

**ANALISIS Y ESTUDIO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION IMPLEMENTADO
EN LA CERVECERIA BAVARIA S.A. DE BUCARAMANGA CON EL FIN DE
PROPONER UNA MEJORA EN EL CONSUMO ENERGETICO**

**JOSE YESID CALDERON CANDELA
RAFAEL LEONARDO GOMEZ DIAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2010**

**ANALISIS Y ESTUDIO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION IMPLEMENTADO
EN LA CERVECERIA BAVARIA S.A. DE BUCARAMANGA CON EL FIN DE
PROPONER UNA MEJORA EN EL CONSUMO ENERGETICO**

**JOSE YESID CALDERON CANDELA
RAFAEL LEONARDO GOMEZ DIAZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2010**

**Dedico este proyecto a mi familia
Y a todas aquellas personas que
Contribuyeron en mi desarrollo
Profesional.....**

YESID

***Dedico este proyecto a mi padre Luis Gómez, por el soy y
aspiro a ser cada día más, a mi mama María Elena por tener
calidad de vida y una amiga incondicional desde que tengo
uso de razón, y a mi hermano Luis Aurelio; de el anhelo que
sea tan buen padre como lo es el nuestro.***

RAFAEL

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos Andrés, Hernán, Rafael por su amistad incondicional y el apoyo en los momentos en los que más lo necesite.

A mi novia por su apoyo y ánimo para seguir adelante.

Al ingeniero Omar Gelvez Arocha por su orientación y su dedicación como docente.

Al ingeniero Carlos Mora por la confianza brindada apoyo y colaboración prestada en este proyecto.

Al ingeniero Jairo Escobar por darnos la oportunidad y abrirnos las puertas de la cervecería y permitirme participar en este proyecto.

A Walter Pedraza trabajador de sala de maquinas en la cervecería por su amabilidad colaboración y voluntad de servicio.

Y en general a todas aquellas personas que contribuyeron para que esto fuera posible.

José Yesid Calderón Candela.

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos y compañeros de estudio en la escuela de Ingeniería Mecánica; Julián, Yesid, Ismael, Jairo, Javier, Andrés, Wilmer por compartir no solamente el tesoro más grande que puede poseer hombre alguno “*El Conocimiento*” si no que también una mano amiga en momentos de flaqueza.

En la cervecería a los Ingenieros Jairo Escobar y Carlos Leonel Mora, por su colaboración y experiencia.

A los operarios de la sala de maquinas, filtración y cocinas por las aclaraciones respecto a los tiempos de operación y dudas con respecto al proceso cervecero.

Especial agradecimiento al señor Walter Pedraza encargado del manejo y operación del sistema de refrigeración de la cervecería, por inducirnos al esquema de trabajo del sistema e interrogantes que tuvimos con respecto a este trabajo.

Rafael Leonardo Gómez Díaz.

Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1 PROCESO CERVECERO	26
1.1 ETAPAS DEL PROCESO CERVECERO	26
1.1.1 ENFRIAMIENTO DEL MOSTO	27
1.1.2 FERMENTACION Y MADURACION	28
1.1.3 FILTRACION, MEZCLA Y CARBONATACION	29
1.1.4 ALMACENAMIENTO	30
2 GENERALIDADES DEL SISTEMA DE REFRIGERACION CERVECERIA BAVARIA S.A. BUCARAMANGA	31
2.1 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA	32
2.2 EQUIPOS DE REFRIGERACION	34
2.2.1 COMPRESORES	34
2.2.2 CONDENSADORES EVAPORATIVOS	36
2.2.3 BOMBAS	37
2.3 EQUIPOS QUE REQUIEREN REFRIGERACION	38
2.4 OPERACIÓN DEL SISTEMA	40
3 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ENERGETICO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION	
3.1 DETERMINACION DE LOS REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	42
3.1.1 CALCULO DE LAS CARGAS TERMICAS QUE IMPONEN LOS SUBSISTEMAS DE ENFRIAMIENTO	43

3.1.1.1	(ENFRIADORES) CONOCIENDO PARAMETROS DEL PROCESO	43
3.1.1.2	(ENFRIADORES) POR MEDIO DE LA VALVULA REDUCTORA DE PRESION	51
3.1.1.3	METODO PARA CALCULO DE CARGA EN LA CAVA DE LUPULO	56
3.1.1.4	CALCULO DE LA CARGA TERMICA DEBIDO A LOS TANQUES DESTINADOS A PROCESOS DE FERMENTACION Y MADURACION	62
3.1.2	CARGA TERMICA EN EL SISTEMA DE REFRIGERACION	73
3.1.2.1	ESTACION DE BOMBEO No 1 y No 2	73
4	DETERMINACION DE LAS CAPACIDADES DEL SISTEMA	74
4.1	COMPRESORES DEL SISTEMA	75
4.1.1	POTENCIA AL FRENO	76
4.2	TANQUES SEPARADORES DE BAJA PRESION	78
4.2.1	SEPARACION DE LIQUIDO/VAPOR	81
4.2.1.1	VELOCIDAD DE SEPARACION TANQUE SEPARADOR No 1	
4.2.1.2	VELOCIDAD DE SEPARACION TANQUE SEPARADOR No 2	
4.3	CONDENSADORES DEL SISTEMA	90
4.4	BOMBAS DEL SISTEMA	91
4.4.1	FLUJO VOLUMETRICO	92
4.4.2	CAVITACION	94
5	COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION	99
5.1	POTENCIA DEL SISTEMA	99
5.2	CARGA DEL SISTEMA	100
5.3	TEMPERATURA DE EVAPORACION	100
5.4	CAPACIDAD DEL SISTEMA	102
5.5	PRESION DE CONDENSACION	102
6	MEJORAS EN EL CONSUMO ENERGETICO	103
6.1	SIN MODIFICAR LA INSTALACION	103

6.1.1	RACIONALIZANDO LAS CAPACIDADES DISPONIBLES DE REFRIGERACION (COMPRESORES+CONDENSADORES) A LA CARGA SOLICITADA	104
6.2	MODIFICANDO LA INSTALACION ACTUAL	114
6.2.1	AISLAMIENTO TERMICO DE TUBERIAS	114
6.2.2	AGREGANDO ELEMENTOS DE CONTROL AUTOMATICO QUE PERMITAN TRABAJO DE EQUIPOS Y AHORRO ENERGETICO DE ESTOS	117
6.2.2.1	OPERACIÓN DE LAS BOMBAS EN EL SISTEMA	117
6.2.2.1.1	CONTROL DE LAS BOMBAS DE AMONIACO	117
6.2.3	CONTROL DE LA PRESION DE CONDENSACION	123
6.2.3.1	CONVERTIDOR DE FRECUENCIA	124
6.2.3.2	SENSOR DE TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO	129
6.2.4	CONTROL DE LOS CONDENSADORES DEL SISTEMA	130
7	MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD	131
7.1	QUE ES RCM	
7.2	OBJETIVO DEL RCM	
7.3	APLICAR RCM A EQUIPOS CRÍTICOS O A TODOS LOS EQUIPOS DE LA PLANTA.	
7.4	DEFINICION DE SISTEMA PARA ANALIS DE RCM	134
7.5	IMPLEMENTACION DEL RCM	136
7.5.1	FASES DEL RCM	136
7.5.1.1	LISTADO DE FUNCIONES Y ESPECIFICACIONES	138
7.5.1.2	DETERMINACION DE LAS FALLAS FUNCIONALES PARA CADA ELEMENTO.	139
7.5.1.3	DETERMINACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO	141

7.5.1.3.1	ANALISIS DE LA GRAVEDAD DE LOS FALLAS. CRITICIDAD	145
7.6	DETERMINACION DE MEDIDAS PREVENTIVAS	148
7.6.1	TAREAS DE MANTENIMIENTO	148
7.6.2	DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO	153
7.6.3	MEJORAS Y MODIFICACIONES DE LA INSTALACIÓN	154
7.6.4	CAMBIOS EN LOS PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN	155
7.6.5	CAMBIOS EN PROCEDIMIENTOS DE MANTENIMIENTO	155
7.6.6	PLAN DE MANTENIMIENTO Y AGRUPACION DE MEDIDAS PREVENTIVAS	156
7.6.6.1	PUESTA EN MARCHA DE LAS MEDIDAS PREVENTIDAS OBTENIDAS	157
7.7	QUE LOGRA EL RCM	158
7.8	RCM SISTEMA DE REFRIGERACION BAVARIA S.A BUCARAMANGA	161
7.8.1	DESARROLLO RCM EN LA CERVECERIA	162
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	165
8.1	CONCLUSIONES	165
	RECOMENDACIONES	166
	ANEXOS	169

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Etapas en el proceso cervecero.....	26
FIGURA 2. Enfriamiento del mosto en la cervecería.....	27
FIGURA 3. Esquema de fermentación y trasiego del sistema.....	28
FIGURA 4. Diagrama de mezclado y obtención del producto final.....	29
FIGURA 5. Esquema de enfriador de agua desaireada.....	30
FIGURA 6. Enfriamiento de los tanques de almacenamiento BBT.....	31
FIGURA 7. Esquema sistema de refrigeración implementado en la cervecería....	33
FIGURA 8. Compresor de tornillo MYCOM, tipo paquete.....	34
FIGURA 9. Condensador evaporativo EVAPCO.....	36
FIGURA 10. Bombas TEIKUKO tipo R.....	37
FIGURA 11. Intercambiador de calor de placas Alfa-Laval.....	38
FIGURA 12. Flujo másico y temperaturas de entrada y salida en un intercambiador de calor de placas.....	43
FIGURA 13. Enfriador de agua para mosto cervecería de Bucaramanga.....	46
FIGURA 14. Enfriador de agua desaireada cervecería de Bucaramanga.....	47
FIGURA 15. Enfriador de trasiego cervecería de Bucaramanga.....	48
FIGURA 16. Enfriador de Pony Malta cervecería de Bucaramanga.....	49
FIGURA 17. Enfriador de cerveza madura cervecería de Bucaramanga.....	50

FIGURA 18. Ubicación de la válvula a la salida del enfriador.....	51
FIGURA 19. Enfriador de glicol para tanques BBT cervecería de Bucaramanga..	53
FIGURA 20. Enfriador de glicol para cava de levadura cervecería de Bucaramanga	
FIGURA 21. Enfriadores de CO2 cervecería de Bucaramanga.....	55
FIGURA 22. Ganancias de calor en la cava de lúpulo.....	56
FIGURA 23. Ganancia de calor en un tanque fermentador o madurador.....	62
FIGURA 24. Comportamiento del mosto estándar.....	63
FIGURA 25 Comportamiento del mosto para Águila Light.....	64
FIGURA 26. Interfaz grafica para el cálculo de carga térmica en tanques fermentadores.....	68
FIGURA 27. Comportamiento de la carga térmica en los tanques fermentadores.	68
FIGURA 28. Trabajo realizado por el compresor del estado 1 al 2.....	76
FIGURA 29. Esquema general del sistema de refrigeración BAVARIA S.A.....	79
FIGURA 30. Tanque separador de baja presión.....	80
FIGURA 31. Separación del vapor del líquido.....	81
FIGURA 32. Proceso de flujo estable en tanques separadores horizontales.....	82
FIGURA 33. Estados en un sistema de refrigeración por recirculación de líquido.	84
FIGURA 34. Diagrama P-h para el amoníaco y ciclo de trabajo.....	85
FIGURA 35. Estaciones de bombeo en la cervecería.....	95
FIGURA 36. Potencia del sistema en un día entre semana.....	99
FIGURA 37. Carga en el tiempo.....	100

FIGURA 38. Temperatura de evaporación en un día entre semana.....	101
FIGURA 39. Potencia Consumida vs Temperatura de Evaporación.....	101
FIGURA 40. Capacidad vs Temperatura de Evaporación.....	102
FIGURA 41. Potencia Consumida vs Presión de Condensación.....	103
FIGURA 42. Ganancia de calor en las líneas del sistema.....	115
FIGURA 43. Ausencia de aislamiento en la tubería de salida, Enfriador de Trasiego.....	115
FIGURA 44. Ausencia de aislamiento en la tubería de salida, Enfriador de Pony Malta.....	116
FIGURA 45. Ausencia de aislamiento en la tubería de entrada, Enfriador de cerveza madura.....	116
FIGURA 46. Control de las Bombas en el sistema de refrigeración.....	118
FIGURA 47. Circuito lógico eléctrico para el control de las bombas.....	119
FIGURA 48. Funcionamiento Convertidor de frecuencia.....	125
FIGURA 49. Sensor de temperatura.....	129
FIGURA 50. Esquema control de la presión de condensación.....	130

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Bombas operando en la cervecería	38
Tabla 2	Subsistemas de enfriamiento que componen cada estación	39
Tabla 3	Operación de equipos en el sistema de refrigeración	40
Tabla 4	Operación de los subsistemas de enfriamiento	41
Tabla 5	Parámetros, enfriador agua para mosto	46
Tabla 6	Parámetros, enfriador de agua desaireada	47
Tabla 7	Parámetros, enfriador de trasiego	48
Tabla 8	Parámetros, enfriador de Pony Malta	49
Tabla 9	Parámetros, enfriador de cerveza madura	50
Tabla 10	Capacidades nominales	51
Tabla 11	Factor de corrección para ΔP	52
Tabla 12	Factor de corrección para una razón de recirculación	52
Tabla 13	Parámetros, enfriador de glicol para tanques BBT	53
Tabla 14	Parámetros, enfriador de glicol para cava de levadura	54
Tabla 15	Parámetros, enfriadores de CO ₂	55
Tabla 16	Numero de renovaciones de aire en 24 horas debido a la apertura de puertas e infiltraciones	57
Tabla 17	Calor aportado por motores dentro del cuarto	59
Tabla 18	Tanques fermentadores en la cervecería de Bucaramanga	64
Tabla 19	Condiciones de operación en un tanque fermentador	65
Tabla 20	Carga térmica tanques HOLVRIEKA	66
Tabla 21	Carga térmica tanques ZIEMANN	66
Tabla 22	Esquema de matriz implementada para determinar la carga térmica	67
Tabla 23	Carga total estación No1	73
Tabla 24	Carga total estación No2	74
Tabla 25	Capacidades de los compresores en el sistema	75

Tabla 26	Máxima velocidad de separación en (m/s) para el amoniaco en condiciones de flujo estable	82
Tabla 27	Capacidades de condensadores en el sistema	90
Tabla 28	Carga máxima en los compresores	91
Tabla 29	Razón de recirculación y tipo de alimentación	92
Tabla 30	Flujo volumétrico requerido en cada estación	94
Tabla 31	NPSH en la bomba 1, para un nivel del 50% en el tanque separador	97
Tabla 32	NPSH en la bomba 1, para un nivel del 15% en el tanque separador	97
Tabla 33	NPSH en la bomba 1 estación No 1 para un nivel del 50% en el tanque separador	98
Tabla 34	NPSH en la bomba 1 estación No 1 para un nivel del 28% en el tanque separador	99
Tabla 35	Escenario No 1, cargas trabajando y equipos en operación a las 7:00 am	105
Tabla 36	Escenario No 1, cargas trabajando y equipos en operación a las 2:00 pm	106
Tabla 37	Escenario No 1, cargas trabajando y equipos en operación a las 3:00 am	107
Tabla 38	Escenario No 2, cargas trabajando y equipos en operación a las 7:00 am	108
Tabla 39	Escenario No 2, cargas trabajando y equipos en operación a las 2:00 pm	109
Tabla 40	Escenario No 2, cargas trabajando y equipos en operación a las 3:00 am	110
Tabla 41	Escenario No 3 cargas trabajando y equipos en operación a las 7:00 am	111
Tabla 42	Escenario No 3, cargas trabajando y equipos en operación a las 2:00 pm	112

Tabla 43	Escenario No 3, cargas trabajando y equipos en operación a las 3:00 am	113
Tabla 44	Características del switch flotador	120
Tabla 45	Características del relé	120
Tabla 46	Selección de la válvula solenoide	122
Tabla 47	Características de la válvula solenoide	123
Tabla 48	Características Convertidor de Frecuencia Seleccionado	128
Tabla 49	Características Sensor de Temperatura	129
Tabla 50	Análisis de Criticidad de Falla (Crítico).	145
Tabla 51	Análisis de Criticidad de Falla (Importante).	146
Tabla 52	Análisis de Criticidad de Falla (Tolerable).	146
Tabla 53	Tareas de mantenimiento y tipos de falla.	150
Tabla 54	Formato RCM BAVARIA No1	162
Tabla 55	Formato RCM BAVARIA No2	163
Tabla 56	Formato RCM BAVARIA No3	164

RESUMEN

TÍTULO:

ANALISIS Y ESTUDIO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION IMPLEMENTADO EN LA CERVECERIA BAVARIA S.A. DE BUCARAMANGA CON EL FIN DE PROPONER UNA MEJORA EN EL CONSUMO ENERGETICO.

AUTORES:

JOSE YESID CALDERON CANDELA

RAFAEL LEONARDO GOMEZ DIAZ

PALABRAS CLAVES: Refrigeración Industrial, BAVARIA S.A., Refrigeración por recirculación, Sistemas Inundados, Estudio de un sistema de refrigeración, Sistemas de Amoniaco.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado comprende el estudio del sistema de refrigeración implementado en la cervecería BAVARIA S.A. de Bucaramanga. Presenta una breve descripción del proceso cervecero, pero en sí enfatiza en la aplicación y el impacto que tiene la refrigeración industrial en la elaboración de la cerveza y otros productos.

Muestra las generalidades del sistema como características de este, principio de funcionamiento de un sistema de refrigeración por recirculación de líquido, equipos (Compresores, Bombas de amoniaco, Condensadores Evaporativos) con los que trabaja el sistema. El comportamiento energético del sistema de refrigeración como el cálculo de cargas o subsistemas de enfriamiento que contiene el sistema, incluyendo el modelamiento dinámico de la carga en los tanques fermentadores.

Da a conocer las capacidades de los equipos que componen el sistema de refrigeración de acuerdo a los parámetros de presión y temperatura en los que trabajan estos equipos.

Este proyecto también propuso mejoras que inciden en la reducción de costos por operación de equipos. También en la operación y el trabajo seguro de estos (en las bombas de amoniaco encargadas de la recirculación del refrigerante) ante posibles colapsos o fallas en el sistema. Se propuso mejoras ante deficiencias en la infraestructura del sistema como ausencia de aislamiento en las tuberías del sistema y fugas del refrigerante en estas líneas.

*Trabajo de grado Modalidad de Investigación.**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gélvez A.

SUMMARY

TITLE:

STUDY AND ANALYSIS OF THE REFRIGERATION SYSTEM IMPLEMENTED IN BAVARIA S.A. BREWERY OF BUCARAMANGA IN ORDER TO PROPOSE AN IMPROVEMENT IN ENERGY CONSUMPTION.

AUTORES:

JOSE YESID CALDERON CANDELA

RAFAEL LEONARDO GOMEZ DIAZ

PALABRAS CLAVES: Industrial refrigeration, BAVARIA S.A., Refrigeration by recirculation, Liquid overfeed systems, Study of a refrigeration system, Ammonia system.

DESCRIPTION:

This paper includes the study of the refrigeration system implemented in BAVARIA S.A. brewery company of Bucaramanga. Presents a short description of the brewer process, but with special attention to the impact that has at the industrial refrigeration, in the elaboration of beer and other products like pony malta.

It shows the system generalities like features of this, operating principle of a liquid recirculation system, equipment (Compressors, ammonia pumps, Evaporative condensers) which the system works. Energy behavior of the refrigeration system like the calculate of the refrigeration loads or the cooling subsystems that the same system has, including the dynamic modeling of the load at the fermenter tanks.

Announces the equipment capacity that the system of refrigeration has, agree to the parameters of pressure and temperature at which all these equipments works.

This project proposes improvements that had an high impact on the cost reduction by the work of the equipment system. It has the good strategy of the safety operation (at the ammonia pumps responsible of the refrigerant recirculation) for possibles collapses or systems fails. It was proposed improvements to infrastructure deficiencies in the system and like the lack of insulation on piping and leakage of the coolant system on these lines.

*Graduation Project – Investigation Modality.**Ability of engineerings Physique-Mechanical, Mechanical engineering school, Ing. Omar Gélvez A.

GLOSARIO

ADJUNTOS. Son ingredientes no malteados que proveen almidón y se utiliza para reemplazar parcialmente la malta sin afectar la calidad de la cerveza.

COCCION DEL MOSTO. Consiste en hervir el mosto entre 60 y 90 minutos dependiendo de la tecnología utilizada.

COMPRESOR TIPO PAQUETE. Es un compresor que se compone de su motor, acoples, separador de aceite, filtros y una bomba de aceite.

FILTRACION. Separar la mayor cantidad de mosto de los afrechos y otras sustancias insolubles, con las mejores características de calidad.

LEVADURA. La levadura no es propiamente una materia prima, ya que no queda en la cerveza, pero es un ingrediente fundamental. Es la responsable de generar alcohol y demás componentes de la cerveza.

LUPULO. Es el responsable del sabor de la cerveza. Aporta el amargo y aroma característicos del producto.

MACERACION. El objetivo es obtener de la malta molida o de una mezcla de malta y adjunto mediante extracción con agua en condiciones apropiadas, la mayor cantidad posible de extracto (sustancias solubles) con las mejores cualidades para producir cerveza.

MALTA. Es la base de la cerveza y responsable principal del carácter, cuerpo sabor, aroma y espuma. Es obtenida o producida a partir de la cebada. En general aporta la mayoría de los componentes químicos en la cerveza.

MOLIENDA. Convertir en harina los granos de malta y de otros cereales (arroz y maíz) de tal manera que se puedan extraer los componentes solubles con el agua utilizada en la maceración.

SEDIMENTACION. Disminuir la temperatura del mosto, oxigenarlo e inyectar la levadura con el fin de generar las condiciones óptimas para la fermentación.

UNIPROCESO. Proceso de fermentación y maduración llevado de manera simultánea en un solo tanque.

UNITANQUE. Tanque que realiza un uniproceto.

INTRODUCCIÓN

La refrigeración industrial es tal vez uno de los muchos sistemas que ha el ser humano desarrollado como consecuencia de la necesidad del hombre de mantener ciertos productos de consumo a temperaturas relativamente bajas ya sea para prolongar la vida de alimentos perecederos o simplemente para obtener algunas comodidades. La refrigeración es imprescindible hoy en día, si se preguntara ¿Qué producto alimenticio no requeriría ser enfriado? Ante una pregunta cómo está, la verdad no se encontraría una respuesta rápida sin pensar detalladamente el interrogante. La aplicación de esta sucede en sectores como, la conservación de frutas, verduras, en la floricultura y por supuesto en el sector de las bebidas.

La industria de las bebidas ha tenido muchos avances a finales de los años 80, en especial la industria cervecera, por ejemplo se tendrá en memoria siempre el uso de los antiguos barriles cerveceros ubicados en grandes cuartos fríos, hasta su reemplazo por los modernos tanques que trabajan en largas jornadas diarias realizando lo que los cerveceros llaman uniproceso. Todo esto gracias a las personas que han dedicado tiempo y esfuerzo en investigaciones para hacer un uso adecuado de la refrigeración y de esta manera un mejor aprovechamiento de la energía.

El uso eficiente de energía “energía eficiente”¹ que significa producir más con menos ¿pero cómo?, bueno puede hacerse y para lograrlo hay que hacer estrategias convenientes que van desde la administración hasta la medición y estudio de los productos a elaborar. El uso eficiente de la energía es un tema que está en boca de líderes mundiales y grandes empresarios ya sea por la necesidad

¹ <http://www.schneider-electric.com.co/servicios/energiaeficiente.cfm>

de disminuir la emisión de agentes contaminantes al ambiente o para competir en la industria con costos más bajos.

Desde el funcionamiento de sus instalaciones² en el año de 1948 hasta su modernización en el 2005, la cervecería BAVARIA S.A. de Bucaramanga cuenta con un único sistema de refrigeración, el cual se encarga de manejar la temperatura adecuada para los procesos que son necesarios en la cervecería.

Actualmente el sistema de refrigeración ha sufrido de varios cambios con respecto al sistema original en el 2005, como la adición de más tanques, enfriadores, condensadores. Todo esto sin ningún estudio previo y solamente obedeciendo a exigencias de producción, de esta manera se generan problemas inesperados como elevación del consumo de energía y fallas de algunos equipos.

El sistema de refrigeración de la cervecería de Bucaramanga representa aproximadamente el 30% del consumo total en la empresa.

Éste trabajo quiere desarrollar el respectivo estudio del sistema de refrigeración, explicando detalladamente en qué consiste un sistema de refrigeración por recirculación de líquido y además analizando desde el consumo energético de cada una de sus cargas, hasta el comportamiento de cada uno de los equipos que conforman el sistema; también pretende idear alternativas que lleven a disminuir el consumo energético actual y de esta manera cumplir con las políticas de un uso eficiente de la energía.

² http://www.bavaria.com.co/espanol/queesbavaria/plantas_cerv_bmanga.php

1 PROCESO CERVECERO³

Es necesario describir en qué consiste el proceso cervecero, ya que se observara de qué manera el sistema de refrigeración tiene impacto en este.

Para la elaboración de la cerveza se necesitan de algunas materias primas (Malta, adjuntos, agua, lúpulo, levadura) algunas de estas materias tienen un proceso como por ejemplo el maltaje. Una vez se tienen reunidas todas las materias primas se procederá a las etapas del proceso cervecero.

1.1 ETAPAS DEL PROCESO CERVECERO

Las etapas del proceso son tan importantes que inciden directamente en el tipo o la clase de cerveza que se quiera elaborar (figura 5).

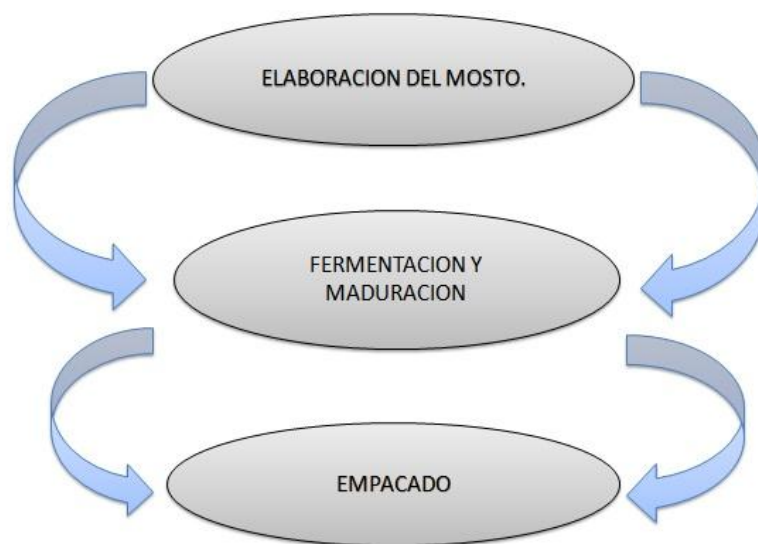


Figura 1. Etapas en el proceso cervecero.

³ BAVARIA S.A. subsidiaria de SABMILLER plc

La elaboración del mosto se realiza en las cocinas, consiste en la transformación de las materias primas para obtener como resultado un líquido azucarado y nutritivo el cual servirá de alimento para la levadura.

Este proceso incluye: molienda, maceración, filtración, cocción, sedimentación y enfriamiento.

1.1.1 ENFRIAMIENTO DEL MOSTO

El sistema de refrigeración opera indirectamente en el enfriamiento del mosto, ya que el amoniaco no enfría el mosto recién cocinado pero si enfría el agua mediante el enfriador de agua para mosto (figura 2).

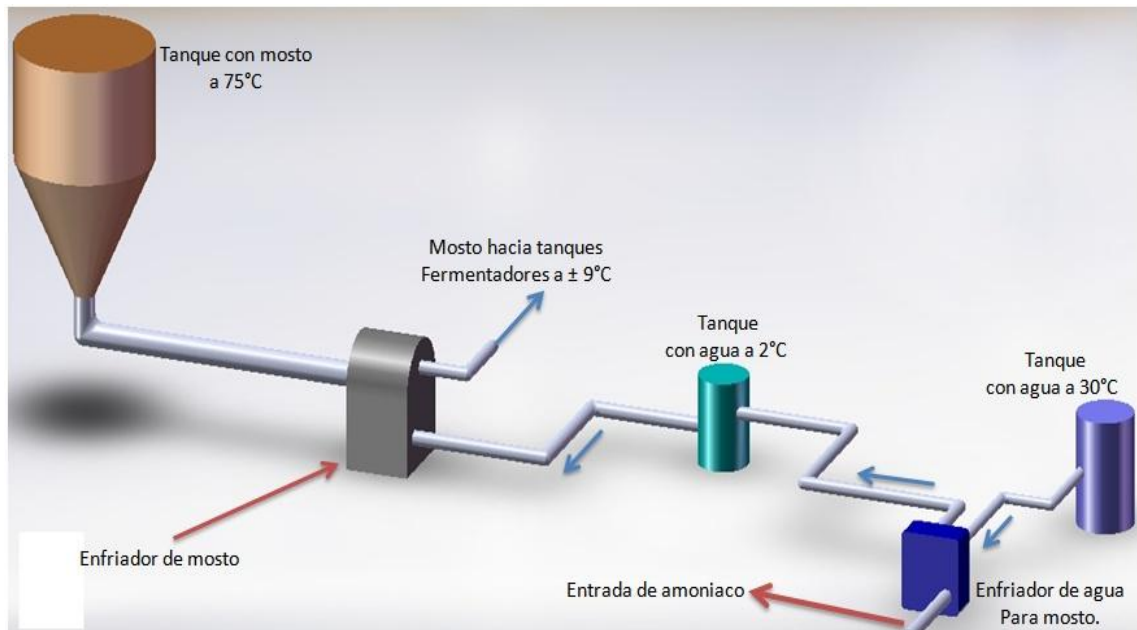


Figura 2. Enfriamiento del mosto en la cervecería

El agua que proviene del acueducto metropolitano es almacenada en un tanque a 30°C o un poco menos, luego es llevada al enfriador de agua para mosto el cual enfría esta a 2°C. El agua que sale del enfriador de mosto es utilizada para lavar botellas.

1.1.2 FERMENTACION Y MADURACION

En la industria se conoce el término fermentación como la descomposición de sustancias orgánicas, por la acción de microorganismos, con desprendimiento de gases y generación de calor.

Para la industria cervecera la fermentación es un metabolismo anaerobio mediante el cual los azúcares fermentables del mosto son transformados en etanol y gas carbónico (CO_2) por acción de la levadura cervecera, con la formación de subproductos y liberación de energía.

En la maduración, una vez la cerveza ha fermentado y se ha separado la levadura, la cerveza es enfriada a -1 a -2°C , se traspa a otro tanque y se mantiene fría durante cierto periodo de tiempo.

La manera en que el sistema de refrigeración trabaja en estos procesos (figura 3), es enviando el refrigerante hacia los tanques los cuales por medio de unas chaquetas que están ubicadas alrededor del tanque, enfrían la cerveza de acuerdo a los parámetros de fermentación o maduración.

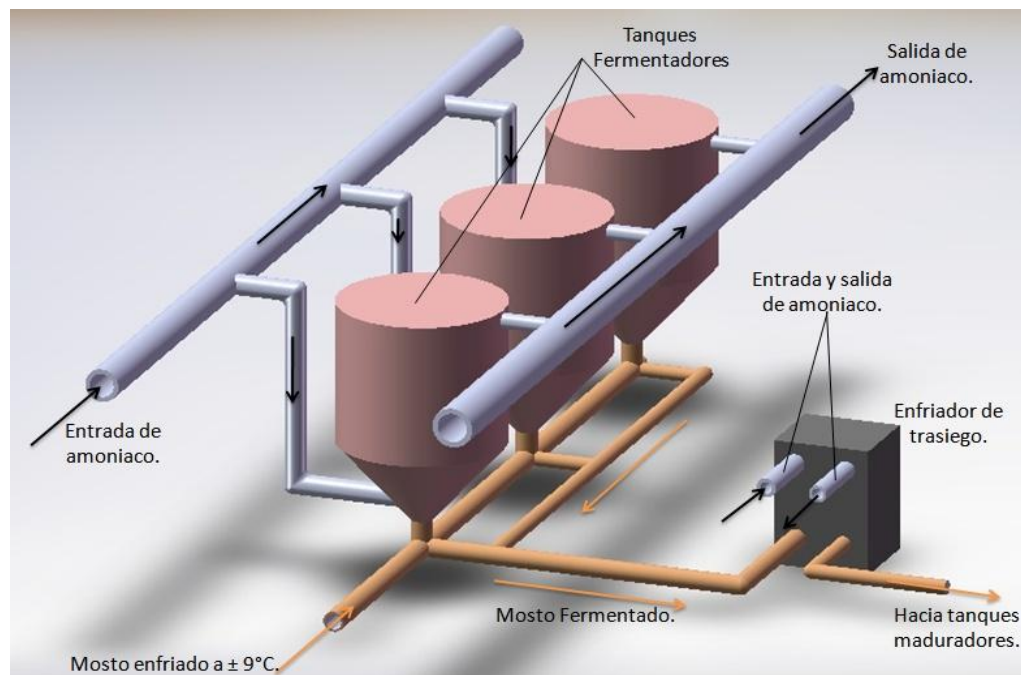


Figura 3. Esquema de fermentación y trasiego del sistema.

