



**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**

**CÁLCULO Y DISEÑO ELÉCTRICO DE UNA COCINA  
INDUSTRIAL Y ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN  
UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO Y SU INFLUENCIA EN LA  
EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE, EN EL INGENIO  
AZUCARERO SANTA ANA**

**Leo José Oropín Segura**  
**Asesorado por el Ing. Juan Luis Arias Chupina**

**Guatemala, mayo de 2006**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CÁLCULO Y DISEÑO ELÉCTRICO DE UNA COCINA INDUSTRIAL Y  
ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA TORRE DE  
ENFRIAMIENTO Y SU INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DEL CICLO  
RANKINE, EN EL INGENIO AZUCARERO SANTA ANA.**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**POR**

**LEO JOSÉ OROPÍN SEGURA**

**ASESORADO POR EL ING. JUAN LUIS ARIAS CHUPINA**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**GUATEMALA, MAYO DE 2006**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Mario Ramón Figueroa López
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
EXAMINADOR	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **CÁLCULO Y DISEÑO ELÉCTRICO DE UNA COCINA INDUSTRIAL Y ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO Y SU INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE, EN EL INGENIO AZUCARERO SANTA ANA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 12 de agosto de 2005.



Leo José Oropín Segura

## **ACTO QUE DEDICO A**

- DIOS** Por haberme dado la vida, mi familia y la oportunidad de alcanzar una meta más en mi vida.
- MIS PADRES** Jose Rigoberto Oropín y Elsa Segura de Oropín  
Por el amor que me han dado, por mis estudios y por su apoyo incondicional en todo momento.
- MIS HERMANAS** Marta Eugenia y Marcia Priscila  
Por sus palabras de ánimo, su apoyo y su ayuda. Las quiero mucho.
- MI NOVIA** Lucía Elizabeth Moreno  
Por su amor, apoyo y comprensión; gracias por darme fuerzas para llegar a este día.
- MI PADRINO** Ingeniero Juan Luis Arias Chupina  
Por sus consejos y apoyo en mi vida y dentro de la carrera
- MIS PRIMOS** Delia, Pitty, Evelyn, Juan Luis, Mario y Roberto
- MI FAMILIA** Con mucho cariño, gracias por confiar y creer en mí.
- MIS AMIGOS** “Un amigo es un hermano que escogemos”, para ustedes con mucho cariño

## **AGRADECIMIENTO**

Aprovecho esta oportunidad para agradecer a la Corporación Agrícola Santa Ana, por darme la oportunidad de desarrollar en ella el Ejercicio Profesional Supervisado, que me permite alcanzar el título de Ingeniero Mecánico Electricista.

Es además muy grato para mí plasmar este reconocimiento a todo el personal que labora en el Ingenio Santa Ana, por sus aportes tanto profesionales como éticos que en su momento compartieron conmigo, los cuales me ayudaron a completar el presente trabajo de graduación, y que han sido fundamentales dentro de mi formación profesional. Que Dios los bendiga.

Guatemala, 23 de febrero de 2006

Ing. Angel Roberto Sic García  
Coordinador Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

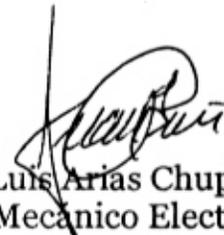
Estimado Ing. Sic García.

Por este medio atentamente le informo que como Asesor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S) del estudiante universitario de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Leo José Oropín Segura, procedí a revisar el informe final de la práctica de EPS, cuyo título es **“Cálculo y diseño eléctrico de una cocina industrial y estudio de transferencia de calor en una torre de enfriamiento y su influencia en la eficiencia del ciclo rankine, en el Ingenio Azucarero Santa Ana”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



Juan Luis Arias Chupina  
Ingeniero Mecánico Electricista  
Colegiado No.1484  
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 17 de abril de 2006  
Ref. EPS. C.162.04.06

Ing. Renato Escobedo  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ing. Escobedo.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"CÁLCULO Y DISEÑO ELÉCTRICO DE UNA COCINA INDUSTRIAL Y ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO Y SU INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE, EN EL INGENIO AZUCARERO SANTA ANA"**.

