros MTTR (tiempo medio para reparar) de falla para cada equipo crítico. Se ha tomado en cuenta la igualdad entre los parámetros MTTR y MTTI (tiempo medio de intervención). Además, se ha seleccionado un número de inspecciones visuales iniciales para los equipos dado por la cantidad de mantenciones correctivas registradas.

Para concluir, junto con lo presentado anteriormente y los parámetros de Weibull se proceden a calcular mediante la expresión (15) la cantidad de frecuencias óptima de inspecciones para cada equipo crítico.

6 Resultados

6.1 Resultado matriz de criticidad

Sector 1: Transporte y almacenamiento de remolacha

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Descargador de camiones	Pitones	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Despastador 1 a Silo	Despastador	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	1	1	3	9	Semi-Crítico
Despastador 2 a Silo	Despastador	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Compuerta oscilante a silo	Motoreductor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Compuerta Oscil.	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	1	1	3	9	No Crítico
Compuerta oscilante a fabrica	Motoreductor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motoreductor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Compuerta Oscil.	2	1	2	1	3	6	No Crítico
Compuerta desviadora	Compuerta Desv.	1	4	2	1	9	9	No Crítico
Despedrador a silo	Tambor	3	4	1	2	6	18	Semi-Crítico
	Variador de Frec.	3	2	1	2	4	12	Semi-Crítico
	Motoreductor	3	2	1	2	4	12	Semi-Crítico
Cinta transportadora de piedras	Motoreductor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Cinta Transp.	2	1	1	1	2	4	No Crítico
Bomba achique despedrador silo	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico

	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Compuerta neumática a rueda	Sist. Neumático	2	2	2	1	5	10	Semi-Crítico

Tabla 10: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha. Elaboración propia.

Sector 1: Transporte y almacenamiento de remolacha

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Rueda elevadora a silo	Reductor	3	6	2	2	14	42	Semi-Crítico
	Motor	3	6	2	2	14	42	Semi-Crítico
	Rueda Elevadora	3	6	2	2	14	42	Crítico
	Acomplamiento	3	6	2	2	14	42	Crítico
Cinta de remolacha a silos	Reductor	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Motor	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Cinta Transp.	3	6	2	1	13	39	Crítico
	Variador de Frec.	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
Cinta pluma	Cinta Transp.	2	6	2	3	15	30	Crítico
	Motor	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
Megaterio	Reductor	2	6	2	2	14	28	Semi-Crítico
	Motor	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Motor	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Motor	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Motor	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Motor	2	6	2	2	14	28	Semi-Crítico
	Huinche	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Huinche	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Puente Despl.	3	6	2	1	13	39	Crítico
	Motorreductor	2	4	2	2	10	20	Semi-Crítico
	Motorreductor	2	6	2	2	14	28	Semi-Crítico

Tabla 11: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha. Elaboración propia.

Sector 1: Transporte y almacenamiento de remolacha

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Silos de descarga	Silos de Remolacha	2	2	1	1	3	6	No Crítico
Pitones y válvulas en silos	Pitones	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Válvulas	2	2	2	1	5	10	Semi-Crítico
	Pitón recto	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Compuertas desviadoras	Compuerta 2	3	4	2	1	9	27	Semi-Crítico
	Compuerta 1	3	4	2	1	9	27	Semi-Crítico
Bomba 1 de remolacha	Bomba	3	4	4	2	18	54	Crítico
	Variador de Frec.	3	4	2	1	9	27	Semi-Crítico
	Motor	3	4	4	2	9	54	Crítico
Bomba 2 de remolacha	Bomba	3	4	4	1	18	54	Semi-Crítico
	Motor	3	4	2	1	9	27	Semi-Crítico
	Variador de Frec.	3	4	2	1	9	27	Semi-Crítico
Separador de flotantes	Separador de Flot.	1	2	1	1	3	3	No Crítico
	Sist. Neumático	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motorreductor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Variador de Frec.	1	2	1	1	3	3	No Crítico
	Motorreductor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Ventilador despastador a Fca	Ventilador	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico

Tabla 12: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha. Elaboración propia.

Sector 1: Transporte y almacenamiento de remolacha

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Despastador GKA	Despastador	2	4	2	1	9	18	Semi-Crítico
	Motor	2	4	2	1	9	18	Semi-Crítico
Despedrador a fabrica	Despedrador	3	4	2	2	10	30	Semi-Crítico
	Reductor	2	4	2	2	10	20	Semi-Crítico
	Variador de Frec.	2	4	2	1	9	18	No Crítico
	Motor	2	4	2	1	9	18	No Crítico
Lavadora final	Lavadora	3	10	4	1	41	123	Crítico
	Motor	2	10	2	1	21	42	Crítico
	Motor	2	10	2	1	21	42	Crítico
	Reductor	2	10	2	1	21	42	Crítico
	Reductor	2	10	2	1	21	42	Crítico
	Variador de Frec.	2	10	2	1	21	42	Crítico
Harnero 3 separador finos	Tamiz Vibratorio	3	4	2	1	9	27	Semi-Crítico
	Motor	2	4	2	1	9	18	No Crítico
Cinta de descarte	Cinta Transp.	1	2	2	1	5	5	No Crítico
	Motorreductor	1	2	2	1	5	5	No Crítico
Harnero separador de colillas	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Tamiz Vibratorio	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico

Tabla 13: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha. Elaboración propia.

Sector 1: Transporte y almacenamiento de remolacha

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Separador balístico	Separador Valístico	2	1	1	1	2	4	No Crítico
	Motor	2	1	2	1	3	6	No Crítico
	Reductor	1	2	2	1	5	5	No Crítico
	Conv. de Frecuencia	1	1	2	1	3	3	No Crítico
Cinta inclinada de pasto	Cinta Transp.	2	2	1	1	3	6	No Crítico
	Motorreductor	2	2	1	1	3	6	No Crítico
Gusano de colillas	Motorreductor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Elevador de colillas	Elev. de Capachos	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motorreductor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba agua lavado final	Bomba	3	6	2	2	14	42	Crítico
	Motor	3	6	2	1	13	39	Crítico
Electroimán	Electroimán	2	6	4	1	25	50	Semi-Crítico
Cinta remolacha a fca.	Motor	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Acomplamiento	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico
	Cinta Transp.	3	6	2	1	13	39	Crítico
	Reductor	2	6	2	1	13	26	Semi-Crítico

Tabla 14: Criticidad para los equipos de transporte y almacenamiento de remolacha. Elaboración propia.

Sector 2: Transporte de agua

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Bomba 1 Reelevadora Agua Sucia	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Variador de Frec.	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba 2 Reelevadora Agua Sucia	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Variador de Frec.	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba 1 Achique Cisterna Agua Sucia	Bomba	1	2	2	1	5	5	No Crítico
	Bomba	1	2	2	1	5	5	No Crítico
Harnero 1	Tamiz Vib.	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	4	1	9	27	Semi-Crítico
Harnero 2	Tamiz Vib.	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	4	2	2	1	5	20	Semi-Crítico
Decantador de Lamelas	Decantador	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba 1 Extractora de Lodos	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Variador de Frec.	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Bomba 2 Extractora de Lodos	Bomba	2	2	2	1	5	10	Semi-Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Variador de Frec.	2	2	2	1	5	10	No Crítico

Tabla 15: Criticidad para los equipos de transporte de agua. Elaboración propia.

Sector 2: Transporte de agua

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Bomba 3 Extractora de Lodos	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	2	2	6	18	Semi-Crítico
	Variador de Frec.	3	2	2	2	6	18	Semi-Crítico
Bomba 4 Extractora de Lodos	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Variador de Frec.	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba 5 Extractora de Lodos	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Variador de Frec.	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba 6 Extractora de Lodos	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Variador de Frec.	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba 7 Extractora de Lodos	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Variador de Frec.	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba 8 Extractora de Lodos	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motor	2	2	1	1	3	6	No Crítico
	Variador de Frec.	2	2	1	1	3	6	No Crítico

Tabla 16: Criticidad para los equipos de transporte de agua. Elaboración propia.

Sector 2: Transporte de agua

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Bomba Achique Lodos	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Válvulas	Válvula	2	2	2	1	5	10	Semi-Crítico
Tolva receptora de cal	Tolva Receptora	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Triturador de cal	Triturador	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motorreductor	2	2	1	1	3	6	No Crítico
Gusano alimentador a tambor apagador	Guzano Inclinado	1	2	2	1	5	5	No Crítico
	Motor	1	2	2	1	5	5	No Crítico
Apagador de cal	Motor	1	2	2	1	5	5	No Crítico
	Tablero Sist.	1	2	2	1	5	5	No Crítico
	Tambor Apagador	1	2	2	1	5	5	No Crítico
Estanque lechada de cal	Depósito de Cal	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Agitador	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba lechada cal	Motor Eléctrico	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Bomba 1 lodos a lagunas	Bomba	2	2	1	1	3	6	No Crítico
	Motor	2	2	1	1	3	6	No Crítico
	Variador de Frec.	2	2	1	1	3	6	No Crítico
Bomba 2 lodos a lagunas	Bomba	2	2	1	1	3	6	No Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico

Tabla 17: Criticidad para los equipos de transporte de agua. Elaboración propia.

Sector 2: Transporte de agua

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Compuerta agua fresca	Válvula	1	2	2	1	5	5	No Crítico
	Motor	1	1	2	1	3	3	No Crítico
	Variador de Frec.	1	1	2	1	3	3	No Crítico
	Compuerta	1	2	2	1	5	5	No Crítico
Bomba 1 agua industrial	Variador	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Bomba	4	2	4	2	10	40	Crítico
	Motor	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Bomba 2 agua industrial	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Bomba 3 agua industrial	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Pozo de agua 1	Pozo de Agua 1	1	1	1	1	2	2	No Crítico
Pozo de agua 2	Pozo de Agua 2	1	1	1	1	2	2	No Crítico
Pozo de agua 3	Pozo de Agua 3	1	1	1	1	2	2	No Crítico
Pozo de agua 4	Pozo de Agua 4	1	1	1	1	2	2	No Crítico
Bomba de pozo 1	Bomba	2	2	2	2	6	12	No Crítico
	Motor	2	2	2	2	6	12	No Crítico
Bomba reelevadora 1 agua de pozo	Bomba	3	2	2	2	6	18	Semi-Crítico
	Motor	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Filtros agua potable	Filtros	3	2	2	5	9	27	Semi-Crítico
Estanque concreto agua potable	Estanque	2	2	1	1	3	6	No Crítico
Estanque elevado agua potable	Estanque	2	2	1	1	3	6	No Crítico
Estanque para agua fresca	Estanque	2	2	1	1	3	6	No Crítico
Estanque agua caliente	Estanque	2	2	1	1	3	6	No Crítico

Tabla 18: Criticidad para los equipos de transporte de agua. Elaboración propia.

Sector 3: Casa de bombas

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Pje IO	Pje FO	Pje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Bomba 1 descarga húmeda (elfa)	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Variador de Frec.	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Bomba 2 descarga húmeda (elfa)	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Celda Central Eléc.	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Bomba refrig. Prensa estopa	Bomba	1	2	2	1	5	5	No Crítico
	Motor	1	2	2	1	5	5	No Crítico
Filtros Agua Lavadora	Filtro Succión	2	4	2	2	10	20	Semi-Crítico
	Filtro Descarga	2	4	2	2	10	20	Semi-Crítico
Bomba 1 control espuma	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba 1 agua flotación a silos	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba 2 agua flotación a silos	Bomba	2	2	2	1	5	10	No Crítico
	Motor	2	2	2	1	5	10	No Crítico
Bomba achique	Bomba	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
	Motor	3	2	2	1	5	15	Semi-Crítico
Válvulas casa bombas	Válvulas	2	2	2	2	6	12	No Crítico

Tabla 19: Criticidad para los equipos de casa de bombas. Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran los equipos críticos seleccionados mediante los índices de criticidad.

Equipo	Sub Equipo	Frecuencia	Ptje IO	Ptje FO	Ptje CR	Consecuencia	Total	Criticidad
Bomba 1 agua industrial	Bomba	4	2	4	2	10	40	Crítico
Rueda elevadora a silo	Rueda Elevadora	3	6	2	2	14	42	Crítico
	Acomplamiento	3	6	2	2	14	42	Crítico
Cinta de remolacha a silo	Cinta Transp.	3	6	2	1	13	39	Crítico
Cinta pluma	Cinta Transp.	2	6	2	3	15	30	Crítico
Megaterio	Puente Despl.	3	6	2	1	13	39	Crítico
Bomba 1 de remolacha	Bomba	3	4	4	2	18	54	Crítico
	Motor	3	4	4	2	18	54	Crítico
Lavadora final	Lavadora	3	10	4	1	41	123	Crítico
	Motor	2	10	2	1	21	42	Crítico
	Motor	2	10	2	1	21	42	Crítico
	Reductor	2	10	2	1	21	42	Crítico
	Reductor	2	10	2	1	21	42	Crítico
	Variador de Frec.	2	10	2	1	21	42	Crítico
Bomba agua lavado final	Bomba	3	6	2	2	14	42	Crítico
	Motor	3	6	2	1	13	39	Crítico
Cinta remolacha a fábrica	Cinta Transp.	3	6	2	1	13	39	Crítico

Tabla 20: Resumen de equipos críticos. Elaboración propia.