Cuando se va a madurar se envía el mosto a los tanques maduradores, no sin antes trasegarlo por un enfriador cuando se hace de esta manera lo que se desea es disminuir el tiempo de elaboración de la cerveza. El mosto también puede ser madurado en los tanques fermentadores, solo cambiaria el régimen de operación del tanque, si se hace de esta manera se le llama uniproceto.

1.1.3 FILTRACION, MEZCLA Y CARBONATACION

Cuando la cerveza ha terminado la maduración presenta una apariencia turbia y además normalmente está concentrada, por lo que debe ser filtrada, mezclada con agua desaireada y carbonatada para obtener el producto final (figura 4). El objetivo de la filtración consiste en tener una cerveza clara, brillante y estable, separando la mayor cantidad posible de sólidos, utilizando un medio filtrante.

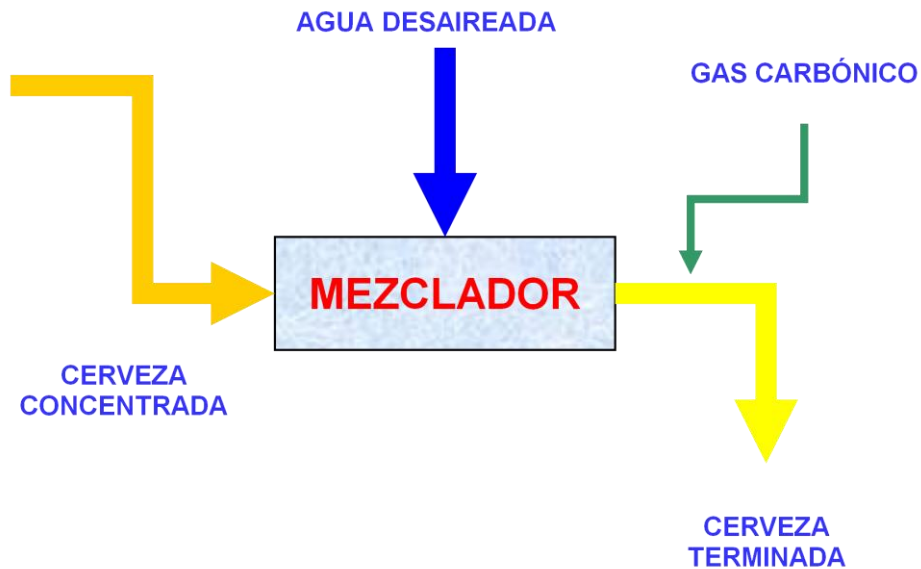


Figura 4. Diagrama de mezclado y obtención de producto final

Mezclar la cerveza concentrada con agua desaireada (sin oxígeno) en proporción tal que se obtenga un producto final dentro de las especificaciones.

El sistema de refrigeración permite que el agua desaireada este bajo los parámetros exigidos para el proceso (figura 5).

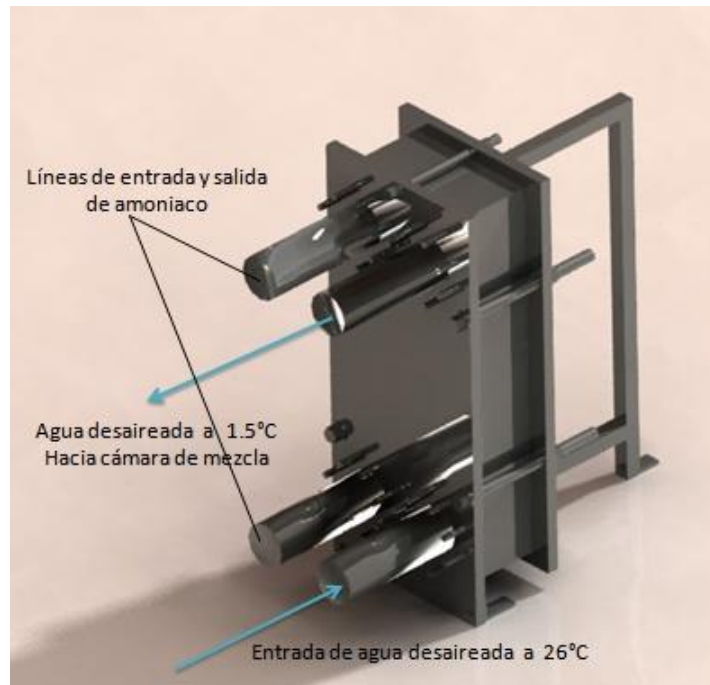


Figura 5. Esquema de enfriador de agua desaireada.

La carbonatación es incorporar en condiciones controladas gas carbónico (CO₂), en una cantidad determinada que cumpla con la especificación de la cerveza.

1.1.4 ALMACENAMIENTO

Una vez se obtiene la cerveza terminada se procede a almacenarla en unos tanques especiales (BBT), los cuales la mantienen a una temperatura adecuada antes de que se envíe al envase.

El enfriamiento para este proceso es de manera indirecta, similar al enfriamiento del mosto, con la diferencia de que los tanques BBT trabajan con glicol (figura 6).

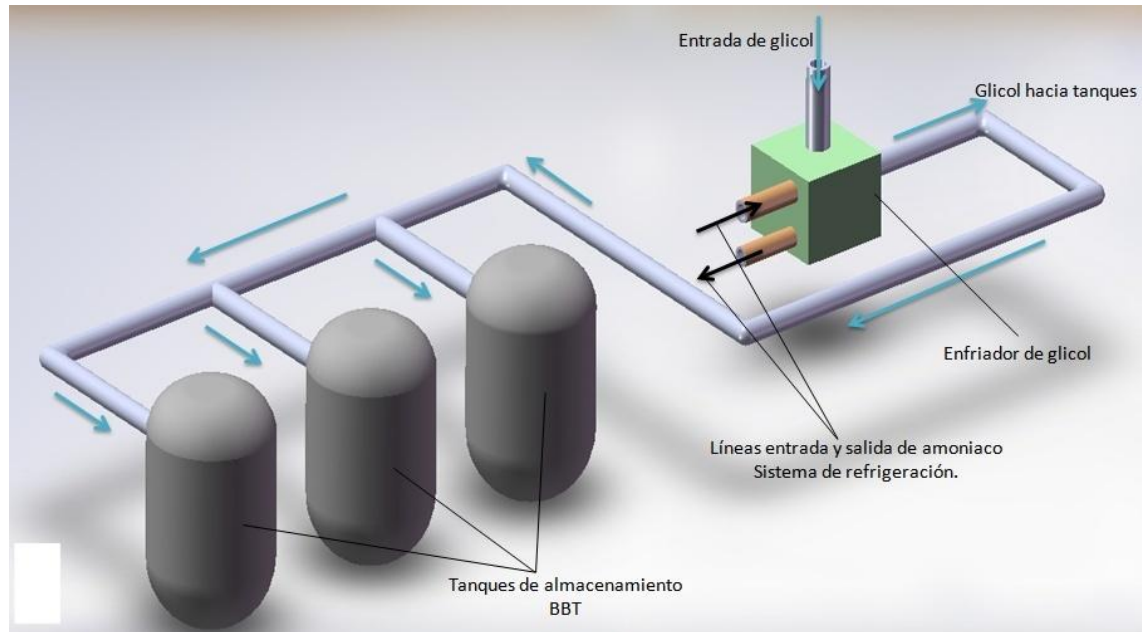


Figura 6. Enfriamiento de los tanques de almacenamiento BBT

2 GENERALIDADES DEL SISTEMA DE REFRIGERACION CERVECERIA BAVARIA S.A. BUCARAMANGA

Para describir las generalidades del sistema de refrigeración de la cervecería se tendrá en cuenta lo siguiente:

- 2.1 Características del sistema.
- 2.2 Equipos de refrigeración.
- 2.3 Equipos que requieren refrigeración.
- 2.4 Operación del sistema.

2.1 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

El sistema de refrigeración usado en la cervecería es un sistema de refrigeración por recirculación de líquido, que también es comúnmente llamado sistema inundado. Estos se destacan por entregar una gran cantidad de líquido refrigerante al evaporador, y evaporar solo una parte de este. Si se quisiera diferenciar entre recirculación de líquido o sistema inundado, se podría decir que el término sistema inundado aplica al enfriador solamente, mientras que un sistema por recirculación de líquido incorpora todos los equipos adicionales que permiten que un enfriador este inundado.

El sistema consta de un grupo de compresores y condensadores conectados en paralelo (figura 7) permitiendo que todos los equipos trabajen a iguales presiones tanto en la entrada como en la salida de estos.

El sistema trabaja con R717 amoníaco anhidro el cual después de la condensación se almacena en el tanque receptor o tanque de alta presión, el refrigerante pasa al tanque separador de líquido o tanque de baja presión por medio del diferencial de presión generado por la válvula de expansión, el refrigerante almacenado en el separador es bombeado hacia los múltiples enfriadores o cargas que componen el sistema. El refrigerante que no logra evaporarse es retornado hacia el separador y recirculado nuevamente hacia las cargas, mientras que el que se evapora es succionado por los compresores y de esta manera se completa el ciclo.

El sistema cuenta con dos tanques separadores, ambos trabajan a la misma temperatura de evaporación -7°C otras características se muestran a continuación:

- Presión de Succión 2,26 [bar].
- Presión de Descarga 11 [bar].
- Temperatura de Evaporación -7 [°C].
- Temperatura de Condensación 31 [°C].

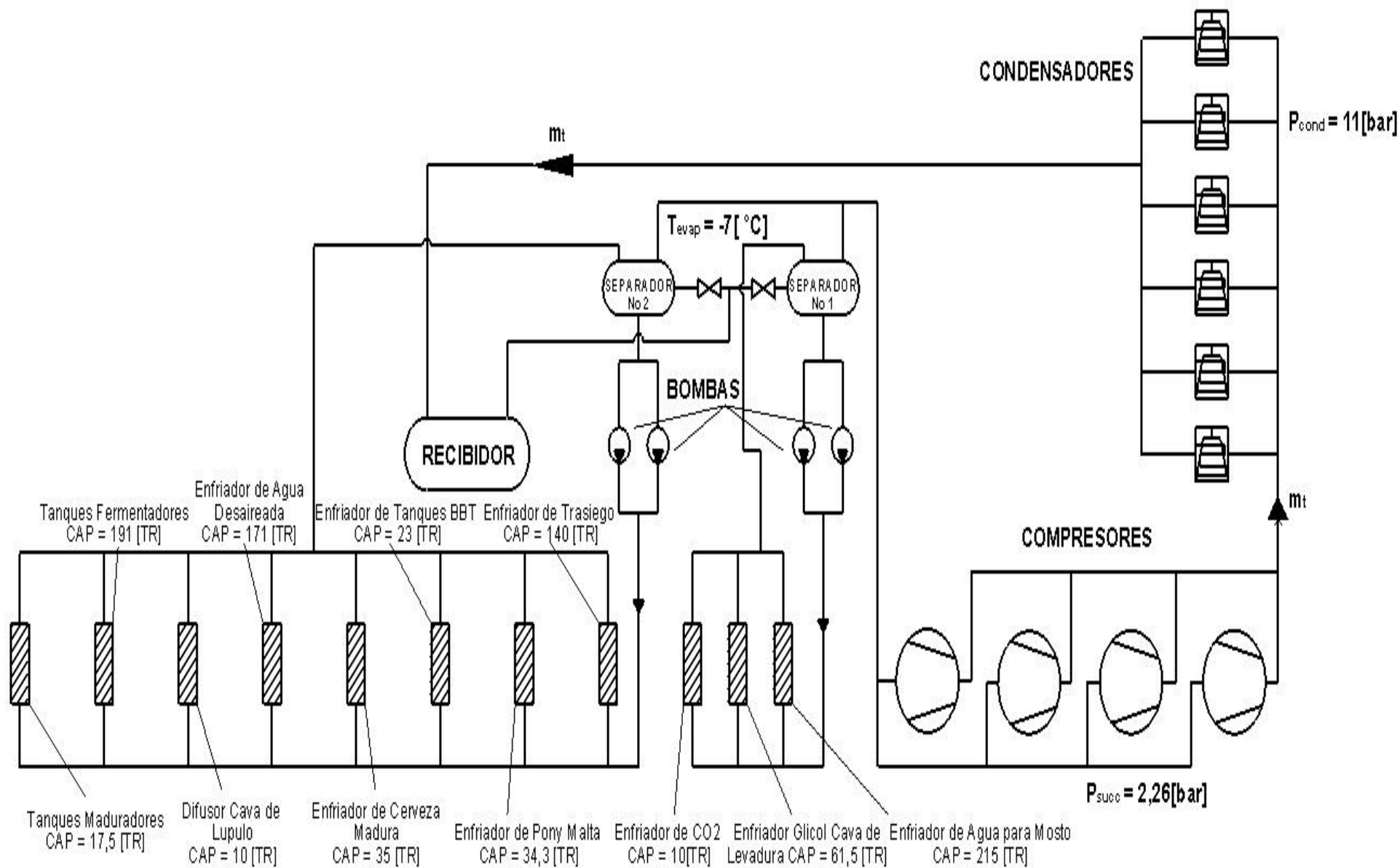


Figura 7. Esquema sistema de refrigeración implementado en la cervecería

2.2 EQUIPOS DE REFRIGERACION

2.2.1 COMPRESORES

El sistema consta de cuatro compresores de tornillo del fabricante Japonés MYCOM⁴ (figura 8), cada uno tiene diferentes características tanto físicas como de capacidad de operación. La potencia total requerida por todos ellos es de aproximadamente 1300[KW].



Figura 8. Compresor de tornillo MYCOM tipo paquete

COMPRESOR No 1

- ✓ Modelo N250SUD-L, Serial 80666
- ✓ Bomba MYCOM modelo M80P 6PM
- ✓ Referencia NH3
- ✓ Fecha: Marzo 1990
- ✓ Motor High Efficiency Toshiba 3 fases
- ✓ BHP= 500[HP]; Type: TTKK; 440[Volts]
- ✓ 2 Polos; 60[HZ]; 3520 [RPM]
- ✓ 570 [Amp]; Tamb,max = 40[°C]

⁴ <http://www.mayekawausa.com/>

COMPRESOR No 2

- ✓ Modelo N250VSD-L, Serial 2556055
- ✓ Bomba MYCOM modelo M80P 6PM
- ✓ Referencia NH3
- ✓ Fecha: Marzo 1990
- ✓ Motor High Efficiency Toshiba 3 fases
- ✓ BHP= 500[HP]; Código: G; 460[Volts]
- ✓ 2 Polos; 60[HZ]; 3576 [RPM]
- ✓ 528 [Amp]; Peso = 1700[Lb]

COMPRESOR No 3

- ✓ Modelo N250SUD-M, Serial 2552845
- ✓ Motor 3 fases, inducción
- ✓ Tipo BDA-BI
- ✓ BHP= 370[HP]; 2 Polos; 440[Volts]; 60[HZ]
- ✓ 565 [Amp]; 3540 [RPM]; Peso = 1800[Lb]
- ✓ Fecha: 1991
- ✓ Bomba de aceite MYCOM Trochord
- ✓ 3 fases; 0,9[Kw]; 4 polos; 1410 – 1710[RPM]
- ✓ 440[Volts]; 50 – 60[HZ]

COMPRESOR No 4

- ✓ Modelo N200VMD-LI, Serial 2035097
- ✓ Referencia NH3
- ✓ Bomba MYCOM modelo M50 - PM
- ✓ Motor 3 fases
- ✓ BHP= 300[Kw];
- ✓ 3570[RPM]
- ✓ 460[Volts]
- ✓ 340 [Amp]

2.2.2 CONDENSADORES EVAPORATIVOS

Para la condensación el sistema posee seis condensadores evaporativos EVAPCO⁵ cuatro de estos son del mismo modelo y los dos restantes son de un modelo más antiguo se espera que tengan la capacidad de rechazo de calor esperada para las condiciones de operación.

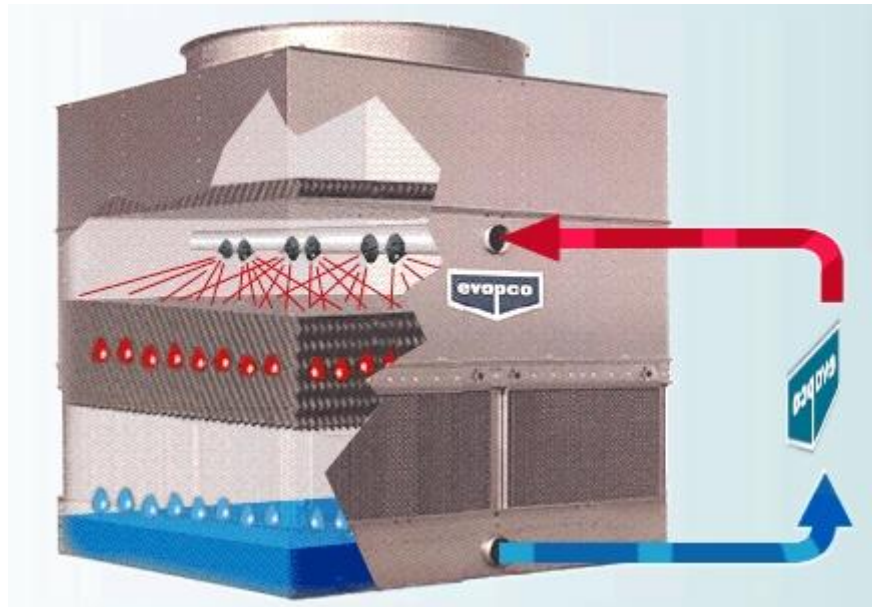


Figura 9. Condensador Evaporativo Evapco

Modelos CATC – 367

- ✓ Temperatura de condensación 33[°C]
- ✓ Temperatura de bulbo húmedo 24[°C]
- ✓ Motor ventilador 20[HP]
- ✓ Motor de la bomba 3[HP]
- ✓ Flujo de aire 101,9[m³/h]
- ✓ Tasa de agua Evaporada 19,9[L/min]

⁵ <http://www.evapco.com/>

Modelos PMCA – 475

- ✓ Temperatura de condensación 35,72[°C]
- ✓ Temperatura de bulbo húmedo 25,5[°C]
- ✓ Motor ventilador 25[HP]
- ✓ Motor de la bomba 5[HP]

2.2.3 BOMBAS

La recirculación se realiza por medio de dos tanques separadores, cada tanque trabaja con dos bombas TEIKOKU⁶ (figura 10) dando en total cuatro bombas para el sistema, todas ellas tienen iguales especificaciones manejan un flujo de 400(Lt/min) cada una y una cabeza de 60(m).

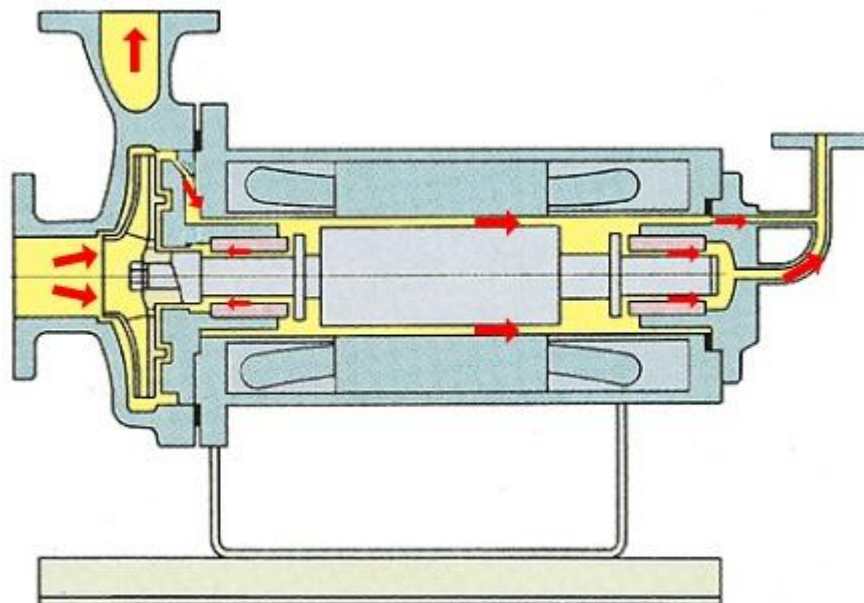


Figura 10. Bombas TEIKOKU tipo R

⁶ <http://www.chempump.com/>

Tabla 1 Bombas Operando en la Cervecería

Marca (Modelo)	Tipo	Cantidad	Condiciones de Operación			
			Cabeza Total [m]	Capacidad [l/min]	NPSH [m]	BHP [Kw]
TEIKOKU DD-2204-4	R42-317F4R-0506T1-E	2	60	400	2,5	6,6
TEIKOKU DD-2204-2	R42-317F4R-0506T1-E	2	60	400	2,5	6,6

2.3 EQUIPOS QUE REQUIEREN REFRIGERACION

El sistema de refrigeración trabaja a una temperatura de evaporación de -7°C esta temperatura es controlada en los tanques separadores, la presión de succión de los compresores es de $2,4(\text{bar})$ y la descarga se hace a una presión de $11(\text{bar})$.

Los enfriadores o las cargas que pertenecen al sistema son en su mayoría intercambiadores de calor de placas⁷ de diferentes fabricantes, estos enfriadores trabajan a diferentes temperaturas por encima de la temperatura de evaporación del sistema.

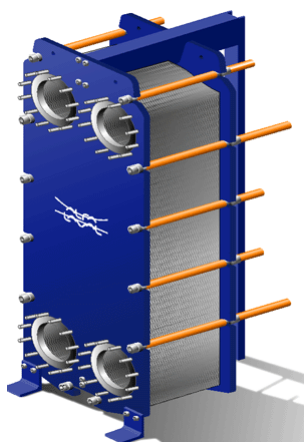


Figura 11. Intercambiador de calor de placas Alfa-Laval

⁷ <http://www.alfalaval.us/>

El otro tipo de cargas son los tanques que se usan para los procesos de fermentación y de maduración, además de un cuarto frío donde se almacena el lúpulo que se va a agregar a la cerveza. Al existir dos tanques separadores cada tanque distribuye refrigerante a un grupo de cargas o subsistemas de enfriamiento, esto puede observarse más detenidamente en la tabla 2.

Tabla 2. Subsistemas de enfriamiento que componen cada estación.

Estación de Bombeo	Subsistema de Enfriamiento
Tanque separador No 1	Enfriador de agua para mosto
	Enfriador de glicol para cava de levadura.
	Enfriadores de CO2
Tanque separador No 2	Enfriador de trasiego
	Enfriador de Pony Malta
	Enfriador de glicol para tanques BBT
	Enfriador de cerveza filtrada
	Enfriador de agua desaireada
	Tanques fermentadores
	Tanques maduradores
	Cuarto frío, difusor cava de lúpulo

2.4 OPERACIÓN DEL SISTEMA

El sistema de refrigeración de la cervecera BAVARIA S.A. de Bucaramanga trabaja continuamente las 24 horas del día. Este sistema es un eslabón de una cadena que conforma un proceso cervecero, por decir si algún proceso anterior o posterior al sistema de enfriamiento falla, el sistema se vería afectado pudiendo ocasionar una parada de este. Un ejemplo claro sería una falla en los tanques donde se cocina el mosto, si esto llegara a suceder el sistema no tendría que enfriar mosto y mucho menos realizar los procesos de fermentación y maduración por lo tanto se generaría una parada del sistema. Otro caso aunque menos drástico sería en el sector de las ventas del producto, llegando a disminuir el volumen de trabajo en el envase y en extremos casos la parada total del proceso.

Aunque el sistema trabaja continuamente, todos sus equipos no lo hacen de esta manera, ya que las cargas operan de manera intermitente. A continuación en la tabla 3 se describe la manera en que frecuentemente trabajan los equipos del sistema.

Tabla 3. Operación de equipos en el sistema de refrigeración.

Equipo	Modelo	Operación	
		Continua	Intermitente
Compresor No 1	N250SUD-L	X	
Compresor No 2	N250SVSD-L	X	
Compresor No 3	N250SUD-M		X
Compresor No 4	N200SVLD-LI		X
Condensadores evaporativos	CATC-367	X	
Condensadores evaporativos	PMCA-475		X
Bombas	DD-2204-2	X	

El compresor No 3 presenta problemas de arrastre de aceite por tal motivo se utilizara solo cuando el No 1 o el No 2 estén fuera de servicio, el compresor No 4 es el de más baja capacidad por tal motivo solo trabaja cuando hay poca demanda de enfriamiento. Debido a la operación de los dos primeros compresores el rechazo de calor se hace por medio de los condensadores evaporativos CATC - 367, los dos restantes solo entran a trabajar cuando alguno de los otros este en rutina de mantenimiento.

Lo mencionado anteriormente se debe a las variaciones de la carga ya que esta no es continua en el periodo de trabajo, de manera similar se presenta en la tabla 4, el modo de operación de los subsistemas de enfriamiento.

Tabla 4. Operación de los subsistemas de enfriamiento.

Subsistema	Operación	
	Continua	Intermitente
Enfriador de agua para mosto	X	
Enfriador de glicol para cava de levadura.	X	
Enfriadores de CO2		X
Enfriador de trasiego		X
Enfriador de Pony Malta		X
Enfriador de glicol para tanques BBT	X	
Enfriador de cerveza filtrada		X
Enfriador de agua desaireada		X
Tanques fermentadores	X	
Tanques maduradores	X	
Cuarto frio, difusor cava de lúpulo	X	

Aunque la tabla 4, muestra el periodo de trabajo de cada carga no tiene en cuenta otros parámetros que pueden variar la operación del sistema, como el numero de tanques que estén madurando, ya que es poco probable que todos estén haciendo este proceso al mismo tiempo, otro podría suceder en el cuarto de frio ya que no se va a tener siempre la misma cantidad de lúpulo a enfriar. Como se puede observar hay varias razones por las cuales la operación del sistema de refrigeración no se realiza de manera continua.

3 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ENERGETICO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION

3.1 DETERMINACION DE LOS REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Corresponde al cálculo de cargas térmicas transitorias y en estado estable debido a los 34 tanques destinados a los procesos de fermentación y maduración. Además de las otras cargas térmicas que imponen los subsistemas de enfriamiento que conforman el sistema de refrigeración.

- Enfriador de glicol para tanques BBT.
- Enfriador de glicol para cava de levadura.
- Enfriador de agua para mosto
- Enfriador de cerveza madura
- Enfriador de trasiego
- Enfriador de pony malta
- Enfriador de agua desairada
- Enfriadores de descarga de CO₂
- Difusor cava de lúpulo
- Tanques fermentadores
- Tanques maduradores

3.1.1 CALCULO DE LAS CARGAS TERMICAS QUE IMPONEN LOS SUBSISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

Para el cálculo de la carga térmica en los enfriadores (Intercambiadores de calor de placas), se tiene que hacer uso de instrumentos que puedan medir temperaturas y flujos volumétricos; debido a que no todos tienen la instrumentación deseada fue necesario calcular la carga térmica de los enfriadores con dos metodologías distintas. Para el cálculo de carga en la cava de lúpulo y en los tanques fermentadores y maduradores se desarrollaron procedimientos diferentes también.

3.1.1.1 (ENFRIADORES) CONOCIENDO PARAMETROS DEL PROCESO

A partir del flujo másico del proceso que se requiera enfriar, y las correspondientes temperaturas de entrada al enfriador y temperatura de salida de este.

Por el primer método se pudieron determinar las cargas de los enfriadores de agua para mosto, agua desaireada, trasiego, pony malta, cerveza madura (figura 12).

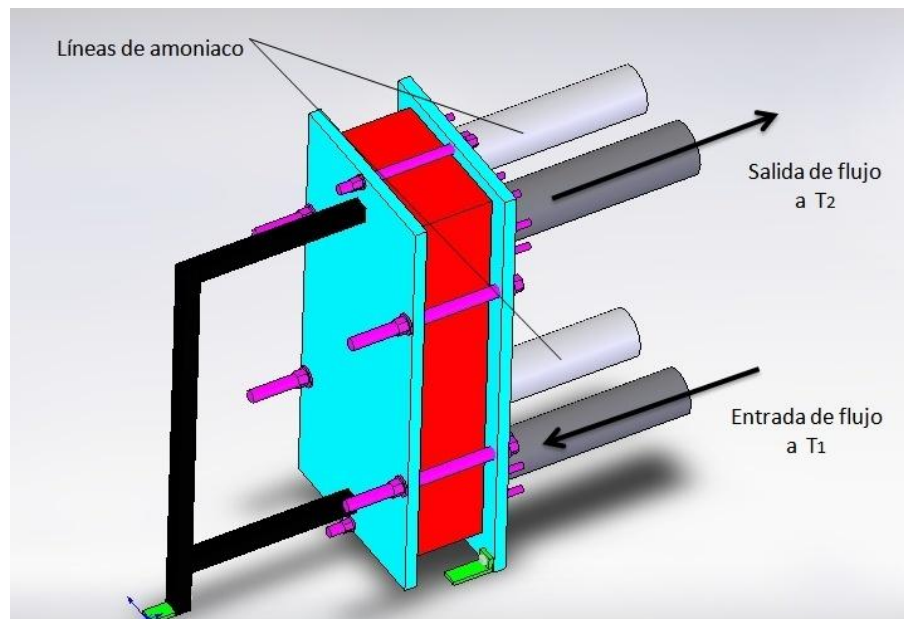


Figura 12. Flujo másico y temperaturas de entrada y salida en un intercambiador de calor de placas

Se determino la carga térmica por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación 1

$$\dot{Q}_{refr} = \rho * \dot{V} * Cp * (T_2 - T_1) \text{ [Kw]}$$

Donde:

ρ = densidad del fluido que se necesita enfriar [Kg/m^3].

\dot{V} = flujo volumétrico del proceso a enfriar [m^3/s].

T_2 = temperatura del fluido a la salida del enfriador [$^{\circ}C$].

T_1 = temperatura del fluido a la entrada del enfriador [$^{\circ}C$].

Cp = Calor específico del fluido a una temperatura promedio $\left[\frac{KJ}{Kg * ^{\circ}C} \right]$

Tomando propiedades a temperatura promedio se calcula la carga térmica para cada enfriador. La cerveza y la pony malta se trabajaron con las propiedades del agua ya que la cerveza tiene un contenido de 90 al 95% de agua.

Por ejemplo para el enfriador de agua para mosto:

$$\dot{V} = 280[Hl/h]; = 0,00777[m^3/s]$$

$$T_1 = 24[^{\circ}C].$$

$$T_2 = 2[^{\circ}C].$$

La temperatura promedio del fluido bajo estas condiciones será:

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}; \quad \rightarrow \quad T_m = \frac{24 + 2}{2}; \quad T_m = 13 [^{\circ}C]$$

Para esta temperatura la densidad y el calor específico son:

$$\rho = 999,34 [Kg/m^3]$$

$$Cp = 4,19 \left[\frac{KJ}{Kg * ^{\circ}C} \right]$$

Aplicando la ecuación 1 y suponiendo una eficiencia del 95% en el enfriador

$$\dot{Q}_{refr} = 999,34 * 0.00777 * 4,19 * (2 - 24); \quad \dot{Q}_{refr} = -753 [Kw]$$

El signo negativo determina el rechazo de calor del proceso.

$$\dot{Q}_{refr} = 214,34 [TR]$$

Enfriador de Agua para Mosto



Figura 13. Enfriador de agua para mosto cervecería de Bucaramanga

Tabla 5. Parámetros enfriador agua para mosto

	Agua	Amoniaco
TEMP ENTRADA:	24°C	- 6°C
TEMP SALIDA:	2°C	----
FLUJO VOLUMETRICO:	280 (l/h).	-----
DENSIDAD:	999,34 (Kg/m ³).	646 (Kg/m ³).
CARGA:	214,34 TR.	214,34 TR.

Enfriador de Agua Desaireada



Figura 14. Enfriador de agua desaireada cervecería de Bucaramanga

Tabla 6. Parámetros enfriador de agua desaireada

	Agua Desaireada	Amoniaco
TEMP ENTRADA:	26°C	- 5°C
TEMP SALIDA:	1.5°C	----
FLUJO VOLUMETRICO:	200 (HI/h).	----
DENSIDAD:	999.25 (Kg/m ³).	645,4 (Kg/ m ³).
CARGA:	171 TR.	171 TR.

Enfriador de Trasiego



Figura 15. Enfriador de trasiego cervecería de Bucaramanga

Tabla 7. Parámetros enfriador de trasiego

	Cerveza Trasegada	Amoniaco
TEMP ENTRADA:	6°C	- 6°C
TEMP SALIDA:	-2°C	-----
FLUJO VOLUMETRICO:	500 (Hl/h).	-----
DENSIDAD:	999.84 (Kg/m ³).	646,7 (Kg/m ³).
CARGA:	140 TR.	140 TR.