Este trabajo lo desarrolló el estudiante universitario, **LEO JOSÉ OROPIN SEGURA**, quien fue asesorado por el Ing. Juan Luis Arias Chupina y supervisado por el Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la **APROBACION DEL MISMO** por parte del asesor y supervisor, **ESTA COORDINACION TAMBIEN APRUEBA SU CONTENIDO**; solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"*Se y Enseñad a Todos*"

Ing. Angel Roberto Sic García  
Coordinador Unidad de EPS



cc. Archivo  
ARSG/jm



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación de la estudiante; Leo José Oropin Segura titulado: **Cálculo y diseño Eléctrico de una cocina industrial y estudio de transferencia de calor en una torre de enfriamiento y su influencia en la eficiencia del ciclo Rankine, en el Ingenio azucarero Santa Ana,** procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR

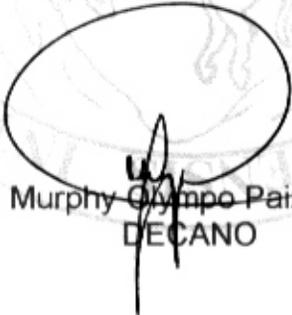


GUATEMALA, 24 DE MAYO 2,006.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **CÁLCULO Y DISEÑO ELÉCTRICO DE UNA COCINA INDUSTRIAL; Y ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO Y SU INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE, EN EL INGENIO AZUCARERO SANTA ANA**, presentado por el estudiante universitario **Leo José Oropin Segura**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, mayo 29 de 2,006

/gdech

*Tudo por ti, Caravelinga Mito*  
Dr. Carlos Martínez Durán  
2006: Centenario de su Nacimiento

## INDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	V
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	VII
<b>GLOSARIO</b>	IX
<b>RESUMEN</b>	XI
<b>OBJETIVOS</b>	XIII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XV
<b>1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes de la Empresa	1
1.1.1. Reseña Histórica	1
1.1.2. Misión de la Empresa	2
1.1.3. Filosofía de Calidad	3
1.1.4. Servicios que presta	3
1.1.4.1. Mercado de Exportación	4
1.1.4.2. Mercado Interno	4
1.2. Estructura Organizacional de la Empresa	6
1.3. Proceso de Producción del Azúcar	6
<b>2. CÁLCULO Y DISEÑO ELÉCTRICO COCINA INDUSTRIAL</b>	<b>11</b>
2.1. Antecedentes del proyecto	11
2.2. Cargas a Instalar	13
2.3. Calculo lumínico	13
2.4. Conductores e interruptores termomagnéticos	22
2.5. Tableros secundarios	24
2.6. Tablero principal	26
2.7. Acometida eléctrica	26

2.8.	Subestación eléctrica	27
2.9.	Red de tierra	27
2.10.	Documentación del Proyecto	29
<b>3.</b>	<b>GUIA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA COCINA INDUSTRIAL</b>	<b>33</b>
3.1.	Mantenimiento mediante ordenes de trabajo	35
3.1.1.	Mantenimiento para las instalaciones de iluminación	36
3.1.2.	Mantenimiento para la instalación eléctrica	36
3.1.3.	Mantenimiento del transformador	37
3.2.	Visitas programadas	38
<b>4.</b>	<b>ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO Y SU INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE</b>	<b>39</b>
4.1.	Torre de enfriamiento	39
4.1.1.	Descripción de operación	39
4.1.2.	Función dentro del proceso	41
4.1.3.	Tratamiento del agua	42
4.1.4.	Transferencia de calor	43
4.2.	Ciclo Rankine que opera con el turbogenerador de 25 MW	46
4.2.1.	Características de operación	46
4.2.2.	Descripción de Equipos	48
4.2.2.1.	Caldera	48
4.2.2.1.1.	Bombas de agua de alimentación	49
4.2.2.2.	Turbina de vapor	50
4.2.2.3.	Calentadores de agua de alimentación	51
4.2.2.4.	Condensador	51