Finalmente, la empresa ha seleccionado, según la alta criticidad y la conveniencia para la planta los siguientes equipos críticos:

Sector de Transporte y almacenamiento de remolacha:

- Rueda elevadora a silo
- Cinta de remolacha a silo
- Cinta pluma
- Megaterio
- Cinta remolacha a fábrica

Sector de transporte de agua:

- Bomba 1 agua industrial
- Bomba 1 de remolacha
- Lavadora final
- Bomba agua lavado final

6.2 Resultados FMECA

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto	Tarea Propuesta
Rueda Elevadora	Estructura	Soporte estructural del equipo y traslado de materia prima de canal de agua a cinta transportadora a silo.	Rueda no gira	Eje roto	No hay movimiento de la rueda elevadora	Reemplazar eje
				Eje trabado	No hay movimiento de la rueda	Inspeccionar eje
			Vibración en el eje		Medir vibraciones	
			Ruidos		Inspeccionar bujes	
			Rueda se detiene o está detenida	Sobrecarga materia prima	Detención temporal	Disminución de la carga
						Reapriete de rayos
				Acople suelto	Energía transmitida del motor al eje no es la adecuada.	Ajustar unión acople-eje.
						Inspeccionar acople
				Fatiga piñón y cremallera	Dientes desgastados	Inspección piñón cremallera
					Ruidos	Medir vibraciones
	Vibraciones	Medir vibraciones				
	Rotura de malla	Deformación o rotura de la malla		Reparar malla		
	Rotura de capacho	Capachos dañados	Reparar pieza dañada			
	Acoplamiento	Entrega a través del motor y caja de accionamiento energía necesaria para el funcionamiento rueda elevadora	Caja accionamiento motriz no funciona	Baja aislación por presencia de humedad	Motor no parte	Medir aislación
						Inspección motor
						Mantenimiento general motor
			Acoplamiento suelto	Aumento de consumo de corriente	Control de vibraciones	
			Rodamiento en mal estado	Detención temporal	Control de vibraciones	
					Inspección de rodamiento	
	Cambio rodamiento					

Tabla 21: Tabla de resultado de análisis FMECA de la rueda elevadora de remolacha. Elaboración propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de Falla	Efecto	Tarea Propuesta
Cinta de remolacha a silo	Cinta	Transporte de materia prima desde la tolva de descarga a silos	Fallo tolva de descarga	Deterioro o rotura de la plancha metálica	La remolacha queda en el suelo	Reparar tolva metálica de descarga
			Parada cinta transportadora	Tambor motriz no gira	Detención temporal	Inspección y mantención de tambor motriz cinta transportadora
						Inspección rodamientos
				Caja de accionamiento motriz no funciona	No hay traslado de remolacha a silo	Inspección y mantención motor siemens 1LA2156- reductor wgw 70245/8000 de cinta transportadora a silo
				Tambor conducido de gira	No hay giro en sentido de la cinta	Inspección tambores
						Inspección rodamientos
				Tambores intermedios	Desniveles en la cinta provocando atochamiento de materia	Giro de polines Reparar polines Cambio de polines
Empalmes dañados	Desgaste de empalmes en la cinta	Caída de la remolacha en los costados	Reparar o reemplazar empalmes			

Tabla 22: Resultados análisis FMECA de la cinta transportadora. Elaboración propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto	Tarea propuesta
Cinta distribuidora (pluma)	Cinta	Trasladar la remolacha entregada desde la cinta transportadora y distribuida a los silos	No hay desplazamiento de cinta	Rodamiento de tornamesa dañado	Ruidos	Inspección estado rodamiento
					Aumento de vibraciones	Medición de vibración
					Daño alto en rodamiento	Reemplazar rodamiento
			Parada cinta transportadora	Tambor motriz no gira	Detención temporal cinta	Inspección y mantención tambor motriz y caja de accionamiento
				Tambor conducido no gira	No hay giro en sentido de la cinta	Inspección tambor conducido
No hay traslado a silos	Empalmes desgastados	Empalmes de cinta en mal estado	Reemplazar empalmes dañados			

Tabla 23: Resultados análisis FMECA de cinta distribuidora (pluma). Elaboración propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de Falla	Efecto	Tarea propuesta
Puente desplazable almacenaje de remolacha (megaterio)	Estructura	Otorgar soporte y mantener el peso del equipo	Fallo desgaste riles	Soltura de pernos en riles	Desalineamiento de ruelas en megaterio	Reapriete de pernos
			Desgaste de bujes en ruedas guías	Ausencia de lubricación	Desgaste de piezas	Inspección de bujes y ruedas guías
					Trabamiento de ruedas	Limpieza y lubricación
			Desgaste de bujes	Ruido molesto	Inspección y mantención de bujes	

Tabla 24: Resultados de análisis FMECA Puente Desplazable Almacenaje de Remolacha (Megaterio). Elaboración Propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto	Tarea propuesta
Puente desplazable almacenaje de remolacha (megaterio)	Motor	Entregar energía mecánica necesaria para el movimiento del equipo	Motor no parte	Rotor trabado por sobrecarga mecánica	Activación de protección eléctrica por sobrecarga	Inspección general del motor
				Rotor trabado por eje torcido	Activación de protección eléctrica por sobrecarga	Inspección general del motor
			Motor trabaja con parámetros anormales de funcionamiento	Rotor desbalanceado	Aumento de consumo de corriente	Control de vibraciones
				Acoplamiento suelto	Aumento consumo de corriente	Inspección motor
				Tapa trasera suelta	Activación de protección eléctrica por corriente diferencial	Control de vibración
				Sistema anclaje suelto	Aumento de consumo de corriente	Control de vibración
				Movimiento axial y/o radial del eje	Activación protección eléctrica por sobrecarga	Control de vibraciones
				Calentamiento excesivo de rodamientos por desbalance	Activación protección térmica	Inspección de carcasa
						Mantenimiento general motor
			Motor trabaja con parámetros anormales de funcionamiento	Rotor desbalanceado	Aumento de consumo de corriente	Control de vibraciones
				Acoplamiento suelto	Aumento consumo de corriente	Inspección motor
						Control de vibración
			Sistema anclaje suelto	Aumento de consumo de corriente	Control de vibración	

Tabla 25: Resultados de análisis FMECA Puente Desplazable Almacenaje de Remolacha (Megaterio). Elaboración propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto	Tarea propuesta
Bomba 1 de agua industrial	Bomba	Impulsar el caudal a lo largo del sistema	No hay impulsión	Rotor de bomba trabado	Caída de presión en línea	Mantenimiento general bomba
					Aumento de consumo de corriente	Medición de caudal y presión
				Rodamiento de rotor dañado	Aumento de Temperatura	Inspección bomba agua industrial
			Fugas de agua	Eje dañado	Desalineamiento de eje	Alineamiento láser
					Acoplamiento dañado	Cambio de protección acoplamiento
					Rotura de eje	Inspección y mantenimiento bomba 1 industrial
				Empaquetadura y/o camisa dañada	Fuga por sello	Inspección bomba
						Cambio de resorte
						Mantenimiento empaquetadura
						Mantenimiento camisa de desgaste

Tabla 26: Resultados análisis de FMECA bomba #1 de agua industrial. Elaboración propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto	Tarea Propuesta
Bomba 1 de remolacha	Bomba	Impulsar el caudal de agua y remolacha por el sistema	No hay impulsión de caudal	Rotor trabado	Caída de presión en línea	Mantenimiento general de la bomba
				Rodamiento del rotor dañado	Caída de presión en la línea	Inspección de la bomba
					Aumento consumo de corriente	Mantenimiento rodamiento
					Ruidos	Medición de vibración
					Aumento vibración	Medición de vibración
				Rotor dañado	Caída de presión en línea	Reparación del rotor
					Aumento de vibración	Medición de vibración
			Ruidos		Medición de vibración	
			Fugas en la bomba	Resorte dañados	Presencia de impurezas en fluidos	Inspección de filtros
					Fuga de fluido visible	Cambio de resortes
					Empaquetadura dañada	Fuga de fluidos visible
				Camisa dañada	Ruidos	Medición de vibraciones
					Fuga visible de fluido en sello mecánico	Cambio de camisa

Tabla 27: Resultados análisis de FMECA bomba 1 de remolacha. Elaboración propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto	Tarea propuesta
Bomba 1 de remolacha	Motor de bomba	Entregar energía mecánica para el funcionamiento de las bombas	Motor no arranca	Rotor trabado sobrecarga mecánica	Activación de protección eléctrica por sobrecarga	Inspección del motor
				Rotor trabado por eje torcido	Activación de protección eléctrica por sobrecarga	Inspección del motor
				Baja aislación por presencia de humedad y/o lubricación en bobinado	Activación de protección eléctrica por corriente instantánea	Medir aislación
						Inspección general motor
						Mantenimiento general motor
				Ausencia de una fase por deterioro eléctrico o mecánico de borde en conexiones	Motor vibra pero no parte	Revisión, limpieza y reapriete de conexiones
			Falla en sistema de control y protección de CCM	Motor no parte por ausencia de energía eléctrica	Mantenimiento general CCM (centro de control de motores)	
			Motor de detiene	Sobrecalentamiento de bobinado estator debido a una sobrecarga mecánica en el eje	Activación de protección térmica	Analizar consumo de corriente
				Desbalance mecánico	Activación de protección eléctrica por sobrecarga	Control de vibraciones
				Rodamiento en mal estado	Activación de protección eléctrica por sobrecarga o corriente instantánea	Analizar consumo de corriente
				Desbalance eléctrico	Activación de protección eléctrica por corriente diferencial o sobrecarga	Analizar consumo de corriente
				Aumento de temperatura en estator por suciedad en carcasa	Activación de protección térmica	Inspección de carcasa
						Mantenimiento general del motor
				Calentamiento excesivo de rodamientos por desbalance	Activación de protección térmica	Control de vibraciones
			Motor trabaja con parámetros anormales	Rotor desbalanceado	Aumento consumo de corriente	Control de vibraciones
				Acoplamiento suelto	Ruidos	Control de vibraciones
					Aumento vibración	Alineamiento láser
			Sistema de anclaje suelto	Aumento de consumo de corriente	Control de vibraciones	

Tabla 28: Resultados análisis de FMECA Motor Bomba 1 de remolacha. Elaboración propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto	Tarea propuesta
Lavadora final	Lavadora	Limpiar la materia prima para su posterior entrada de cinta de remolacha a fábrica	Daños en estructura	Tobera en mal estado	Filtración en tobera	Inspección piping de la estructura
					Caída de presión en línea	Reparación de filtraciones
			Desgaste en rodillos	Soltura de rodillos	Limpieza deficiente	Inspección de rodillos
					Desalineamiento de rodillos	Disminución eficiencia
			Lavadora sin movilidad	Rodamiento en mal estado	No hay giro	Inspección y mantenimiento
					Ruido	Mantenimiento de rodamiento o cambio según estado de rodam.
	Aumento de vibraciones	Control de vibraciones				
	Motor lavadora	Entregar energía mecánica a lavadora para su funcionamiento	Motor no parte	Rotor trabado por sobrecarga mecánica	Activación de protección eléctrica por sobrecarga	Inspección general del motor
				Rotor trabado por eje torcido	Activación de protección eléctrica por sobrecarga	Inspección general del motor
			Motor de detiene	Sobrecalentamiento del embobinado estator debido a sobrecarga mecánica en el eje	Activación de protección térmica	Inspección general del motor
				Desbalance mecánico	Activación protección eléctrica por sobrecarga	Control de vibraciones
				Tapa trasera suelta	Activación de protección eléctrica por corriente diferencial	Inspección visual del motor
				Rodamiento en mal estado	Ruidos	Control de vibraciones Cambio de rodamiento según horas de uso
				Movimiento axial y/o radial del eje	Activación protección eléctrica por sobrecarga	Control de vibraciones
				Calentamiento excesivo de rodamientos por desbalance	Activación de protección térmica	Inspección carcasa
						Mantenimiento general motor
			Control de vibraciones			
			Motor trabaja con parámetros anormales de funcionamiento	Rotor desbalanceado	Aumento consumo de corriente	Control de vibraciones
				Acoplamiento suelto	Aumento de consumo de corriente	Inspección del motor Control de vibración
				Sistema de anclaje suelto	Aumento de consumo de corriente	Control de vibración

Tabla 29: Resultados de análisis de FMECA Lavadora Final. Elaboración propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla funcional	Modo de falla	Efecto	Tarea propuesta
Bomba agua final	Bomba	Impulsar el caudal de agua y materia prima a lo largo del sistema	No hay impulsión	Rotor de la bomba trabado	Caída de presión en línea	Mantenimiento general de la bomba
					Aumento de consumo de corriente	Inspección de la bomba
				Rodamiento rotor dañado	Aumento de la temperatura	Inspección de la bomba
					Aumento de vibraciones	Medición de vibraciones
				Ruidos	Medición de vibraciones	
			Fugas de agua	Eje dañado	Desalineamiento del eje	Alineamiento láser
					Acoplamiento dañado	Cambio de protección de acoplamiento
				Empaquetadura y/o camisa dañada	Fuga por sello	Inspección de bomba
						Cambio de resorte
			Mantenimiento general			

Tabla 30: Resultados de análisis Bomba agua final. Elaboración propia.

Nombre equipo	Subsistema	Función	Falla Funcional	Modo de Falla	Efecto	Tarea Propuesta
Cinta de remolacha a Fábrica	Cinta	Transporte de materia prima desde la lavadora Maguina a fábrica	Caja de reducción presenta fallas o detenimiento de cinta	Motor no parte	Rotor trabado por sobrecarga mecánica	Inspección eléctrica de motor
						Revisión de acoplamiento con caja reductora
				Falla en acoplamiento	Discos dañados	Inspección y mantenimiento de Acoplamiento entre motor y caja de reducción
				Caja reductora con fallas	Engranajes dañados	Mantenimiento de parte interior de caja reductora
			Parada cinta transportadora debido a defectos en tambores	Tambor Motriz no gira	Detención temporal de la cinta transportadora	Inspección de tambor motriz
						Inspección de rodamientos
				Defectos en partes laterales de la cinta	Caída de remolacha en los bordes	Mantenimiento de guarderas laterales
						Inspección de fijaciones laterales en guarderas
				Tolva principal dañada	Atochamiento de remolacha al ingreso de la cinta	Reparar tolva de caída de remolacha a cinta transportadora a fábrica
				Tambor conducido de gira	No hay giro en sentido de la cinta	Inspección tambores
						Inspección rodamientos
			Tambores intermedios	Desniveles en la cinta provocando atochamiento de materia	Giro de polines	
					Reparar polines	
					Cambio de polines	
Empalmes dañados	Desgaste de empalmes en la cinta	Caída de la remolacha en los costados	Reparar o reemplazar empalmes			

Tabla 31: Resultados de análisis de FMECA a cinta transportadora de remolacha a fábrica. Elaboración propia

6.3 Estimación de parámetros de Weibull

Para la estimación para cada equipo de los valores de Weibull (β , γ , η) según lo planteado en el Ítem 4.3.1. Cada estimación realizada ha sido validada según el gráfico correspondiente a X vs Y correspondiente. A continuación, se presentan los cálculos realizados para cada equipo crítico correspondiente.

6.3.1 Rueda Elevadora

En el siguiente gráfico se muestra el ajuste lineal realizado para la estimación de los parámetros de Weibull y la estimación del cálculo de la confiabilidad.

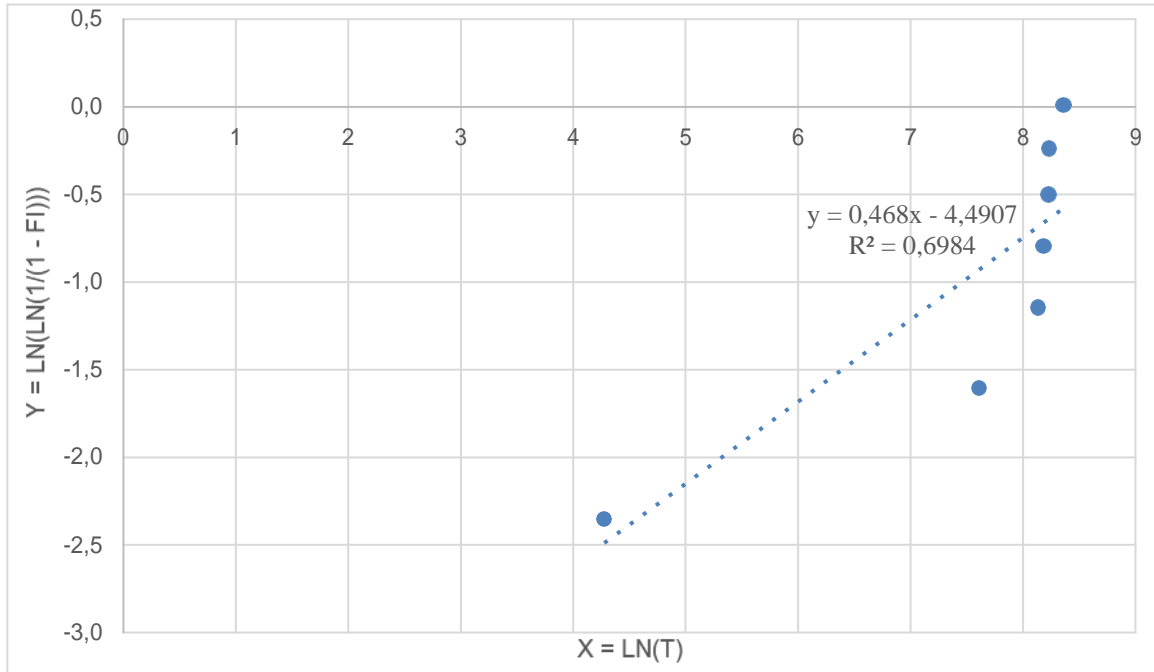


Fig. 39: Ajuste lineal para Rueda Elevadora, elaboración propia.