Enfriador de Pony Malta

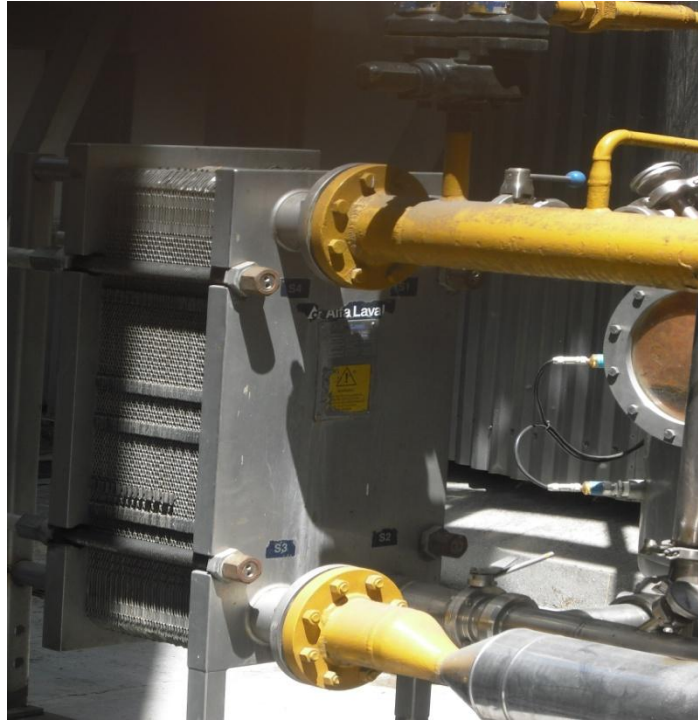


Figura 16. Enfriador de Pony Malta cervecería de Bucaramanga

Tabla 8. Parámetros enfriador de Pony Malta

	Pony Malta	Amoniaco
TEMP ENTRADA:	3°C	- 6°C
TEMP SALIDA:	0.2°C	-----
FLUJO VOLUMETRICO:	350 (Hl/h).	-----
DENSIDAD:	999.83 (Kg/m ³).	646,7 (Kg/m ³).
CARGA:	34,3 TR.	34,3 TR.

Enfriador de Cerveza Madura (Filtración)



Figura 17. Enfriador de cerveza madura cervecería de Bucaramanga

Tabla 9. Parámetros enfriador de cerveza madura

	Cerveza Madura	Amoniaco
TEMP ENTRADA:	-0.5°C	5°C
TEMP SALIDA:	-2.5°C	-----
FLUJO VOLUMETRICO:	500 (Hl/h).	-----
DENSIDAD:	999.83 (Kg/m ³).	645,4 (Kg/m ³).
CARGA:	35 TR.	35 TR.

3.1.1.2 (ENFRIADORES) POR MEDIO DE LA VALVULA REDUCTORA DE PRESION

El cálculo de la carga térmica se realizo de la siguiente manera.

Conociendo el tipo de válvula reguladora de presión y temperatura (PM Danfoss)⁸ en la salida del enfriador (figura 18) mediante el catalogo suministrado por el fabricante ver tabla 10; y teniendo en cuenta otras variables como lo son la relación de recirculación, temperatura de evaporación en el tanque separador y caída de presión generada por la válvula.

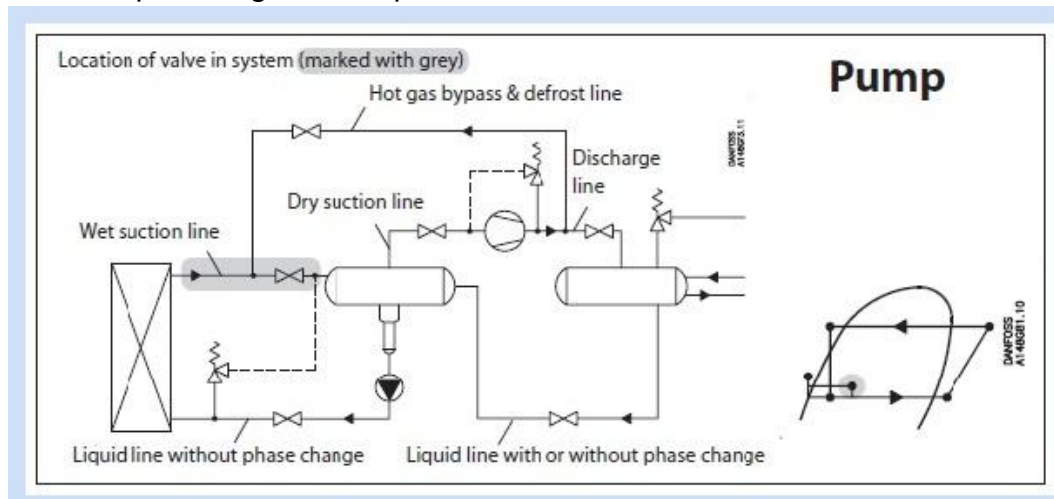


Figura 18. Ubicación de la válvula a la salida del enfriador

Tabla 10. Capacidades nominales

Tipo	m ³ /h	Temperatura de Evaporación °C							
		-50 °C	-40 °C	-30 °C	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C
PM 5	1.6	2.9	3.8	4.7	5.7	6.8	8	9.2	10.4
PM 10	3	5.5	7.1	8.8	10.7	12.8	15	17.2	19.6
PM 15	4	7.3	9.5	11.8	14.3	17	19.9	23	26.1
PM 20	7	12.8	16.6	20.6	25	29.8	34.9	40	46
PM 25	11.5	21	27.2	33.8	41	49	57	66	75
PM 32	17.2	31.4	41	51	61	73	86	99	112
PM 40	30	55	71	88	107	128	150	172	196
PM 50	43	79	102	126	154	183	214	247	281
PM 65	79	144	187	232	282	336	394	454	516
PM 80	141	258	334	415	504	600	703	810	920
PM 100	205	375	485	603	733	873	1022	1177	1338
PM 125	329	601	779	968	1176	1401	1640	1890	2174

⁸ Danfoss pilot operated main valves for regulating pressure and temperatura type PM

Con los datos anteriormente mencionados se realiza la búsqueda en el catalogo del fabricante realizando las correcciones propuestas por este, para la capacidad debido a la caída de presión (ver tabla 11) y razón de recirculación (ver tabla 12). Obteniendo de esta forma la capacidad a la cual operan dichos enfriadores en las condiciones mencionadas.

Tabla 11. Factor de corrección para ΔP

Factor de corrección por ΔP	
ΔP (bar)	Factor de Corrección
0.2	1
0.25	0.89
0.3	0.82
0.4	0.71
0.5	0.63
0.6	0.58

Tabla 12. Factor de corrección para una razón de recirculación

Factor de corrección por razón de recirculación	
Razón de Recirculación	Factor de Corrección
2	0.77
3	0.90
4	1
6	1.13
8	1.20
10	1.25

De esta manera se realizó el cálculo de la carga térmica para los enfriadores de: Glicol para tanques BBT, glicol (cava levadura), de CO₂.

Enfriador de Glicol para Tanques BBT



Figura 19. Enfriador de glicol para tanques BBT cervecería de Bucaramanga

Tabla 13. Parámetros enfriador de glicol para tanques BBT

	Amoniaco
Temp Evaporación	-7 °C
Caída de Presión	0.3 bar.
Relación Recirculación	7
Tipo de Válvula Danfoss	PM3- 32
CARGA:	23 TR.

Enfriador de Glicol para Cava de Levadura



Figura 20. Enfriador de Glicol para cava de levadura cervecería de Bucaramanga

Tabla 14. Parámetros enfriador de glicol para cava de levadura

	Amoniaco
Temp Evaporación	-7 °C
Caída de Presión	0.35 bar.
Relación Recirculación	7
Tipo de Válvula Danfoss	PM3- 50
CARGA:	61.5 TR.

Enfriadores de CO2



Figura 21. Enfriadores de CO2 cervecería de Bucaramanga

Tabla 15. Parámetros enfriadores de CO2

	Amoniaco
Temp Evaporación	-7 °C
Caída de Presión	0.36bar.
Relación Recirculación	7
Tipo de Válvula Danfoss	PM3- 20
CARGA:	10 TR.

3.1.1.3 METODO PARA CÁLCULO DE CARGA EN LA CAVA DE LUPULO

Para el cálculo de la carga térmica correspondiente a la cava de lúpulo se tuvieron en cuenta las ganancias de calor (figura 21) debido a:

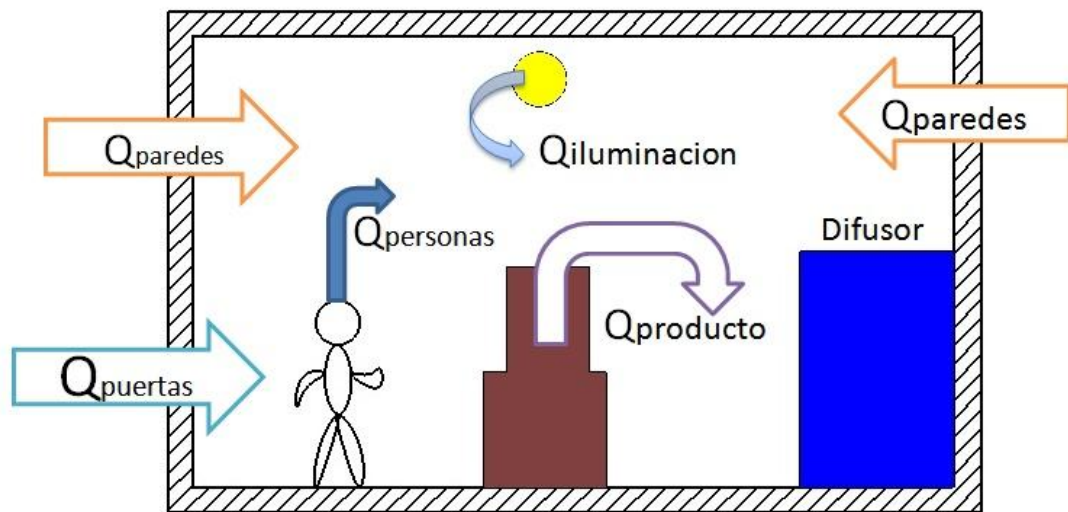


Figura 22. Ganancias de calor en la cava de lúpulo

- ✓ Apertura de puertas.
- ✓ Iluminación.
- ✓ Personas.
- ✓ Motores.
- ✓ Paredes.
- ✓ Producto.

APERTURA DE PUERTAS

En el cálculo de esta carga térmica se tiene en cuenta el número de renovaciones equivalente, aquellas obtenidas en función de las pérdidas por infiltraciones según el volumen de la cámara y el número de veces que se abren las puertas, dependiendo del nivel de temperatura (ver tabla 16).

Tabla 16. Número de renovaciones de aire en 24 horas debido a la apertura de puertas e infiltraciones

Volumen de la cámara en m ³	TEMPERATURAS	
	SOBRE 0°C	BAJO 0°C
200	6	4.5
1200	2.2	1.7
3000	1.4	1.1
15000	0.90	0.80

Por lo tanto en el cálculo de la carga intervienen la diferencia de entalpías entre el aire exterior y el aire interior de la cámara, la densidad del aire y el número de renovaciones establecido. La expresión utilizada para este cálculo es:

Ecuación 2

$$Q = VOL * Di * N1 * \delta_m$$

Donde:

VOL = Volumen de la cámara (m³).

Di = Diferencia de entalpia entre el aire exterior y el aire de la cámara (KJ/Kg).

δ_m = densidad media del aire entre las condiciones interiores y exteriores (Kg/m³).

N1= número de renovaciones de aire por día (Nº de veces).

$$VOL = 380.3 \text{ (m}^3\text{)}.$$

$$Di = 68.61 \text{ (KJ/Kg)}.$$

$$\delta_m = 1.22 \text{ (Kg/ m}^3\text{)}.$$

N1= 5.3 renovaciones de aire por día

$$Q_{ap} = 1.95 \text{ (Kw)}$$

ILUMINACIÓN

En el cálculo de la carga térmica debido a la iluminación se tiene en cuenta el número de lámparas instaladas y la potencia de cada una, el cálculo se realiza con la siguiente expresión:

Ecuación 3

$$Q = N * Pl$$

N = numero de lámparas instaladas

Pl = Potencia de la lámpara (Kw)

$$Q = 18 * 60$$

$$Q_{ilu} = 1.08 \text{ Kw}$$

PERSONAS

En el cálculo de la carga térmica debido a las personas dentro de la cámara se realizó según *ASHRAE Handbook 1998 Refrigeration R12*.

Ecuación 4

$$Q = 272 - 6 * P \text{ (W)}$$

P = Numero de personas en la cámara

$$Q = 272 - 6 * 5$$

$$Q_{\text{pers}} = 242 \text{ (W)}$$

MOTORES

En el cálculo de la carga térmica aportada por los motores se tienen en cuenta sus características tales como lo son potencia y la ubicación del motor dentro del cuarto.

Según *ASHRAE Handbook 1998 Refrigeration R12, R8*. Se tiene:

Tabla 17. Calor aportado por motores dentro del cuarto

Potencia en la placa del motor (HP)	(Kw)	Tipo de motor	Rpm	Eficiencia del motor	Motor dentro del equipo (W)
2	1.5	Trifásico	1750	79	1887
3	2.2	Trifásico	1750	81	2763
5	3.7	Trifásico	1750	82	4541

Se tienen dos motores trifásicos con una potencia de 2.4 HP y el motor esta dentro del equipo. En total seria 4.8 HP de esta manera por la tabla se ubica el valor de potencia de los motores y se determina la carga térmica aportada por los motores.

$$Q_{\text{motor}} = 4.36 \text{ (Kw)}$$

PAREDES

El calor sensible ganado por las paredes es calculado en estado estable según:

Ecuación 5

$$Q_p = UA * \Delta T \text{ [W]}$$

Donde:

Qp= calor ganado, (W).

A= área de la sección de la pared, (m²).

ΔT = diferencia entre la temperatura afuera de la cámara y la temperatura del espacio enfriado. (°C).

El coeficiente global de transferencia U de la pared puede ser calculado por la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_o}}$$

U= coeficiente global de transferencia de calor, $W/(m^2 * K)$

x= espesor de la pared. (m).

K= conductividad térmica de los materiales que conforman la pared, $W/(m * K)$

hi= coeficiente de convección interno, $W/(m^2 * K)$

ho= coeficiente de convección externo, $W/(m^2 * K)$

$$Q_p = 1.01 \text{ (Kw)}$$

PRODUCTO

El cálculo de la carga térmica debido al enfriamiento del producto se realiza de acuerdo con la siguiente expresión:

Ecuación 6

$$Q_{pro} = \frac{c * Md * 1000 * (Tl - Tc)}{24 * 3600} (Kw)$$

Donde:

c = Calor específico del producto (KJ/Kg °C)

Md = masa del producto en toneladas.

Tl = Temperatura de entrada del producto (°C).

Tc = Temperatura de salida del producto (°C).

T = temperatura promedio del producto (°C).

$$c = 1.8459 + 1.8306 * 10^{-3} * T - 4.6509 * 10^{-6} * T^2$$

Md = 50 toneladas

Tl = 25 °C

Tc = 5 °C

Q_{pro} = 27.08 (Kw).

De esta manera la carga en la cava de lúpulo es igual a:

Ecuación 7

$$Q_{cl} = Q_{pro} + Q_p + Q_{motor} + Q_{pers} + Q_{ilum} + Q_{ap}$$

$$Q_{cl} = 36.4 (Kw) = 10.44 (TR)$$

3.1.1.4 CALCULO DE LA CARGA TERMICA DEBIDO A LOS TANQUES DESTINADOS A PROCESOS DE FERMENTACION Y MADURACION

La ganancia de calor hacia los tanques básicamente es de dos maneras, la primera es proveniente de los alrededores y la segunda es debido al calor generado en el proceso (fermentación o maduración). De esta manera se evapora el refrigerante que se encuentra en las chaquetas (figura 23).

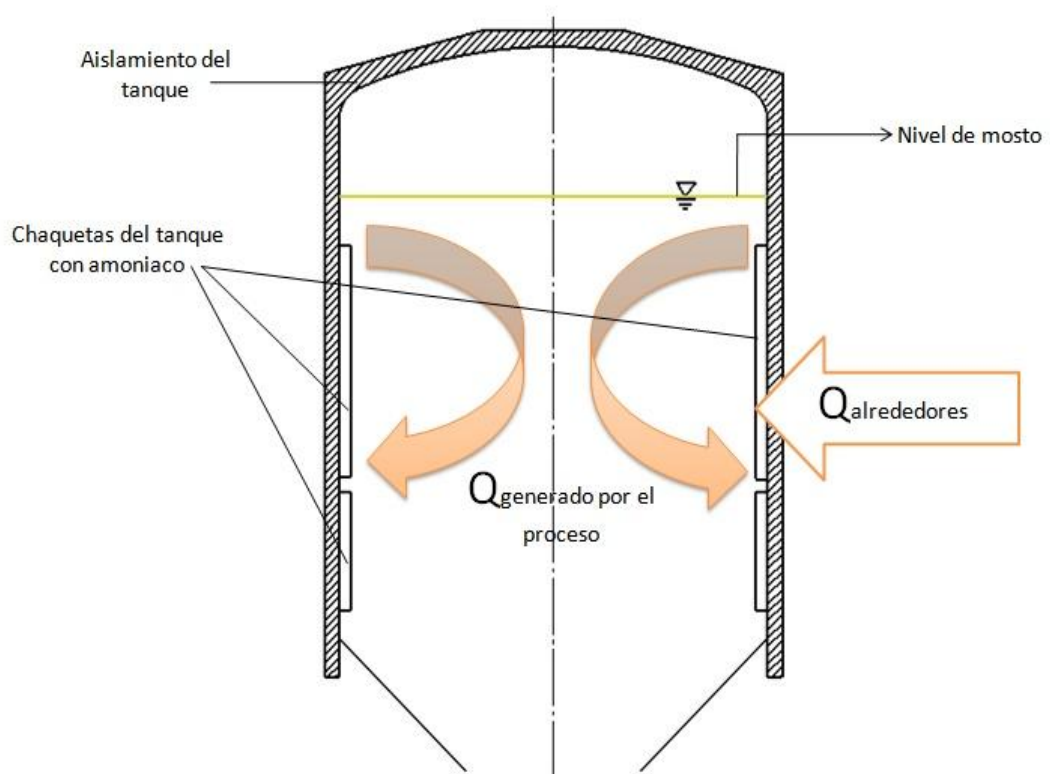


Figura 23. Ganancia de calor en un tanque madurador o fermentador

CALCULO DE LA CARGA TERMICA EN LOS TANQUES FERMENTADORES

Para el cálculo de la carga térmica de los tanques fermentadores se realizara un análisis con base en las curvas de fermentación para mosto estándar y mosto para águila light, figura 24 y figura 25 respectivamente.

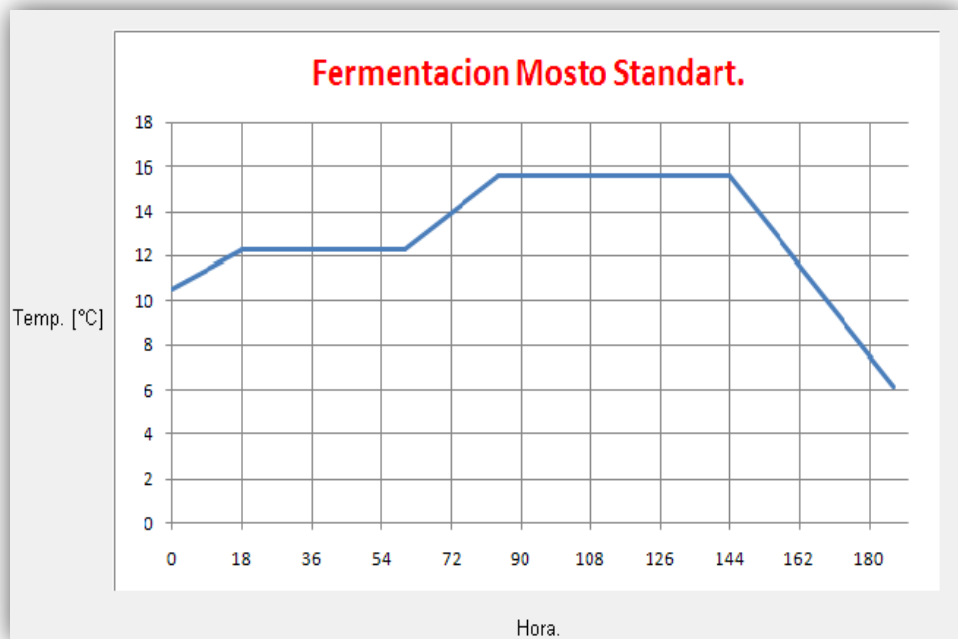


Figura 24. Comportamiento del mosto estándar

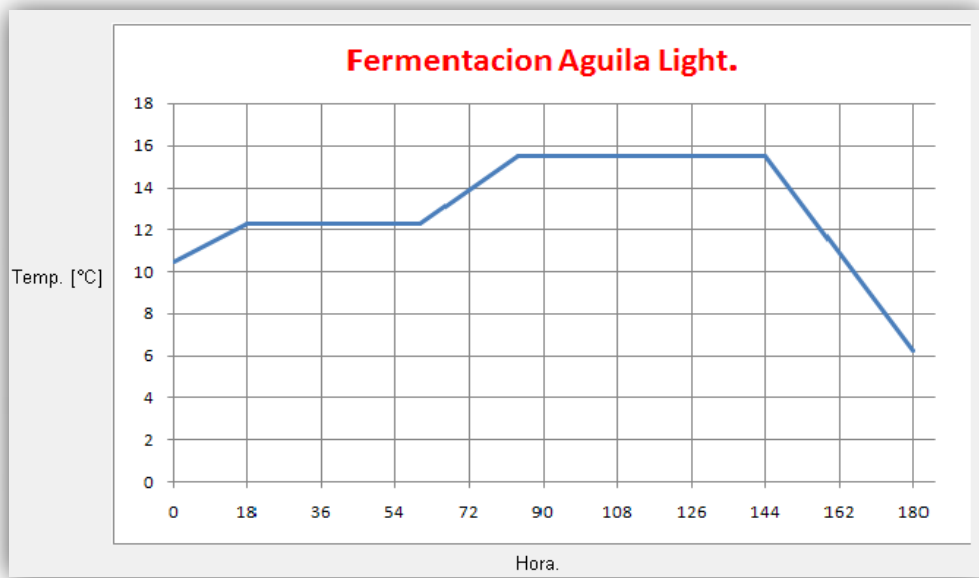


Figura 25. Comportamiento del mosto para Águila Ligth

Las cargas se calcularon teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

Tabla 18. Tanques fermentadores en la cervecería de Bucaramanga

Tipo de Tanque	Volumen útil Máximo	No de Tanques	Tipo de Mosto
HOLVRIEKA	2700 HI	9	Estándar y Águila light.
ZIEMANN	1800 HI	9	Estándar y Águila light.

Tabla 19. Condiciones de operación en un tanque fermentador

Volumen de mosto por cocimiento :	450 Hl.
Días de operación de la cocina :	6 días.
Días de descanso de la cocina :	1 día.
Tiempo de cocimiento:	2 horas.
Tiempo de llenado de un tanque ziemann:	8 horas.
Tiempo de llenado de un tanque holvrieka:	12 horas.
Tiempo de auto lavado del tanque:	30 minutos.
Tiempo en desocuparse un tanque ziemann:	3,6 horas.
Tiempo en desocuparse un tanque holvrieka:	5,4 horas.

De acuerdo a estas graficas se observa que el mosto debe mantenerse aproximadamente a 12°C y después en el descanso de acetilo por encima de 15°C, y más adelante debe enfriarse hasta 6°C. La única diferencia entre estas dos graficas es que el mosto estándar se demora un tiempo más en fermentación.

Se tienen que calcular tres cargas correspondientes a cada una de las etapas de la fermentación para las dos clases de tanques, este cálculo se realizo del siguiente modo:

Ecuación 8

$$\dot{Q}_n = \frac{\rho_n * \forall * C_{pn} * \Delta T_n}{t_n} [Kw]$$

Donde:

n = Etapas de fermentación (1, 2, 3).

ρ_n = Densidad del mosto a una temperatura promedio $\Delta T_n [Kg/m^3]$.

\forall = Volumen de los tanques fermentadores 270[m³] y 180[m³] respectivamente.

C_{pn} = Calor específico a una temperatura promedio $\Delta T_n \left[\frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ C} \right]$.

ΔT_n = Diferencial de temperatura que ocurre en cada etapa de la fermentación [$^\circ C$].

t_n = Tiempo que dura cada una de las etapas de la fermentación. [s].

Teniendo en cuenta las anteriores condiciones las cargas térmicas que demanda cada uno de los tanques durante las fases del proceso de fermentación son:

PARA TANQUES HOLVRIEKA 2700 HI

Tabla 20. Carga térmica tanques HOLVRIEKA

Primera etapa de fermentación:	30,5(Kw) o 8,67 TR.
Segunda etapa de fermentación:	44 (Kw) o 12,5 TR.
Tercera etapa de fermentación:	83 (Kw) o 23,6 TR.

PARA TANQUES ZIEMANN 1800 HI

Tabla 21. Carga térmica tanques ZIEMANN

Primera etapa de fermentación:	20,3(Kw) o 5,78 TR.
Segunda etapa de fermentación:	29,4(Kw) o 8,4 TR.
Tercera etapa de fermentación:	47,4(Kw) o 13,5 TR.

Para realizar la simulación y mostrar el comportamiento de la carga térmica en el tiempo, se hace una matriz que contenga las condiciones antes mencionadas y las cargas calculas para cada etapa del proceso del siguiente modo:

Tabla 22. Esquema de matriz implementada para determinar la carga térmica

Tiempo	TANQUES 1800 HI.				TANQUES 2700 HI.			
	1	2	n	n+1	1	2	n	n+1
1	0-0:00	0	0	0	0	0	Q1	0
	4-4:00(am)	0	0	0	0	0	Q1	0
	8-8:00(am)	0	0	0	0	0	0	Q1
	12-12:00(pm)	Q1	0	0	0	0	0	0
	16-4:00(pm)	Q1	0	0	0	0	0	0
	20-8:00(pm)	Q1	0	0	0	0	0	0
2	24-0:00	0	0	0	0	0	Q2	Q1
	28-4:00(am)	0	Q1	0	0	0	Q2	Q1
	32-8:00(am)	0	Q1	0	0	0	Q2	Q1
	36-12:00(pm)	Q2	Q1	0	0	0	Q3	Q1
	40-4:00(pm)	Q2	0	0	0	0	Q3	Q1
	44-8:00(pm)	Q2	0	0	0	0	0	Q1
3	48-0:00(am)	Q3	0	Q1	0	0	0	Q2
	52-4:00(am)	Q3	Q2	Q1	0	0	0	Q2
	56-8:00(pm)	0	Q2	Q1	0	0	0	Q2
	60-12:00(pm)	0	Q2	Q2	0	0	0	Q3
	64-4:00(pm)	0	Q3	Q2	0	0	0	Q3
	68-8:00(pm)	0	Q3	Q2	Q1	0	0	0

Donde:

Q1=calor debido a la primera etapa de fermentación.

Q2=calor debido a la segunda etapa de fermentación.

Q3=calor debido a la tercera etapa de fermentación.

Realizando la matriz completa en MATLAB e identificando la fila que sume la mayor carga se determinara la carga pico correspondiente al proceso de fermentación. La simulación en MATLAB tuvo en cuenta los siguientes parámetros que se muestran en la siguiente interfaz grafica:



Figura 26. Interfaz grafica para el cálculo de carga térmica en tanques fermentadores

El comportamiento de la carga térmica en el tiempo se hizo para un período de un mes aproximadamente, y se demostró que es más alta la carga de fermentación cuando se elabora mosto estándar que mosto para águila light. En la siguiente figura se observa la carga térmica para el mosto estándar:

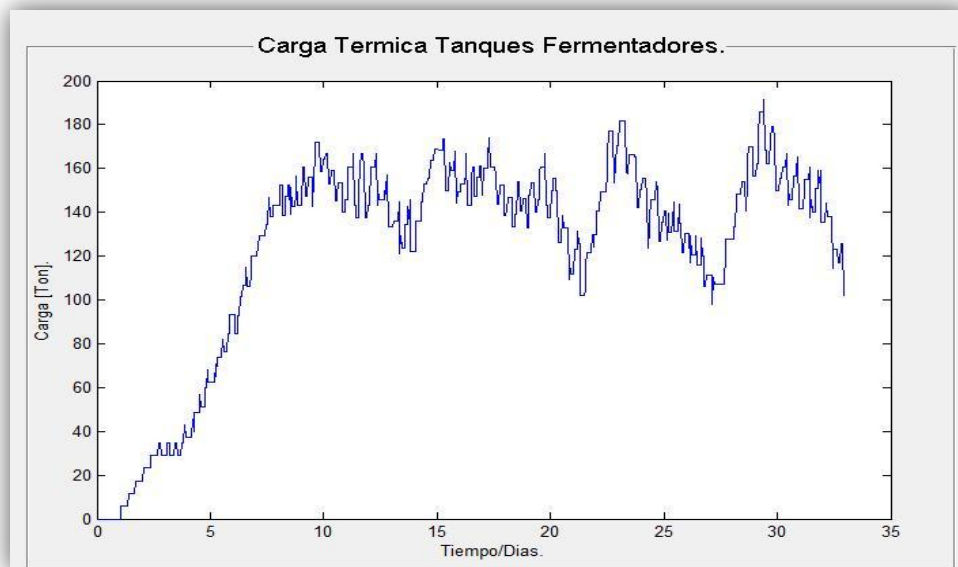


Figura 27. Comportamiento de la carga térmica en los tanques fermentadores

La carga pico para estos tanques será de 192 TR.

CALCULO DE LA CARGA TERMICA EN LOS TANQUES MADURADORES.

Para este cálculo se tuvieron en cuenta unos parámetros diferentes con respecto a los tanques fermentadores, ya que el comportamiento de la cerveza adentro de estos tanques debe mantenerse a una temperatura constante durante el respectivo periodo de maduración, esta temperatura es llamada temperatura de maduración y es primordial para el tipo de cerveza que se quiera hacer.

Algunos de los parámetros a tener en cuenta para calcular la carga de los tanques maduradores son:

V_u = Volumen útil del tanque 180[m³] - (tanques ZIEMANN).

T_a = Temperatura ambiente [°C].

T_m = Temperatura de maduración [°C].

N_t = Numero de tanques maduradores, 15 en total.

Para el procedimiento se supuso una temperatura de superficie del tanque, de esta manera se halló un coeficiente de transferencia de calor por convección libre y por radiación.

T_s = Temperatura de superficie del tanque. [°C]

T_{amb} = Temperatura ambiente. [°C]

$$T_f = \frac{T_s + T_{amb}}{2}$$

T_f = Temperatura de película para hallar propiedades. [°C]

ν = Viscosidad cinemática [m²/s] a una temperatura de película T_f .

k = Conductividad térmica del aire $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$, a una temperatura de película T_f .

P_r = Numero de Prandtl, a una temperatura de película T_f .

$$\beta = \frac{1}{T_f + 273}$$

β = Coeficiente de expansión volumétrica [$1/K$].

L_c = Longitud característica del cilindro, o altura del tanque [m].

$$G_r = \frac{9.81 * \beta * (T_{amb} - T_s) * L_c^3}{\nu^2}$$

G_r = Numero de Grashof.

Para este caso el tanque (cilindro vertical) puede tratarse como una placa vertical cuando:

$$D \geq \frac{35 * L_c}{G_r^{1/4}}$$

D = Diámetro del tanque [m].

$$R_a = G_r * P_r$$

R_a = Numero de Rayleigh.

$$N_u = \left(0.825 + \frac{0.387 * R_a^{1/6}}{\left[1 + \left(0.492/P_r \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2$$

N_u = Número promedio de Nusselt.

$$h_{conv} = \frac{k * N_u}{L_c}$$

h_{conv} = Coeficiente de transferencia de calor por convección, $\left[W/m^2 * ^\circ C \right]$

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * ((T_{amb} + 273)^2 + (T_s + 273)^2) * ((T_{amb} + 273) + (T_s + 273))$$

ε = Emisividad de la superficie del tanque (Aluminio).

h_{rad} = Coeficiente de transferencia de calor por radiación, $\left[W/m^2 * ^\circ C \right]$

Luego se halla el flujo de calor entre la temperatura ambiente y el R717-amoniaco que está a -2(°C). Para determinar el flujo de calor se determina una resistencia equivalente que tiene en cuenta los coeficientes externos de convección y radiación, el aislamiento del tanque 15 (cm) de espuma de poliuretano y la respectiva chaqueta del tanque en acero inoxidable de 3(mm) de espesor.

$$Q_e = \frac{(T_{amb} - T_{R717})}{R_{total}}$$

Q_e = Calor ganado por el tanque externamente [W].

T_{R717} = Temperatura del amoniaco en el interior de la chaqueta. [°C]

R_{total} = Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través del tanque fermentador compuesto por capas de acero inoxidable y una capa de espuma de poliuretano y sujeto a radiación y convección externa $\left[^\circ C/W \right]$.