4.2.2.4.1.	Torre de enfriamiento	53
4.2.2.5.	Bombas de condensado	53
4.2.3.	Eficiencia del Ciclo Rankine	54
4.2.3.1.	Bases teóricas para la prueba	55
4.2.3.2.	Prueba de comportamiento del sistema de vapor	57
4.2.3.2.1.	Balance térmico de los calentadores del ciclo	60
4.2.3.2.2.	Rendimiento térmico del ciclo	61
4.2.3.2.3.	Razón de vapor por kilovatio	63
<b>CONCLUSIONES</b>		65
<b>RECOMENDACIONES</b>		67
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		69
<b>APÉNDICE</b>		71



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Organigrama Grupo Corporativo Santa Ana	8
2. Proceso agroindustrial del azúcar	10
3. Distribución del local de la cocina industrial	14
4. Información de la luminaria proporcionada por el fabricante	17
5. Diagrama unifilar para la cocina industrial	30
6. Diagrama de fuerza para la cocina industrial	31
7. Diagrama de iluminación para la cocina industrial	32
8. Diagrama de operación de la torre de enfriamiento	42
9. Diagrama de enfriamiento	44
10. Diagrama p - V para ciclo de Carnot	85
11. Esquema de bloques para ciclo de vapor Rankine	87
12. Diagrama p-V para ciclo de vapor de Rankine	88
13. Diagrama T-S para ciclo de vapor de Rankine	89

### TABLAS

I. Cargas a instalar en la cocina industrial	13
II. Niveles de iluminación según I.E.S y S.M.I.I	15
III. Factor de corriente en motores para selección de la protección	24
IV. Descripción calculo eléctrico para cocina industrial	28
V. Eficiencia de diferentes tecnologías de cogeneración	56
VI. Simbología eléctrica	76



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>pol</b>	abreviatura para polarización.
<b>ppm</b>	partes por millón.

### Eléctrico

<b>RCL</b>	Relación de cavidad de la zona
<b>hcl</b>	Altura de trabajo en metros
<b>E</b>	Nivel de luxes calculados sobre la altura de trabajo
<b>Ø</b>	Lúmenes emitidos por la lámpara
<b>c.u.</b>	Coeficiente de utilización
<b>f.m.</b>	Factor de mantenimiento
<b>η</b>	Eficiencia
<b>D.M.E.</b>	Demanda máxima estimada
<b>I.E.S.</b>	Sociedad de ingeniería de iluminación
<b>S.M.I.I.</b>	Sociedad mexicana de ingeniería de iluminación
<b>I<sub>cc</sub></b>	Corriente de cortocircuito
<b>kW</b>	Kilovatios
<b>kVA</b>	Kilovoltamperios
<b>MW</b>	Megavatios

### Mecánico

<b>Q</b>	Densidad de flujo de calor
<b>q</b>	Calor transferido por unidad de masa
<b>G</b>	Flujo de aire seco, en lb/min.
<b>L</b>	Flujo de agua, lb/min.
<b>h</b>	Entalpía específica (BTU/lbm)

<b>s</b>	Entropía específica (BTU/lbm°R)
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>psi</b>	Libras sobre pulgada cuadrada
<b>psia</b>	Libras sobre pulgada cuadrada absolutos
<b>Hg</b>	Símbolo del mercurio
<b>BTU</b>	Unidad térmica británica, es una medida de energía
<b>GPM</b>	Galones por minuto
<b>W</b>	Trabajo (BTU/lbm)
<b>P</b>	Presión, en PSI
<b>lbm</b>	Libra-masa
<b>m</b>	Fracción en la fase vapor
<b>v</b>	Volumen específico
<b>RV</b>	Razón de vapor por kilovatio generado
$\Phi_{vap}$	Flujo de vapor, en lb/h
$\eta_t$	Rendimiento térmico