La validez del ajuste lineal se ve reflejada en la correlación (R^2). El valor correspondiente a la correlación es bastante bajo. Sin embargo, la estimación de los valores de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los valores obtenidos son:

$\beta = 0,468$
$\gamma = 0$
$\eta = 14.698,7$

Tabla 32: Parámetros de Weibull para Rueda Elevadora.

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo.

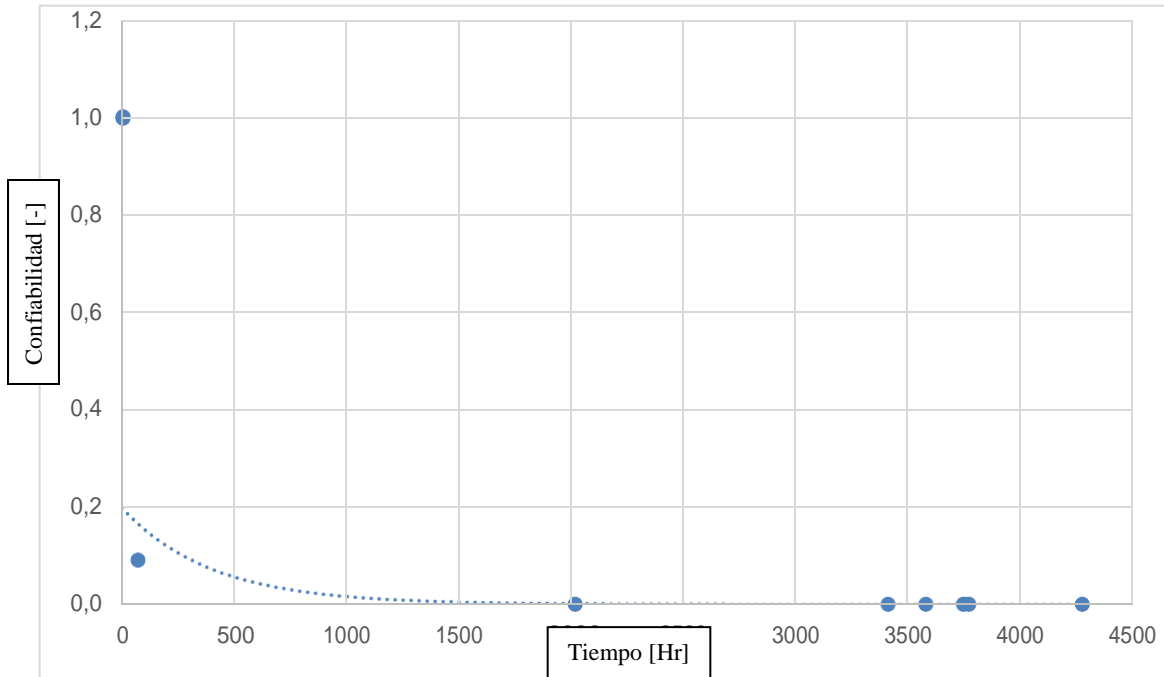


Fig. 40: Confiabilidad para Rueda Elevadora.

Posteriormente, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

Kolmogorov - Smirnov	
Max Calc	0,188
Alpha	0,05
Max Tabla	0,352
APROBADO	

Tabla 33: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para rueda elevadora.

Como se observa en la tabla 42, el ajuste obtenido mediante la validación es aprobada debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Máx. Calc = 0,188) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov – Smirnov (Max tabla = 0,352).

6.3.2 Cinta transportadora a silo

En la figura 41 se muestra el ajuste lineal realizado para la estimación de los parámetros de Weibull y la estimación del cálculo de la confiabilidad.

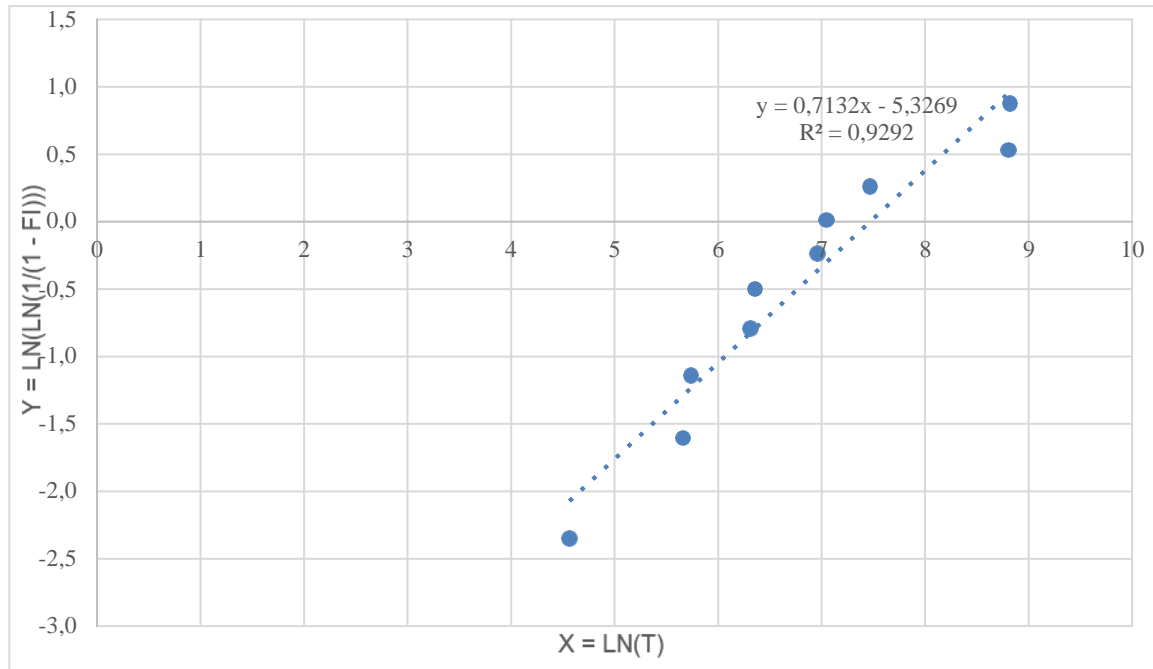


Fig. 41: Ajuste lineal para Cinta transportadora a silo, elaboración propia.

La validez del ajuste lineal se ve reflejada en la correlación (R^2). El valor correspondiente a la correlación es aceptable. Sin embargo, la estimación de los valores de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los valores obtenidos son:

$\beta = 0,7132$
$\gamma = 0$
$\eta = 1752,9$

Tabla 34: Parámetros de Weibull para Cinta transportadora a silo.

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo.

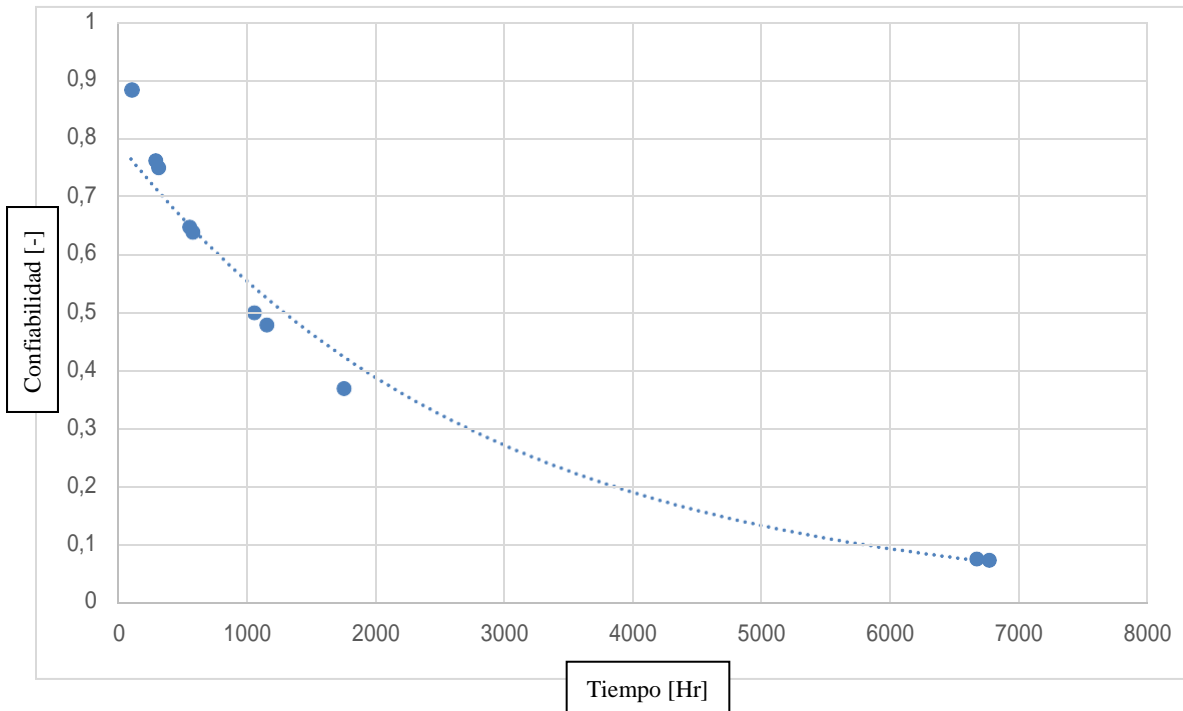


Fig. 42: Confiabilidad para Cinta transportadora a silo, elaboración propia.

Posteriormente, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

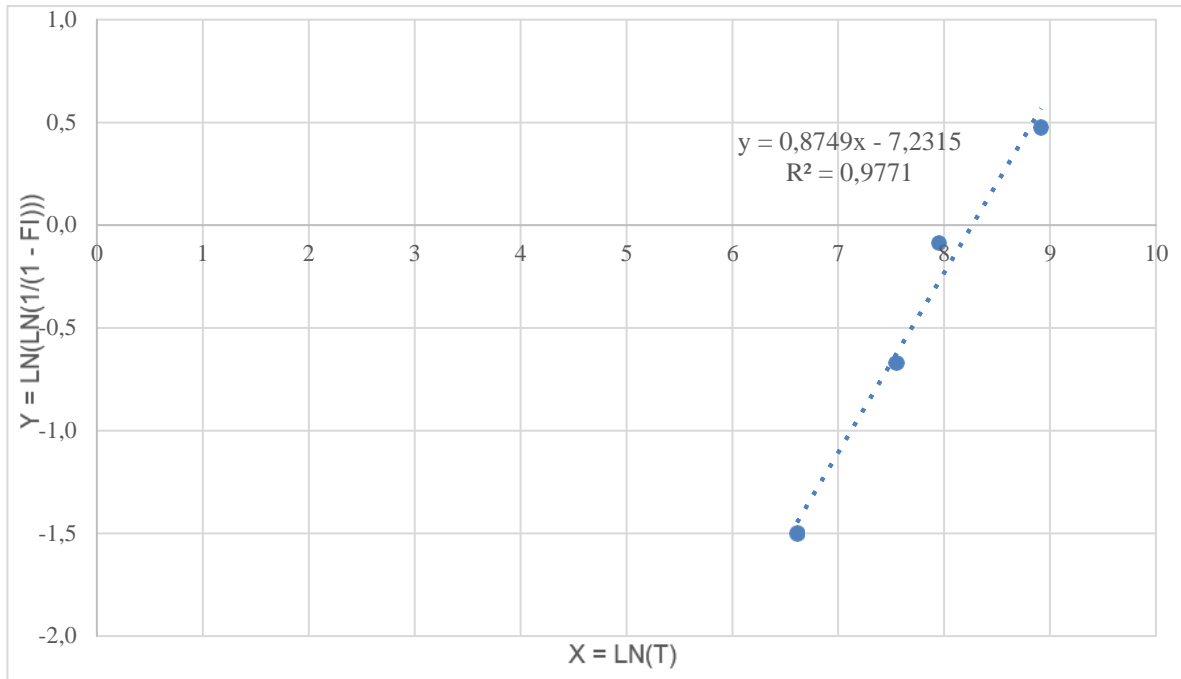
Kolmogorov - Smirnov	
Max Calc	0,198
Alpha	0,05
Max Tabla	0,250
APROBADO	

Tabla 35: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para la cinta transportadora a silo.

Como se observa en la tabla 43, el ajuste obtenido mediante la validación es aprobada debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Máx. Calc = 0,198) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov – Smirnov (Max tabla = 0,250).

6.3.3 Cinta pluma

Fig. 43: Ajuste lineal para Cinta pluma, elaboración propia.



La validez del ajuste lineal se ve reflejada en la correlación (R^2). El valor correspondiente a la correlación es aceptable. Sin embargo, la estimación de los valores de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los valores obtenidos son:

$\beta = 0,8749$
$\gamma = 0$
$\eta = 3887,5$

Tabla 36: Parámetros de Weibull para Cinta pluma.

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo.

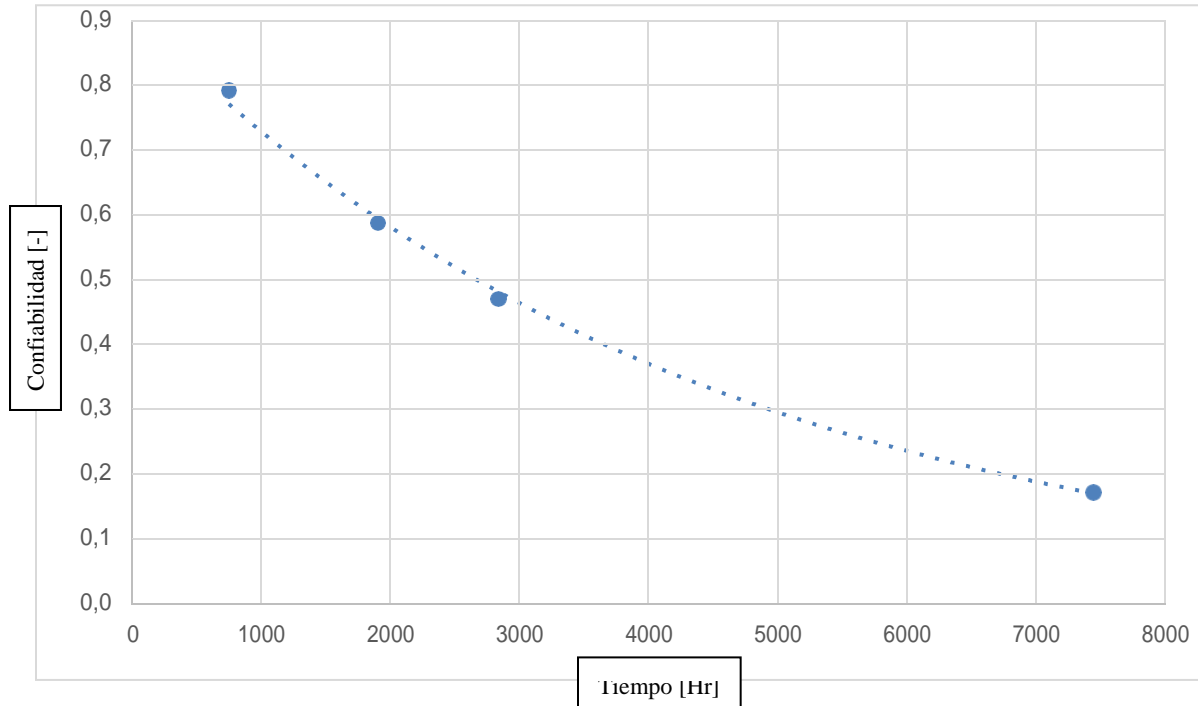


Fig. 44: Confiabilidad para Cinta pluma, elaboración propia.