Para comprobar la validez de la suposición original se determina la temperatura de superficie del tanque, y se realiza un proceso iterativo.

$$T_s = T_{amb} - (Q_e * R_{equiv})$$

R_{equiv} = Red de resistencias térmicas equivalentes debidas a la radiación y a la convección.

El sistema de ecuaciones anterior se monto en MATLAB para que se resolviera y se obtuvieron resultados con un margen de error del 0,1%.

Una vez calculado el calor ganado por el tanque externamente se le suma el calor impuesto por la temperatura de la cerveza madurando.

$$Q_m = \frac{T_{mad} - T_{R717}}{R_{int}}$$

T_{mad} = Temperatura de la cerveza en el interior del tanque. [°C]

R_{int} = Resistencia térmica equivalente al espesor de la chaqueta del tanque y convección debido a la cerveza madurando.

De esta manera la carga máxima obtenida para los 15 tanques madurando es de 17,5 TR.

3.1.2 CARGA TERMICA EN EL SISTEMA DE REFRIGERACION

La revisión de la carga térmica se realiza para el sistema el cual está dividido en dos estaciones de bombeo; en cada estación se tienen las cargas que se muestran en la tabla 23 y tabla 24 respectivamente.

3.1.2.1 ESTACION DE BOMBEO No 1 y No 2

Tabla 23. Carga total estación No 1

EQUIPO	CAPACIDAD (TR).
Enfriador de Agua para Mosto	215
Enfriador de Glicol para Cava de Levadura	61,5
Enfriadores de CO2	10
Total	286,5 TR

Tabla 24. Carga total estación No 2

EQUIPO	CAPACIDAD (TR).
Enfriador de Trasiego	140
Enfriador de Glicol para Tanques BBT	23
Enfriador de Pony Malta	34,3
Enfriador de Cerveza Madura (Filtración)	35
Difusor en la Cava de Lúpulo	10,44
Enfriador de Agua Desaireada	171
Tanques Fermentadores	192
Tanques Maduradores	17,5
Total	623,24 TR

De acuerdo a los parámetros de operación de cada enfriador y los tanques que realizan procesos de fermentación y maduración se tiene una carga térmica máxima de **909,74 TR**.

4 DETERMINACION DE LAS CAPACIDADES DEL SISTEMA

La determinación de las capacidades del sistema se realiza de la siguiente manera:

- 4.1 Compresores.
- 4.2 Tanques Separadores de Baja Presión.
- 4.3 Condensadores del Sistema.
- 4.4 Bombas.

4.1 COMPRESORES DEL SISTEMA

Para la determinación de las capacidades del sistema se utilizaron las tablas de ratings del fabricante, aunque la cervecera no contaba con esta información, por medio vía email⁹ el fabricante pregunto por los datos actuales de presiones de succión y descarga, refrigerante y aceite utilizados. De acuerdo a esta información suministro los datos que se muestran a continuación.

Para:

Refrigerante amoniaco anhidro con aceite mineral

Presión de succión de 2,3[bar].

Presión de descarga de 11[bar].

Tabla 25. Capacidades de los compresores en el sistema

Equipo (Modelo)	Relación de Compresión	Temperatura Descarga [°C]	Flujo de refrigerante [Kg/h]	Capacidad [TR].	Potencia al Freno [HP]
N250SUD-L	3,34	70,7	4860	439,9	500
N250VSD-L	3,34	70	4860	439,9	500
N250SUD-M	3,34	74,3	4796	434	370
N200VLD-LI	3,34	43	3743	318,5	300

La capacidad demandada por todos los subsistemas de enfriamiento está calculada por el total de las dos estaciones, de esta forma:

- Capacidad demandada en la estación No 1 286,5 TR.
- Capacidad demandada en la estación No 2 623,24 TR.
- Carga Total 909,74 TR.

⁹ Ifarrand@mayekawausa.com

Con esta carga demandada se puede apreciar que la carga máxima del sistema puede ser cubierta utilizando los compresores N250SUD-L, N250VSD-L y el N200VLD-LI. El tercer compresor puede utilizarse también aunque por problemas de arrastre de aceite es preferible utilizar el cuarto.

4.1.1 POTENCIA AL FRENO

Para determinar la potencia que necesitan los compresores se deben de conocer los estados 1 y 2 (figura 28), y el flujo másico del sistema \dot{m}_t ;

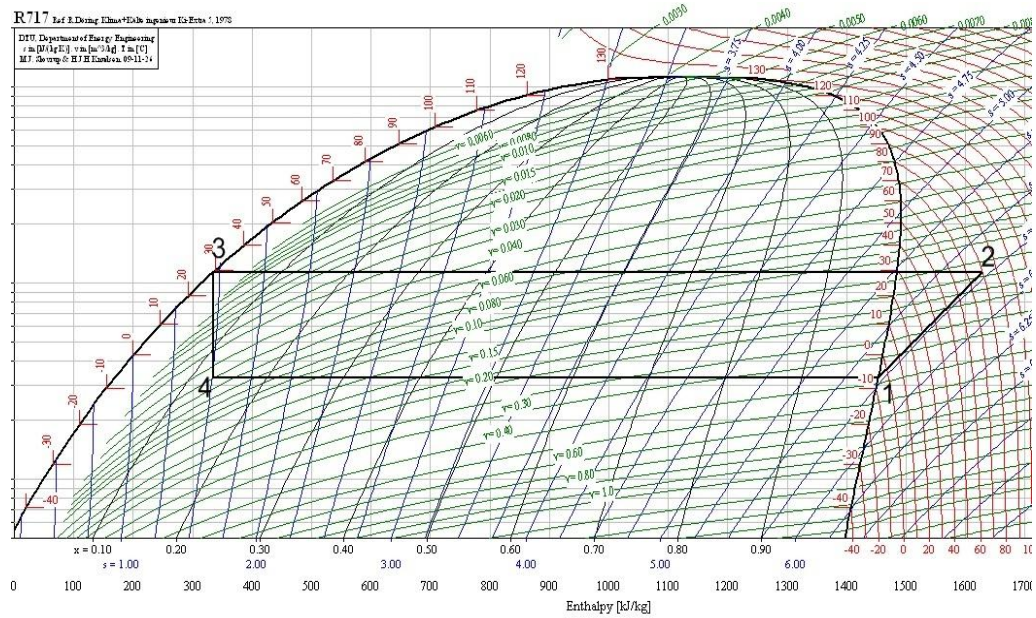


Figura 28. Trabajo realizado por el compresor del estado 1 al 2.

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{t1} + \dot{m}_{t2}$$

$$\dot{m}_t = 0,909 + 1,974$$

$$\dot{m}_t = 2,883 \text{ (Kg/s)}$$

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_t * (h_2 - h_1) [KW]$$

Para las condiciones de $T_{evap} = -7^{\circ}C$ y $P_{cond} = 11 \text{ bar}$:

$$h_1 = 1454 [KJ/Kg] ; h_2 = 1639 [KJ/Kg]$$

$$\dot{W}_{comp} = 2,883 * (1625 - 1454)$$

$$\dot{W}_{comp} = 532,1 [KW]$$

MYCOM-MAYEKAWA recomienda instalar un factor de seguridad de más de un 10% para la potencia al freno. Entonces suponiendo un 30% de potencia adicional.

$$Pot = \frac{\dot{W}_{comp}}{0,7} ; Pot = \frac{532,1}{0,7}$$

$$Pot = 760,14 [KW] \cong 1019,4 [HP]$$

Comparando el valor obtenido con el de la tabla 25, 1670 [HP] se puede apreciar que en la cervecería hay más potencia instalada ofreciendo seguridad ante posibles sobrecargas.

4.2 TANQUES SEPARADORES DE BAJA PRESION

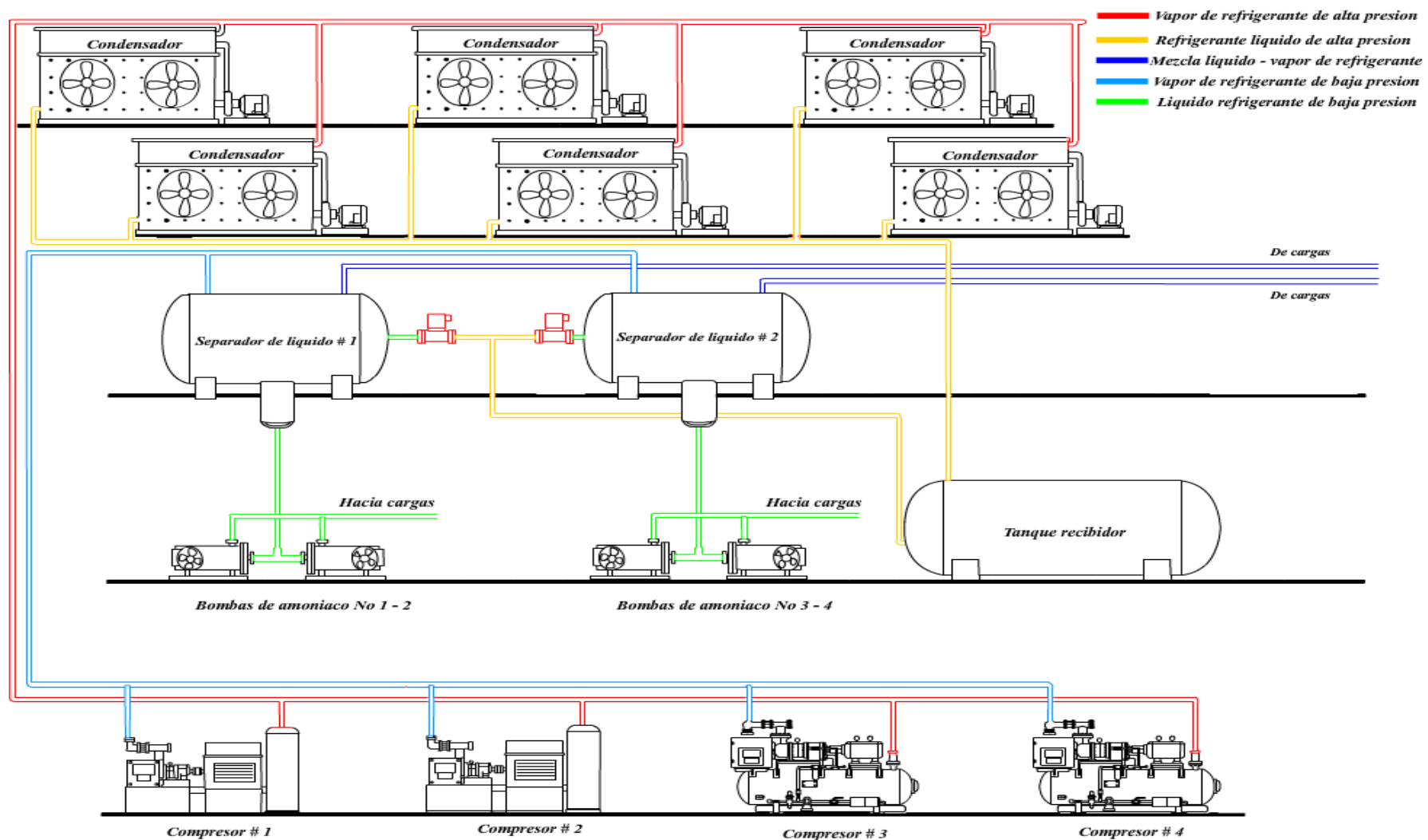
En los tanques separadores se requiere determinar la máxima velocidad de separación para evitar arrastre de líquido hacia los compresores.

Los tanques de este tipo ya sean horizontales o verticales son ampliamente usados en este tipo de sistemas, y es en particular las dimensiones físicas del cuarto de sala de maquinas las que influyen en la selección de uno de ellos. La gran mayoría de los diseñadores prefieren tanques verticales para trabajar con bombas en un sistema por recirculación por que se obtiene un mejor NPSH.

En el sistema de refrigeración de la cervecería de Bucaramanga estos tanques se ubican en un segundo piso, están dispuestos horizontalmente y cada uno de ellos presta la alimentación de refrigerante para sus respectivas cargas (figura 29).

De acuerdo a *ASHRAE* en los tanques horizontales se deben tener las conexiones de entrada y salida separadas por lo menos a una distancia igual a la altura o el diámetro interno equivalente del tanque. Aunque los separadores son hechos con relaciones de longitud a diámetro (L/D) de 1/1 incrementándose hasta 10/1, los separadores menos costosos usualmente tienen razones (L/D) entre 3/1 y 5/1.

Según TODD B. JEKEL el máximo nivel de líquido permitido en un tanque separador horizontal corresponde a la mitad de su diámetro interno $H/D = 0,5$.



PLANTA GENERAL DEL SISTEMA DE REFRIGERACION BAVARIA S.A.

Figura 29. Esquema general sistema de refrigeración cervecería BAVARIA S.A

El máximo nivel de líquido en tanque comprende la suma de dos volúmenes (figura 30), el volumen del nivel inferior $V_{Ballast}$ es el volumen provisto que permite a las bombas extraer el líquido del tanque separador y que este asegure el flujo estable para los evaporadores. Un periodo de tiempo de 5 minutos es asumido adecuadamente para este propósito, aunque cabe aclarar que este valor influye mucho en el tamaño del tanque separador, entonces el $V_{Ballast}$ es igual al flujo volumétrico de la bomba en (Lt/min) multiplicado por 5 o el valor que se tenga de criterio.

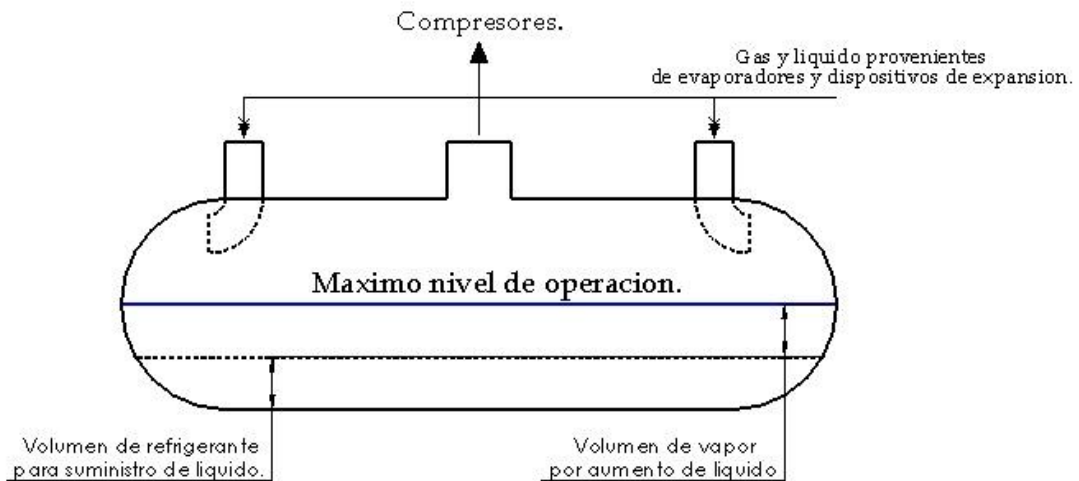


Figura 30. Tanque separador de baja presión

El volumen del nivel superior V_{Surge} se debe a variaciones anormales de salida de líquido del evaporador debido a la descongelación o al incremento súbito en carga de refrigeración, y a fallas de energía en la bomba debido a que el líquido en la línea de retorno vapor/líquido regresa al tanque separador.

Durante un descarche o descongelamiento se asume que el gas que entra empuja todo el líquido que hay en el enfriador y este por medio de la línea de retorno regrese al separador. La fracción de líquido en el enfriador durante la operación depende en sí de la forma en que se alimente este, si la alimentación

es por abajo o en la parte superior. Si la alimentación es por la parte superior del enfriador se toma un valor del 30% del $V_{Ballast}$, en el caso contrario se tomara un valor del 80%.

4.2.1 SEPARACION DE LIQUIDO/VAPOR

Aunque los tanques de baja presión almacenan líquido otra función primordial es la separación de este del vapor para asegurar que el vapor que llegue al compresor esté libre de cantidades de líquido.

Mientras sea usual referirse a la separación de líquido como un proceso de remoción completa del refrigerante líquido, este no es el caso. En el tranque hay un espectro de tamaños de gota, y las técnicas de separación son exitosas en remover solamente las gotas más grandes. Las gotas pequeñas son succionadas, pero algunas son evaporadas en la línea de succión y otras se desvanecen inmediatamente al entrar a la succión del compresor.

La gravedad es la fuerza fundamental usada para separar líquido del vapor aunque se tienen en cuenta otras como la fuerza de flotación y de arrastre. La velocidad debe ser lo suficientemente baja como para que una gran cantidad de gotas se asienten en el fondo (figura 31).

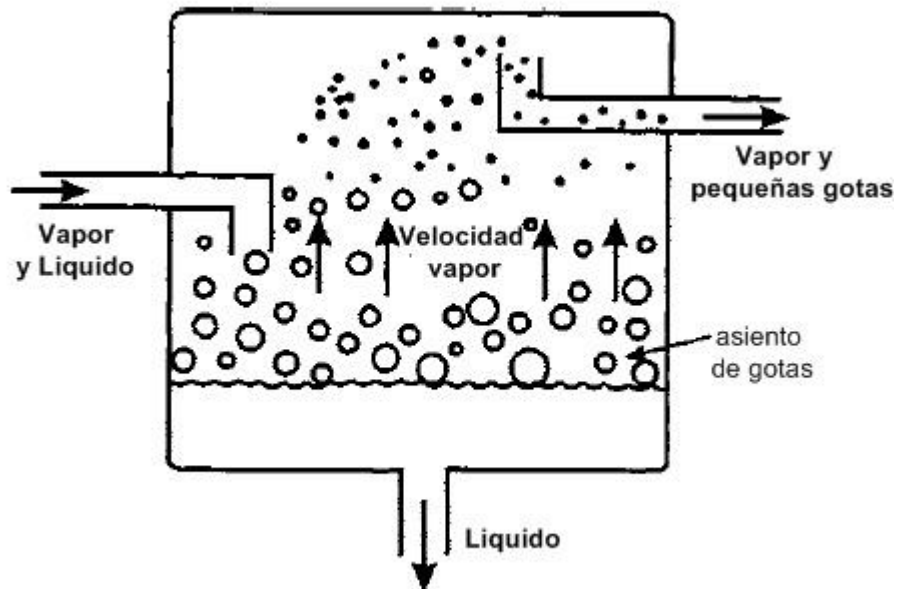


Figura 31. Separación del vapor del líquido

En un tanque separador si el vapor se mueve hacia arriba a una velocidad terminal, una gota de diámetro crítico permanecerá suspendida, mientras que las otras serán succionadas por el compresor y las demás se asentaran en el tanque. El valor de la velocidad no debe sobrepasar los valores recomendados por *ASHRAE* ya que implicaría cantidades considerables de líquido en el vapor que se llevara al compresor, estos datos se ven en la tabla 26.

Tabla 26. Máxima velocidad de separación en (m/s) para el amoniaco en condiciones de flujo estable

Refrigerante	Distancia Separación Vertical (mm).	Temperatura de Evaporación °C				
		-57	-40	-23	-7	10
Amoniaco	250	0,8	0,48	0,31	0,21	0,15
	610	3,3	1,99	1,29	0,879	0,64
	910	3,54	2,17	1,43	0,99	0,71

Para determinar esta velocidad de separación debe de conocerse el flujo volumétrico de vapor \dot{v}_t que pasa a través del tanque y el área de la sección transversal por la cual pasa este, (figura 32).

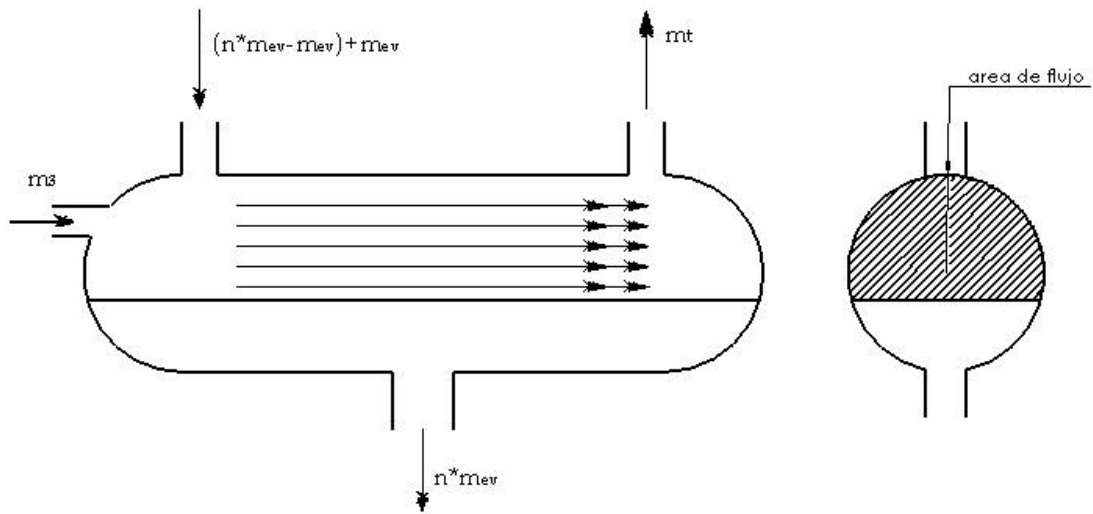


Figura 32. Proceso de flujo estable en tanques separadores horizontales

Donde:

$n * \dot{m}_{ev}$ = Flujo de líquido bombeado por el sistema.

\dot{m}_3 = Flujo proveniente del tanque receptor de alta presión (Kg/s).

$(n * \dot{m}_{ev} - \dot{m}_{ev}) + \dot{m}_{ev}$ = Relación de flujo bombeado por el sistema y el flujo evaporado.

\dot{m}_t = Flujo másico de vapor que pasa a través del tanque (Kg/s).

Realizando un análisis de flujo estable se tiene que:

$$\sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sal}$$

$$\dot{m}_3 + (n * \dot{m}_{ev} - \dot{m}_{ev}) + \dot{m}_{ev} = n * \dot{m}_{ev} + \dot{m}_t$$

Pero conociendo que \dot{m}_t debe ser igual al flujo másico evaporado más el flujo de vapor generado al expandirse y llegar al separador.

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{ev} + \dot{m}_g$$

El flujo másico \dot{m}_3 es igual al flujo que pasa por el dispositivo de expansión y que llega al tanque separador en forma de líquido \dot{m}_l y vapor \dot{m}_g .

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_l + \dot{m}_g$$

Reemplazando estas dos ecuaciones en la ecuación de continuidad de masa se obtiene:

$$\dot{m}_l + \dot{m}_g + (n * \dot{m}_{ev} - \dot{m}_{ev}) + \dot{m}_{ev} = n * \dot{m}_{ev} + \dot{m}_{ev} + \dot{m}_g$$

$$\dot{m}_l = \dot{m}_{ev}$$

Para determinar el estado de mezcla líquido vapor debe de conocerse la temperatura de condensación del sistema. Los estados están ubicados en los puntos mostrados en la figura 33, y sus respectivas propiedades pueden hallarse en el diagrama (P-h) o con el uso de tablas de propiedades.

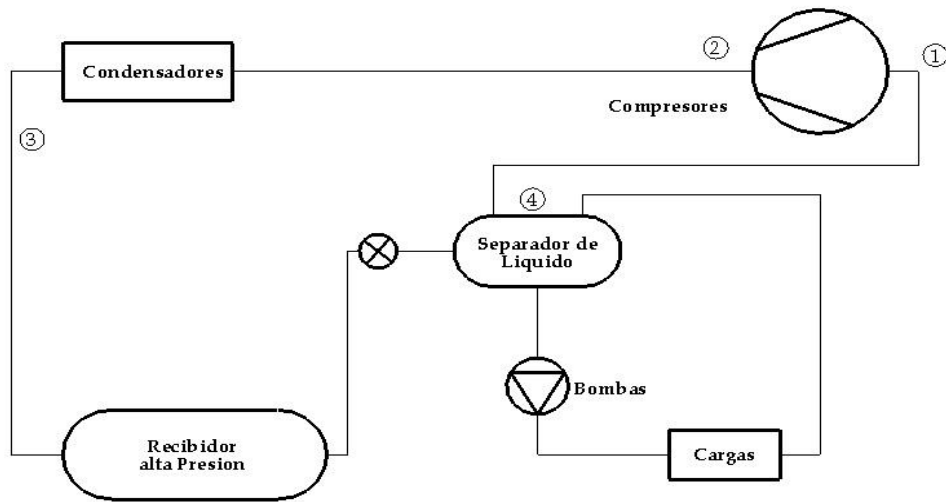


Figura 33. Estados en un sistema de refrigeración por recirculación de líquido

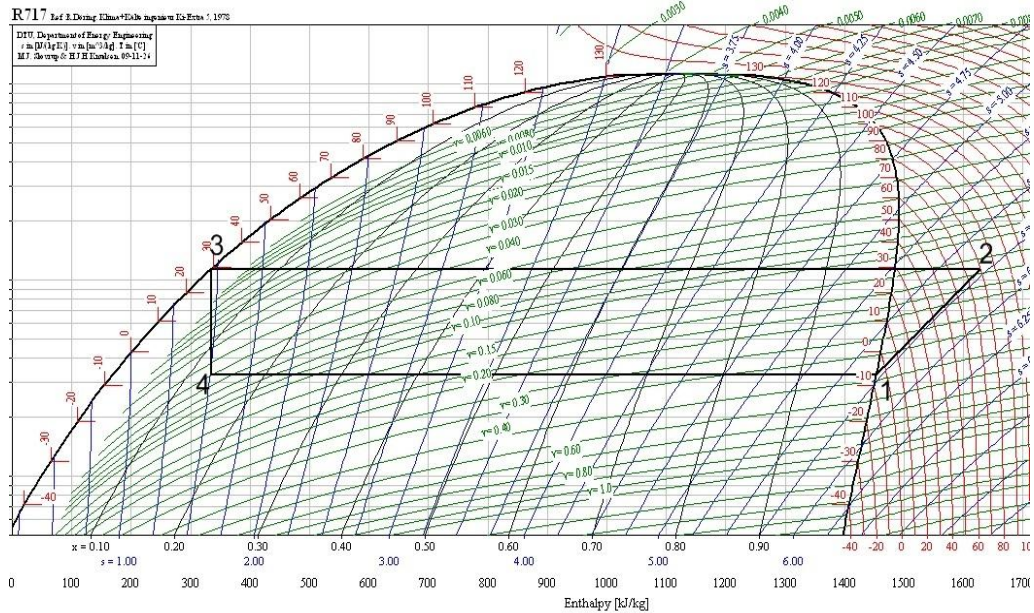


Figura 34. Diagrama P-h para el amoníaco y ciclo de trabajo

Para el estado 3 a una presión de condensación de 11(bar), la entalpia $h_3 = 346,4 [KJ/Kg]$, mediante la expansión isoentálpica $h_3 = h_4$.

$$h_4 = h_f + x * (h_g - h_f)$$

Donde:

h_f = Entalpia del líquido saturado a la temperatura de evaporación $[KJ/Kg]$.

h_g = Entalpia del vapor saturado a la temperatura de evaporación $[KJ/Kg]$.

x = Calidad de la mezcla liquido vapor.

Teniendo en cuenta que la calidad x es la razón entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla.

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_l + \dot{m}_g}$$

El flujo de vapor que pasa a través del tanque se puede encontrar relacionando todos los datos mencionados en las ecuaciones planteadas. A continuación se hará los cálculos correspondientes para los dos tanques de la cervecería de Bucaramanga.

4.2.1.1 VELOCIDAD DE SEPARACION TANQUE SEPARADOR No 1

Para esta estación se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

$$D = 860mm.$$

$$L = 3000mm.$$

$$\dot{v} = 800(Lt/min).$$

Carga máxima de la estación 286,5 [TR] \cong 1007,1 [Kw].

Temperatura del tanque = $-7^\circ C$.

Se tiene un flujo evaporado de:

$$\dot{m}_{ev} = \frac{\dot{Q}_{max}}{h_{fg}} \text{ (Kg/s)}$$

h_{fg} = Calor latente de vaporización a $T_{evap} = -7^\circ C$

$$h_{fg} = 1287 \text{ [KJ/Kg]}$$

$$\dot{m}_{ev} = \frac{1007,1}{1287}; \quad \dot{m}_{ev} = 0,783 \text{ (Kg/s)} = \dot{m}_l$$

Se determina la calidad de la mezcla a la temperatura de evaporación $-7^\circ C$,

$$x = \frac{346,4 - 167,8}{1454 - 167,8}; \quad x = 0,139$$

Se determina la masa de vapor.

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_l + \dot{m}_g}$$

$$0.139 * (0,783 + \dot{m}_g) = \dot{m}_g$$

∴

$$\dot{m}_g = 0,126 \text{ (Kg/s)}$$

$$\dot{m}_t = \dot{m}_g + \dot{m}_{ev}; \quad \dot{m}_{t1} = 0,909 \text{ (Kg/s)}$$

La densidad del gas se determina a una temperatura de -7°C

$$\dot{v}_t = \frac{\dot{m}_t}{\rho}; \quad \dot{v}_t = \frac{0,909}{2,679}; \quad \rightarrow \dot{v}_t = 0,339 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Para un nivel de líquido en el tanque de 45% del diámetro del tanque $H=387(\text{mm})$, se tiene un área de flujo de:

$$A_{flu} = 0,6178 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$v = \frac{\dot{v}_t}{A_{flu}}; \quad \rightarrow v = \frac{0,339}{0,6178}$$

$$v = 0,55 \text{ (m/s)}$$

De acuerdo a la tabla 25, la máxima velocidad para las condiciones dadas es de $v_{max} = 0,624 \text{ (m/s)}$.

Este valor es aproximadamente igual al valor calculado, por tal razón para esta carga el máximo nivel que puede tener el tanque separador es de $H=387(\text{mm})$. De esta manera se evitara arrastre de líquido a los compresores.

4.2.1.2 VELOCIDAD DE SEPARACION TANQUE SEPARADOR No 2

Para esta estación se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

$$D = 1400\text{mm}.$$

$$L = 5000\text{mm}.$$

$$\dot{v} = 800(\text{Lt}/\text{min}).$$

Carga máxima de la estación $623,24 [\text{TR}] \cong 2190,78 [\text{Kw}]$.

Temperatura del tanque = -7°C .

Se tiene un flujo evaporado de:

$$\dot{m}_{ev} = \frac{\dot{Q}_{max}}{h_{fg}} (\text{Kg}/\text{s})$$

h_{fg} = Calor latente de vaporización a $T_{evap} = -7 (^\circ\text{C})$

$$h_{fg} = 1287 [\text{KJ}/\text{Kg}]$$

$$\dot{m}_{ev} = \frac{2190,78}{1287}; \quad \dot{m}_{ev} = 1,70 (\text{Kg}/\text{s})$$

Realizando cálculos iguales a la anterior estación se tiene que:

$$\dot{m}_g = 0,274 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right)$$

$$\dot{m}_{t2} = 1,974 (\text{Kg}/\text{s})$$

$$\dot{v}_t = \frac{\dot{m}_t}{\rho}; \quad \dot{v}_t = \frac{1,974}{2,679}; \quad \rightarrow \dot{v}_t = 0,737 (\text{m}^3/\text{s})$$

Para un nivel de líquido en el tanque de 50% del diámetro del tanque $H=700(\text{mm})$, se tiene un área de flujo de:

$$A_{flu} = 1,539 [m^2]$$

$$v = \frac{0,737}{1,539}$$

$$v = 0,478(m/s)$$

Para este nivel de altura de líquido la velocidad está por debajo del criterio máximo de *ASHRAE* inclusive el tanque podría operar con un nivel más alto a este, sin presentar problemas de arrastre de aceite.

En general para ambas estaciones se podría concluir que trabajan de manera segura ya que operan en los niveles calculados, si se diera un aumento en la demanda de carga se tendría que bajar el nivel del líquido en el tanque, modificando la posición del switch flotador. Pero se tiene que tener cuidado de no bajar mucho el nivel de los tanques para evitar la cavitación en las bombas como se verá más adelante.

4.3 CONDENSADORES DEL SISTEMA

Es razonable revisar la capacidad instalada en los condensadores para mantener la presión de descarga en los compresores en el valor de trabajo, y de esta manera evitar problemas de sobre carga en estos.

Actualmente existen seis equipos instalados:

- Cuatro condensadores evaporativos EVAPCO CATC - 367
- Dos condensadores evaporativos EVAPCO PMCA - 475

Operando a una temperatura de bulbo húmedo de 24°C y una presión de condensación de 11 [bar] los equipos disponen de esta capacidad:

Tabla 27. Capacidades de condensadores en el sistema

Modelo	Calor Rechazado por Unidad (Capacidad) MBH
PMCA - 475	4,19
CATC - 367	5,395

El calor rechazado por un equipo de condensación será igual a la carga de refrigeración más la impuesta por el trabajo del compresor.

Como se menciona anteriormente la carga máxima del sistema en la cervecería puede ser cubierta por los compresores N250SUD-L, N250VSD-L y N200VLD-LI (tabla 24). Para este caso suponiendo una operación completa de los 4 compresores en el sistema (tabla 28).