### Subíndices

<b>ent</b>	Condición de entrada
<b>sal</b>	Condición de salida
<b>sum</b>	Suministrado
<b>f</b>	Valor en líquido saturado
<b>g</b>	Valor en vapor saturado
<b>E</b>	Condición eléctrica
<b>T</b>	Turbina
<b>B</b>	Bomba
<b>C</b>	Caldera
<b>G</b>	Generador

## GLOSARIO

<b>Bagazo:</b>	Residuo de la caña de azúcar molida, se utiliza como combustible para la generación de vapor.
<b>Brix:</b>	Unidad de medida que expresa el porcentaje en peso de sólidos disueltos en una solución.
<b>Cachaza:</b>	Es la primera espuma que arroja el zumo de la caña; constituye además los lodos que trae el jugo de caña luego de la molienda.
<b>Ciclo de potencia: de vapor</b>	Es un ciclo termodinámico donde el vapor del agua se utiliza para generar potencia mecánica.
<b>Cogeneración:</b>	Proceso de generación de energía eléctrica y energía mecánica, a partir del vapor que se obtiene al quemar el bagazo.
<b>Condensación:</b>	Cambio de fase por el que el vapor de agua pasa a su estado líquido.
<b>Entalpía:</b>	Cantidad de energía en un sistema termodinámico que éste puede intercambiar con su entorno.
<b>Entropía:</b>	Es una medida de la capacidad de un sistema de realizar un trabajo útil; esta relacionada con la temperatura y el calor. $\Delta S = Q / T$

<b>Isentrópica:</b>	Condición que se refiere a entropía constante.
<b>Miel final:</b>	Residuo líquido que se separa de la última masa cocida en una máquina centrífuga, del cual no resulta económico extraer más azúcar.
<b>Polarización:</b>	Se refiere al porcentaje en peso de sacarosa por grano de azúcar.
<b>Proceso: adiabático</b>	Proceso en el que solo se identifican interacciones de trabajo, sin ganancia o pérdida de calor.
<b>Retrolavado:</b>	Proceso de inversión del sentido de la dirección del fluido para la limpieza del condensador.
<b>Termodinámica:</b>	Ciencia que trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia.
<b>Turbogenerador:</b>	Es un generador eléctrico acoplado directamente con una turbina de vapor, de la cual recibe la energía mecánica que va a convertir en energía eléctrica.
<b>Vapor Saturado:</b>	El vapor producido a la temperatura de ebullición correspondiente a su presión absoluta.
<b>Zafra:</b>	Periodo en que se inicia el corte de caña y los ingenios azucareros están en su proceso de producción de azúcar; se realiza durante el verano.

## RESUMEN

Dentro del Ejercicio Profesional Supervisado realizado en el Ingenio Santa Ana, se elaboró el cálculo y el diseño eléctrico para el montaje de una cocina industrial, en la cual se preparan los alimentos para los cortadores de caña en época de zafra; para este diseño se aplicaron las normas internacionales correspondientes a las instalaciones del tipo industrial, ya que por la capacidad instalada de la misma, se clasifica dentro de las de este tipo.

El primer paso fue realizar un estudio de las necesidades de iluminación, con lo cual se puede diseñar un correcto sistema de alumbrado para el área de trabajo. Luego se hizo el diseño de los circuitos que van a comprender el sistema y se calculó para ellos el calibre del conductor y el interruptor termomagnético adecuado. En función de la capacidad del sistema se calculó los elementos de protección general y la capacidad de la subestación eléctrica necesaria para alimentar la instalación eléctrica. Por último, se realizó una guía de mantenimiento preventivo para la instalación que abarca las acciones principales a seguir para mantener una correcta operación de los equipos dentro de la cocina.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia en la operación del turbogenerador de 25 MW de la planta de cogeneración del ingenio, se adquirió una torre de enfriamiento para el condensador dentro del ciclo de vapor. Para encontrar la eficiencia de este sistema se hizo un estudio del mismo para comprender su funcionamiento, se tomó las mediciones necesarias dentro de un ciclo de operación del mismo, y luego se realizó el procedimiento necesario para el análisis del sistema de vapor. Con esta prueba se obtuvo información importante acerca del comportamiento del sistema y de la influencia que tuvo la torre de enfriamiento dentro del mismo.