Posteriormente, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

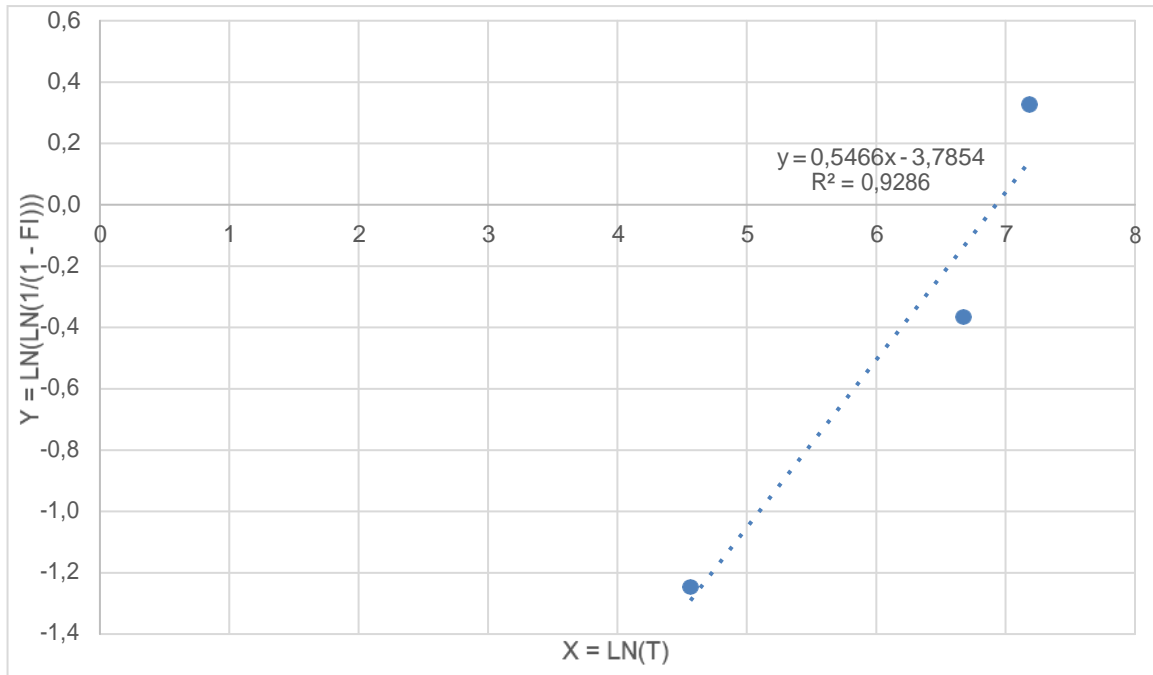
Kolmogorov - Smirnov	
Max Calc	0,185
Alpha	0,05
Max Tabla	0,20
APROBADO	

Tabla 37: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para la cinta pluma.

Como se observa en la tabla 43, el ajuste obtenido mediante la validación es aprobada debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Máx. Calc = 0,185) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov – Smirnov (Max tabla = 0,20).

6.3.4 Megaterio

Fig. 45: Ajuste lineal Megaterio, elaboración propia.



La validez del ajuste lineal se ve reflejada en la correlación (R^2). El valor correspondiente a la correlación es aceptable. Sin embargo, la estimación de los valores de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los valores obtenidos son:

$\beta = 0,5466$
$\gamma = 0$
$\eta = 1017,8$

Tabla 38: Parámetros de Weibull para Megaterio.

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo.

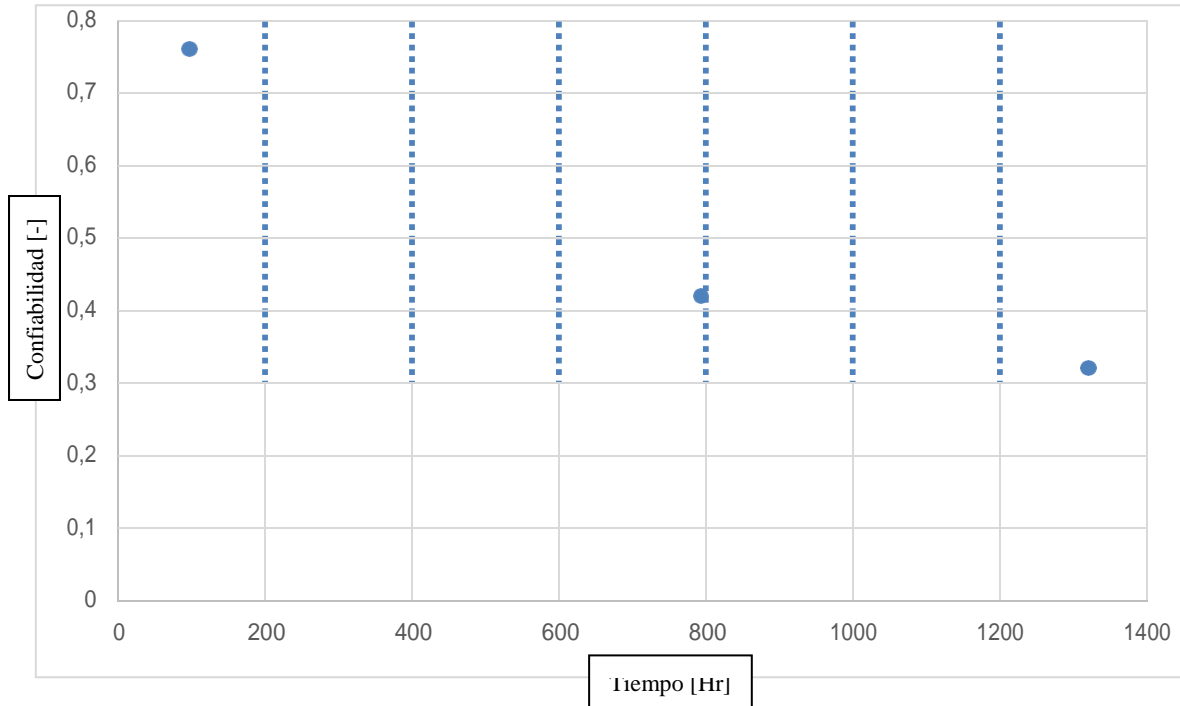


Fig. 46: Confiabilidad para Megaterio, elaboración propia.

Posteriormente, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

Kolmogorov - Smirnov	
Max Calc	0,127
Alpha	0,05
Max Tabla	0,14
APROBADO	

Tabla 39: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para la Megaterio.

Como se observa en la tabla 47, el ajuste obtenido mediante la validación es aprobada debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Máx. Calc = 0,127) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov – Smirnov (Max tabla = 0,14).

6.3.5 Cinta de remolacha a fábrica

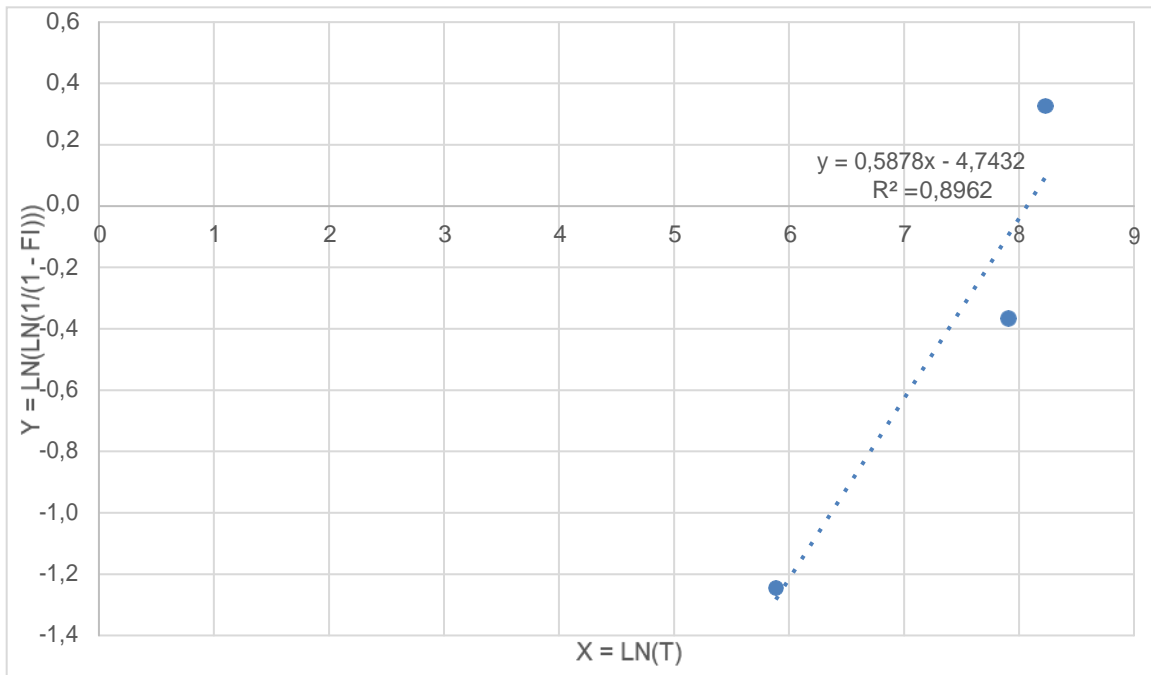


Fig. 47: Ajuste lineal cinta de remolacha a fábrica, elaboración propia.

La validez del ajuste lineal se ve reflejada en la correlación (R^2). El valor correspondiente a la correlación es aceptable. Sin embargo, la estimación de los valores de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los valores obtenidos son:

$\beta = 0,5878$
$\gamma = 0$
$\eta = 3195,2$

Tabla 40: Parámetros de Weibull para Cinta transportadora a silo.

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo.

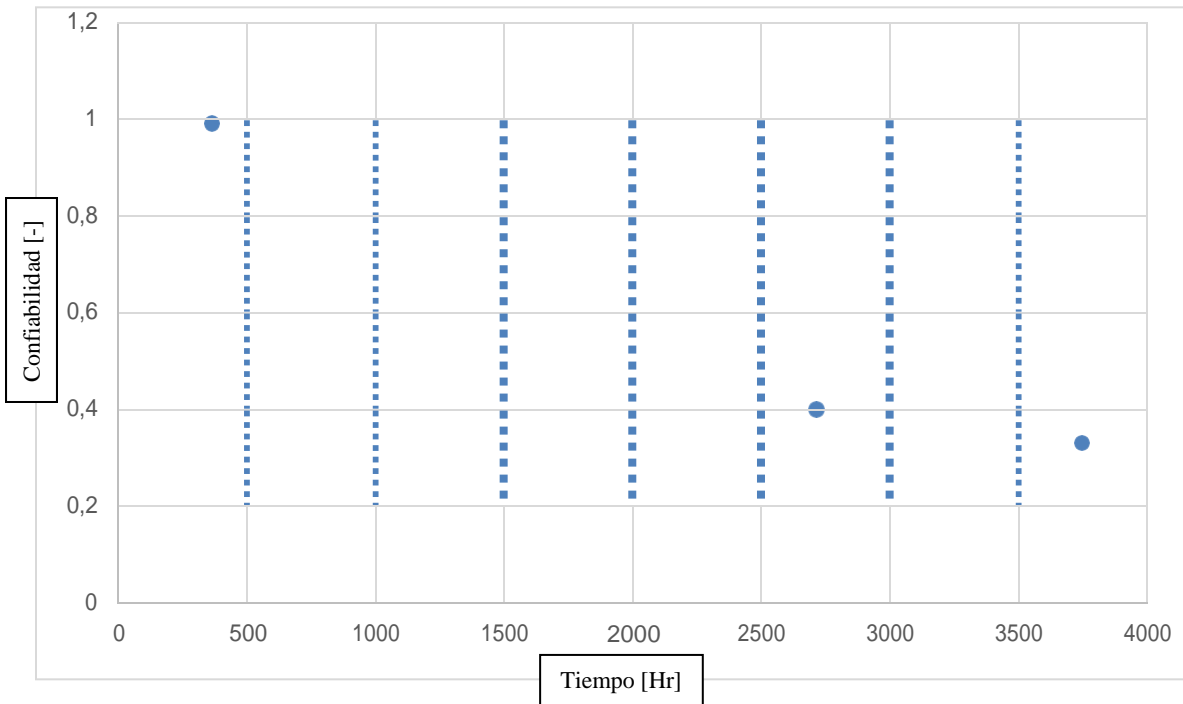


Fig. 48: Confiabilidad para Cinta de remolacha a fábrica, elaboración propia.

Posteriormente, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

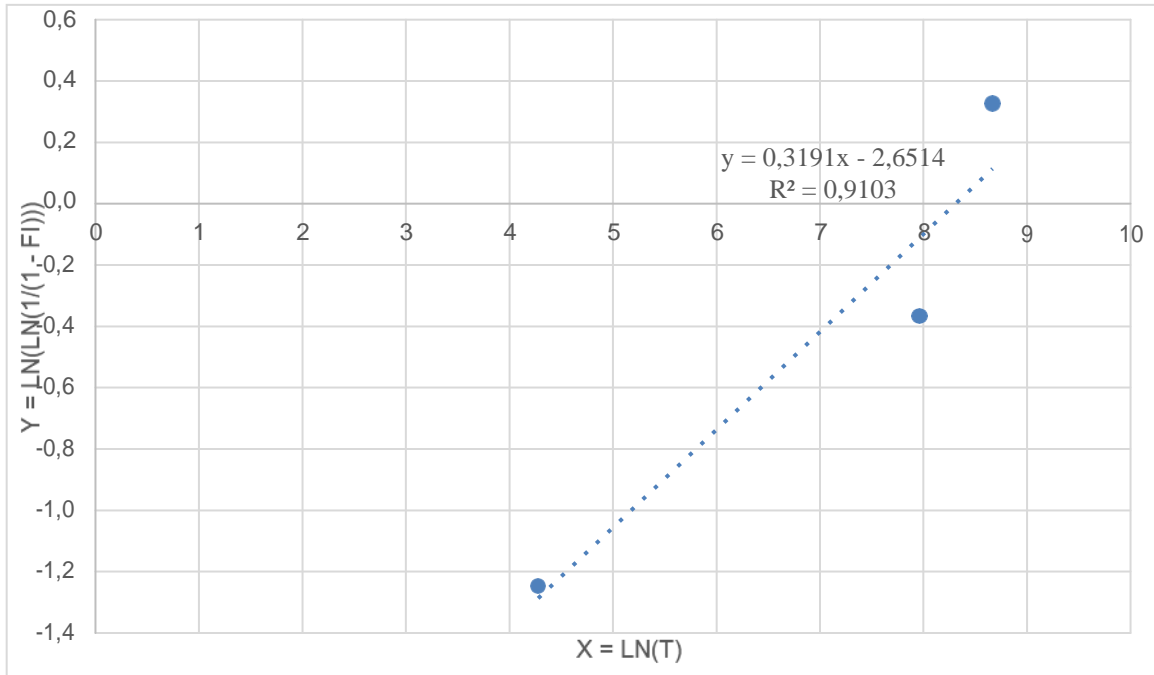
Kolmogorov - Smirnov	
Max Calc	0,10
Alpha	0,05
Max Tabla	0,13
APROBADO	

Tabla 41: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para la Cinta remolacha a fábrica.