Tabla 28. Carga máxima en los compresores

Equipo (Modelo)	Capacidad [TR]	Potencia al freno [HP]
N250SUD-L	439,9	500
N250VSD-L	439,9	500
N250SUD-M	434	370
N200VLD-LI	318,5	300
<i>TOTAL</i>	<i>1632,3</i>	<i>1670</i>

$$\begin{aligned}
 \circ \text{ Carga} &= 1623,3 \text{ [TR]} * 12000 &= 19479600 \text{ [BTU/Hr]} \\
 \circ \text{ Carga}_{\text{compre}} &= 1670 \text{ [BHP]} * 2545 &= 4250150 \text{ [BTU/Hr]} \\
 \hline
 \text{Total} &&= 23729750 \text{ [BTU/Hr]}
 \end{aligned}$$

Se tiene que tener en cuenta que cuando se utilicen solo dos compresores como usualmente sucede, se tengan en operación un número de condensadores adecuados para el rechazo de calor.

4.4 BOMBAS DEL SISTEMA

Las bombas del sistema de refrigeración deben trabajar de manera adecuada ofreciendo seguridad y confiabilidad en su operación, para esto se debe tener en cuenta:

- 4.4.1 Flujo volumétrico.
- 4.4.2 Cavitación.

4.4.1 FLUJO VOLUMETRICO

Las bombas seleccionadas deben de trabajar en conjunto con el diseño del sistema, y proveer la rata de líquido refrigerante requerido.

En la cervecería de Bucaramanga se cuenta con los equipos de bombeo (tabla 1).

Para la estación No 1 se sabe que $286,5 \text{ TR} \cong 1007 \text{ [Kw]}$; la selección de la bomba depende de la razón de recirculación utilizada, *ASHRAE* recomienda valores dependiendo del modo de alimentación de los evaporadores (tabla 29).

Tabla 29 Razón de Recirculación y tipo de alimentación

Refrigerante.	Razón de Recirculación
Amoniaco, alimentación en el nivel superior del enfriador – Diámetro grande de tubos.	6 a 7
Amoniaco, alimentación en el nivel inferior del enfriador – Diámetro pequeño de tubos.	2 a 4
Refrigerante R-22	3

Se sabe para esta estación que el flujo evaporado es $\dot{m}_{ev} = 0,783 \text{ (Kg/s)}$ y que la mayoría de los enfriadores son alimentados por su parte inferior, pero todos ellos están ubicados por encima del nivel de la bomba, debió a esto se utilizara un valor entre 6 a 7.

La razón de amoniaco líquido entregada por las bombas hacia cada una de las cargas de esa estación $\dot{m}_{bomba\ 1}$ es:

$$\dot{m}_{bomba\ 1} = n * \dot{m}_{ev1}$$

$$\dot{m}_{bomba\ 1} = 6,5 * 0,783$$

$$\dot{m}_{bomba\ 1} = 5,09 \text{ (Kg/s)}$$

$$\dot{v}_{bomba\ 1} = \frac{\dot{m}_{bomba\ 1}}{\rho_{liqu}}$$

ρ_{liqu} = Densidad del amoniaco liquido a -7°C

$$\dot{v}_{bomba\ 1} = \frac{5,09}{648,1} = \dot{v}_{bomba\ 1} = 0,00785 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$\dot{v}_{bomba\ 1} = 471,2 \text{ [Lt/min]}$$

Como se puede observar el caudal demandado puede ser manejado con el uso de las dos bombas en la estación.

Para la estación No 2, 623,24 TR \cong 2190,78 [Kw]; la cantidad de flujo evaporado en la estación es $\dot{m}_{ev} = 1,70 \text{ (Kg/s)}$.

Al igual que en la estación No 1 algunos enfriadores se encuentran en un nivel superior que al de las bombas, pero otros están por debajo del nivel de estas. Por tal razón se promedió un número n como valor para la razón de recirculación.

$$\dot{m}_{bomba\ 2} = 4,5 * 1,70$$

$$\dot{m}_{bomba\ 2} = 7,65 \text{ (Kg/s)}$$

$$\dot{v}_{bomba\ 2} = \frac{\dot{m}_{bomba\ 2}}{\rho_{liqu}}$$

$$\dot{v}_{bomba\ 2} = \frac{7,65}{648,1} = \dot{v}_{bomba\ 2} = 0,0118 [m^3/s]$$

$$\dot{v}_{bomba\ 2} = 708 [Lt/min]$$

El flujo demandado por la estación No 2, también puede ser manejado por las dos bombas de $\dot{v} = 400(Lt/min)$.

Tabla 30 Flujo volumétrico requerido en cada estación

	Estación No 1	Estación No 2
Caudal Demandado	471,2 [Lt/min]	708 [Lt/min]

4.4.2 CAVITACION

Para garantizar una operación segura en la bomba, se debe de tener especial atención en la succión de la bomba para que no ocurra vaporización del líquido en la entrada (cavitación). Un requisito específico para prevenir cavitación es proveer un adecuado NPSH.

La carga de aspiración neta positiva ($NPSH_{necesaria}$) que se define como la $NPSH$ mínima necesaria para evitar la cavitación en la bomba, es así un valor tal que la $NPSH$ real o disponible debe ser mayor que $NPSH_{necesaria}$.

Con el fin de evitar la cavitación, es necesario tener la certeza de que la presión local en cualquier punto de la bomba se mantiene arriba de la presión de vapor del fluido.

Ecuación 9

$$NPSH = \left(\frac{P}{\rho * g} + \frac{V^2}{2 * g} \right)_{\text{entrada de la bomba}} - \frac{P_v}{\rho * g}$$

En el sistema de refrigeración de la cervecería de Bucaramanga se dispone de un montaje en las dos estaciones tal como se muestra en la figura 35.

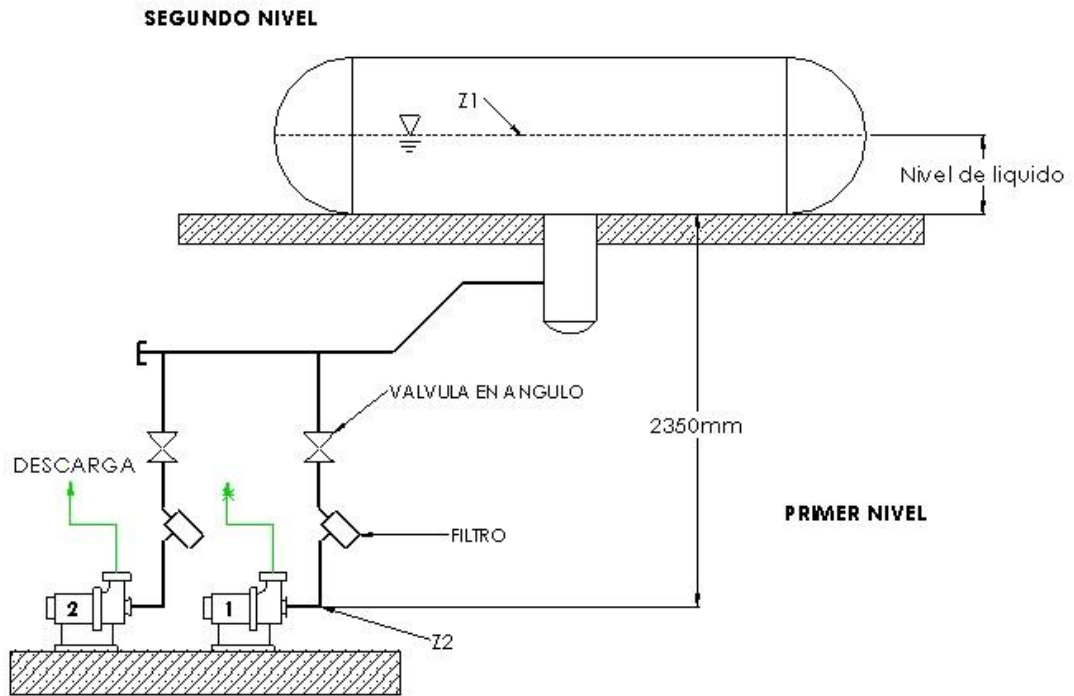


Figura 35. Estaciones de bombeo en la cervecería

Aplicando la ecuación de la energía para el caso de flujo estacionario en la forma de cargas a lo largo de la línea de corriente desde el punto 1 (nivel del líquido), hasta el punto 2 (entrada de la bomba 1).

Carga de presión en la entrada de la bomba:

Ecuación 10

$$\frac{P_2}{\rho * g} = \frac{P_1}{\rho * g} + (Z1 - Z2) - \frac{V_2^2}{2 * g} - h_{L,total}$$

La carga de aspiración neta positiva disponible en la entrada de la bomba se obtiene de la ecuación 9. Luego de la sustitución de la ecuación 10, se obtiene:

NPSH disponible:

Ecuación 11

$$NPSH = \frac{P_1 - P_v}{\rho * g} + (Z1 - Z2) - h_{L,total}$$

Como la presión en el tanque separador es aproximadamente igual a la presión de vapor a la temperatura del tanque, entonces el primer término de la derecha en la ecuación se anula. De esta forma la expresión resultante será:

Ecuación 12

$$NPSH = (Z1 - Z2) - h_{L,total}$$

De esta ecuación se aprecia que el *NPSH* disponible es la diferencia entre el nivel superior del líquido y el eje central de la bomba, menos las pérdidas debidas a las tuberías, conexiones, válvulas y accesorios.

$h_{L,total}$ = Pérdida de carga hidrostática irreversible total en el sistema de tuberías.

$$h_{L,total} = \left(f * \frac{L}{D} + \sum K_L \right) * \frac{V^2}{2 * g}$$

Parametrizando el caudal entregado por la bomba 1 y para un nivel en el tanque del 50% del diámetro (figura 34) en la estación No 2. Se determina en el software EES el NPSH en función del gasto volumétrico.

Tabla 31 NPSH en la bomba 1, para un nivel del 50% en el tanque separador

Caudal [Lt/min]	f	h_L [m]	Re	NPSH [m]
200	0.01854	0.01441	88120	3.036
300	0.01707	0.0323	132179	3.018
400	0.01613	0.0573	176239	2.993
500	0.01546	0.0894	220299	2.961
600	0.01494	0.1286	264359	2.921
700	0.01453	0.1748	308418	2.875

En la tabla 30, se observa que para el flujo de 400[Lt/min] el NPSH disponible es mayor que el necesario (tabla 1).

$$NPSH_{disponible} > NPSH_{necesario}$$

$$2.993 > 2.5$$

Para las condiciones dadas no se presentaran problemas por cavitación. La cavitación podría presentarse en esta bomba cuando el nivel del tanque es de aproximadamente 15% del diámetro de este (tabla 31).

Tabla 32 NPSH en la bomba 1, para un nivel del 15% en el tanque separador

Caudal (Lt/min)	f	h_l [m]	Re	NPSH [m]
200	0.01854	0.01441	88120	2.546
300	0.01707	0.0323	132179	2.528
400	0.01613	0.0573	176239	2.503
500	0.01546	0.0894	220299	2.471
600	0.01494	0.1286	264359	2.431
700	0.01453	0.1748	308418	2.385

Para la bomba 2 de la estación No 2 se tiene que tener presente que la línea es de mayor longitud y que tiene un accesorio de mas, pero usando el EES¹⁰ no se tiene mucha diferencia con los resultados anteriores.

Para las bombas 1 y 2 de la estación No 1, se hará un cambio en el planteamiento del problema ya que la tubería en la succión de las bombas es de 4" de diámetro.

Tabla 33 NPSH en la bomba 1 estación No 1 para un nivel del 50% en el tanque separador

Caudal [Lt/min]	f1	f2	h_{IT} [m]	Re1	Re2	NPSH [m]
200	0.01854	0.01707	0.02123	88120	132179	2.679
266.7	0.01748	0.01613	0.03761	117493	176239	2.662
333.3	0.01672	0.01546	0.05862	146866	220299	2.641
400	0.01613	0.01494	0.08425	176239	264359	2.616
466.7	0.01566	0.01453	0.1145	205612	308418	2.586
533.3	0.01527	0.01418	0.1493	234985	352478	2.551
600	0.01494	0.01389	0.1888	264359	396538	2.511
666.7	0.01466	0.01364	0.2329	293732	440598	2.467
733.3	0.01441	0.01342	0.2815	323105	484657	2.418
800	0.01418	0.01322	0.3348	352478	528717	2.365

Para un caudal de 400 [lt/min], la bomba no corre riesgo de cavitación, el riesgo de que la bomba entre en cavitación ocurrirá cuando el nivel de líquido en el tanque sea del 28% del diámetro de este (tabla 34).

¹⁰ S.A. Klein & Alvarado

Tabla 1 NPSH en la bomba 1 estación No 1 para un nivel del 28% en el tanque separador

Caudal [Lt/min]	f1	f2	h_{IT} [m]	Re1	Re2	NPSH [m]
200	0.01854	0.01707	0.02123	88120	132179	2.561
266.7	0.01748	0.01613	0.03761	117493	176239	2.545
333.3	0.01672	0.01546	0.05862	146866	220299	2.524
400	0.01613	0.01494	0.08425	176239	264359	2.498
466.7	0.01566	0.01453	0.1145	205612	308418	2.468
533.3	0.01527	0.01418	0.1493	234985	352478	2.433
600	0.01494	0.01389	0.1888	264359	396538	2.393

5 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION

5.1 POTENCIA DEL SISTEMA

La potencia consumida por el sistema depende de los equipos que estén operando en un instante determinado (compresores, condensadores, bombas).

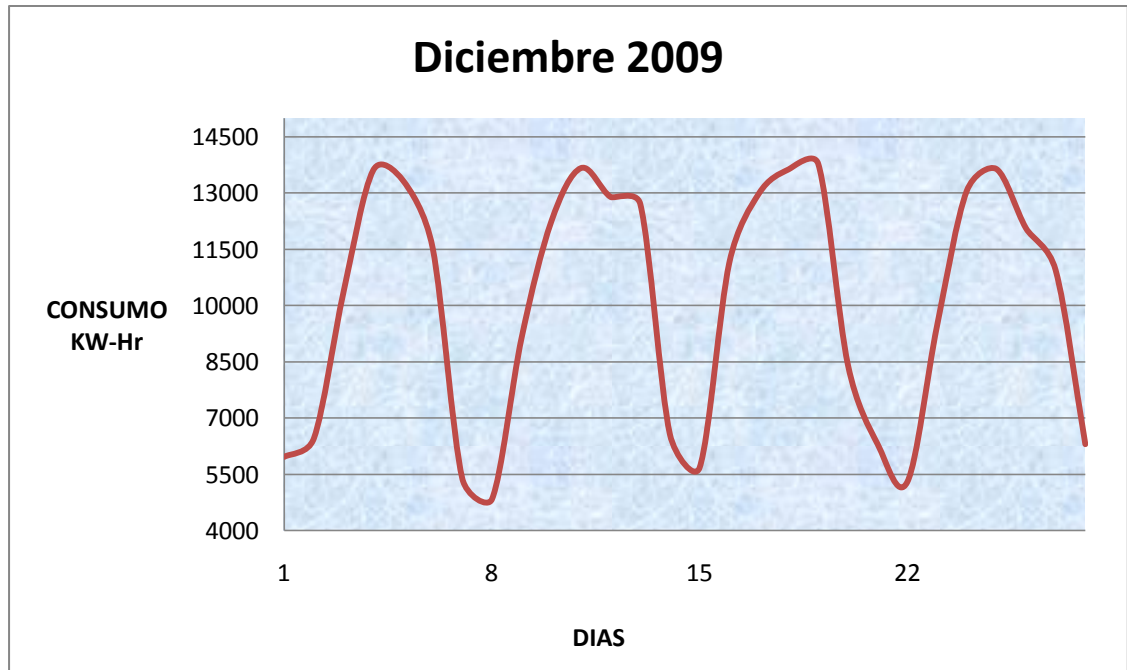


Figura 36. Potencia del sistema Vs Tiempo

5.2 CARGA DEL SISTEMA

Como se menciona antes (tabla 3), los enfriadores que trabajan en la cervecería no lo hacen de manera continua. Todos ellos dependen de factores que pueden afectar la producción de la cervecería.

El comportamiento de cargas en la cervecería en un mes cualquiera es aproximadamente igual a:

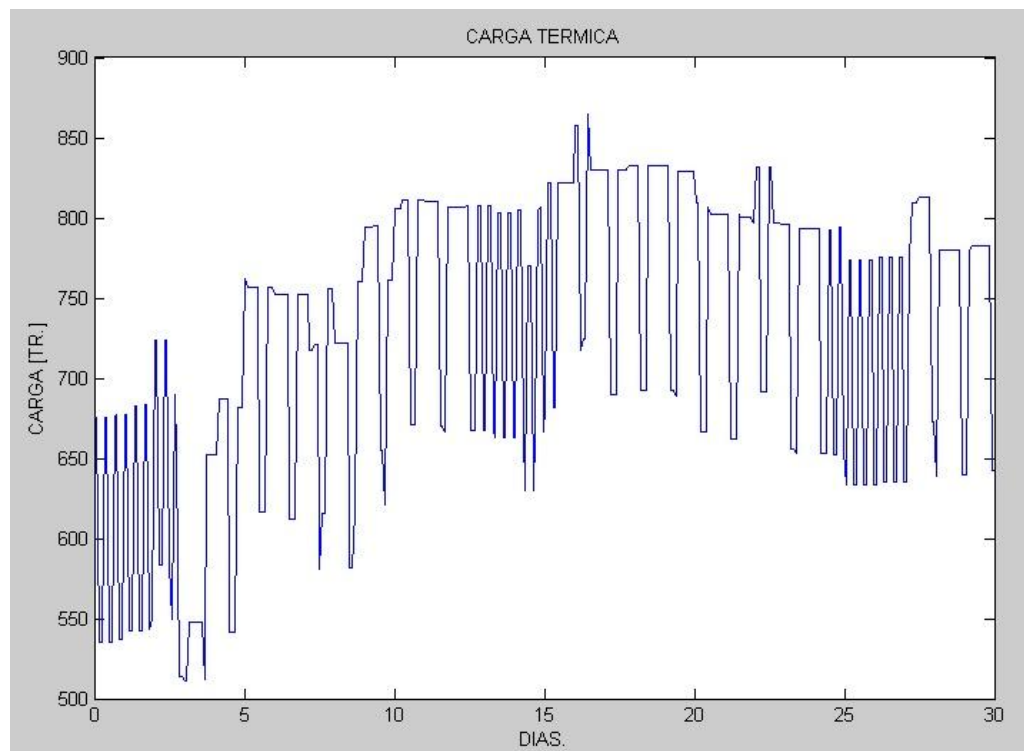


Figura 37. Carga en el tiempo

5.3 TEMPERATURA DE EVAPORACION

El sistema trabaja a una única temperatura de evaporación -7°C esta temperatura es igual en ambos tanques de baja presión.

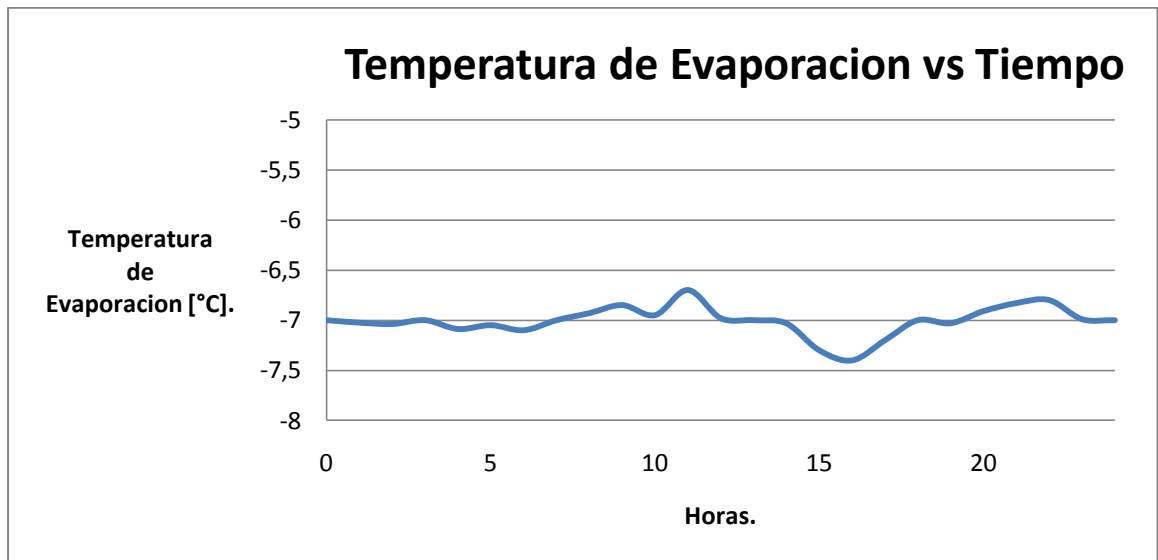


Figura 38. Temperatura de evaporación en un día entre semana

Disminuir la temperatura de evaporación es una opción, si se desea un menor consumo de potencia (figura 39), mas sin embargo se debe tener precaución en que el refrigerante llegue a los enfriadores a la temperatura adecuada, para enfriar de manera correcta el respectivo proceso.

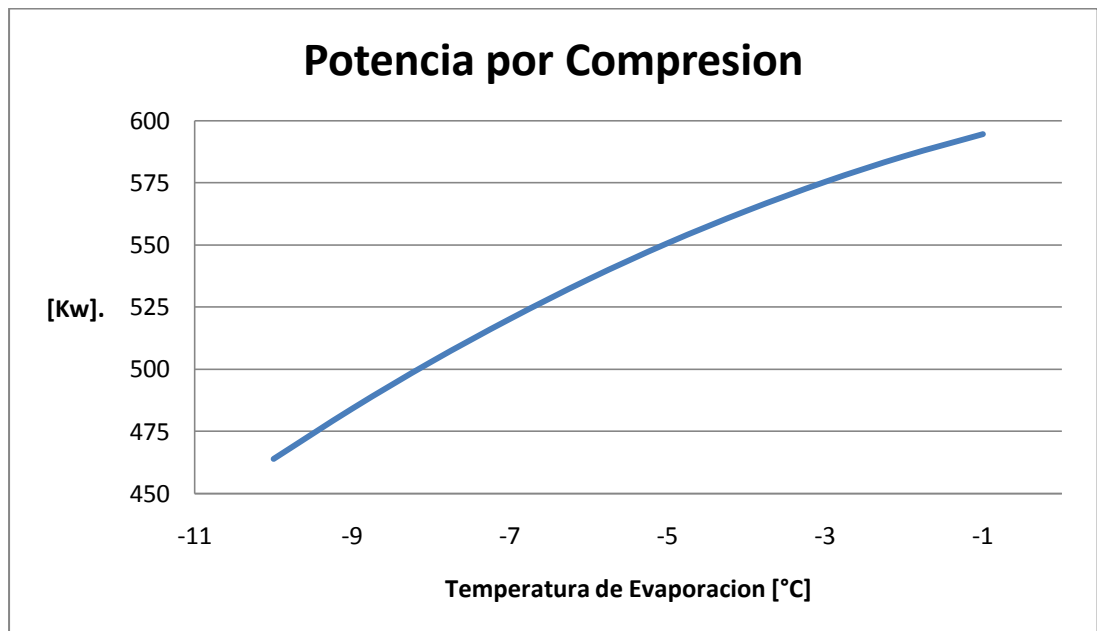


Figura 39. Potencia Consumida vs Temperatura de Evaporación

5.4 CAPACIDAD DEL SISTEMA

Variar la temperatura de evaporación en el sistema podría afectar la capacidad de este. La influencia de la temperatura de evaporación en la capacidad del sistema se ve en la figura 40.

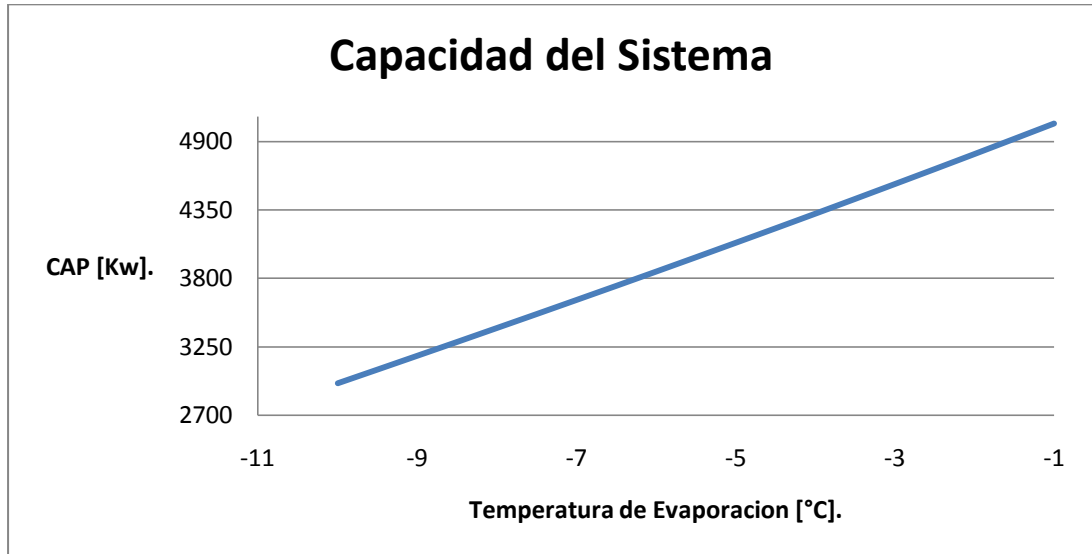


Figura 40. Capacidad vs Temperatura de Evaporación

5.5 PRESION DE CONDENSACION

La presión de descarga en los compresores es de 11 [bar] manométricos, ajustando la temperatura de condensación a 31°C. Disminuir la presión de condensación en 1[bar] llevaría a un menor trabajo de compresión (figura 41). El valor mínimo de presión de condensación en el sistema debe ser tal que asegure un flujo uniforme a través del dispositivo de expansión.

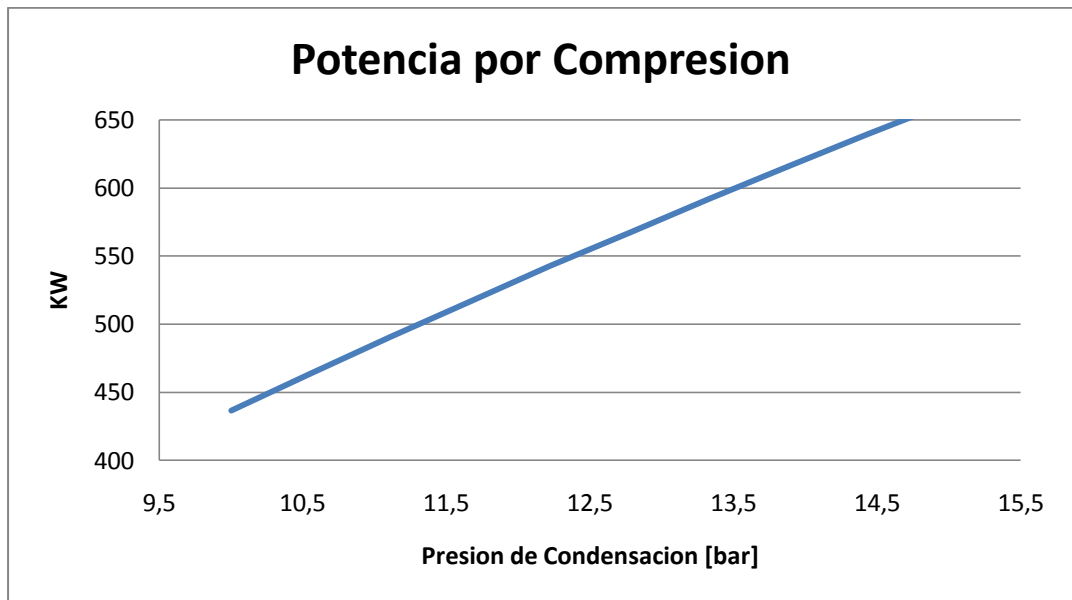


Figura 41. Potencia Consumida vs Presión de Condensación

6 MEJORAS EN EL CONSUMO ENERGETICO

Para lograr una disminución en el consumo energético del sistema se han definido varias opciones, se podría usar una de estas opciones o todas ellas si son convenientes. Las propuestas son hechas en dos maneras.

- **6.1** Sin modificar la instalación.
- **6.2** Modificando la instalación actual

6.1 SIN MODIFICAR LA INSTALACION

Teniendo en cuenta los equipos que actualmente operan en la cervecería y su respectivo montaje. Se realizan una propuesta para optimizar la operación del sistema de refrigeración y como resultado de esto lograr un ahorro energético. Esta propuesta es:

- **6.1.1** Racionalizando las capacidades disponibles de refrigeración (Compresores + Condensadores) a la carga solicitada.

6.1.1 RACIONALIZANDO LAS CAPACIDADES DISPONIBLES DE REFRIGERACION (COMPRESORES+CONDENSADORES) A LA CARGA SOLICITADA

De este modo se puede obtener la operación adecuada de los equipos según la demanda de carga térmica. En la figura 35, se puede apreciar la demanda de carga en la cervecería, para esta demanda se pueden establecer los compresores, y condensadores evaporativos que deben estar trabajando.

A continuación se mostraran varios escenarios posibles durante una operación en un día cualquiera de la cervecería, cuando la temperatura de evaporación es de -7 [°C], y la presión de condensación es de 11 [bar].

Escenario No 1

Para una cantidad de cargas determinadas, y un día con cielo despejado en Bucaramanga con humedad relativa del 75% las temperaturas de bulbo húmedo a las 7:00am, 2:00pm, 3:00am, son 22 [°C], 26 [°C] y 12 [°C] respectivamente.

Tabla 35. Escenario No 1, cargas trabajando y equipos en operación a las 7:00 am

Temperatura de Bulbo Húmedo 22 [°C]	COMPRESORES				CONDENSADORES EVAPORATIVOS					
Escenario de Trabajo	<i>No 1 (N250SUD-L)</i>	<i>No 2 (N250VSD-L)</i>	<i>No 3 (N250SUD-M)</i>	<i>No 4 (N200VLD-LI)</i>	<i>No 1 CATC - 367</i>	<i>No 2 CATC - 367</i>	<i>No 3 CATC - 367</i>	<i>No 4 CATC - 367</i>	<i>No 5 PMCA - 475</i>	<i>No 6 PMCA - 475</i>
Agua para mosto, Enfriador glicol cava de levadura, Enfriador de cerveza madura, Tanques fermentadores y maduradores, Cava de lúpulo, Enfriador de glicol tanques BBT.	✓			✓	✓	✓	✓			
Carga: 554 [TR].	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 434 [TR]	Capacidad: 318,5 [TR]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]
Calor total rechazado: 15,48 [MBH].										

Tabla 36. Escenario No 1, cargas trabajando y equipos en operación a las 2:00 pm

Temperatura de Bulbo Húmedo 26 [°C]	COMPRESORES				CONDENSADORES EVAPORATIVOS					
Escenario de Trabajo	No 1 (N250SUD-L)	No 2 (N250VSD-L)	No 3 (N250SUD-M)	No 4 (N200VLD-LI)	No 1 CATC - 367	No 2 CATC - 367	No 3 CATC - 367	No 4 CATC - 367	No 5 PMCA - 475	No 6 PMCA - 475
Agua para mosto, Enfriador glicol cava de levadura, Enfriador de cerveza madura, Tanques fermentadores y maduradores, Cava de lúpulo, Enfriador de glicol tanques BBT.	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Carga: 554 [TR].	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 434 [TR]	Capacidad: 318,5 [TR]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]
Calor total rechazado: 25 [MBH].										

Tabla 37. Escenario No 1, cargas trabajando y equipos en operación a las 3:00 am

Temperatura de Bulbo Húmedo 12 [°C]	COMPRESORES				CONDENSADORES EVAPORATIVOS					
Escenario de Trabajo	No 1 (N250SUD-L)	No 2 (N250VSD-L)	No 3 (N250SUD-M)	No 4 (N200VLD-LI)	No 1 CATC - 367	No 2 CATC - 367	No 3 CATC - 367	No 4 CATC - 367	No 5 PMCA - 475	No 6 PMCA - 475
Agua para mosto, Enfriador glicol cava de levadura, Enfriador de cerveza madura, Tanques fermentadores y maduradores, Cava de lúpulo, Enfriador de glicol tanques BBT.	✓			✓	✓	✓				
Carga: 554 [TR].	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 434 [TR]	Capacidad: 318,5 [TR]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]
						Calor total rechazado: 8,4 [MBH].				

Escenario No 2

Para una cantidad de cargas determinadas con 11 tanques maduradores la cava de lúpulo a mitad de carga, y un día con cielo despejado en Bucaramanga con humedad relativa del 75% las temperaturas de bulbo húmedo a las 7:00am, 2:00pm, 3:00am, sean 20 [°C], 25 [°C] y 13 [°C] respectivamente.