## **OBJETIVOS**

### **Generales**

1. Realizar el cálculo y diseño eléctrico para una cocina industrial ubicada en la planta del Ingenio Santa Ana, para el proceso de preparación de los alimentos que recibirán los trabajadores del corte de caña.
2. Estudio de transferencia de calor en una torre de enfriamiento para evaluar su influencia en la eficiencia del ciclo Rankine, que opera con el turbogenerador de 25MW.

### **Específicos**

1. Cálculo y distribución de la iluminación para el local en el que se ubicará la cocina industrial.
2. Distribución de la instalación eléctrica para la cocina industrial, que incluye diagrama unifilar, protecciones, subestación y acometida.
3. Proponer un plan de mantenimiento para la instalación eléctrica realizada.
4. Estudiar el proceso de transferencia de calor que se da en la torre de enfriamiento y evaluar la influencia en el ciclo al utilizar un flujo de agua fría constante para la condensación del vapor.



## INTRODUCCIÓN

Dada la necesidad de unificar la producción de alimentos para los cortadores de caña de azúcar, en el Ingenio Santa Ana se hizo una cocina industrial, para lo cual fue necesario realizar el cálculo y el diseño de la instalación eléctrica.

El procedimiento utilizado para los cálculos realizados se basa en las normas internacionales que regulan este tipo de instalaciones, para que todo el trabajo realizado cumpla con las expectativas y necesidades para el diseño, que a la vez permite la facilidad de mantenimiento y tiene una vista estética que no afecta las operaciones que se realizan dentro de la cocina industrial.

Se plantea además una guía con los requerimientos necesarios para darle mantenimiento a la instalación eléctrica diseñada, de tal manera que se incluya esta dentro del plan de mantenimiento preventivo que se maneja dentro de la empresa.

La instalación eléctrica en la cocina industrial se realizó de acuerdo con las recomendaciones expuestas por el autor en este trabajo, según el cálculo y el diseño eléctrico que realizó para la misma.

La cogeneración es importante para la utilización del residuo de la caña de azúcar, además de los ingresos económicos que representa, y para eficientar este sistema se instaló una torre de enfriamiento para reemplazar el uso de agua de río como líquido de enfriamiento para la operación del condensador, ya

que necesita menos mantenimiento y se pueden obtener mejores resultados en la operación del condensador al proveer un flujo constante de agua fría.

Para estudiar la influencia de la torre de enfriamiento dentro del ciclo se realizó el procedimiento para determinar el rendimiento térmico del ciclo de vapor y se determinó la razón de libras de vapor utilizadas por kilovatio de potencia eléctrica generado para observar el comportamiento del sistema respecto a la operación del mismo cuando se utilizaba agua de río.

# **1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA**

## **1.1. Antecedentes de la empresa**

En estos últimos años, la producción azucarera de Guatemala ha tomado más importancia, debido a que en las cosechas recientes se han alcanzado niveles récord de producción, ocupando en el último año el tercer lugar como exportador más grande de Latinoamérica y el Caribe, y el sexto en importancia a nivel mundial. Este hecho representa significativos beneficios económicos para el país, sobre todo, por la generación de divisas y por el empleo que la industria azucarera provee.