Como se observa en la tabla 49, el ajuste obtenido mediante la validación es aprobada debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Máx. Calc = 0,10) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov – Smirnov (Max tabla = 0,13).

6.3.6 Bomba 1 agua industrial

Fig. 49: Ajuste lineal bomba 1 agua industrial, elaboración propia.



La validez del ajuste lineal se ve reflejada en la correlación (R^2). El valor correspondiente a la correlación es aceptable. Sin embargo, la estimación de los valores de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los valores obtenidos son:

$\beta = 0,3191$
$\gamma = 0$
$\eta = 4060,1$

Tabla 42: Parámetros de Weibull para bomba 1 agua industrial.

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo.

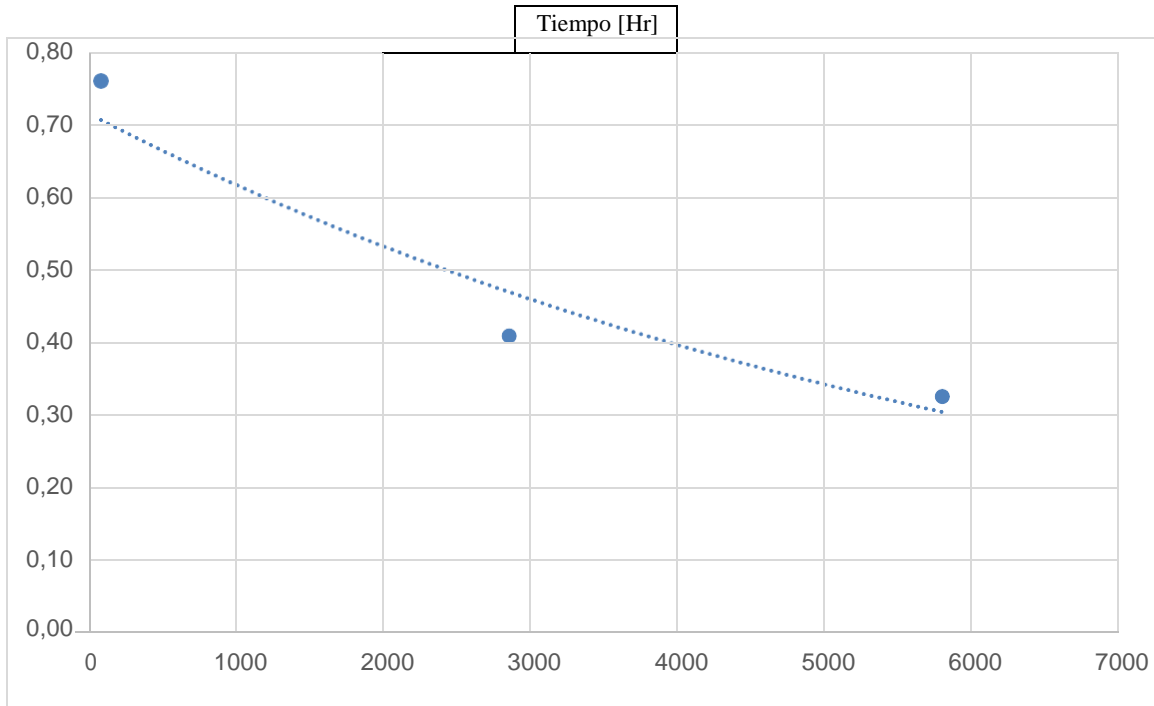


Fig. 50: Confiabilidad para Bomba 1 agua industrial, elaboración propia.

Posteriormente, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

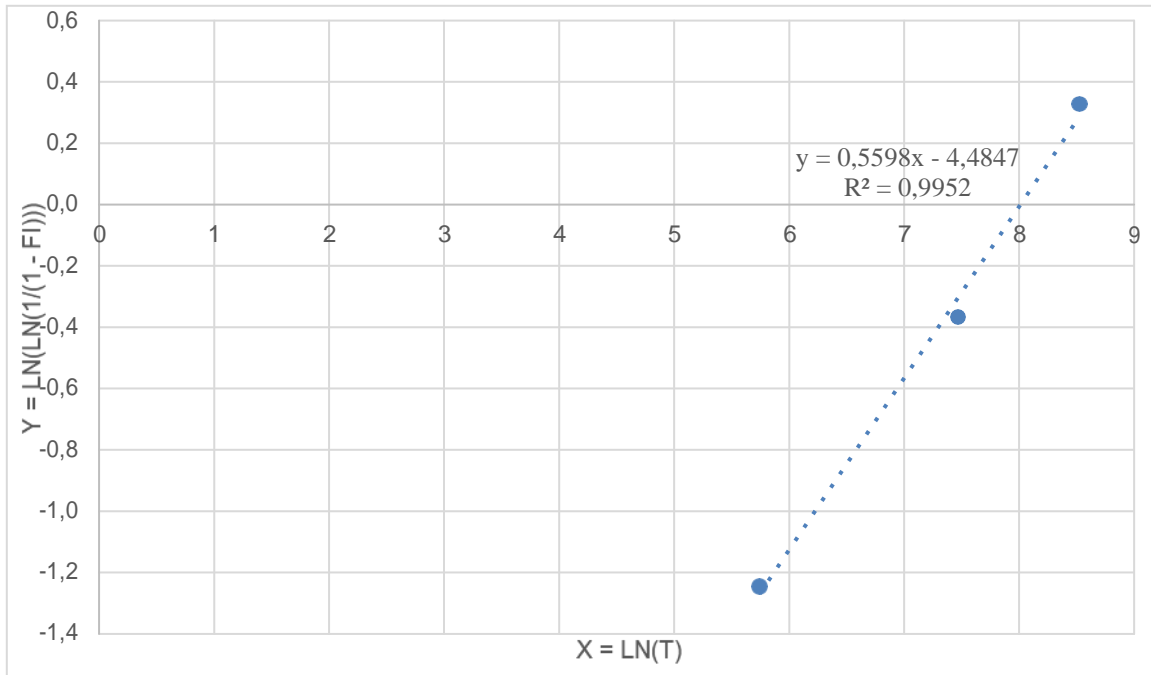
Kolmogorov - Smirnov	
Max Calc	0,12
Alpha	0,05
Max Tabla	0,15
APROBADO	

Tabla 43: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para bomba 1 agua industrial.

Como se observa en la tabla 51, el ajuste obtenido mediante la validación es aprobada debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Máx. Calc = 0,12) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov – Smirnov (Max tabla = 0,15).

6.3.7 Bomba 1 de remolacha

Fig. 51: Ajuste lineal bomba 1 de remolacha, elaboración propia.



La validez del ajuste lineal se ve reflejada en la correlación (R^2). El valor correspondiente a la correlación es aceptable. Sin embargo, la estimación de los valores de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los valores obtenidos son:

$\beta = 0,5598$
$\gamma = 0$
$\eta = 3914,7$

Tabla 44: Parámetros de Weibull para Bomba 1 de remolacha.

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo.

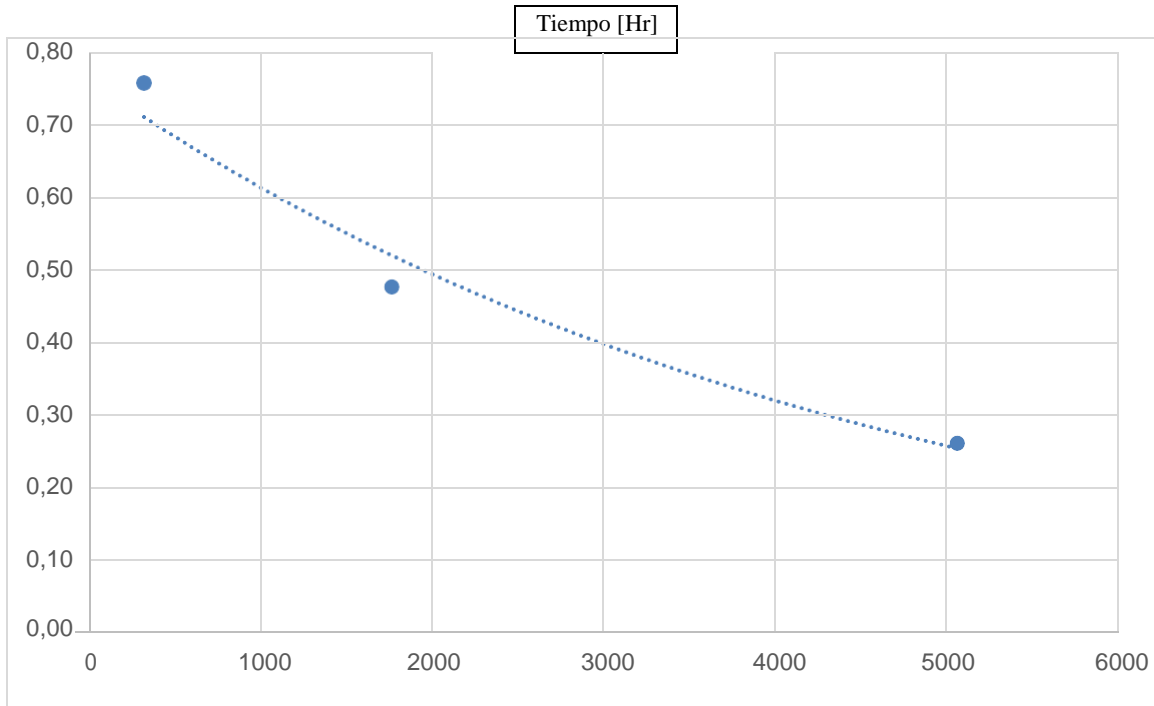


Fig. 52: Confiabilidad para Bomba 1 de remolacha, elaboración propia.

Posteriormente, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

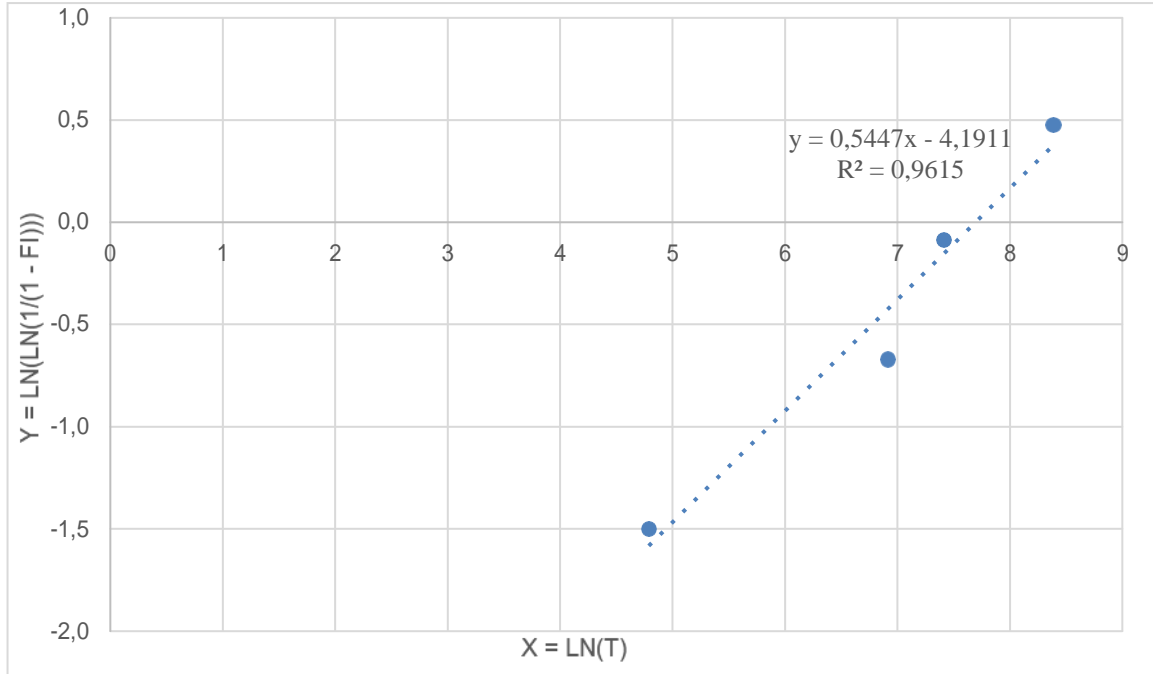
Kolmogorov - Smirnov	
Max Calc	0,09
Alpha	0,05
Max Tabla	0,16
APROBADO	

Tabla 45: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para Bomba 1 de remolacha.

Como se observa en la tabla 53, el ajuste obtenido mediante la validación es aprobada debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Máx. Calc = 0,09) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov – Smirnov (Max tabla = 0,16).

6.3.8 Lavadora final

Fig. 53: Ajuste lineal lavadora final, elaboración propia.



La validez del ajuste lineal se ve reflejada en la correlación (R^2). El valor correspondiente a la correlación es aceptable. Sin embargo, la estimación de los valores de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los valores obtenidos son:

$\beta = 0,5447$
$\gamma = 0$
$\eta = 2195,9$

Tabla 46: Parámetros de Weibull para Lavadora final.

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo.

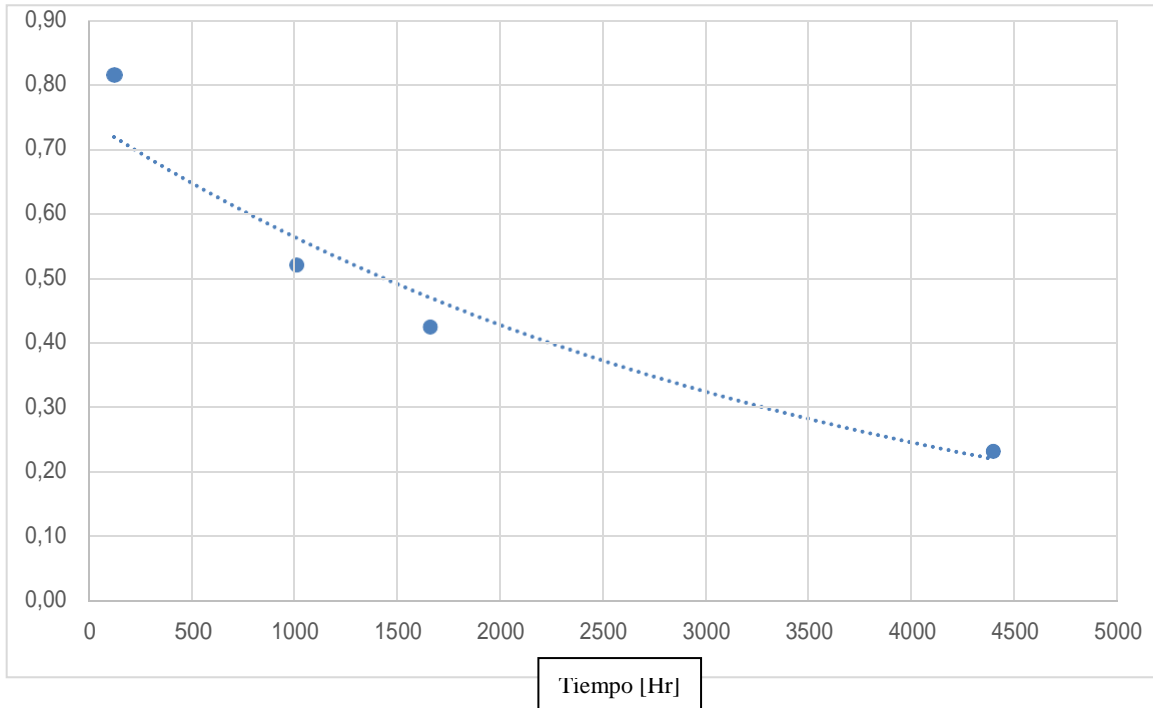


Fig. 54: Confiabilidad para Lavadora final, elaboración propia.