Tabla 38. Escenario No 2, cargas trabajando y equipos en operación a las 7:00 am

Temperatura de Bulbo Húmedo 20 [°C]	COMPRESORES				CONDENSADORES EVAPORATIVOS					
Escenario de Trabajo	No 1 (N250SUD-L)	No 2 (N250VSD-L)	No 3 (N250SUD-M)	No 4 (N200VLD-LI)	No 1 CATC - 367	No 2 CATC - 367	No 3 CATC - 367	No 4 CATC - 367	No 5 PMCA - 475	No 6 PMCA - 475
Agua para mosto, Enfriador glicol cava de levadura, Enfriador de agua desaireada, Enfriador de cerveza madura, Tanques fermentadores y maduradores, Cava de lúpulo, Enfriador de glicol tanques BBT.	✓			✓	✓	✓	✓			
Carga: 716,3 [TR].	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 434 [TR]	Capacidad: 318,5 [TR]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]
Calor total rechazado: 15,82 [MBH].										

Tabla 39. Escenario No 2, cargas trabajando y equipos en operación a las 2:00 pm

Temperatura de Bulbo Húmedo 25 [°C]	COMPRESORES				CONDENSADORES EVAPORATIVOS					
Escenario de Trabajo	No 1 (N250SUD-L)	No 2 (N250VSD-L)	No 3 (N250SUD-M)	No 4 (N200VLD-LI)	No 1 CATC - 367	No 2 CATC - 367	No 3 CATC - 367	No 4 CATC - 367	No 5 PMCA - 475	No 6 PMCA - 475
Agua para mosto, Enfriador glicol cava de levadura, Enfriador de agua desaireada, Enfriador de cerveza madura, Tanques fermentadores y maduradores, Cava de lúpulo, Enfriador de glicol tanques BBT.	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Carga: 716,3 [TR].	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 434 [TR]	Capacidad: 318,5 [TR]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]
						Calor total rechazado: 27,45 [MBH].				

Tabla 40. Escenario No 2, cargas trabajando y equipos en operación a las 3:00 am

Temperatura de Bulbo Húmedo 13 [°C]	COMPRESORES				CONDENSADORES EVAPORATIVOS					
Escenario de Trabajo	No 1 (N250SUD-L)	No 2 (N250VSD-L)	No 3 (N250SUD-M)	No 4 (N200VLD-LI)	No 1 CATC - 367	No 2 CATC - 367	No 3 CATC - 367	No 4 CATC - 367	No 5 PMCA - 475	No 6 PMCA - 475
Agua para mosto, Enfriador glicol cava de levadura, Enfriador de agua desaireada, Enfriador de cerveza madura, Tanques fermentadores y maduradores, Cava de lúpulo, Enfriador de glicol tanques BBT.	✓			✓	✓	✓				
Carga: 716,3 [TR].	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 434 [TR]	Capacidad: 318,5 [TR]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]
						Calor total rechazado: 10,7 [MBH].				

Escenario No 3

Igual al escenario No 2 pero añadiendo la operación del enfriador de trasiego.

Tabla 41. Escenario No 3, cargas trabajando y equipos en operación a las 7:00 am

Temperatura de Bulbo Húmedo 20 [°C]	COMPRESORES				CONDENSADORES EVAPORATIVOS					
Escenario de Trabajo	No 1 (N250SUD-L)	No 2 (N250VSD-L)	No 3 (N250SUD-M)	No 4 (N200VLD-LI)	No 1 CATC - 367	No 2 CATC - 367	No 3 CATC - 367	No 4 CATC - 367	No 5 PMCA - 475	No 6 PMCA - 475
Agua para mosto, Enfriador glicol cava de levadura, Enfriador de agua desaireada, Enfriador de cerveza madura, Tanques fermentadores y maduradores, Cava de lúpulo, Enfriador de glicol tanques BBT, Enfriador de trasiego.	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
Carga: 856,4 [TR].	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 434 [TR]	Capacidad: 318,5 [TR]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]
Calor total rechazado: 19,08 [MBH].										

Tabla 42. Escenario No 3, cargas trabajando y equipos en operación a las 2:00 pm

Temperatura de Bulbo Húmedo 24 [°C]	COMPRESORES				CONDENSADORES EVAPORATIVOS					
Escenario de Trabajo	No 1 (N250SUD-L)	No 2 (N250VSD-L)	No 3 (N250SUD-M)	No 4 (N200VLD-LI)	No 1 CATC - 367	No 2 CATC - 367	No 3 CATC - 367	No 4 CATC - 367	No 5 PMCA - 475	No 6 PMCA - 475
Agua para mosto, Enfriador glicol cava de levadura, Enfriador de agua desaireada, Enfriador de cerveza madura, Tanques fermentadores y maduradores, Cava de lúpulo, Enfriador de glicol tanques BBT, Enfriador de trasiego.	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
Carga: 856,4 [TR].	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 434 [TR]	Capacidad: 318,5 [TR]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]
Calor total rechazado: 28,75 [MBH].										

Tabla 43. Escenario No 3, cargas trabajando y equipos en operación a las 3:00 am

Temperatura de Bulbo Húmedo 24 [°C]	COMPRESORES				CONDENSADORES EVAPORATIVOS					
Escenario de Trabajo	No 1 (N250SUD-L)	No 2 (N250VSD-L)	No 3 (N250SUD-M)	No 4 (N200VLD-LI)	No 1 CATC - 367	No 2 CATC - 367	No 3 CATC - 367	No 4 CATC - 367	No 5 PMCA - 475	No 6 PMCA - 475
Agua para mosto, Enfriador glicol cava de levadura, Enfriador de agua desaireada, Enfriador de cerveza madura, Tanques fermentadores y maduradores, Cava de lúpulo, Enfriador de glicol tanques BBT, Enfriador de trasiego.	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
Carga: 856,4 [TR].	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 439,9 [TR]	Capacidad: 434 [TR]	Capacidad: 318,5 [TR]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 5,395 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]	Capacidad: 4,19 [MBH]
Calor total rechazado: 12,4 [MBH].										

6.2 MODIFICANDO LA INSTALACION ACTUAL

Teniendo en cuenta las actuales condiciones del sistema de refrigeración en la cervecería, se requiere realizar modificaciones con el fin de disminuir el consumo energético estas son:

- **6.2.1** Aislamiento térmico de tuberías.
- **6.2.2** Agregando elementos de control automático que permitan trabajo de equipos y ahorro energético de estos.

6.2.1 AISLAMIENTO TERMICO DE TUBERIAS.

Conservar la energía mediante la reducción de la velocidad del flujo de calor es la razón principal de las superficies aisladoras.

En la cervecería de Bucaramanga existen varias líneas del sistema que no se encuentran aisladas, permitiendo que entre calor de los alrededores (figura 39), y de esta manera el amoníaco no llegue al enfriador a la temperatura designada.

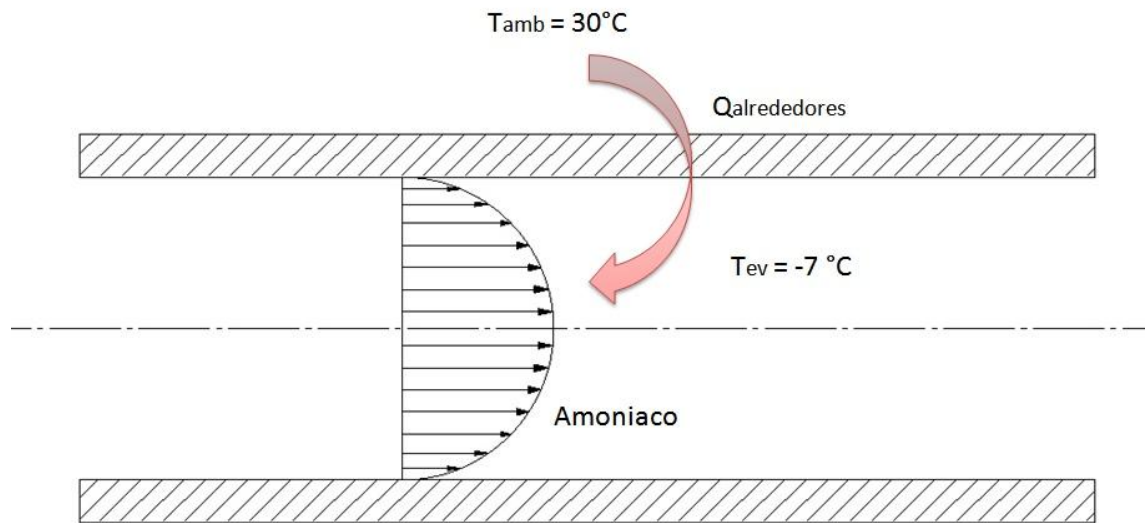


Figura 42. Ganancia de calor en las líneas del sistema

Estas líneas están ubicadas en las entradas de los enfriadores de Trasiego, Pony Malta, Cerveza Madura.



Figura 43. Ausencia de aislamiento en la tubería de entrada, Enfriador de trasiego



Figura 44. Ausencia de aislamiento en la tubería de salida, Enfriador de pony malta



Figura 45. Ausencia de aislamiento en la tubería de entrada, Enfriador de cerveza madura

6.2.2 AGREGANDO ELEMENTOS DE CONTROL AUTOMATICO QUE PERMITAN TRABAJO DE EQUIPOS Y AHORRO ENERGETICO DE ESTOS

Los elementos de control automático, permiten que el sistema trabaje acorde a las variaciones de carga y cambio de las condiciones ambientales.

En la cervecería de Bucaramanga el sistema de refrigeración cuenta con algunos de estos dispositivos de control, sin embargo hay equipos que no están provistos de un control adecuado. Estos equipos son:

- ✓ Bombas para recirculación
- ✓ Condensadores evaporativos

6.2.2.1 OPERACIÓN DE LAS BOMBAS EN EL SISTEMA

Para mantener las bombas del sistema en operación sin problemas, debe de asegurarse el flujo a través de la bomba dentro del rango de operación permitido. Si el caudal es demasiado bajo, el calor del motor puede evaporar parte del refrigerante y producir funcionamiento en seco o cavitación de la bomba.¹¹

Cuando el caudal aumenta demasiado hace que las pérdidas (tuberías y accesorios) se incrementen y de esta manera disminuya el *NPSH* y sea menor que el disponible.

Para evitar cavitación es importante mantener suficiente carga de succión positiva para la bomba.

6.2.2.1.1 CONTROL DE LAS BOMBAS DE AMONIACO

Para los requerimientos de control y seguridad se hace necesario la utilización de un sistema de control on/off con el fin de ejecutar las siguientes necesidades.

¹¹ © Danfoss A/S (RA Marketing/MWA), 12-2007

- Dar apertura y cierre a la válvula solenoide que permite el suministro de refrigerante ante un eventual suceso de bajo nivel en el tanque separador.
- Apagar los motores de las bombas de amoníaco cuando se presente bajo nivel de líquido en el tanque separador.
- Encender los motores de las bombas cuando se alcance el nivel de operación del tanque separador.

Para este tipo de control se requiere una simple lógica eléctrica que tiene que ser cableada adecuadamente, o se podría ingresar en la programación de un PLC si se tuviera.

A continuación se describe la manera de cómo van a ser controladas las bombas del sistema de refrigeración, a fin de evitar daños en ellas.

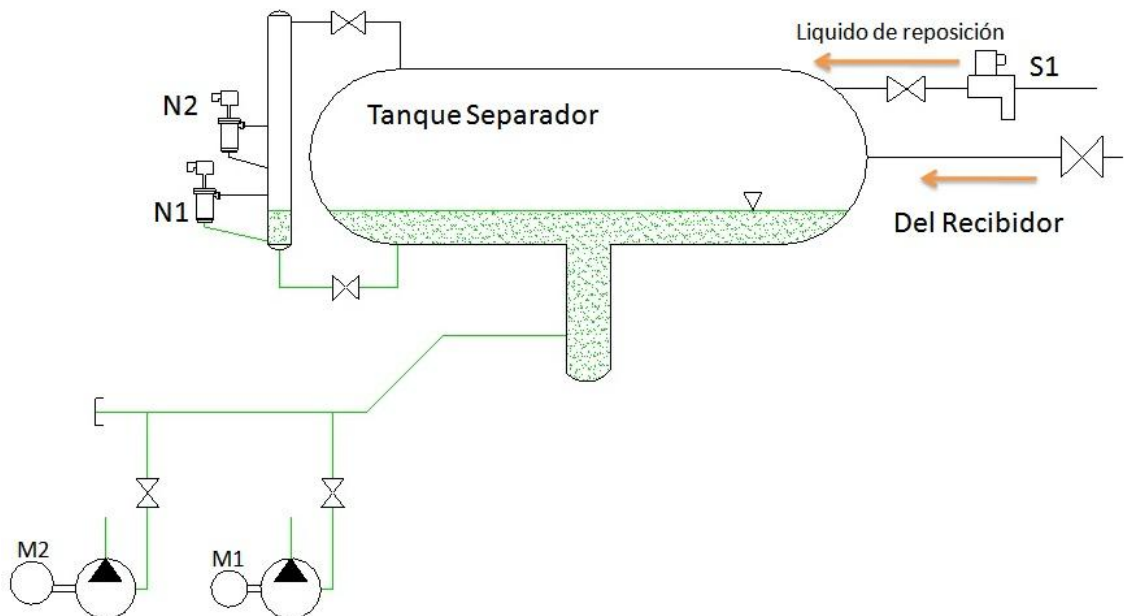


Figura 46. Control de las bombas en el sistema de refrigeración.

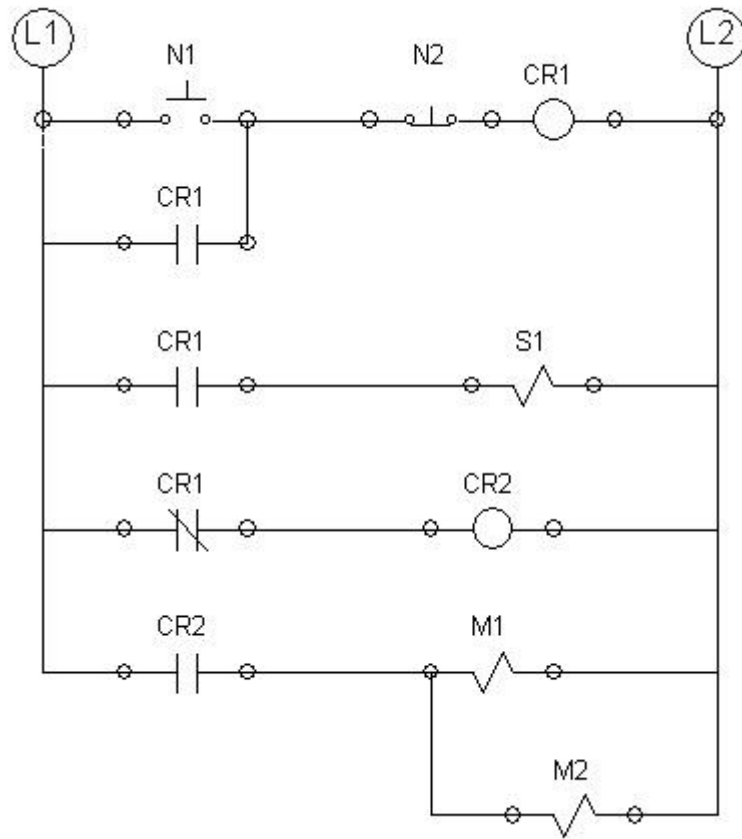


Figura 47. Circuito lógico eléctrico para el control de las bombas

El circuito consta de los relés CR1 y CR2 con sus contactos auxiliares normalmente cerrados o abiertos respectivamente. Cuando el sistema está energizado los motores de las bombas están trabajando común y corriente.

Si el nivel de líquido en el tanque separador disminuye considerablemente, el interruptor de nivel N1 energizará el solenoide de la electroválvula S1, y detendrá los motores M1 y M2.

Cuando el nivel se haya recuperado N2 desenergizará S1 y pondrá en marcha M1 y M2.


ELEMENTOS PARA EL CONTROL DE LAS BOMBAS

SWITCH FLOTADOR

Es un elemento electromecánico que controla el nivel del líquido en recipientes y acumuladores, también puede ser usado como alarma de seguridad.

Danfoss recomienda usar para este propósito el switch flotador tipo AKS 38¹² el dispositivo puede ser instalado en cualquier posición, pero preferiblemente que sea verticalmente. Otras características se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 44 Características del switch flotador

Equipo	Características		
Switch flotador AKS 38 - Danfoss			
	Refrigerante	R -717 (amoniac)	
	Rango de temperatura	- 50°C / 65°C	
	Rango de presiones	Max presión de trabajo 24 [bar]	
	Voltajes de entrada	250 V ac / 30 V dc	
		Normalmente cerrados o Normalmente abiertos	
	Peso	9,75 Kg	
	Material	Acero inoxidable, zinc	
	O-ring	Neopreno	
	Caja eléctrica	Policarbonato	
	Nivel de liquido	La posición varia entre valores 12,5 (mm) hasta 50 (mm)	
Cantidad necesaria	2		

¹² <http://www.danfoss.com/businessareas/refrigerationandairconditioning/products/group/ra/liquid-level-controls/aks-38/37a1b694-7fb1-40c9-aa7b-0889aeca5763.html>

RELES

Es un dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que por medio de una bobina y un electroimán se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos.

Para una aplicación industrial la electrónica de potencia es empleada siempre y cuando sea necesario conmutar frecuentemente o en caso de que se necesite una conmutación segura y exacta.

Tabla 45 Características del Relé

Equipo	Características	
ELR W3/9 – 500 PHOENIX CONTACT ¹³		
	Denominación salida	Salida AC
	Tensión nominal de salida	500 VAC
	Frecuencia de red	50 – 60 Hz
	Corriente de carga	9 A
		Corriente de fuga: 7 mA
	Peso	0,7785 Kg
	Anchura	62 mm
	Altura	110 mm
	Profundidad	84 mm
	Posición	Montaje sobre carril horizontal
	Cantidad necesaria	2, CR1 y CR2

¹³ <http://www.phoenixcontact.es/adaptacion-senales/>

VALVULA SOLENOIDE

La válvula solenoide normalmente cerrada es la encargada de permitir el paso del líquido refrigerante hacia el tanque separador ante un nivel insuficiente de líquido.

Seleccionar la válvula adecuada es de vital importancia para una operación adecuada.

Danfoss ofrece los modelos EVRA para este fin, la selección de la válvula depende de los parámetros que se muestran en la siguiente tabla.


Tabla 46 Selección de la válvula de solenoide

Tipo	Capacidad media en [Kw]			
	R717	R22	R134a	R404A
EVRA 3	21.8	4.6	4.3	3.2
EVRA/T 10	142	30.2	27.8	21.1
EVRA/T 15	256	54.4	50.1	38
EVRA/T 20	426	90.6	83.5	63.3
EVRA 25	947	201	186	141
EVRA 32	1515	322	297	225
EVRA 40	2368	503	464	351

Para el tanque separador No 1 la capacidad es igual a 1007,44 [Kw], trabajando con amoníaco. Se utilizaría una válvula *EVRA 32*.

Para el tanque separador No 1 la capacidad es igual a 2190,78 [Kw], trabajando con amoníaco. Se utilizaría una válvula *EVRA 40*.

Tabla 47 Características de la válvula de solenoide

Equipo	Características	
Válvula solenoide EVRA 32 / EVRA 40 Danfoss		
	Refrigerante	R -717 (amoniaco)
	Temperatura del medio	- 40 °C / 105 °C
	Rango de presiones	Max presión de trabajo 42 [bar]
	Tipo de válvulas	Válvulas de pistón servoaccionadas
		Válvulas normalmente cerradas
	Peso	4 Kg
	Cuerpo de la válvula	Hierro fundido
	Tapón roscado	Acero inoxidable
	Junta	Aluminio
	Posición	Con la flecha en la dirección del caudal
Cantidad necesaria	2 EVRA 32 / EVRA 40	

6.2.3 CONTROL DE LA PRESION DE CONDENSACION

Es importante tener en cuenta para un funcionamiento adecuado en la condensación factores que afectan el normal funcionamiento de los equipos. Estos factores dependen de las condiciones ambientales y las condiciones de carga. Es necesario controlar la presión de condensación ya que una presión demasiado baja daría como resultado un diferencial de presión insuficiente a través del dispositivo de expansión ocasionando un abastecimiento insuficiente de refrigerante en el tanque separador. La idea principal del control es controlar la capacidad del condensador cuando la temperatura de bulbo húmedo es baja,

de modo que la presión de condensación se mantenga por encima del nivel mínimo aceptable.

Para los requerimientos de control en la condensación se hace necesario la utilización de un convertidor de frecuencia y un sensor que nos registre la temperatura de bulbo húmedo.

El uso de un convertidor de frecuencia ofrece las siguientes ventajas:

- Ahorro de energía.
- Mejor control.
- Reducción del nivel de ruido.
- Un sistema de control completo que es fácil de usar.

6.2.3.1 CONVERTIDOR DE FRECUENCIA

Un convertidor de frecuencia o variador de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los dispositivos variadores de frecuencia operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna (CA) esta determinada por la frecuencia de CA suministrada y el número de polos en el estator, de acuerdo con la relación:

$$RPM = \frac{120 \times f}{p}$$

Donde

RPM = Revoluciones por minuto

f = frecuencia de suministro AC (hertz)

p = Número de polos (a dimensional)

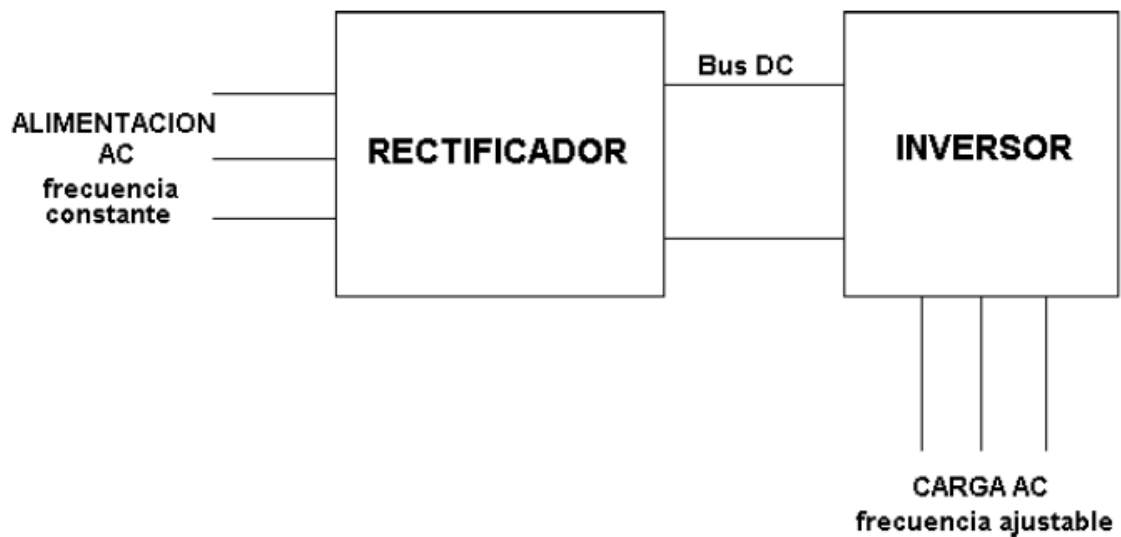


Fig 48. Funcionamiento Convertidor de Frecuencia

RECTIFICADOR

La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje al inversor para mantener constante la relación Volts/Hz

INVERSOR

El inversor utiliza dispositivos de potencia de estado sólido que son controlados por microprocesadores para conmutar el voltaje del bus de CD y producir una señal de CA de frecuencia ajustable que alimenta al motor.

SELECCIÓN DEL CONVERTIDOR DE FRECUENCIA

A la hora de elegir un convertidor de frecuencia es muy importante conocer sus características y saber interpretarlas. De esa forma podremos hacer la elección correcta.

CARACTERISTICAS

1. Dimensiones y peso
2. Límite de vueltas del motor
3. Frecuencia
4. Resistencia
5. Corriente máxima
6. Limitación de corriente
7. Protección térmica

1. Dimensiones y peso: Las dimensiones nos dan una idea de si el variador podrá ser alojado en un determinado espacio.. Sin embargo las dimensiones y el peso están en ocasiones reñidos con la eficacia del variador, ya que se recurre con frecuencia a reducir el número de transistores.

2. Límite de vueltas del motor: Si se emplean motores potentes, es decir de pocas vueltas de bobinado, el variador se puede calentar excesivamente y dañarse. Por ello los fabricantes especifican el menor número de vueltas de bobinado que el variador puede soportar. Los variadores que tienen menos transistores y por ello mas resistencia, no pueden soportar motores potentes.

En general los variadores de alta gama no tienen limitación de la potencia de los motores, que se expresa por su número de vueltas de bobinado.

3. Frecuencia: Los variadores electrónicos funcionan como interruptores, es decir permiten o cortan el paso de la corriente muchas veces por segundo. La velocidad variará en función de que predomine el paso o el corte de la corriente. El número de veces que el variador realiza esta acción por segundo se denomina frecuencia y se expresa en Hercios (Hz). Los primeros variadores que se fabricaron daban solo 50-60 Hz. A partir 1000 Hz se denominan de alta frecuencia, pero actualmente algunos pueden alcanzar valores superiores a 20.000 Hz. Cuanto mayor sea la frecuencia, mayor será la progresividad y por tanto la suavidad de funcionamiento. Además a mayor frecuencia mayor duración de las baterías y mayor vida del motor.

4. Resistencia: Es un parámetro importante en el funcionamiento del variador, ya que en gran parte indica su calidad. Cuando la resistencia es baja la potencia que llega al motor desde las baterías y a través del variador, es mayor. Si es alta se transforma la energía eléctrica en calor, por lo que el motor corre menos y la autonomía de las baterías es menor. Se expresa en voltios/amperios, es decir la disminución de la tensión al pasar la corriente por el variador por cada amperio suministrado. Los fabricantes suelen expresar la resistencia a valores de 10 amperios (A). Si un fabricante da un valor de resistencia de 0,0015 ohmios significa que al aplicar una corriente de 10 A, la disminución de la tensión será de 0,015 voltios ($V = 0,0015 \times 10$). De todas formas, como cada fabricante la mide de diferente forma, es difícil comparar variadores de distintos fabricantes, aunque sí es posible comparar los de una misma marca entre sí. La resistencia que dan los fabricantes se refiere al paso por los transistores, no a través de todo el variador y sus cables.

5. Corriente máxima: Es un valor indirecto de la calidad de los transistores empleados en el variador. El máximo de corriente que las baterías pueden dar es de unos 120 amperios, pero cuanta más corriente pueda soportar el variador, mejor es la calidad de sus transistores. Las mediciones, y por ello sus valores pueden variar entre fabricantes, lo que hace difícil una comparación real.

6. Limitación de corriente: Esta función limita la intensidad de corriente que llega al motor, es decir la cantidad de amperios. Su función es doble, por una parte ahorra energía, que en los valores altos es difícilmente utilizable por el motor, y por otra hace más fácil la conducción ya que evita aceleraciones excesivas. La limitación de corriente reduce la aceleración, pero no debería

disminuir la velocidad punta, aunque algunos modelos sí la disminuyen. La limitación puede realizarse mediante un botón giratorio, un chip intercambiable (digital), o mediante la programación del variador, en aquellos que poseen dicha función.

7. Protección térmica: Los variadores que la tiene llevan un sensor que desconecta los transistores cuando la temperatura sube demasiado. Esta función protege a los transistores y evita que se estropeen por el exceso de temperatura; cuando el variador se enfría vuelve a funcionar normalmente. Algunos variadores pueden tener dos fases, una disminuye la aceleración a la mitad y si la temperatura sigue subiendo la corta totalmente. Esta función no es imprescindible en los variadores de altas prestaciones, ya que se calientan poco debido a su baja resistencia.

El convertidor de frecuencia seleccionado teniendo en cuenta las características anteriormente mencionadas es:

Tabla 48. Características Convertidor de Frecuencia Seleccionado

	<p>Convertidor de Frecuencia AKD 5000</p>
<p>Protección</p>	<p>IP 20 o IP 54</p>
<p>Capacidad</p>	<p>0,75 Kw a 55 Kw</p>
<p>Voltaje</p>	<p>200-240V o 380 A 500V</p>

6.2.3.2 SENSOR DE TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO

El sensor para la medición de temperatura de bulbo húmedo seleccionado basa su funcionamiento en la variación de resistencia a cambios de temperatura en el medio. En ellos se aprovecha el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que, ante un aumento de temperatura, haya un aumento de la resistencia eléctrica que presentan. Ha este tipo de sensores se les conoce también con el nombre de RTD. Un tipo de RTD son las **Pt100** o **Pt1000**. Estos sensores deben su nombre al hecho de estar fabricados de platino (Pt) y presentar una resistencia de 100ohms o 1000ohms respectivamente a 0°C.

SELECCIÓN SENSOR TEMPERATURA BULBO HUMEDO

El sensor seleccionado para la medición de la temperatura de bulbo húmedo fue un Pt100. Con las siguientes características:

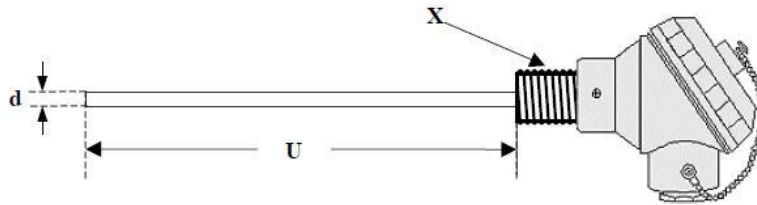


Fig 49. Sensor de temperatura

Tabla 49. Características Sensor de Temperatura

Tipo de sensor	Resistencia de platino 100Ω @ 0°C
Rango de T° operativo	0 @ 400 °C
Material del cuerpo	Incomel 600
Exactitud	0.5 °C
Conexion	3 cables (RTD,RTD, Compensacion)

6.2.4 CONTROL DE LOS CONDENSADORES DEL SISTEMA

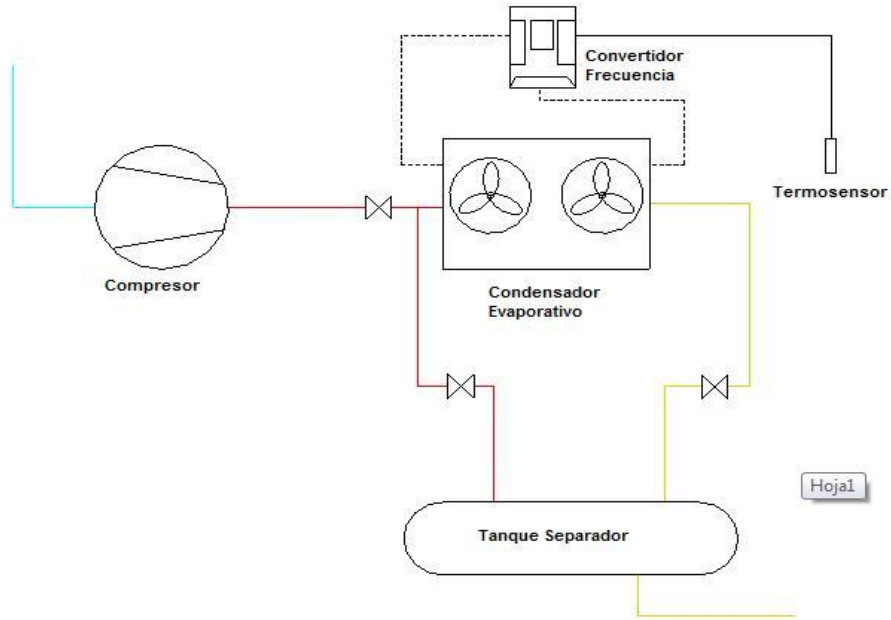


Fig. 50. Esquema de Control en la Condensación

El control propuesto consiste en la instalación de un convertidor de frecuencia en los condensadores evaporativos, el cual cambiara las revoluciones a las cuales giran los ventiladores y cuya razón de cambio será sujeta a las variaciones en la temperatura de bulbo húmedo. Si esta temperatura de bulbo húmedo disminuye el convertidor recibirá esta señal con la lectura de la temperatura e inmediatamente disminuirá las revoluciones a las que giran los ventiladores en los condensadores evaporativos. Manteniendo la presión de condensación por encima de un nivel mínimo aceptable.

7. MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD

RCM o *Reliability Centred Maintenance*, (Mantenimiento Centrado en Fiabilidad/Confiabilidad) es una técnica más dentro de las posibles para elaborar un plan de mantenimiento en una planta industrial y que presenta algunas ventajas importantes sobre otras técnicas. Inicialmente fue desarrollada para el sector de aviación, donde los altos costos derivados de la sustitución sistemática de piezas amenazaba la rentabilidad de las compañías aéreas. Posteriormente fue trasladada al campo industrial, después de comprobarse los excelentes resultados que había dado en el campo aeronáutico.