### **1.1.1. Reseña histórica**

En 1968 un grupo de empresarios adquirió parte de los equipos de los Ingenios Santa Juana y Canóvanas de Puerto Rico, iniciándose así la construcción de Ingenio Santa Ana, en la Finca Cerritos, ubicada a 65 kms. al sur de la ciudad de Guatemala, en el departamento de Escuintla, a 220 mts. sobre el nivel del mar. La primera zafra prueba se hizo en 1969/70, moliéndose 154,973.75 toneladas de caña y produciendo 239,525 quintales de azúcar en 136 días; la capacidad instalada en esa época era de 3,500 ton/día.

En 1993 comenzó a operar la refinería, diseñada para elaborar refina de alta calidad, partiendo de la azúcar blanca sulfitada, con capacidad de 500 toneladas de azúcar por día. Contaba con 3 tachos, 7 filtros, 6 centrifugas automáticas, una secadora y una enfriadora; años mas adelante, se instalo un clarificador de azúcar disuelta, para poder trabajar con azucares afinadas.

En el área de Cogeneración, el Ingenio Santa Ana produjo su propia energía eléctrica desde el comienzo de sus operaciones. En efecto, desde 1969 contó con una potencia instalada de 3.5 MW, hoy en día la capacidad instalada actual es de 60 MW.

Las operaciones de corte de caña, se iniciaron en el período 1977/78. Se empleaban 1,200 cortadores para cortar 1,000 toneladas de caña diarias, con machete convencional. Hace seis años, se inició el programa de capacitación permanente para el corte de caña con machete australiano, habiéndose incrementado la eficiencia en el corte, la calidad de producto final, y los ingresos de los cortadores. Así también, se construyeron módulos habitacionales con las comodidades necesarias para albergar a los cortadores de cuadrilla, procedentes del altiplano guatemalteco, a los cuales se proporciona alimentación abundante en proteínas, completada con sales de rehidratación oral.

En 1996, Santa Ana avanzó significativamente en sus planes estratégicos, al desarrollar una de las fábricas más eficientes, lo cuál logró colocando mayor capacidad instalada, con equipo de alta tecnología, ello apoyado por un proyecto de automatización industrial único en Centro América, alcanzando en la zafra 2004/05 una producción récord de 4, 000,000 de quintales de azúcar.

### **1.1.2. Misión de la empresa**

La empresa se considera un Grupo Corporativo visionario, comprometido con el progreso y bienestar de Guatemala, dedicado a producir eficientemente bienes y servicios de óptima calidad, derivados de la caña de azúcar, por medio

del desarrollo de los recursos humanos y tecnológicos, para satisfacer las necesidades de los clientes nacionales e internacionales.

### **1.1.3. Filosofía de calidad**

El Grupo Corporativo Santa Ana, tiene claramente definida su filosofía de calidad:

*Generar altos niveles de rendimiento, eficiencia y calidad en el proceso productivo y competitividad en el mercado del azúcar en el ámbito nacional e internacional.*

Esta filosofía está sustentada por el liderazgo que cada persona ejerza en su puesto de dirección, por el replanteamiento de sus procesos donde el papel de la automatización, la sistematización y las comunicaciones son factores determinantes y por la cultura de calidad, que tiene por valores entre otros, la creatividad, la comunicación eficaz y el trabajo en equipo.

### **1.1.4. Servicios que presta**

Santa Ana se dedica a la producción de caña de azúcar, elaboración de azúcar y generación de energía eléctrica. También comercializa subproductos como la melaza, bagazo y cachaza y diversos servicios conexos.

Como muchas de las empresas, Ingenio Santa Ana tiene dos mercados hacia los cuales comercializa los diversos productos que son aceptados por su calidad.

#### **1.1.4.1. Mercado de exportación**

a) Azúcar Refinada Tipo “A”.