Posteriormente, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

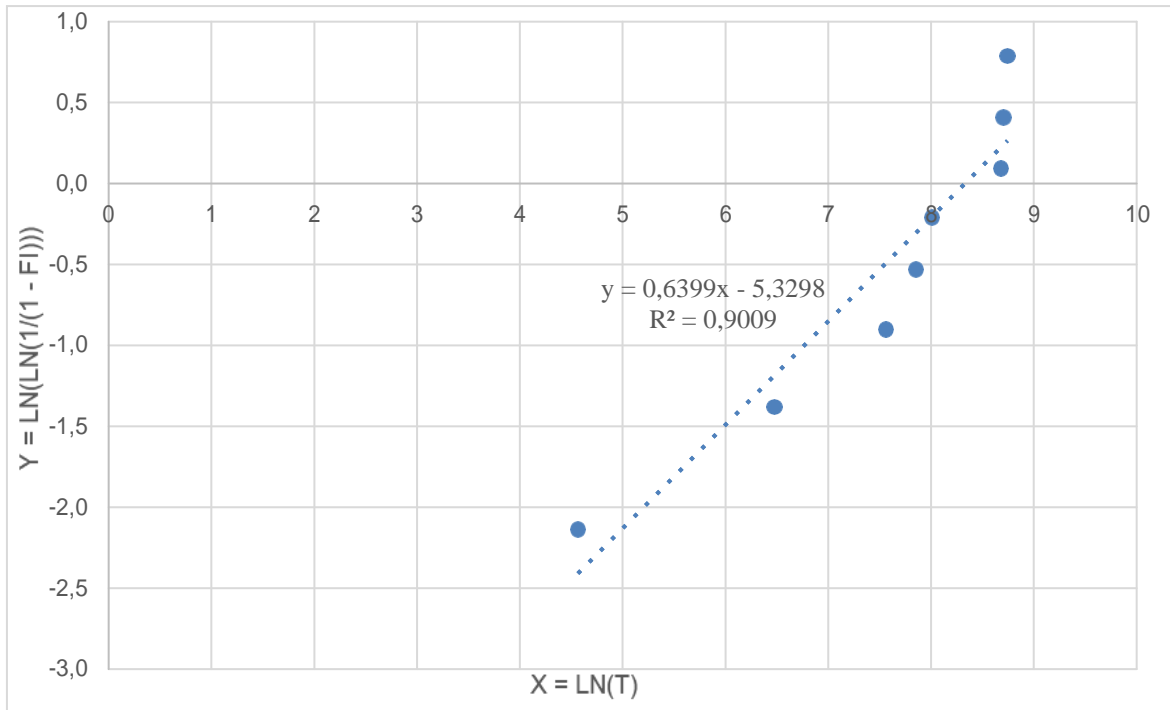
Kolmogorov - Smirnov	
Max Calc	0,23
Alpha	0,05
Max Tabla	0,29
APROBADO	

Tabla 47: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para Lavadora final.

Como se observa en la tabla 55, el ajuste obtenido mediante la validación es aprobada debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Máx. Calc = 0,11) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov – Smirnov (Max tabla = 0,14).

6.3.9 Bomba agua lavado final

Fig. 55: Ajuste bomba agua lavado final, elaboración propia.



La validez del ajuste lineal se ve reflejada en la correlación (R^2). El valor correspondiente a la correlación es aceptable. Sin embargo, la estimación de los valores de Weibull es analizada bajo los test de validación.

Los valores obtenidos son:

$\beta = 0,6399$
$\gamma = 0$
$\eta = 4142,7$

Tabla 48: Parámetros de Weibull para bomba agua lavado final.

En base a estos parámetros, se calcula la confiabilidad del sistema en el tiempo.

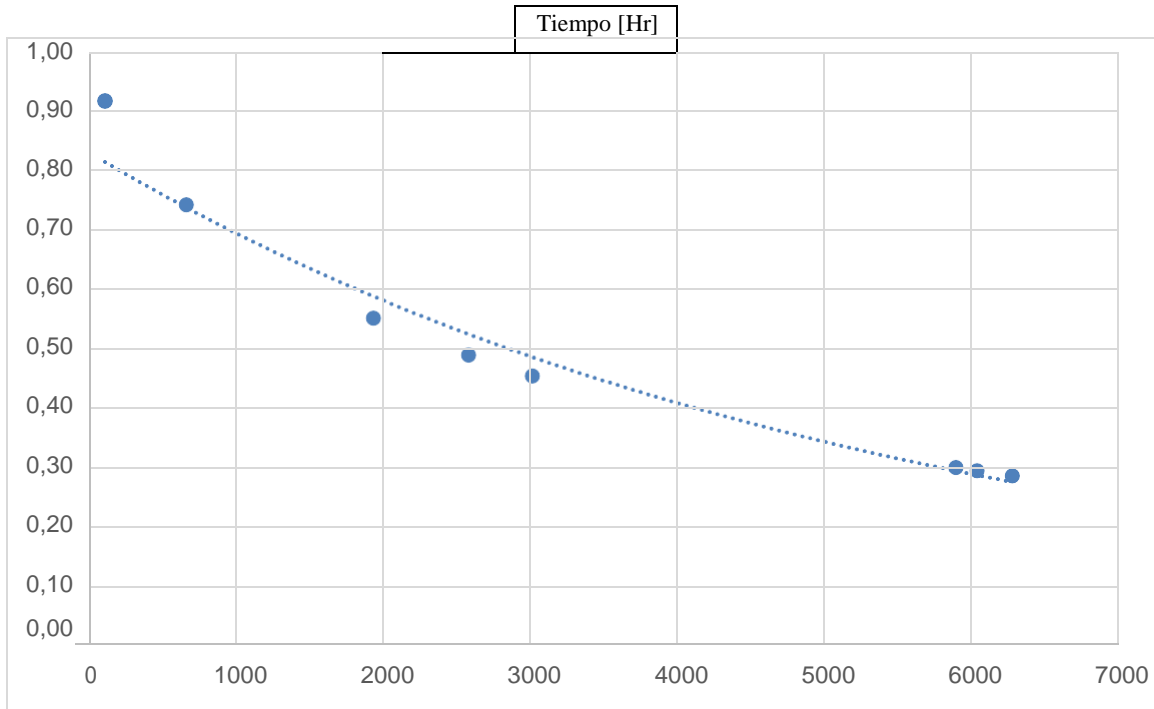


Fig. 56: Confiabilidad para bomba agua lavado final, elaboración propia.

Posteriormente, es necesario validar los resultados obtenidos mediante el test de Kolmogorov-Smirnov.

Kolmogorov - Smirnov	
Max Calc	0,21
Alpha	0,05
Max Tabla	0,25
APROBADO	

Tabla 49: Validación Test Kolmogorov – Smirnov para bomba agua lavado final.

Como se observa en la tabla 57, el ajuste obtenido mediante la validación es aprobada debido a que la diferencia máxima calculada en la estimación de parámetros (Máx. Calc = 0,21) es menor que el máximo entregado por la tabla de Kolmogorov – Smirnov (Max tabla = 0,25).

6.4 Selección de estrategia de Mantenimiento

6.4.1 Rueda elevadora

Se adjuntan en la siguiente tabla, los costos asociados a la mantención de la rueda elevadora, con esto se refiere a costos preventivos, correctivos; y los parámetros de Weibull para este equipo crítico. La relación Alpha, se refiere a la razón entre el costo preventivo y el costo correctivo. ([um]: unidad de medida arbitraria, para cuidar los valores originales de IANSA S.A).

	Costos [um]	
Preventivo	Correctivo	Alpha
105.000	294.600	2,4
Parámetro de weibull		
Beta	Gamma	Eta
0,468	0	14.698,7

Tabla 50: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.

Siendo,

Cp: Costo mantención preventiva.

Cc: Costo mantención correctiva.

Finalmente, considerando que $(Cp/Cc < 1)$ se define una estrategia de tipo preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 72 días.

6.4.2 Cinta de remolacha a silo

Se adjuntan en la siguiente tabla, los costos asociados a la mantención de la rueda elevadora, con esto se refiere a costos preventivos, correctivos; y los parámetros de Weibull para este equipo crítico. La relación Alpha, se refiere a la razón entre el costo preventivo y el costo correctivo. ([um]: unidad de medida arbitraria, para cuidar los valores originales de IANSA S.A).

	Costos [um]	
Preventivo	Correctivo	Alpha
832.000	348.700	2,4
	Parámetro de weibull	
Beta	Gamma	Eta
0,7132	0	1752,9

Tabla 51: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.

Finalmente, considerando que $(C_p/C_c < 1)$ se define una estrategia de tipo preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 45 días.

6.4.3 Cinta pluma

Se adjuntan en la siguiente tabla, los costos asociados a la mantención de la rueda elevadora, con esto se refiere a costos preventivos, correctivos; y los parámetros de Weibull para este equipo crítico. La relación Alpha, se refiere a la razón entre el costo preventivo y el costo correctivo. ([um]: unidad de medida arbitraria, para cuidar los valores originales de IANSA S.A).

	Costos [um]	
Preventivo	Correctivo	Alpha
856.500	2.568.400	0,3
	Parámetro de weibull	
Beta	Gamma	Eta
0,8749	0	3887,5

Tabla 52: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.

Finalmente, considerando que $(C_p/C_c < 1)$ se define una estrategia de tipo preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 56 días.

6.4.4 Megaterio

Se adjuntan en la siguiente tabla, los costos asociados a la mantención de la rueda elevadora, con esto se refiere a costos preventivos, correctivos; y los parámetros de Weibull para este equipo crítico. La relación Alpha, se refiere a la razón entre el costo preventivo y el costo correctivo. ([um]: unidad de medida arbitraria, para cuidar los valores originales de IANSA S.A).

	Costos [um]	
Preventivo	Correctivo	Alpha
968.300	1.057.200	1,5
	Parámetro de weibull	
Beta	Gamma	Eta
0,5466	0	1017,8

Tabla 53: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.

6.4.5 Cinta de remolacha a fábrica

Se adjuntan en la siguiente tabla, los costos asociados a la mantención de la rueda elevadora, con esto se refiere a costos preventivos, correctivos; y los parámetros de Weibull para este equipo crítico. La relación Alpha, se refiere a la razón entre el costo preventivo y el costo correctivo. ([um]: unidad de medida arbitraria, para cuidar los valores originales de IANSA S.A).

	Costos [um]	
Preventivo	Correctivo	Alpha
1.780.550	759.600	2,3
	Parámetro de weibull	
Beta	Gamma	Eta
0,5878	0	3195,2

Tabla 54: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.

Finalmente, considerando que $(C_p/C_c < 1)$ se define una estrategia de tipo preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 48 días.

6.4.6 Bomba 1 agua industrial

Se adjuntan en la siguiente tabla, los costos asociados a la mantención de la rueda elevadora, con esto se refiere a costos preventivos, correctivos; y los parámetros de Weibull para este equipo crítico. La relación Alpha, se refiere a la razón entre el costo preventivo y el costo correctivo. ([um]: unidad de medida arbitraria, para cuidar los valores originales de IANSA S.A).

	Costos [um]	
Preventivo	Correctivo	Alpha
906.500	2.356.248	0,4
	Parámetro de weibull	
Beta	Gamma	Eta
0,3191	0	4060,1

Tabla 55: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.

Finalmente, considerando que $(C_p/C_c < 1)$ se define una estrategia de tipo preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 28 días.

6.4.7 Bomba 1 de remolacha

Se adjuntan en la siguiente tabla, los costos asociados a la mantención de la rueda elevadora, con esto se refiere a costos preventivos, correctivos; y los parámetros de Weibull para este equipo crítico. La relación Alpha, se refiere a la razón entre el costo preventivo y el costo correctivo. ([um]: unidad de medida arbitraria, para cuidar los valores originales de IANSA S.A).

	Costos [um]	
Preventivo	Correctivo	Alpha
659.300	580.430	1,1
	Parámetro de weibull	
Beta	Gamma	Eta
0,5598	0	3914,7

Tabla 56: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.

Finalmente, considerando que $(C_p/C_c < 1)$ se define una estrategia de tipo preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 65 días.

6.4.8 Lavadora final

Se adjuntan en la siguiente tabla, los costos asociados a la mantención de la rueda elevadora, con esto se refiere a costos preventivos, correctivos; y los parámetros de Weibull para este equipo crítico. La relación Alpha, se refiere a la razón entre el costo preventivo y el costo correctivo. ([um]: unidad de medida arbitraria, para cuidar los valores originales de IANSA S.A).

	Costos [um]	
Preventivo	Correctivo	Alpha
2.596.100	1.800.370	1,4
	Parámetro de weibull	
Beta	Gamma	Eta
0,5447	0	2195,9

Tabla 57: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.

Finalmente, considerando que $(C_p/C_c < 1)$ se define una estrategia de tipo preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 35 días.

6.4.9 Bomba agua lavado final

Se adjuntan en la siguiente tabla, los costos asociados a la mantención de la rueda elevadora, con esto se refiere a costos preventivos, correctivos; y los parámetros de Weibull para este equipo crítico. La relación Alpha, se refiere a la razón entre el costo preventivo y el costo correctivo. ([um]: unidad de medida arbitraria, para cuidar los valores originales de IANSA S.A).

	Costos [um]	
Preventivo	Correctivo	Alpha
1.950.030	1.120.500	1,7
	Parámetro de weibull	
Beta	Gamma	Eta
0,6399	0	4142,7

Tabla 58: Costos preventivos, correctivos y parámetros de Weibull para la Rueda elevadora.

Finalmente, considerando que $(C_p/C_c < 1)$ se define una estrategia de tipo preventivo con un tiempo óptimo entre intervención preventiva de 67 días.

6.5 Frecuencia de Inspecciones

Para el cálculo de la frecuencia de inspecciones se determinan los siguientes parámetros:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	
MTTR [Hrs/falla]	
Costo correctivo [um]	
Costo inspección [um]	
Costo de falla [um]	
Frecuencia inicial [insp/Hr]	
Frecuencia óptima [insp/mes]	

Tabla 59: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Entonces, la frecuencia óptima es la cantidad de inspecciones mensuales que se le realizan al equipo.