Fue documentado por primera vez en un reporte escrito por F.S. Nowlan y H.F. Heap y publicado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América en 1978. Desde entonces, el RCM ha sido usado para ayudar a formular estrategias de gestión de activos físicos en prácticamente todas las áreas de la actividad humana organizada, y en prácticamente todos los países industrializados del mundo. Este proceso definido por Nowlan y Heap ha servido de base para varios documentos de aplicación en los cuales el proceso RCM ha sido desarrollado y refinado en los años siguientes.

7.1 QUE ES RCM¹⁴

Es un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual, desarrollando un programa de mantenimiento programado que determinara los niveles inherentes de seguridad y confiabilidad de equipos complejos a costos mínimos.

¹⁴ Mantenimiento Centrado en Confiabilidad "Jhon Moubray Edición en Español 2000"

7.2 OBJETIVO DEL RCM

El objetivo fundamental de la implantación de un Mantenimiento Centrado en Confiabilidad o RCM en una planta industrial es aumentar la disponibilidad y disminuir costos de mantenimiento. El análisis de una planta industrial según esta metodología aporta una serie de resultados:

- Mejora la comprensión del funcionamiento de los equipos y sistemas.
- Analiza todas las posibilidades de fallo de un sistema y desarrolla mecanismos que tratan de evitarlos, ya sean producidos por causas intrínsecas al propio equipo o por actos personales.
- Determina una serie de acciones que permiten garantizar una alta disponibilidad de la planta

7.3. APLICAR RCM A EQUIPOS CRÍTICOS O A TODOS LOS EQUIPOS DE LA PLANTA

Como se ha dicho, RCM es una técnica que originalmente nació en el sector de la aviación. El principal objetivo era asegurar que un avión no va a fallar en pleno vuelo, pues no hay posibilidad de efectuar una reparación si se produce una falla a, por ejemplo, 10.000 metros de altura. El segundo objetivo, casi tan importante como el primero, fue asegurar esa confiabilidad al mínimo costo posible, en la seguridad de que resultaba económicamente inviable un mantenimiento que basaba la fiabilidad de la instalación (el avión) en la sustitución periódica de todos sus componentes.

Es importante recordar que esta técnica se aplica a todo el avión, no sólo a un equipo en particular. Es el conjunto el que no debe fallar, y no alguno de sus elementos individuales, por muy importantes que sean. RCM se aplica a los motores, pero también se aplica al tren de aterrizaje, a las alas, a la instrumentación, al fuselaje, etc.

La mayor parte de las industrias que aplican RCM, sin embargo, no lo aplican a toda la instalación. En general, seleccionan una serie de equipos, denominados 'equipos críticos', y tratan de asegurar que esos equipos no fallen.

El estudio de fallas de cada uno de estos equipos se hace con un grado de profundidad tan elevado que por cada equipo se identifican cientos (sino miles) de modos de falla potenciales, y para el estudio de cada equipo crítico se emplean meses, incluso años.

Pero qué ocurre con el resto de los equipos. El mantenimiento del resto de los equipos se elabora atendiendo a las recomendaciones de los fabricantes y a la experiencia de los técnicos y responsables de mantenimiento. En el mejor de los casos, sólo se estudian sus fallas y sus formas de prevenirlas después de que éstos se produzcan, cuando se analizan las averías sufridas en la instalación, y se hace poca cosa por adelantarse a ellas.

Cuando tras meses o años de implantación de RCM se observan los logros obtenidos y la cantidad de dinero y recursos empleados para conseguirlos, el resultado suele ser desalentador: un avance muy pequeño, los problemas reales de la planta no se han identificado, RCM no ha contribuido a aumentar la fiabilidad o la disponibilidad de la planta, y los costos de mantenimiento, teniendo en cuenta la cantidad de dinero invertida en estudio de fallas, han aumentado. Pasarán muchos años antes de obtener algún resultado positivo. Lo más probable es que se abandone el proyecto mucho antes, ante la ausencia de resultados.

Es posible que esa forma de plantear el trabajo, dirigir el RCM a los equipos críticos, pudiera ser correcta en determinadas circunstancias, pero es dudosamente viable cuando se busca mejorar la disponibilidad y los costos de mantenimiento en una planta industrial. La instalación puede pararse, incluso por periodos prolongados de tiempo, por equipos o elementos que no suelen pertenecer a esa categoría de equipos críticos. Es el caso de una tubería, o de una válvula sencilla, o un instrumento. Estamos acostumbrados a pensar en equipos críticos como equipos grandes, significativos, y a veces olvidamos que un simple tornillo puede parar una planta, con la consiguiente pérdida de producción y los costos de arranque asociados.

Porque no son los equipos los que son críticos, sino las fallas. Un equipo no es crítico en sí mismo, sino que su posible criticidad está en función de las fallas que pueda tener. Considerar un equipo crítico no aporta, además, ninguna información que condicione un planteamiento acerca de su mantenimiento. Si por

ser crítico debemos realizar un mantenimiento muy exhaustivo, puede resultar que estemos malgastando esfuerzo y dinero en prevenir fallas de un presunto equipo crítico que sean perfectamente asumibles. Repetimos, pues, que es la clasificación de los fallas en críticas o no-críticas lo que nos aporta información útil para tomar decisiones, y no la clasificación de los equipos en sí mismos.

Por tanto, debemos dirigir el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad a un conjunto reducido de equipos o a toda la planta. La respuesta, después de todo lo comentado, es obvia: debemos dirigirlo a toda la planta. Debemos identificar los posibles fallas en toda la planta, clasificar estas fallas según su criticidad, y adoptar medidas preventivas que los eviten o minimicen sus efectos, y cuyo costo sea proporcional a su importancia y al costo de su resolución (costo global, no sólo costo de reparación).

De esta forma, antes de comenzar el trabajo, es necesario planificarlo de forma que se asegure que el estudio de fallos va a abarcar la totalidad de la instalación.

Una buena idea es dividir la planta en los sistemas principales que la componen, y estudiar cada uno de ellos con el nivel de profundidad adecuado. Estudiar cada sistema con una profundidad excesiva acabará sobrecargando de trabajo a los responsables del estudio, por lo que los resultados visibles se retrasarán, y se corre el riesgo nuevamente de hacerlo inviable. Y estudiarlo con un nivel de profundidad mínimo será sencillo y simplificará el proceso, pero no conseguirá ningún resultado realmente útil.

7.4 DEFINICION DE SISTEMA PARA ANALIS DE RCM

El primer problema que se plantea al intentar realizar un análisis de fallas según la metodología del RCM es elaborar una lista ordenada de los equipos que hay en ella. Realizar un inventario de los activos de la planta es algo más complejo de lo que pueda parecer en un primer momento.

Una simple lista de todos los motores, bombas, sensores, etc. de la planta no es útil ni práctica. Una lista de estas características no es más que una lista de datos, no es una información (hay una diferencia importante entre datos e información). Si queremos elaborar una lista de equipos realmente útil, debemos

expresar esta lista en forma de estructura arbórea, en la que se indiquen las relaciones de dependencia de cada uno de los ítems con los restantes.

En una planta industrial podemos distinguir los siguientes niveles, a la hora de elaborar esta estructura arbórea:

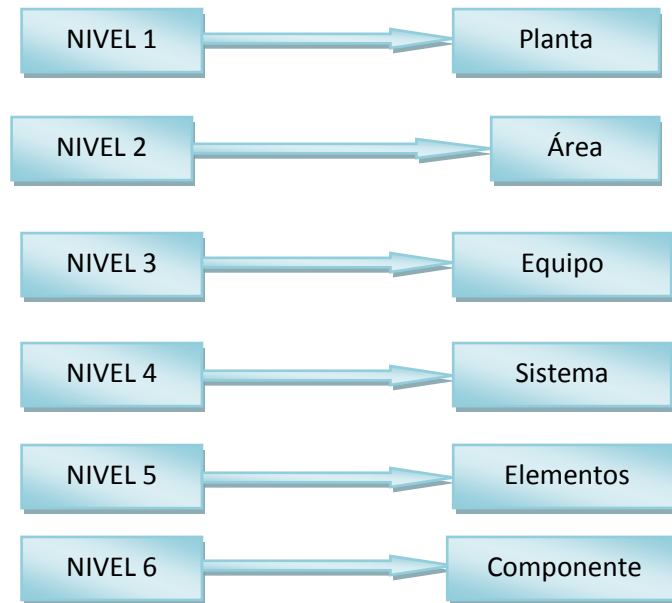


Figura 51. Niveles de división en la planta.

Una empresa puede tener una o varias plantas de producción, cada una de las cuales puede estar dividida en diferentes zonas o áreas funcionales. Estas áreas pueden tener en común la similitud de sus equipos, una línea de producto determinada o una función. Cada una de estas áreas estará formada por un conjunto de equipos, iguales o diferentes, que tienen una entidad propia. Cada equipo, a su vez, está dividido en una serie de sistemas funcionales, que se ocupan de una misión dentro de él. Los sistemas a su vez se descomponen en elementos (el motor de una bomba de lubricación será un elemento). Los componentes son partes más pequeñas de los elementos, y son las partes que habitualmente se sustituyen en una reparación. Definamos en primer lugar qué entendemos por cada uno de estos términos:

- **Planta:** Centro de trabajo. Ej.: Empresa X, Planta de Barcelona.
- **Área:** Zona de la planta que tiene una característica común (centro de coste, similitud de equipos, línea de producto, función). Ej.: Area Servicios Generales, Área hornos, Área Línea 1.

- **Equipo:** Cada uno de las unidades productivas que componen el área, que constituyen un conjunto único.
- **Sistema:** Conjunto de elementos que tienen una función común dentro de un equipo.
- **Elemento:** Cada uno de las partes que integran un sistema. Ej.: el motor de la bomba de lubricación de un compresor. Es importante diferenciar elemento y equipo. Un equipo puede estar conectado o dar servicio a más de un equipo. Un elemento, en cambio, solo puede pertenecer a un equipo. Si el ítem que tratamos de identificar puede estar conectado o dar servicio simultáneamente a más de un equipo, será un equipo, y no un elemento. Así, si una bomba de lubricación sólo lubrica un compresor, se tratará de un elemento del compresor. Si en cambio, se trata de una bomba que envía aceite de lubricación a varios compresores (sistema de lubricación centralizado), se tratará en realidad de otro equipo, y no de un elemento de alguno de ellos.
- **Componentes:** partes en que puede subdividirse un elemento. Ej.: Rodamiento de un motor.

7.5 IMPLEMENTACION DEL RCM

El mantenimiento centrado en confiabilidad se basa en el análisis de fallas, tanto aquellos que ya han ocurrido, como los que se están tratando de evitar con determinadas acciones preventivas como por último aquellos que tienen cierta probabilidad de ocurrir y pueden tener consecuencias graves. Durante ese análisis de fallas debemos contestar a seis preguntas claves

1. Cuáles son las funciones y los estándares de funcionamiento en cada sistema
2. Cómo falla cada equipo
3. Cuál es la causa de cada fallo
4. Qué consecuencias tiene cada fallo
5. Cómo puede evitarse cada fallo
6. Qué debe hacerse sino es posible evitar una falla.

7.5.1 FASES DEL RCM

La metodología en la que se basa RCM supone ir completando una serie de fases para cada uno de los sistemas que componen la planta:

- **Fase 1: Definición de sistema para análisis de RCM.** (Codificación y listado) de todos los subsistemas, equipos y elementos que componen el sistema que se está estudiando.
- **Fase 2: Definir función y estándar de desempeño asociado a cada elemento.** (Estudio detallado del funcionamiento del sistema).
- **Fase 3: Determinación de las fallas funcionales para cada elemento**
- **Fase 4: Determinación de los modos de falla** o causas de cada uno de las fallas encontrados en la fase anterior.
- **Fase 5: Estudio de las consecuencias de cada modo de falla.** Clasificación de las fallas.
- **Fase 6: Selección de política de manejo de fallas mas adecuada para cada modo de falla (Logica de decisión)** .Se aplica la lógica de manejo de fallas de MSGIII. Estandarizar procedimientos específicos para fallas. Diseñar hojas de ruta agrupando tareas de inspección asociadas a equipos o a los conjuntos PM según disposición y disponibilidad de los equipos.
- **Fase 7: Desarrollo de cronogramas con base en la Fase 6**

7.5.1.1 DETERMINACIÓN DE FALLAS FUNCIONALES PARA CADA ELEMENTO

Una falla es la incapacidad de un ítem para cumplir alguna de sus funciones. Por ello decíamos en el punto anterior que si realizamos correctamente el listado de funciones, es muy fácil determinar las fallas: tendremos una posible falla por cada función que tenga el ítem (sistema, subsistema o equipo) y no se cumpla.

Puede ser conveniente hacer una distinción entre fallas funcionales y fallas técnicas. Definiremos como falla funcional aquella falla que impide al sistema en su conjunto cumplir su función principal. Naturalmente, son los más importantes.

Veamos un ejemplo:

Un sistema de refrigeración, para cumplir su función, necesita cumplir una serie de especificaciones. Las más importantes son: caudal de agua de refrigeración, temperatura, presión y composición química.

Un fallo funcional del sistema de refrigeración puede ser:

Caudal insuficiente de agua de refrigeración. Será una falla funcional porque con caudal insuficiente es imposible que el sistema de refrigeración pueda cumplir su función, que es refrigerar. La planta probablemente parará o verá disminuida su capacidad por este motivo.

Las fallas técnicas afectan tanto a sistemas como a subsistemas o equipos. Una falla técnica es aquella que, no impide al sistema cumplir su función, supone un funcionamiento anormal de una parte de éste.

Estas fallas, aunque de una importancia menor que las fallas funcionales, suponen funcionamientos anormales que pueden tener como consecuencia una degradación acelerada del equipo y acabar convirtiéndose en fallas funcionales del sistema.

Las fuentes de información para determinar las fallas son muy diversas. Entre las principales podemos citar las siguientes:

- Consulta al histórico de averías.
- Consultas al personal de mantenimiento y de producción.

- Estudio de los diagramas lógicos y funcionales de la planta.

HISTÓRICO DE AVERÍAS

El histórico de averías es una fuente de información valiosísima a la hora de determinar las fallas potenciales de una instalación. El estudio del comportamiento de una instalación, equipo o sistema a través de los documentos en los que se registran las averías e incidencias que pueda haber sufrido en el pasado nos aporta una información esencial para la identificación de fallas.

En algunas plantas no existe un archivo histórico de averías suficientemente fiable, un archivo en el que se hayan registrado de forma sistemática cada una de las averías que haya tenido cada equipo en un periodo determinado. Pero con algo de imaginación, siempre es posible buscar una fuente que nos permita estudiar el historial del equipo:

- ✓ Estudio de las partes de trabajo, de averías, etc. Agrupando las partes de trabajo por equipos es posible deducir las incidencias que han afectado a la máquina en un periodo determinado.
- ✓ Facturas de repuesto. Es laborioso, pero en caso de necesitarse, puede recurrirse al departamento de contabilidad para que facilite las facturas del material consumido en mantenimiento en un periodo determinado (preferiblemente largo, 5 años por ejemplo). De esta información es posible deducir las incidencias que han podido afectar al equipo que se estudia.

Diarios de incidencias. El personal a turnos utiliza en ocasiones diarios en los que refleja los incidentes sufridos, como medio para comunicárselos al turno siguiente. Del estudio de estos diarios también es posible obtener información sobre averías e incidentes en los equipos.

PERSONAL DE MANTENIMIENTO

Siempre es conveniente conversar con cada uno de los miembros que componen la plantilla, para que den su opinión sobre los incidentes más habituales y las formas de evitarlos. Esta consulta ayudará, además, a que el personal de

mantenimiento se implique en el RCM. La falta de implicación del personal de mantenimiento será una dificultad para su puesta en marcha del plan de mantenimiento resultante.

PERSONAL DE PRODUCCIÓN

Igual que en el punto anterior, la consulta al personal de producción nos ayudará a identificar los fallos que más interfieren con la operación de la planta.

DIAGRAMAS LÓGICOS Y DIAGRAMAS FUNCIONALES

Estos diagramas suelen contener información valiosa, incluso fundamental, para determinar las causas que pueden hacer que un equipo o un sistema se detengan o se disparen sus alarmas. Los equipos suelen estar protegidos contra determinadas fallas, bien mostrando una alarma como aviso del funcionamiento incorrecto, bien deteniéndolos o impidiendo que se pongan en marcha si no se cumplen determinadas condiciones. El estudio de la lógica implementada en el sistema de control puede indicarnos posibles problemas que pudiera tener la instalación.

7.5.1.3 DETERMINACIÓN DE LOS MODOS DE FALLO

Una vez determinadas todas las fallas que puede presentar un sistema, un subsistema o uno de los equipos significativos que lo componen, deben estudiarse los modos de falla. Podríamos definir 'modo de falla' como la causa primaria de una falla, o como las circunstancias que acompañan una falla concreto.

Cada falla, funcional o técnica, puede presentar, como vemos, múltiples modos de falla. Cada modo de falla puede tener a su vez múltiples causas, y estas a su vez otras causas, hasta llegar a lo que se denomina 'causas raíces'. No obstante, la experiencia demuestra que si se trata de hacer un estudio tan exhaustivo, los recursos necesarios son excesivos. El análisis termina abandonándose con pocos avances, se bloquea. Por tanto, es importante definir con qué grado de profundidad se van a estudiar los modos de falla, de forma que

el estudio sea abordable, sea técnicamente factible. Es aconsejable estudiar modos de falla y causas primarias de estas fallas, y no seguir profundizando. De esta forma, perderemos una parte de la información valiosa, pero a cambio, lograremos realizar el análisis de fallas de toda la instalación con unos recursos razonables y en un tiempo también razonable. Recordemos que, según Pareto, el 20% de las causas son responsables del 80% de los problemas.

UN EJEMPLO SENCILLO: MODOS DE FALLO EN EL NIVEL DE UN TANQUE DE AGUA

Como ejemplo: Pensemos en una caldera que produce vapor para ser consumido en una turbina de vapor con la que generar energía eléctrica. Supongamos el sistema 'Circuito agua-vapor' y el subsistema 'Agua de alimentación'. Uno de las fallas que puede presentar es el siguiente:

El nivel del tanque de agua de alimentación es bajo:

Los modos de falla, o causas que pueden hacer que ese nivel sea bajo pueden ser las siguientes:

- Las bombas de condensado no impulsan agua desde el condensador.

- La tubería que conduce el agua desde las bombas de condensado está obstruida.

- La tubería que conduce el agua desde las bombas de condensado tiene una rotura.

- Válvula de recirculación de las bombas de condensador está totalmente abierta.

- Fuga importante en la caldera, en alguno de los circuitos (alta, media o baja presión).

- Fuga o rotura en el cuerpo del tanque de agua de alimentación.

- Fuga o rotura en la tubería de salida del tanque hacia las bombas de alta, media o baja presión.

- Válvula de Drenaje abierta o en mal estado.

□ Sistema de control de nivel no funciona correctamente.

Ejemplos:

FALLAS Y MODOS DE FALLA EN EL MOTOR ELÉCTRICO DE UNA BOMBA

En el estudio del motor de una bomba centrífuga de gran tamaño utilizada para la impulsión de un circuito de agua de refrigeración, se identificaron 6 fallas. A continuación se muestran esas fallas con todos los modos de fallo identificados.

Falla A: El motor no gira

Modos de fallo:

- Bobinado roto o quemado.
- - Terminal de conexión del cable eléctrico de alimentación defectuoso.
 - Fallo de alimentación del motor (no recibe corriente eléctrica).
 - Eje bloqueado por rodamientos dañados.

Fallo B: Altas vibraciones

Modos de fallo:

- Eje doblado
 - Rodamientos en mal estado.
 - Desalineación con el elemento que mueve
 - Desequilibrio en rotor de la bomba o del motor
 - Acoplamiento dañado
 - Resonancias magnéticas debidas a excentricidades
 - Uno de los apoyos del motor no asienta correctamente

Fallo C: La protección por exceso de consumo (el "térmico") salta

Modos de fallo:

- Térmico mal calibrado.
- Bobinado roto o quemado.
- Rodamientos en mal estado.
- Desequilibrios entre las fases.
- El motor se calienta porque el ventilador se ha roto.

Fallo D: La protección por cortocircuito salta

Modos de fallo:

- Bobinado roto o quemado
- Terminal defectuoso
- Elemento de protección en mal estado

Fallo E: La protección por derivación salta

Modos de fallo:

- >Fallo en el aislamiento (fase en contacto con la carcasa)
- La puesta a tierra está en mal estado
- Una de las fases está en contacto con tierra

Fallo F: Ruido excesivo

Modos de fallo:

- Eje doblado
- >Rodamientos en mal estado
- Rozamientos entre rotor y estator
- Rozamientos en el ventilador -> Mala lubricación de rodamientos (rodamientos "secos").

Fallo G: Alta temperatura de la carcasa externa

Modos de fallo:

- Rodamientos en mal estado.
- Suciedad excesiva en la carcasa.
- Ventilador roto.
- Lubricación defectuosa en rodamientos.

Con la lista de los posibles modos de falla de cada una de los identificados anteriormente, estaremos en disposición de abordar el siguiente punto: el estudio de la criticidad de cada falla.

7.5.1.4 ANALISIS DE LA GRAVEDAD DE LOS FALLAS. CRITICIDAD

El siguiente paso es determinar los efectos de cada modo de falla y, una vez determinados, clasificarlos según la gravedad de las consecuencias.

La primera pregunta a responder en cada modo de falla es, pues: ¿qué pasa si ocurre? Una sencilla explicación lo que sucederá será suficiente. A partir de esta explicación, estaremos en condiciones de valorar sus consecuencias para la seguridad y el medio ambiente, para la producción y para el mantenimiento. Consideraremos tres posibles casos: que el fallo sea *crítico*, que el fallo sea *importante* o que sea tolerable. En lo referente a la seguridad y al impacto medioambiental del fallo, consideraremos que la falla es crítica si existen ciertas posibilidades de que pueda ocurrir, y ocasionaría un accidente grave, bien para la seguridad de las personas o bien para el medioambiente. Consideraremos que es *importante* si, aunque las consecuencias para la seguridad y el medioambiente fueran graves, la probabilidad de que ocurra la falla es baja. Por último, consideraremos que la falla es tolerable si la falla tiene poca influencia en estos dos aspectos. En cuanto a la producción, podemos decir que una falla es crítica si el fallo supone una parada de planta, una disminución del rendimiento o de la capacidad productiva, y además, existe cierta probabilidad de que la falla pudiera ocurrir. Si la posibilidad es muy baja, aunque pueda suponer una parada o afecte a la potencia o al rendimiento, la falla debe ser considerado como importante. Y por último, la falla será tolerable si no afecta a la producción, o lo

hace de modo despreciable. Desde el punto de vista del mantenimiento, si el costo de la reparación (de la suma de la falla más otras fallas que pudiera ocasionar ese) supera una cantidad determinada (por ejemplo, 10.000 Euros), el fallo será crítico. Será importante si está en un rango inferior (por ejemplo, entre 1000 y 10.000 Euros) y será tolerable por debajo de cierta cantidad (por ejemplo, 1000 Euros). Las cantidades indicadas son meras referencias, aunque pueden considerarse aplicables en muchos casos. En resumen, para que una falla sea crítica, debe cumplir alguna de estas condiciones:

1. Que pueda ocasionar un accidente que afecte a la seguridad o al medioambiente, y que existan ciertas posibilidades de que ocurra.
2. Que suponga una parada de planta o afecte al rendimiento o a la capacidad de producción.
3. Que la reparación del fallo más los fallos que provoque este (fallos secundarios) sea superior a cierta cantidad.

ANALISIS DE CRITICIDAD DE FALLAS					
Seguridad y Medio Ambiente		Producción		Mantenimiento	
Accidente grave Probable		Supone parada o afecta a potencia o rendimiento		Alto costo de reparación	
Accidente grave pero muy poco probable		Afecta a potencia y/o rendimiento pero la falla es poco probable		Costo medio de reparación	
Poca Influencia en seguridad y medio ambiente		No afecta la producción		Bajo costo de reparación	

Tabla 50. Analisis de Criticidad de Falla (Critico).

Critico

Para que un fallo sea importante:

No debe cumplir ninguna de las condiciones que lo hagan crítico. Debe cumplir alguna de estas condiciones:

- Que pueda ocasionar un accidente grave, aunque la probabilidad sea baja.

- Que pueda suponer una parada de planta, o afecte a la capacidad de producción y/o rendimiento, pero que probabilidad de que ocurra sea baja.
- Que el costo de reparación sea medio.

ANALISIS DE CRITICIDAD DE FALLAS					
Seguridad y Medio Ambiente		Producción		Mantenimiento	
Accidente grave Probable		Supone parada o afecta a potencia o rendimiento		Alto costo de reparación	
Accidente grave pero muy poco probable		Afecta a potencia y/o rendimiento pero la falla es poco probable		Costo medio de reparación	
Poca Influencia en seguridad y medio ambiente		No afecta la producción		Bajo costo de reparación	

Tabla 51. Analisis de Criticidad de Falla (Importante).

Importante

Para que un fallo pueda ser considerado tolerable, no debe cumplir ninguna condición que le haga ser crítico o importante, y además, debe tener poca influencia en seguridad y medioambiente, no afecte a la producción de la planta y tenga un coste de reparación bajo.

ANALISIS DE CRITICIDAD DE FALLAS					
Seguridad y Medio Ambiente		Producción		Mantenimiento	
Accidente grave Probable		Supone parada o afecta a potencia o rendimiento		Alto costo de reparación	
Accidente grave pero muy poco probable		Afecta a potencia y/o rendimiento pero la falla es poco probable		Costo medio de reparación	
Poca Influencia en seguridad y medio ambiente		No afecta la producción		Bajo costo de reparación	

Tabla 52. Análisis de Criticidad de Falla (Tolerable).

Tolerable

7.6 DETERMINACION DE MEDIDAS PREVENTIVAS

Determinados los modos de falla del sistema que se analiza y clasificados estos modos de falla según su criticidad, el siguiente paso es determinar las medidas preventivas que permiten bien evitar la falla. Desde luego, este es el punto fundamental de un estudio RCM.

Las medidas preventivas que se pueden tomar son de cinco tipos:

1. Tareas de mantenimiento.
2. Mejoras.
3. formación del personal.
4. Modificación de instrucciones de operación.
5. Modificación de instrucciones de mantenimiento.

Es aquí donde se ve el enorme potencial del análisis de fallas: no sólo se obtiene un conjunto de tareas de mantenimiento que evitarán estas fallas, sino que además se obtendrán todo un conjunto de otras medidas, como un listado de modificaciones, un plan de formación, una lista de procedimientos de operación necesarios. Con la garantía de que tendrán un efecto muuy importante en la mejora de resultados de una instalación.

7.6.1 TAREAS DE MANTENIMIENTO

Son los trabajos que podemos realizar para cumplir el objetivo de evitar la falla o minimizar sus efectos. Las tareas de mantenimiento pueden, a su vez, ser de los siguientes tipos:

Tipo 1: Inspecciones visuales. Veíamos que las inspecciones visuales siempre son rentables. Sea cual sea el modelo de mantenimiento aplicable, las inspecciones visuales suponen un costo muy bajo, por lo que parece interesante echar un vistazo a todos los equipos de la planta en alguna ocasión.

Tipo 2: Lubricación. Igual que en el caso anterior, las tareas de lubricación, por su bajo costo, siempre son rentables.

Tipo 3: Verificaciones del correcto funcionamiento realizados **con instrumentos propios** del equipo (verificaciones on-line). Este tipo de tareas consiste en la toma de datos de una serie de parámetros de funcionamiento utilizando los propios medios de los que dispone el equipo. Son, por ejemplo, la verificación de alarmas, la toma de datos de presión, temperatura, vibraciones, etc. Si en esta verificación se detecta alguna anomalía, se debe proceder en consecuencia. Por ello es necesario, en primer lugar, fijar con exactitud los rangos que entenderemos como normales para cada una de las puntos que se trata de verificar, fuera de los cuales se precisará una intervención en el equipo. También será necesario detallar como se debe actuar en caso de que la medida en cuestión esté fuera del rango normal.

Tipo 4: Verificaciones del correcto funcionamiento realizado **con instrumentos externos** del equipo. Se pretende, con este tipo de tareas, determinar si el equipo cumple con unas especificaciones prefijadas, pero para cuya determinación es necesario desplazar determinados instrumentos o herramientas especiales, que pueden ser usadas por varios equipos simultáneamente, y que por tanto, no están permanentemente conectadas a un equipo, como en el caso anterior. Podemos dividir estas verificaciones en dos categorías:

- Las realizadas con instrumentos sencillos, como pinzas amperimétricas, termómetros por infrarrojos, tacómetros, vibrómetros.
- Las realizadas con instrumentos complejos, como analizadores de vibraciones, detección de fugas por ultrasonidos, termografías, análisis de la curva de arranque de motores.

Tipo 5: Tareas condicionales. Se realizan dependiendo del estado en que se encuentre el equipo. No es necesario realizarlas si el equipo no da síntomas de encontrarse en mal estado. Estas tareas pueden ser:

- Limpiezas condicionales, si el equipo da muestras de encontrarse sucio.
- Ajustes condicionales, si el comportamiento del equipo refleja un desajuste en alguno de sus parámetros
- Cambio de piezas, si tras una inspección o verificación se observa que es necesario realizar la sustitución de algún elemento.

Tipo 6: Tareas sistemáticas, realizadas cada ciertas horas de funcionamiento, o cada cierto tiempo, sin importar como se encuentre el equipo. Estas tareas pueden ser:

- Limpiezas
- Ajustes
- Sustitución de piezas

Tipo 7: Grandes revisiones, también llamados *Mantenimiento Cero Horas, Overhaul o Hard Time*, que tienen como objetivo dejar el equipo como si tuviera cero horas de funcionamiento. Una vez determinado los modos de falla es necesario determinar qué tareas de mantenimiento podrían evitar o minimizar los efectos de una falla. Pero lógicamente, no es posible realizar cualquier tarea que se nos ocurra que pueda evitar una falla. Cuanto mayor sea la gravedad de una falla, mayores recursos podremos destinar a su mantenimiento, y por ello, más complejas y costosas podrán ser las tareas de mantenimiento que tratan de evitarlo. Por ello, el punto anterior se explicaba la necesidad de clasificar las fallas según sus consecuencias. Si la falla ha resultado ser crítica, casi cualquier tarea que se nos ocurra podría ser de aplicación. Si la falla es importante, tendremos algunas limitaciones, y si por último, la falla es tolerable, solo serán posibles acciones sencillas que prácticamente no supongan ningún coste. En este último caso, el caso de fallas tolerables, las únicas tareas son las de tipo 1, 2 y 3. Es decir, para fallas tolerables podemos pensar en inspecciones visuales, lubricación y lectura de instrumentos propios del equipo.

En caso de fallas importantes, a los dos tipos anteriores podemos añadirle ciertas verificaciones con instrumentos externos al equipo y tareas de tipo condicional; estas tareas sólo se llevan a cabo si el equipo en cuestión da signos de tener algún problema. Es el caso de las limpiezas, los ajustes y la sustitución de determinados elementos. Todas ellas son tareas de los tipos 4 y 5. En el caso anterior, se puede permitir la falla, y solucionarla si se produce.

En el caso de fallas importantes, tratamos de buscar síntomas de falla antes de actuar. Si una falla resulta crítica, y por tanto tiene graves consecuencias, se justifica casi cualquier actividad para evitarlo. Tratamos de evitarlo o de minimizar sus efectos limpiando, ajustando, sustituyendo piezas o haciéndole una gran revisión sin esperar a que dé ningún síntoma de falla.

La siguiente tabla trata de aclarar qué tipos de tareas de mantenimiento podemos aplicar dependiendo de la criticidad de la falla.

TIPOS DE TAREA DE MANTENIMIENTO	TIPOS DE FALLA A LOS QUE PUEDE APLICARSE
Inspecciones visuales	Todos las fallas
Tareas de lubricacion	Todos las fallas
Verificaciones ON-LINE	Todos las fallas
Verificaciones OF-LINE <ul style="list-style-type: none"> • Verificaciones sencillas <ul style="list-style-type: none"> ○ Mediciones de temperatura ○ Mediciones de vibración ○ Mediciones de consumo de corriente. • Verificación con instrumentos complejos <ul style="list-style-type: none"> ○ Análisis de vibraciones ○ Termo grafías ○ Detección de fugas por ultrasonido ○ Análisis de la curva de arranque de los motores ○ Comprobación de alineación por laser 	Fallas importantes y criticas
Tareas condicionales (según los resultados anteriores) <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza • Ajuste • Sustitución de piezas según estado 	Fallas importantes y criticas
Tareas sistemáticas (Haya o no haya síntomas de falla) <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza sistemática • Ajuste sistemático • Sustitución sistemática de piezas desgaste 	Fallas criticas
Mantenimiento cero horas Overhaul Sustitución de todos los elementos sometidos a desgaste	Fallas criticas

Tabla 53. Tareas de mantenimiento y tipos de falla.

En la cervecería se utiliza MSG III para la lógica de manejo de fallas. El siguiente cuadro muestra la lógica de la decisión para determinar la tarea a seguir para cada modo de falla que amerite la utilización de RCM.