Es el azúcar de mayor calidad. Sus especificaciones técnicas son: color 0 - 45 grados ICUMSA (constituye el factor mas importante para este tipo de azúcar), pol 99.85 % mínima; humedad 0.04 %

b) Azúcar Cruda

Constituye el azúcar con una pol mínima de 97.9%

#### **1.1.4.2. Mercado interno**

a) Azúcar Blanca Standard (Sulfitada)

Es el azúcar de mayor venta para consumo local. Sus características son: pol de 99.4 - 99.6%, color 180 – 400 ICUMSA, humedad 0.20 %. Contiene vitamina A en una concentración de 12 a 20 ppm. En Santa Ana, este tipo de azúcar se envasa bajo la marca “Caña Real”.

b) Azúcar Refinada Local

Es un azúcar con 0 - 80 grados ICUMSA, pol de 99.6 - 99.8%, humedad 0.04 %. Este tipo de azúcar al igual que la anterior, también esta vitaminada. En Santa Ana se empaca bajo la marca “Nevada”.

c) Azúcar Superior

Es un azúcar con 99.6 – 99.79 % de pol, 0.10 % de humedad, color 80 – 200 ICUMSA.

d) Azúcar Morena

Es un azúcar con 98 – 99.4% de pol, 0.40 % de humedad y color 400 - 800 ICUMSA.

e) Melaza

Se le denomina así a la miel final que se obtiene en el último agotamiento en el ciclo de masas. Sus especificaciones técnicas son: Brix 85 % y pureza entre 30 – 35%. Constituye la materia prima para hacer alcohol y rones; además se usa para alimento de ganado. Este producto se distribuye tanto para mercado nacional como para el internacional.

f) Torta de Cachaza

Constituye el lodo filtrado y lavado, producido por la precipitación en el proceso de clarificación de jugo mezclado. Sirve como fuente primaria para abonos orgánicos en la producción agrícola.

g) Energía Eléctrica

Las especificaciones de este servicio es que la empresa cumpla con la cantidad de MW que se proyecte generar o cogenerar. Para tal efecto, Santa Ana cuenta con 6 calderas, una que se alimenta con bunker y bagazo, y otras cinco que trabajan utilizando solo bagazo. Se cuenta además con dos tipos de turbogeneradores:

- Turbogeneradores de escape: Que se alimentan de vapor del ingenio y devuelven vapor al proceso.
- Turbogenerador de condensación: Que se alimentan de vapor y sacan agua condensada.

Dicha generación se efectúa 13,200 voltios, y por medio de un transformador se eleva a 69,000 voltios, 60 Hz, trifásica y un factor de potencia de 0.95 para conectarse con el sistema nacional de energía eléctrica. Actualmente, durante la época de zafra, se generan 40 MW de los cuales se venden 32 MW a la Empresa Eléctrica de Guatemala; durante la época de no zafra se mantienen disponibles con una capacidad de 25 MW.

## **1.2. Estructura organizacional de la empresa**

Como empresa, Santa Ana esta dirigida por una Junta Directiva, y su estructura esta compuesta por seis divisiones y el staff de la gerencia general. Cada una de estas tiene su propia misión, bajo la cual trabajan para hacer un trabajo profesional eficiente y eficaz.

## **1.3. Proceso de producción del azúcar**

La caña de azúcar es una planta que pertenece a la familia de las gramíneas, es una planta perenne, que tiene la ventaja de ser la mas eficiente en transformar la energía solar en azucares y biomasa.

También, genera igual cantidad de oxigeno que cualquier bosque tropical. La caña cuando se planta, produce de 4 a 7 cortes anuales (retoños), sin necesidad de plantarla cada año.

Parte de la caña que procesa el ingenio se corta manualmente, hay siete frentes de corte que suministran arriba de 10.000 toneladas de caña diarias.

Aproximadamente existen más de 3.000 hombres dedicados al corte de caña, además de los que se dedican a las otras labores de la cosecha, como maquinaria, apuntadores, recogedores de caña, etc.