6.5.1 Rueda elevadora.

Los parámetros arrojaron los siguientes valores:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	0,86
MTTR [Hrs/falla]	0,86
Costo correctivo [um]	294.600
Costo inspección [um]	105.000
Costo de falla [um]	930.000
Frecuencia óptima [insp/mes]	5

Tabla 60: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Por lo tanto, se propone realizar 5 inspecciones al mes.

6.5.2 Cinta de remolacha a silo.

Los parámetros arrojaron los siguientes valores:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	2,3
MTTR [Hrs/falla]	2,3
Costo correctivo [um]	348.000
Costo inspección [um]	86.000
Costo de falla [um]	78.500
Frecuencia óptima [insp/mes]	6

Tabla 61: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Por lo tanto, se propone realizar 6 inspecciones al mes.

6.5.3 Cinta pluma.

Los parámetros arrojaron los siguientes valores:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	1,8
MTTR [Hrs/falla]	1,8
Costo correctivo [um]	2.568.400
Costo inspección [um]	856.500
Costo de falla [um]	4.355.300
Frecuencia óptima [insp/mes]	5

Tabla 62: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Por lo tanto, se propone realizar 5 inspecciones al mes.

6.5.4 Megaterio.

Los parámetros arrojaron los siguientes valores:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	1,3
MTTR [Hrs/falla]	1,3

Costo correctivo [um]	1.057.200
Costo inspección [um]	968.300
Costo de falla [um]	2.030.000
Frecuencia óptima [insp/mes]	4

Tabla 62: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Por lo tanto, se propone realizar 4 inspecciones al mes.

6.5.5 Cinta de remolacha a fábrica.

Los parámetros arrojaron los siguientes valores:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	1,1
MTTR [Hrs/falla]	1,1
Costo correctivo [um]	759.600
Costo inspección [um]	1.780.550
Costo de falla [um]	2.564.000
Frecuencia óptima [insp/mes]	5

Tabla 63: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Por lo tanto, se propone realizar 5 inspecciones al mes.

6.5.6 Bomba 1 de agua industrial.

Los parámetros arrojaron los siguientes valores:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	0,9
MTTR [Hrs/falla]	0,9
Costo correctivo [um]	2.356.248
Costo inspección [um]	906.500
Costo de falla [um]	3.806.000
Frecuencia óptima [insp/mes]	5

Tabla 64: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Por lo tanto, se propone realizar 5 inspecciones al mes.

6.5.7 Bomba 1 de remolacha.

Los parámetros arrojaron los siguientes valores:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	1,2
MTTR [Hrs/falla]	1,2
Costo correctivo [um]	580.430
Costo inspección [um]	659.300
Costo de falla [um]	981.500
Frecuencia óptima [insp/mes]	4

Tabla 65: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Por lo tanto, se propone realizar 4 inspecciones al mes.

6.5.8 Lavadora final.

Los parámetros arrojaron los siguientes valores:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	1,6
MTTR [Hrs/falla]	1,6
Costo correctivo [um]	1.800.370
Costo inspección [um]	2.596.100
Costo de falla [um]	3.569.200
Frecuencia óptima [insp/mes]	6

Tabla 66: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Por lo tanto, se propone realizar 6 inspecciones al mes.

6.5.9 Bomba agua lavado final.

Los parámetros arrojaron los siguientes valores:

Parámetro	valor
MTTI [Hr/falla]	0,7

MTTR [Hrs/falla]	0,7
Costo correctivo [um]	1.120.500
Costo inspección [um]	1.950.030
Costo de falla [um]	3.050.700
Frecuencia óptima [insp/mes]	4

Tabla 67: Parámetros frecuencia de inspecciones. Elaboración propia.

Por lo tanto, se propone realizar 4 inspecciones al mes.

7 Análisis de resultados

7.1 Análisis de resultados Matriz de criticidad

Para elegir los equipos considerados críticos, se debe realizar una matriz de criticidad la cual jerarquiza la importancia que posee cada equipo en el proceso productivo que se lleva cabo. Es de vital importancia reconocer que con la ayuda del ingeniero mecánico del área de mantenimiento y jefe de zona patio, se lograron conocer a fondo todos los equipos y su proceso productivo, cuya tarea es la de mayor dificultad.

Para generar los nueve equipos críticos, se toma un modelo expuesto anteriormente:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} * \text{Criticidad} \quad (53)$$

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} * [(\text{IO} \times \text{FO}) + \text{CR}] \quad (54)$$

Donde,

IO = Factor de Impacto Operacional

FO = Factor de Flexibilidad Operacional

CR = Factor de costes de reparación

Todos los equipos y subequipos deben ser analizados con este modelo, obteniendo así los equipos de mayor puntaje son considerados equipos de tipo A (críticos), según la figura N°38. Estos equipos críticos son:

Sector de Transporte y almacenamiento de remolacha:

- Rueda elevadora a silo
- Cinta de remolacha a silo

- Cinta pluma
- Megaterio
- Cinta remolacha a fábrica

Sector de transporte de agua:

- Bomba 1 agua industrial
- Bomba 1 de remolacha
- Lavadora final
- Bomba agua lavado final

Esto nueve equipos críticos, son expuestos a diversos estudios para generar el plan de mantenimiento.

7.2 Análisis de resultados de FMECA

Este tipo de análisis de criticidad corresponde a una metodología diseñada para identificar los posibles modos de fallas de un proceso o equipo, para cada componente se analiza los modos de fallas, causas y efectos en el proceso; a través de una tabla para poder ordenar la información obtenida.

Para llevar a cabo el análisis de FMECA, se debe tener un nivel alto de conocimiento de cada uno de los equipos, su funcionamiento y mantenimiento. Es por ello, que este análisis se debe hacer en conjunto con un ingeniero de mantenimiento de la empresa y el encargado del área productiva a analizar, si es requerido también se puede sumar el eléctrico a cargo de patio.

A través de este análisis se obtienen resultados que permite visualizar tipos de fallas que no han visto anteriormente en el catastro de falla histórica, lo que da una gamma de tipos de falla más amplia que la conocida, esto se debe a que el histórico de fallas solo muestra los tipos de falla que se han producido de un horizonte temporal definido.

De acuerdo al modo de falla, se pueden tomar decisiones acerca de qué tipo de mantenimiento aplicar, ya sea preventivo o correctivo. Esto podría generar un mejor funcionamiento de los equipos, como también un alargamiento en la vida útil del equipo.

7.3 Análisis de parámetros de Weibull

Existen distintos tipos de modelos para determinar la confiabilidad de los equipos y cómo se comporta a lo largo de un tiempo determinado. Debido a los requerimientos de una alta flexibilidad se recomienda utilizar parámetros de Weibull.

El análisis obtenido es el esperado, las curvas se comportan según lo indicado en la teoría. Es decir, analizando cada uno de los equipos en la curva de la bañera, se nota un comportamiento típico en la etapa de la infancia en la cual la confiabilidad desciende rápidamente con respecto al tiempo de utilización para luego alcanzar una etapa de madurez (constante). Estos resultados tienen directa influencia en el factor de forma (β) obtenido para cada equipo ($\beta > 1$). El parámetro η (de escala) presenta los valores del orden de los MTTF calculados para cada equipo, lo cual concuerda con la teoría. En cuanto al parámetro Gamma (γ) o de localización se considera cero, debido a que $\gamma = 0$, es equivalente a que el origen del tiempo para la ley es el mismo que el de las observaciones.

Los datos utilizados para estimar los parámetros de Weibull, corresponden a los presentes al histórico de fallas de la empresa IANSA S.A facilitados por los encargados de área.

Se obtuvieron resultados ajustados a la teoría, esto se debe a un buen trabajo en la empresa al momento de anotar las fallas obtenidas, el error se observa en la falta de un plan de mantenimiento con estas fallas.

7.4 Selección de estrategia de mantenimiento

Al analizar el punto de selección de estrategia de mantenimiento para cada equipo crítico, es posible observar el tipo de mantenimiento óptimo y el intervalo de tiempo entre intervenciones preventivas. (5.4 Selección de estrategia de mantenimiento).

La estrategia seleccionada para equipo crítico es la preventiva. Para cada frecuencia recomendada para cada equipo los tiempos son razonables. Siendo los costos C_p/C_c cercanos a uno.

En el caso del megaterio la razón entre los costos de mantención es muy cercano a uno, no es posible decir con determinación que el tipo de estrategia de mantenimiento es la adecuada o si se trata de un error del método utilizado. Por ende, puede ser un tema debatible el método utilizado, vale decir, la validez de los datos utilizados.

Al analizar los parámetros necesarios para lograr la estrategia de mantenimiento, encontramos los parámetros de Weibull y los costos de intervención preventiva y correctiva. En el caso de los parámetros de Weibull se encuentran problemas en llevar a cabo la estimación. Sin embargo, no se ha dicho explícitamente sobre la validez de los datos de los costos de mantención preventiva y correctiva, para lograr la selección de la estrategia. Es importante mencionar que los datos obtenidos fueron entregados por el encargado de servicio técnico de mantención de la planta y obtenidos por medio del sistema computacional de registro de mantenimiento.

Al obtener los datos de costos (preventivo y correctivo) se identifica una falta de identificación de cada registro y la asignación deficiente de los costos asociados. Entonces, para llevar un buen análisis, se llegó a la conclusión de hacer estimaciones y suposiciones, las cuales pueden alejar los cálculos de los valores reales.

7.5 Frecuencia de inspecciones

Cada una de las inspecciones corresponde a intervenciones que no incurren en la detención del equipo cuando está en producción, solo cuando están detenidos por mantenimiento preventivo. Es decir, poder ser inspecciones visuales o auditivas de los componentes de cada equipo, como por determinación de la empresa en realizar mantenimiento a sus equipos. Se propone, que sea posible considerar las tareas asociadas a los FMECA que implican sólo inspecciones de los componentes. Luego de definidas esas tareas, se puede calendarizar la aplicación de éstas basándose en la frecuencia de inspecciones estimada para cada equipo. Además, dichas inspecciones son una alternativa complementaria a los programas de mantenimiento que se tienen y la corrección de fallas ocurridas esporádicamente.

Las mantenciones no son de un alto costo, debido a que el equipo no se detiene, de lo contrario sería necesario incurrir en repuestos o fungibles. Sólo es necesario costear las horas hombre destinadas a la inspección de los componentes seleccionados para cada equipo.

Entonces, las inspecciones representan una buena alternativa para el sistema que se quiere implementar en la zona de patio de la planta. Es decir, permite mejorar mejoras en los programas actuales de mantenimiento a un bajo costo y a una alta disponibilidad.

Por tanto, queda en criterio de la empresa decidir la aplicación de los planes de mantenimiento definidos previamente para cada equipo en conjunto con el complemento de las inspecciones preventivas. De no incorporar este plan de mantenimiento, es posible mantener el plan de mantenimiento actual y apoyarlo por medio de inspecciones.

8 Conclusiones

El modelo de mantenimiento es diseñado de acuerdo a las necesidades de la empresa, cuya industria cuenta software SAP de administración productiva logística y de recursos humanos, el que permite llevar a cabo el registro detallado de materiales, trabajos, repuestos, tiempo empleado y costos asumidos en la ejecución del mantenimiento. En este sentido, al contar actualmente con una data histórica de lo que pasa con los equipos, posibilita tener los gastos de cada mantención, cantidad de fallas y el encargado que realizará mantenciones; lo que conlleva a un orden y un trabajo más eficaz y eficiente por parte de los trabajadores de la planta.

Los indicadores de mantenimiento establecidos permitieron evaluar el desempeño del programa de mantenimiento preventivo, tomando las medidas necesarias para su mejoramiento. Se recomienda subcontratar proyectos para reparar fallas en lo equipos, cuando lo amerite.

Al estudiar en concepto de ahorro de costos de mantenimiento para los equipos críticos analizados es posible concluir que es conveniente y recomendable la aplicación del plan de mantenimiento propuesto. A través de la realización de este plan de mantenimiento para los equipos críticos, se tiene un ahorro de un cuarto aproximado, con respecto a no tener plan de mantenimiento.

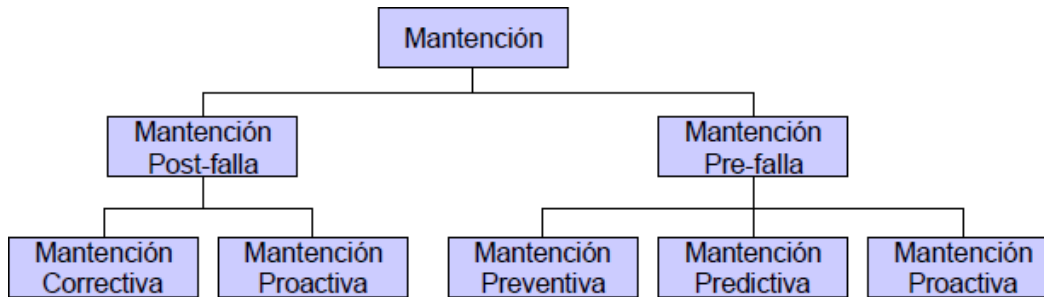
Finalmente, se propone como alternativa complementaria de las tareas de mantenimiento actuales o futuras la aplicación de inspecciones de mantenimiento, utilizar los FMECA desarrollados con el objeto de seleccionar tareas relacionadas con la inspección presencial y aplicarlas de acuerdo con las frecuencias óptimas calculadas. Esto representa una buena alternativa debido al bajo costo incurrido en ellas, relacionado directamente con el costo de las horas hombre de la inspección.

9 Bibliografía

- [1] F. Monchy: “Teoría y práctica del mantenimiento industrial”, MASSON, S.A. Barcelona, 1990. ISBN:84-311-0524-0.
- [2] Gian Paolo Frezza C: “Proceso Industrial de Remolacha y Química del azúcar”, Vol. 1, Iansa S.A. 1996.
- [3] Gian Paolo Frezza C: “Proceso Industrial de Remolacha y Química del azúcar”, Vol. 4, Iansa S.A. 1996.
- [4] Gian Paolo Frezza C: “Proceso Industrial de Remolacha y Química del azúcar”, Vol. 5, Iansa S.A. 1996.
- [5] Gian Paolo Frezza C: “Proceso Industrial de Remolacha y Química del azúcar”, Vol. 6, Iansa S.A. 1996.
- [6] R. Pascual: “El arte de mantener”, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, Edición 2.8, Santiago, 2005.
- [7] S. Garcia: “Organización y gestión integral de mantenimiento”, Diaz de Santos, Edición 1, España, 2003.
- [8] A. Arata: “Ingeniería de la confiabilidad”, Ril Editores, 2013.
- [9] A. Arata, L. Furlanetto: “Manual de gestión de activos y Mantenimiento”, Ril Editores, 2005.
- [10] V. Meruane: “Gestión de activos físicos”, Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Chile, Primera Edición, Santiago, 2011.