FALLA OCULTA O EVIDENTE

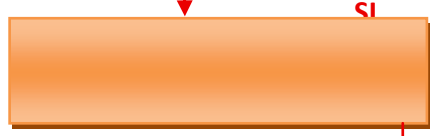
¿Es el efecto de la falla funcional evidente al operador en el curso de sus tareas operativas?



SI

EVIDENTE

¿Será que la falla funcional o daño tiene un efecto adverso directo en las operaciones o el funcionamiento del sistema?



SI



NO

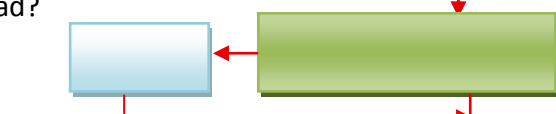
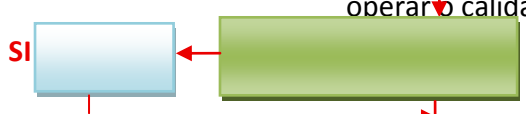


¿La falla funcional tendrá un efecto adverso directo en la capacidad de operar o calidad?

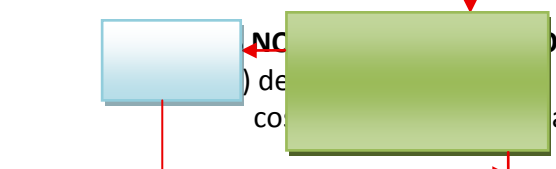
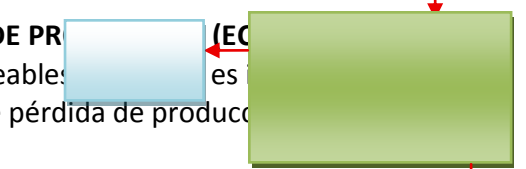
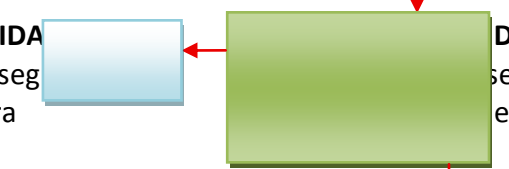


FALLA FUNCIONAL

¿La combinación de la falla adicional del sistema relacionado tendrán un efecto adverso?

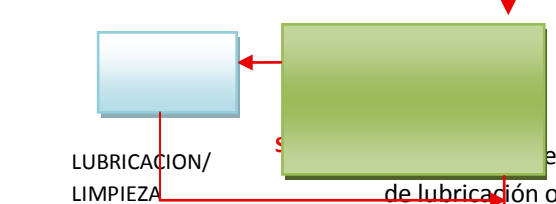
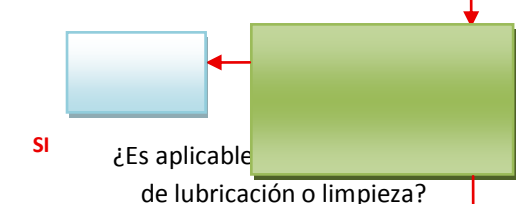
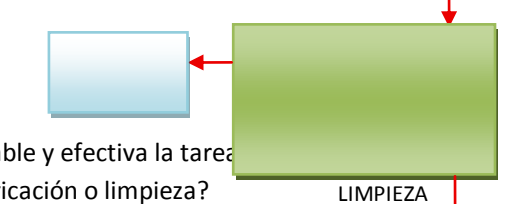
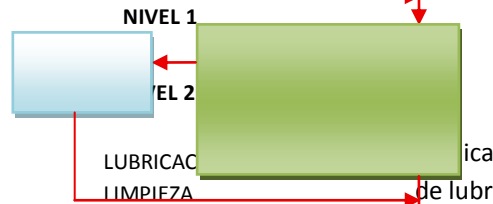


SI



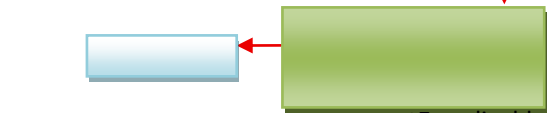
EFFECTOS DE SEGURIDAD

Tarea(s) requeridas para asegurar una operación segura



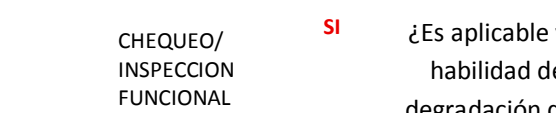
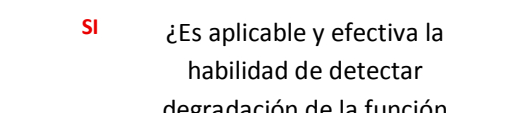
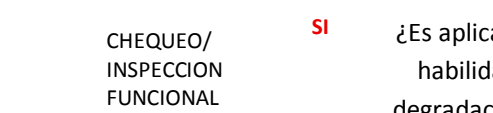
SI

¿Es aplicable y efectiva la tarea de lubricación o limpieza?



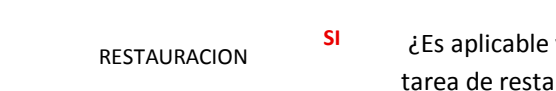
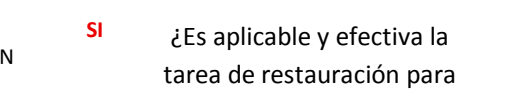
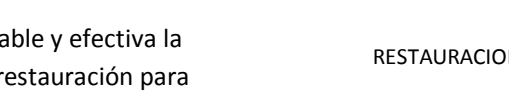
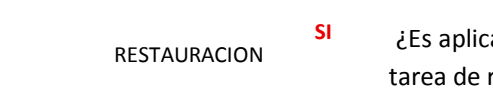
SI

¿Es aplicable y efectiva una operación de verificación?



SI

¿Es aplicable y efectiva la habilidad de detectar degradación de la función mediante tarea(s) en línea o fuera de línea?



SI

¿Es aplicable y efectiva la tarea de restauración para

7.6.2 DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA DE LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO

Una vez determinadas las tareas, es necesario determinar con qué frecuencia es necesario realizarlas. Existen tres posibilidades para determinar esta frecuencia:

1. Si tenemos datos históricos que nos permitan conocer la frecuencia con la que se produce la falla, podemos utilizar cualquier técnica estadística que nos permita determinar cada cuanto tiempo se produce el fallo si no actuamos sobre el equipo. Debemos contar con un número mínimo de valores (recomendable más de 10, aunque cuanto mayor sea la población más exactos serán los resultados). La frecuencia estará en función del costo de la falla y del costo de la tarea de mantenimiento (mano de obra + materiales + pérdida de producción durante la intervención).
2. Si disponemos de una función matemática que permitan predecir la vida útil de una pieza, podemos estimar la frecuencia de intervención a partir de dicha función. Suele ser aplicable para estimar la vida de determinados elementos, como los álabes de una turbina de gas, los cojinetes o rodamientos de un equipo rotativo o la vida de una herramienta de corte.
3. Si no disponemos de las informaciones anteriores, la determinación de la frecuencia con la que deben realizarse las tareas de mantenimiento propuestas debe hacerse en base a la opinión de expertos. Es la más subjetiva, la menos precisa de las formas de determinar la frecuencia de intervención, y sin embargo, la más utilizada. No siempre es posible disponer de información histórica o de modelos matemáticos que nos permitan predecir el comportamiento de una pieza.

Si no se dispone de datos históricos ni de fórmulas matemáticas, podemos seguir estos consejos:

- ✓ Es conveniente fijar una frecuencia diaria para tareas de muy bajo costo, como las inspecciones visuales o las lecturas de parámetros.
- ✓ La frecuencia mensual es aconsejable para tareas que supongan montajes o desmontajes complejos, y no esté justificado hacer a diario.
- ✓ La frecuencia anual se reserva para tareas que necesitan que la planta esté parada, y que no se justifica realizarlas con frecuencia mensual.

Estas frecuencias indicativas no son sino meras guías de referencia. Para cada caso, es conveniente comprobar si la frecuencia propuesta es la más indicada.

Por último, y con el fin de facilitar la elaboración del plan de mantenimiento, es conveniente especificar la especialidad de la tarea (mecánica, eléctrica, predictiva, de operación, de lubricación).

7.6.3 MEJORAS Y MODIFICACIONES DE LA INSTALACIÓN

Determinadas las fallas pueden prevenirse más fácilmente modificando la instalación, o introduciendo mejoras. Las mejoras pueden ser, entre otras, de los siguientes tipos:

⇒ Cambios en los materiales. Manteniendo el diseño de las piezas, el único cambio que se realiza es en la calidad de los materiales que se emplean. Algunos ejemplos: cambios en la composición química del acero con el que está fabricada la pieza, en el tratamiento superficial que recibe esta para mejorar las características de la capa más externa, en el tipo de aceite con el que lubricamos dos piezas metálicas que mantienen entre sí contacto en movimiento.

⇒ Cambios en el diseño de una pieza. La geometría de algunas piezas hace que en determinados puntos acumulen tensiones que facilitan su falla. Un simple cambio en el diseño de estas piezas puede hacer que cumplan su función perfectamente y que su probabilidad de rotura disminuya sensiblemente.

⇒ Instalación de sistemas de detección, bien de aviso o bien para evitar que el equipo funcione en condiciones que puedan ser perjudiciales

⇒ Cambios en el diseño de una instalación. En ocasiones no es una pieza, sino todo un conjunto el que debe ser rediseñado, para evitar determinados modos de falla. Es el caso, por ejemplo, de fallas producidas por golpes de ariete: no suele ser una pieza la que es necesario cambiar, sino todo un conjunto, añadiendo elementos (como tuberías flexibles o acumuladores de presión) y modificando trazados.

⇒ Cambios en las condiciones de trabajo. Por último, en ocasiones la forma de evitar la falla de una pieza o un equipo no es actuar sobre éstos, sino sobre el

medio que los rodea. Imaginemos el caso de una falla en un intercambiador de calor producido por incrustaciones en el haz tubular que conduce el líquido de refrigeración. Esta falla puede evitarse tratando químicamente este líquido con un producto anti-incrustante: no estaríamos actuando sobre el intercambiador, sino sobre un componente externo (las características físico-químicas del líquido refrigerante).

7.6.4 CAMBIOS EN LOS PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN

El personal que opera suele tener una alta incidencia en los problemas que presenta un equipo. Podemos decir, sin lugar a dudas, que esta es la medida más barata y más eficaz en la lucha contra las averías. En general, las tareas de mantenimiento tienen un costo, tanto en mano de obra como en materiales. Las mejoras tienen un costo añadido, relacionado con el diseño y con las pruebas. Pero un cambio en un procedimiento de operación tiene en general un costo muy bajo, y un beneficio potencial altísimo. Como inconveniente, todos los cambios suelen tener una inercia alta para llevarlos a cabo, por lo que es necesario prestar la debida atención al proceso de implantación de cualquier cambio en un procedimiento.

En ocasiones, para minimizar los efectos de una falla es necesario adoptar una serie de medidas provisionales si este llegara a ocurrir. Dentro de los cambios en procedimientos de operación, un caso particular es este: instrucciones de operación para el caso de que llegue a ocurrir una falla en concreto.

7.6.5 CAMBIOS EN PROCEDIMIENTOS DE MANTENIMIENTO

Algunas averías se producen porque determinadas intervenciones del personal de mantenimiento no se hacen correctamente. La redacción de procedimientos en los que se indique claramente como deben realizarse determinadas tareas, y en los que figuren determinados datos (tolerancias, ajustes, pares de apriete, etc.) es de gran utilidad.

✓ FORMACIÓN

Bien para evitar que determinadas fallas ocurran, o bien para resolverlos rápidamente en caso de que sucedan, en ocasiones es necesario prever

acciones formativas, tanto para el personal de operación como para el de mantenimiento. La formación en determinados procedimientos, la formación en un riesgo en particular o el repaso de un diagrama unifilar, o el estudio de una avería sucedida en una instalación similar son ejemplos de este tipo de acción.

7.6.6 PLAN DE MANTENIMIENTO Y AGRUPACIÓN DE MEDIDAS PREVENTIVAS

Determinadas las medidas preventivas para evitar las fallas potenciales de un sistema, el siguiente paso es agrupar estas medidas por tipos (tareas de mantenimiento, mejoras, procedimientos de operación, procedimientos de mantenimiento y formación), lo que luego nos facilitará su implementación.

El resultado de esta agrupación será:

- **Plan de Mantenimiento.** Era inicialmente el principal objetivo buscado. El plan de mantenimiento lo componen el conjunto de tareas de mantenimiento resultante del análisis de fallos. Puede verse que aunque era el objetivo inicial de este análisis, no es el único resultado útil.

- **Lista de mejoras técnicas a implementar.** Tras el estudio, tendremos una lista de mejoras y modificaciones que es conveniente realizar en la instalación. Es conveniente depurar estas mejoras, pues habrá que justificar económicamente ante la Dirección de la planta y los gestores económicos la necesidad de estos cambios.

- **Actividades de formación.** Las actividades de formación determinadas estarán divididas normalmente en formación para personal de mantenimiento y formación para personal de operación. En algunos casos, es posible que se sugiera formación para contratistas, en tareas en que éstos estén involucrados.

- **Lista de Procedimientos de operación y mantenimiento a modificar.** Habremos generado una lista de procedimientos a elaborar o a modificar que tienen como objetivo evitar fallos o minimizar sus efectos. Como ya se ha

comentado, habrá un tipo especial de procedimientos, que serán los que hagan referencia a medidas provisionales en caso de fallo

7.6.6.1 PUESTA EN MARCHA DE LAS MEDIDAS PREVENTIVAS OBTENIDAS

Ya hemos visto que tras el estudio de RCM se obtienen una serie de medidas preventivas, entre las que destaca el Plan de Mantenimiento a desarrollar en la instalación. Pero una vez obtenidas todas estas medidas y agrupadas de forma operativa, es necesario implementarlas.

Puesta en marcha del plan de mantenimiento

Determinado el nuevo plan de mantenimiento, hay que sustituir el plan anterior por el resultante del estudio realizado. Es conveniente repasarlo una vez más, por si se hubieran olvidado tareas. Sobre todo, es necesario comprobar que las tareas recomendadas por los fabricantes han sido tenidas en cuenta, para asegurar que no se olvida en el nuevo plan ninguna tarea importante. Pero una vez revisado, hay que tratar de que la implementación sea lo más rápida posible.

Para alguna de las tareas que se detallan en el nuevo plan es posible que no se disponga en planta de los medios necesarios. Por ello, es necesario que los responsables del mantenimiento se aseguren de que se dispone de los medios técnicos o de los materiales necesarios.

También es imprescindible formar al personal de mantenimiento en el nuevo plan, explicando en qué consiste, cuales son las diferencias con el anterior, y que fallas se pretenden evitar con estos cambios.

Implementación de mejoras técnicas

La lista de mejoras obtenida y depurada hay que presentarla a la Dirección de la planta para su realización. Habrá que calcular el costo que supone, solicitar algunos presupuestos y preseleccionar posibles contratistas (en el caso de que no puedan implementarse con personal de la planta). También habrá que exponer y calcular los beneficios que se obtienen que la implementación de cada una de ellas.

Puesta en marcha de las acciones formativas

Para implementar las acciones formativas determinadas en el análisis, no hay más que incluirlas en el Plan de Formación de la planta. La gran diferencia entre las acciones formativas propuestas por el RCM y la mayoría de las que suelen formar parte de los planes de formación suele ser que los propuestos por el RCM tienen como objetivo la solución a problemas tangibles, y por tanto, se traducen rápidamente en una mejora de los resultados.

Puesta en marcha de cambios en procedimientos de operación y mantenimiento

Para la implementación de estos cambios en procedimientos de operación y mantenimiento es necesario asegurar que todos los implicados conocen y comprenden los cambios. Para ellos es necesario organizar sesiones formativas en las que se explique a todo el personal que tiene que llevarlos a cabo cada uno de los puntos detallados en los nuevos procedimientos, verificando que se han entendido perfectamente. Este aspecto formativo es el más importante para asegurar la implementación efectiva de los cambios en procedimientos.

7.7 QUE LOGRA EL RCM

7.7.1 MAYOR SEGURIDAD E INTEGRIDAD AMBIENTAL

Considera las implicaciones ambientales y para seguridad de cada patrón de falla antes de considerar su efecto en las operaciones. Esto significa que se actúa para minimizar o eliminar todos los riesgos identificables relacionados con la seguridad de los equipos y el ambiente. Al incorporar la seguridad a la toma de decisiones del mantenimiento, el RCM también mejora la actitud de las personas en relación con este tema.

7.7.2 MEJOR FUNCIONAMIENTO OPERACIONAL

RCM reconoce que todos los tipos de mantenimiento tienen algún valor y provee reglas para decidir cual es el mas adecuado en cada situación. De esta manera se asegura que solo se eligieran las formas de mantenimiento mas efectivas para cada activo físico y que se tomaran las medidas necesarias en el caso que el mantenimiento no pueda ayudar. Este esfuerzo por ajustar y focalizar el mantenimiento lleva a grandes mejoras en el desempeño de los activos físicos donde sean requeridas.

RCm fue desarrollado para ayudar a las aerolíneas a diseñar los programas de mantenimiento para nuevos tipos de aeronaves antes que entraran en servicio. Por lo tanto resulta ser una manera ideal de desarrollar programas de este tipo para nuevos activos físicos, especialmente equipos complejos para los que no existe información histórica disponible. Esto ahorra mucho de la prueba y error que tan frecuentemente forma parte del desarrollo de nuevos programas de mantenimiento, pruebas que son frustrantes, demandan tiempo y producen errores que pueden ser muy costosos.

7.7.3 MEJOR COSTO EFICIENCIA DEL MANTENIMIENTO

RCM continuamente centra su atención en las actividades de mantenimiento que tiene mayor efecto en el desempeño de la planta. Esto ayuda a asegurar que todo lo que se gasta para el mantenimiento se invierta en las areas en las que pueda tener los mejores resultados.

Además si el RCM es aplicado correctamente a los sistemas de mantenimiento ya existentes, reduce la cantidad de trabajo de rutina (en otras palabras la tareas de mantenimiento hechas cíclicamente) de cada periodo habitualmente entre en un 40 % y un 70 %. Por otro lado si RCM se utiliza para desarrollar un programa de mantenimiento nuevo la carga de trabajo resultante es mucho mas baja que si el programa es desarrollado con los métodos tradicionales.

7.7.4 MAYOR VIDA UTIL DE LOS COMPONENTES COSTOSOS

Debido al cuidadoso énfasis en el uso de técnicas de mantenimiento a condición.

7.7.5 UNA BASE DE DATOS GLOBAL

Una revisión de RCM finaliza con un registro global y extensivamente documentado de los requerimientos de mantenimiento de los activos físicos utilizados por la organización. Esto posibilita la adaptación de circunstancias cambiantes (como cambios de modelos o aparición de nuevas tecnologías) sin tener que reconsiderar todas las políticas de mantenimiento desde el comienzo. También permite a quienes utilizan el equipo demostrar que sus programas de mantenimiento están contruidos sobre una base racional. Finalmente la información almacenada en las hojas de trabajo de RCM reduce los efectos de rotación de personal y la pérdida de experiencia que esto provoca. También se provee una clara visión de las habilidades necesarias para mantener cada activo físico, y para decidir que repuestos deben tenerse en stock.

7.7.6 MAYOR MOTIVACION DEL PERSONAL.

Especialmente las personas involucradas en el proceso de revisión. Esto lleva a un mayor entendimiento general del activo en su contexto operacional, junto con un sentido de pertenencia mas amplios de los problemas de mantenimiento y sus soluciones. También aumenta la probabilidad de que las soluciones perduren.

7.7.7 MEJOR TRABAJO DE EQUIPO.

RCM provee un lenguaje técnico que es mas fácil de entender para cualquier persona que tenga relación con el mantenimiento.

7.8 RCM SISTEMA DE REFRIGERACION BAVARIA S.A BUCARAMANA

Teniendo en cuenta que ya se selecciono el sistema en el cual se va realizar el análisis RCM se procederá a desarrollar las fases del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).

Los equipos seleccionados del sistema de refrigeración de la planta a los cuales se les realizara la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM son los siguientes:

- 4 compresores de tornillo.
- 6 condensadores evaporativos.
- 4 Bombas de amoniaco.

Los pasos a seguir a continuación para implementar la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad son los siguientes:

1. Listado de equipos y partición en todos los subsistemas equipos y elementos que componen el sistema que se está estudiando (fase 1 y 2).
2. Identificar las posibles fallas funcionales para cada elemento y establecer modos de falla para todas las fallas funcionales. (Fase 3 y 4)
3. Establecer el efecto y consecuencia de cada modo de falla. Se define el efecto y la causa de cada uno de los modos de falla (fase 5).
4. Selección de política de manejo de fallas mas adecuada. Se aplica la lógica de manejo de fallas de MSG III. (Fase 6).
5. Cronograma de traegas de mantenimiento. (fase 7)

7.8.1 DESARROLLO RCM EN LA CERVECERIA

La cervecería actualmente está desarrollando la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para esto cuenta con unos formatos en los cuales se consigna la información que se obtiene durante la ejecución de la metodología en el transcurso de cada una de las fases del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).

Donde obtendremos como resultado final de todo este proceso frecuencias con las que se debe realizar una tarea, duración de cada tarea, personal necesario para realizar una tarea, habilidad requerida por el personal para realizar una tarea y el estado del equipo en el cual se realizara una tarea.

En la tabla No se desarrolla las fase 1 de la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad las cuales corresponde a:

- Listado de todos los equipos y elementos que componen el sistema que será estudiado.

En la tabla No se desarrollan las fases 3, 4, 5, 6 de la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad las cuales corresponde a:

- Determinación de las fallas funcionales para cada elemento.
- Determinación de los modos de falla.
- Estudio de las consecuencias de los modos de falla.
- Determinación si aplica RCM.

En la tabla No se desarrolla la fase 7 de la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad las cuales corresponde a:

- Tareas de mantenimiento a realizar
- Cronograma de las tareas de mantenimiento

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1 CONCLUSIONES

- ✓ Se desarrollo un estudio actual del sistema de refrigeración de la cervecería BAVARIA S.A. de Bucaramanga, el cual se conforma por:
 - Calculo de las cargas térmicas transitorias y de estado estable correspondientes a los 34 tanques destinados a los procesos de fermentación y maduración.
 - Calculo de las cargas térmicas que imponen los otros subsistemas de enfriamiento que conforman el sistema de refrigeración.
 - Determinación de las capacidades de los equipos que conforman el sistema de refrigeración.
 - Elaboración de un plano actualizado de la distribución de planta, del sistema de refrigeración en la cervecería de Bucaramanga.
 - Propuestas que ayudaran a mejorar las condiciones de operación de algunos equipos, y a disminuir el consumo de energía en la cervecería.

- ✓ La ejecución de este proyecto permitió conocer de que manera incide la refrigeración industrial en un proceso cervecero a gran escala.

- ✓ Se elaboro un informe técnico para la cervecería donde el usuario puede acceder a:

- Valor de carga térmica en [TR], para cada enfriador en uso en la cervecería, incluye también valores de cargas para tanques maduradores y fermentadores.
- Nivel mínimo de operación en los tanques separadores de baja presión, con fin de evitar cavitación en las bombas de amoniaco
- Plano de distribución de planta del sistema de refrigeración de la cervecería de Bucaramanga en versión PDF, y DWG si se quiere acceder por medio de Volo View.
- Un CD que incluye un programa compilado en Matlab, por medio de este programa se puede:
 - calcular la carga térmica de cada enfriador en función de sus parámetros de operación.
 - Los equipos adecuados (Compresores + Condensadores) que deben operar para una carga determinada y una temperatura de bulbo húmedo exterior.
 - El comportamiento de la carga térmica para un día entre semana.

El programa puede ser ejecutado en cualquier computador personal.

- ✓ Se aplico la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) a los siguientes equipos que conforman el sistema de refrigeración:
 - Cuatro compresores de tornillo.
 - Cuatro bombas de amoniaco.
 - Seis condensadores evaporativos.

- ✓ Al aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad se obtuvieron los siguientes resultados:
 - Tipos de falla de cada uno de los equipos.
 - Frecuencias de Mantenimiento.
 - Tipos de tareas de mantenimiento a realizar:
 - Preventivo
 - Correctivo
 - Predictivo
 - Duración de las tareas de mantenimiento.
 - Personal requerido para la realización de las tareas de mantenimiento.

- ✓ Este proyecto permitió un encuentro entre el estudiante y la industria, logrando enlazar las herramientas y la formación académica, con situaciones reales de procesos industriales.

8.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Implementar el control para la protección de las bombas de amoníaco, sacándolas de línea cuando el nivel del tanque baje por debajo del mínimo establecido.

- ✓ Implementar el RCM realizado al sistema de refrigeración ya que se obtendría:
 - Mejor Funcionamiento Operacional.
 - Mayor vida útil en los componentes costosos.
 - Reducción de los costos de mantenimiento.

- ✓ Implementar una estrategia de operación adecuada en equipos del sistema de refrigeración (Compresores + Condensadores) con el propósito de disminuir el consumo energético del sistema.

- ✓ En la cervecería se necesita de un detector de fugas de amoníaco confiable en varias zonas del sistema, este detector debe tener las siguientes características:
 - Detectar concentraciones de amoníaco desde 25 ppm.
 - Que tenga sensores remotos para ubicarlos en diferentes puntos del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- ASHRAE Handbook- Fundamentals 2005.
- ASHRAE Refrigeration Handbook (SI) 2002.
- **DANFOSS** Manual de Controles Automaticos para Aistemas de Refrigeracion Industriales.12- **DKRCI.PA.000.C2.05 2007**
- **DOSSAT Roy J.** Principios de Refrigeración. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. México, 1998.
- **JOHNSON, Whilliam M.; WHITMAN, William.** Tecnología De La Refrigeración y Aire Acondicionado. Thomson.2002.
- **Mantenimiento Centrado en la Confibilidad “Jhon Moubray ” Edicion en español 2000**

ANEXO A

CATALOGO DE MODOS DE FALLA

Bavaria S.A cuenta con un catalogo de modos de falla el cual nos fue suministrado como guía para el desarrollo de la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad.

- **Desgaste: Juego, Superficie Interna o Externa, Caras Planas, Rosca, Dientes, Asientos.**

EFFECTO** para componentes de larga vida que trabajan en malas condiciones por lo que sufren desgaste acelerado.

- Juego Axial o Radial por Buje Desgastado
- Eje Desgastado, Pista Desgastada, Rodacha Desgastada.
- Superficie Interna desgastada formando ranuras.
- Superficie Externa desgastada formando escalones.
- Superficie Desgastada formando Caras planas.
- Rosca Desgastada.
- Dientes de correa Desgastados.
- Dientes de piñón Desgastados.
- Asiento Desgastado.

- **Desgaste: Empaques, Retenedores, Diafragmas, Sello Mecánico, Sello Hidráulico.**

EFFECTO** para componentes de cambio que trabajan en malas condiciones por lo que sufren desgaste acelerado.

- Empaque desgastado.
- Retenedor desgastado.
- Diafragma desgastado.
- Sello mecánico desgastado.
- Sello hidráulico desgastado.

- **Desgaste: Vida útil, Fatiga de Material, Pérdida de Elasticidad / Resistencia.**

CAUSA RAIZ** para componentes mecánicos que trabajan en buenas condiciones y desgaste normal.

- Rodamiento desgastado.
- Piñón desgastado.
- Correa desgastada.
- Cadena desgastada.
- Carrete desgastado.

- **Desgaste: Pérdida Aislamiento, Fatiga Electrónica.**

CAUSA RAIZ** para componentes eléctricos.

- Motor con Aislamiento Perdido (por uso normal).
- Filtro de Armónicos Fatigado (por uso normal).

- **Deterioro: Deformación, Corrosión, Fisurado, Rotura, Cristalización, Rayado.**

EFFECTO** para componentes mecánicos deteriorados por agente externo.

- Soporte Deformado.
 - Eje corroído.
 - Vidrio Fisurado.
 - Manguera Cristalizada.
 - Carátula Rayada.
- **Deterioro: Sulfatamiento, Contactos Suelos o Soldados, Conectores Rotos, Cable Roto, Espejo Roto.**

EFEECTO** para componentes eléctricos deteriorados por agente externo.

- Borne Sulfatada.
 - Variador con Contactos Suelos.
 - Caja de paso con bornes Contactos Soldados.
 - Sensor Inductivo con conector roto.
 - Fococelda con cable roto.
 - Fococelda con Espejo roto.
- **Limitación Funcional: Pérdida de Señal de Entrada o de Salida.**

EFEECTO** para componentes electrónicos que no funcionan por falta de señales.

- PLC con señal perdida.
 - Módulo con señal de entrada perdida.
 - Microcontrolador con señal de salida perdida.
- **Limitación Funcional: Bobina, Encoder, Resolver, Tarjeta o Dispositivo Electrónico Dañado.**

EFEECTO** para componentes electrónicos que se dañan de forma aleatoria o por efecto de otro problema.

- Electroválvula con bobina quemada.
- Encoder dañado.

- Resolver dañado.
- Tarjeta LCM dañada.
- Dispositivo de Rayos X dañado.
- PLC dañado.
- Memoria RAM dañada.

- **Limitación Funcional: Descalibración, Desalineación, Desubicación, Perturbado.**

EFFECTO** para todo tipo componentes en bueno estado pero no cumplen con la función.

- Transmisor de presión descalibrado.
- Transmisor de temperatura descalibrado.
- Fococelda desalineada.
- Sensor Inductivo desubicado.
- Cámara perturbada.

- **Limitación Funcional: Agarrotamiento, Atascamiento, Recorrido Incompleto, Obstrucción.**

EFFECTO** para componentes mecánicos deteriorados.

- Rodamiento agarrotado.
- Émbolo Atascado.
- Válvula con Recorrido Incompleto
- Filtro de Aire Obstruido.

- **Externa: Botella, Caja, Tapa, Etiqueta, Vidrio, Polvo, Elemento Extraño limitando la función.**

EFFECTO** para todo tipo de sistemas.

- Botella Caída.
- Caja Atascada.
- Tapa Atascada.
- Etiqueta Pegada.
- Vidrio Atascado.
- Tablero eléctrico empolvado.
- Fococelda con Elemento extraño limitando la función (Cucaracha).

- **Falta de Servicios: Energía Eléctrica, Aire, Vapor, Agua, CO2.**

EFEECTO** para todo tipo de sistemas.

- Suministro de Energía cortado.
- Línea de aire desconectada.
- Suministro de vapor insuficiente.
- Línea de aire obstruida.
- Suministro de CO2 congelado.

- **Lubricación Manual o Automática: Insuficiente u Obstruida, Pérdida por fuga.**

EFEECTO** para sistemas de lubricación y aditivos.

- Lubricación manual insuficiente.
- Línea de grasa obstruida.
- Lubricación automática con fuga.

- **Instalación: Ensamble, Alineación o Nivelación Inadecuada, Desajuste de Tornillería o Soportería.**

EFEECTO** para componentes mecánicos y ensambles.

- Carcaza desensamblada.
- Eje desalineado.
- Placa de transferencia desnivelada.
- Piñón bipartido desajustado.

- **Humedad: Por Condensación o Chorro.**

EFEECTO** para componentes eléctricos y electrónicos

- Motor Humedecido.
- Fococelda Mojada.

- **Vibración: Ajuste Incorrecto, Soltura de Accesorios, Conectores o Borneras Seltas.**

EFEECTO** para componentes mecánicos y ensambles.

- Brida suelta.
- Borne suelta.
- Tornillo de ajuste suelto.

- **Condición: Sobrevoltaje, Sobrecorriente, Torque Excesivo, Interferencia, Armónicos, Sobrepresión, Sobretemperatura.**

EFEECTO** para componentes electrónicos.

- Tarjeta Servo controladora dañada (por sobrevoltaje).
- Motor caliente (Por Sobrecorriente).
- Reductor dañado (por torque excesivo).
- Variador de velocidad dañado (por interferencia de radiofrecuencia).
- Transmisor de Presión dañado (por sobre presión).
- PLC reiniciado (por presencia de armónicos en la red).
- Resistencia de Frenado quemada (por sobretemperatura).

- **Fugas: Accesorios, Manqueras, Acople Rápido, Racor, Unión, Te, Juntas, Tuberías, Boquillas**

EFEECTO** para componentes neumáticos.

- Racor fugando.
 - Acople Rápido fugando.
 - Boquilla fugando.
 - Regulador de Aire fugando.
 - Cilindro Neumático fugando.
-
- **Consumibles: Recipiente Vacío o Mermado de Aditivos, Lubricantes, Jabones, Soluciones.**

EFEECTO** para sistemas de lubricación y aditivos.

- Tanque de Aceite vaciado.
 - Tanque de agua refrigeración mermado.
 - Caneca de Jabón vaciada.
-
- **Comunicaciones: Pérdida de Señal por Cable Roto, Interferencia Electromagnética, Pérdida de Datos**

EFEECTO** para componentes electrónicos.

- Variador con Falla de bus (Pérdida de comunicación).
- PLC desconectado (Pérdida de comunicación).
- Computador Infectado.
- Disco duro formateado.