10 Anexos

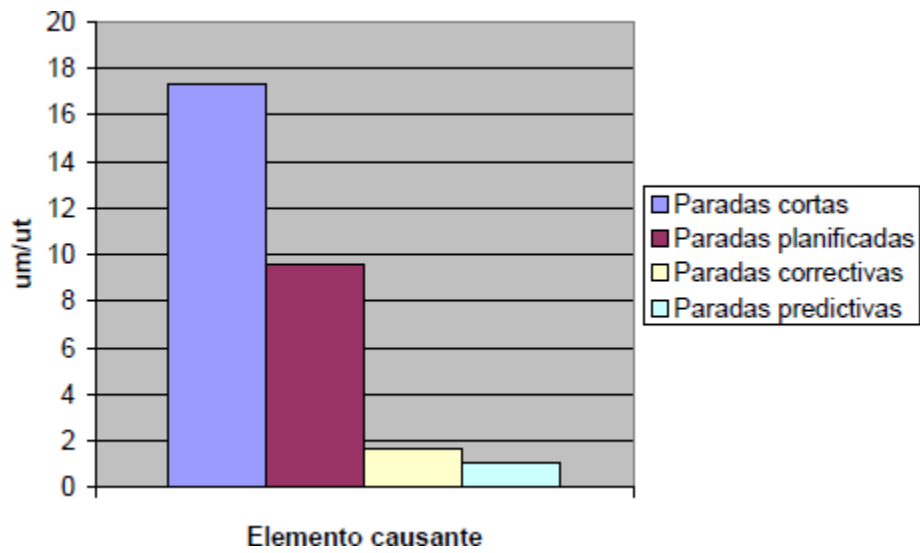
Tipos de estrategias de mantenimiento.



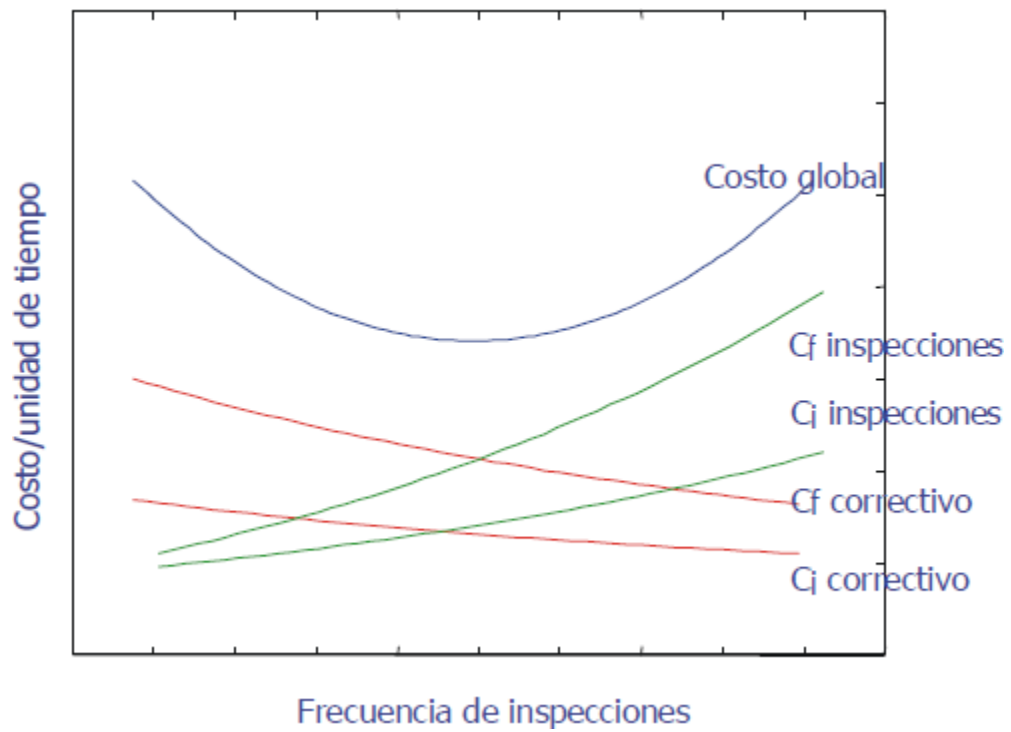
Ficha de datos técnicos para un equipo y sus componentes sujeto a inspección de vibraciones.

Datos técnicos																		
Equipo				Horas de operación anuales planificadas				horas										
				Vacaciones y feriados				horas										
Producto				Tasa de producción nominal				ton/hr										
Week No	Ocasión	Nivel Vibración	Paradas	Fecha	año	Tipo de parada			Duración total de paradas (min)				Unidades producidas		Unidades rechazadas		Observaciones	
						Horas de detención	Paradas cortas		Esperas									
						Mantenimiento no planificado correctivo												
						Mantenimiento no planificado predictivo												
						Mantenimiento planificado												
						Observación												

Análisis de Pareto para los costos de falla



Frecuencia óptima de inspecciones



Etapas de la vida de un producto: curva de la “bañera”.



Necesidad de información según actores.

Misión	Información	Información
Intervención	-Intervenciones -seguimiento de ejecución	-codificación -solicitud de tareas -piezas de repuesto -cartera de tareas -estado de intervenciones -planificación
Análisis	-Equipos -Planificación -análisis -consumos	-documentos técnicos -repuestos -planificación de trabajos -recursos -procedimientos
Gestión	-gastos/presupuesto -personal	-costos directos -costos indirectos -costos por equipo -valor stock bodega -planificación de recursos

Zona norte de patio ISANSA S.A Ñuble.





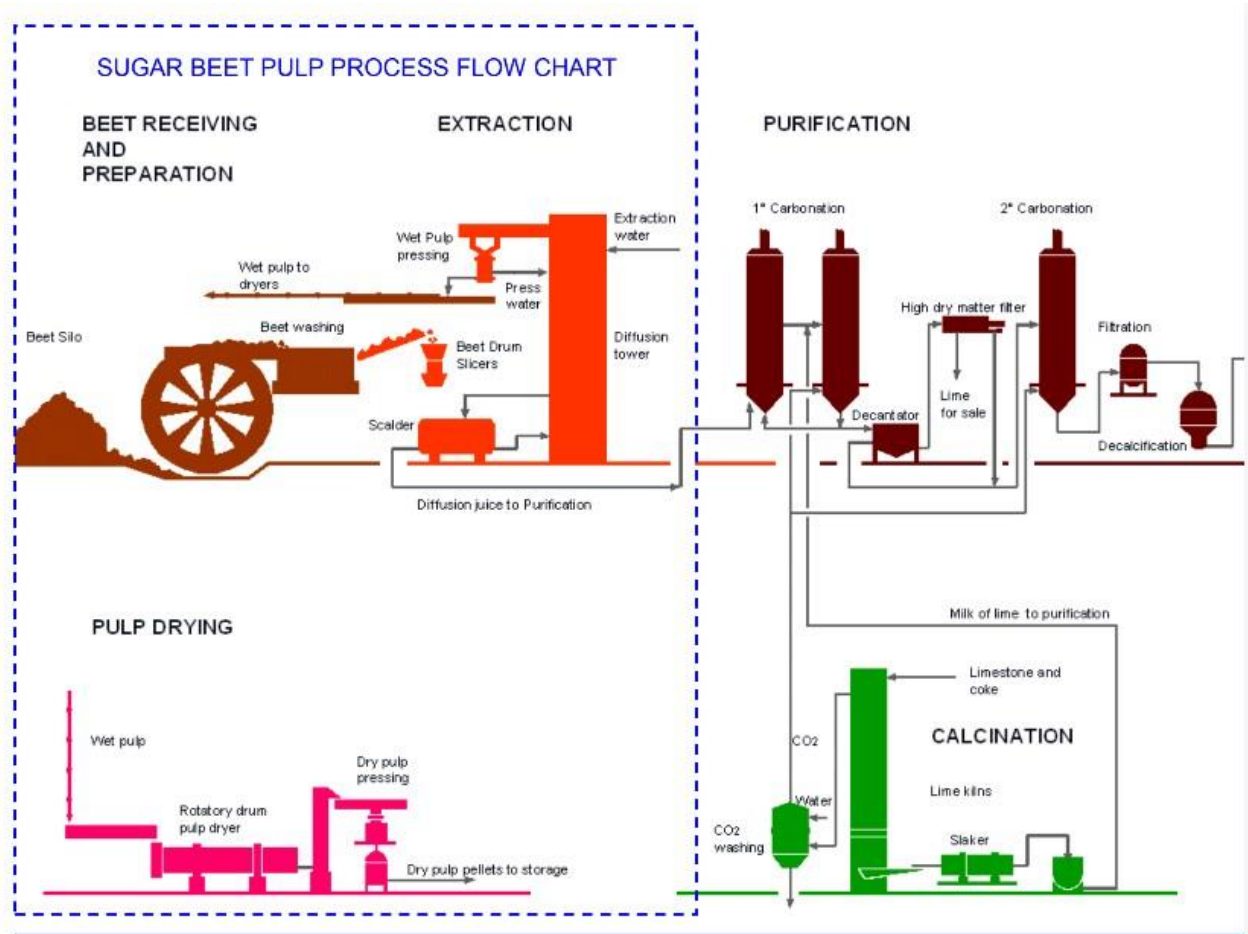
Remolacha almacenada en silos de Patio IANSA S.A Ñuble



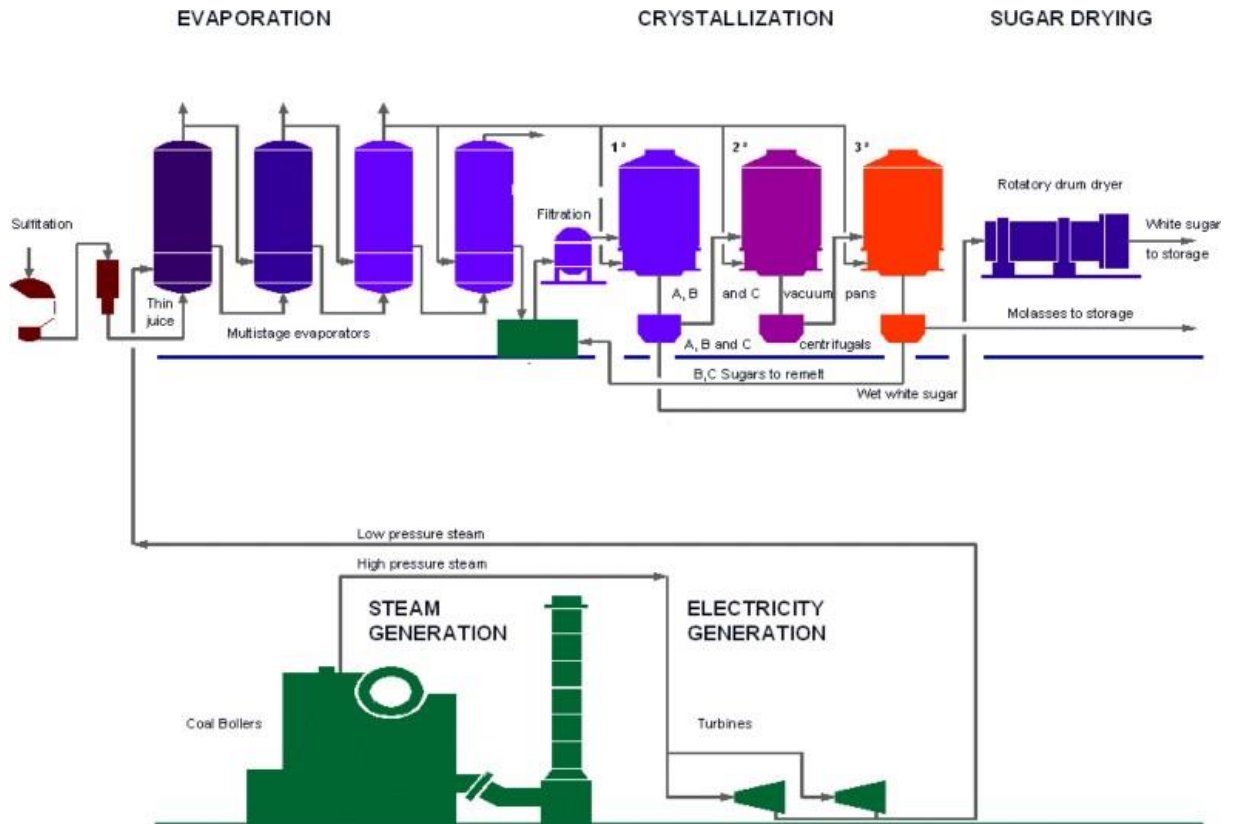
Zona de recepción de remolacha en IANSA S.A Ñuble



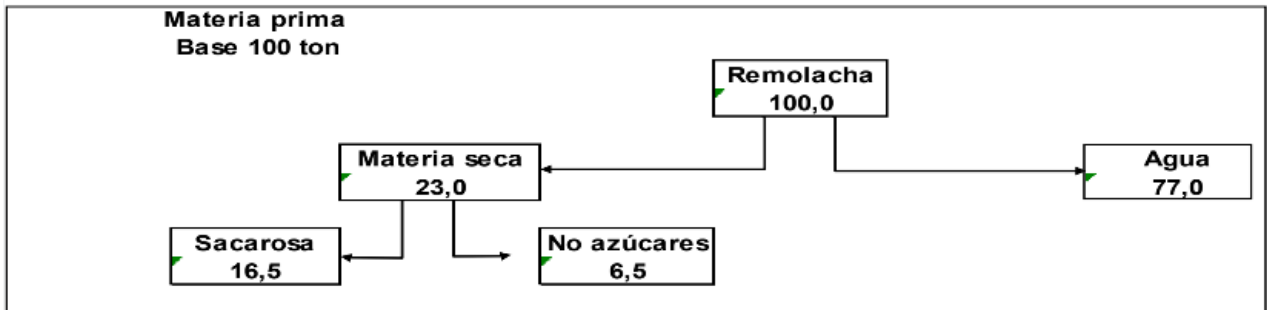
Procesos en fábrica de la remolacha



Procesos en fábrica de la remolacha



Balance de materiales y consumo en una fábrica de azúcar de remolacha

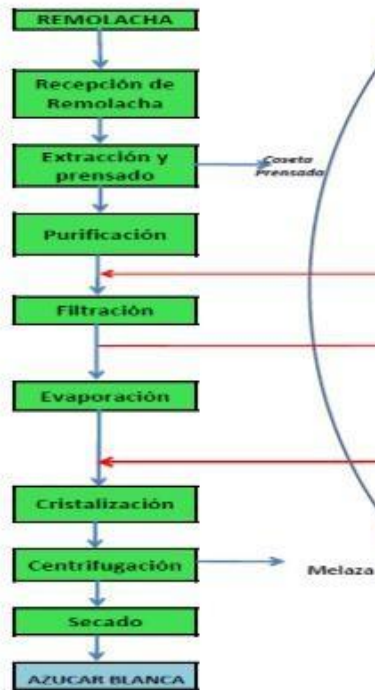


		Para una fábrica 6.000 t/d	
MATERIA PRIMA	Remolacha	100,0 ton	6.000 t/d
Productos	Azúcar blanco	15,0 ton	1.000 t/d
	Melaza	3,3 ton	200 t/d
	Coseta seca	4,6 ton	300 t/d
Insumos	Carboncillo		200 t/d
	-calderas		65 t/d
	-secadores		120 t/d
	Coque		12 t/d

Tipos de operación en una fábrica azucarera

- 1) Azúcar de remolacha
- 2) Azúcar de azúcar crudo

Proceso Azucarero de Remolacha



Proceso Azúcar Cruda