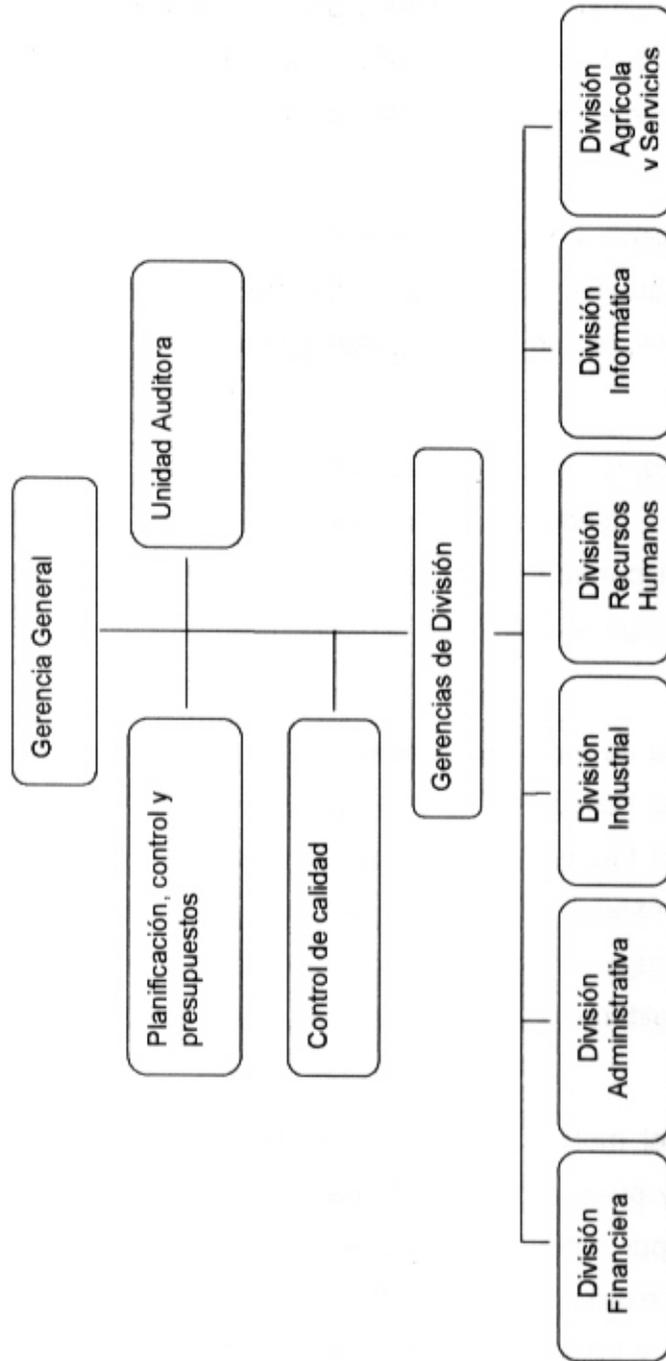
La caña llega al patio de dos formas: caña maleteada que en su mayoría es verde, sin quemar; y caña a granel, que viene en contenedores, llamados jaulas, para que puedan ser fácilmente descargados.

En el patio, la caña es pesada en las básculas y luego se descarga en las mesas de caña, donde es lavada. Después, la caña pasa por los conductores donde es transportada y preparada para que en el sistema de molienda la extracción del jugo sea fácil.

El sistema de molienda consiste de un tandem de molinos compuestos de cuatro rodillos conocidos con el nombre de mazas. Se agrega agua de imbibición para facilitar la extracción de sacarosa. La finalidad principal de los molinos es conseguir la mayor separación posible de los dos elementos de la caña: fibra y jugo. El jugo extraído es bombeado a fábrica y el bagazo es conducido a calderas para utilizarse como combustible.

Luego del molino el jugo es pasado por calentadores para subirle la temperatura, y pasa a clarificación para sacarle los lodos en los clarificadores que trabajan por medio de decantación; el lodo es enviado a los filtros de cachaza para extraer parte del jugo. El jugo del clarificador es enviado a los evaporadores, y luego a los tachos donde se concentra la miel para formar el grano de azúcar.

**Figura 1 - Organigrama Grupo Corporativo Santa Ana**

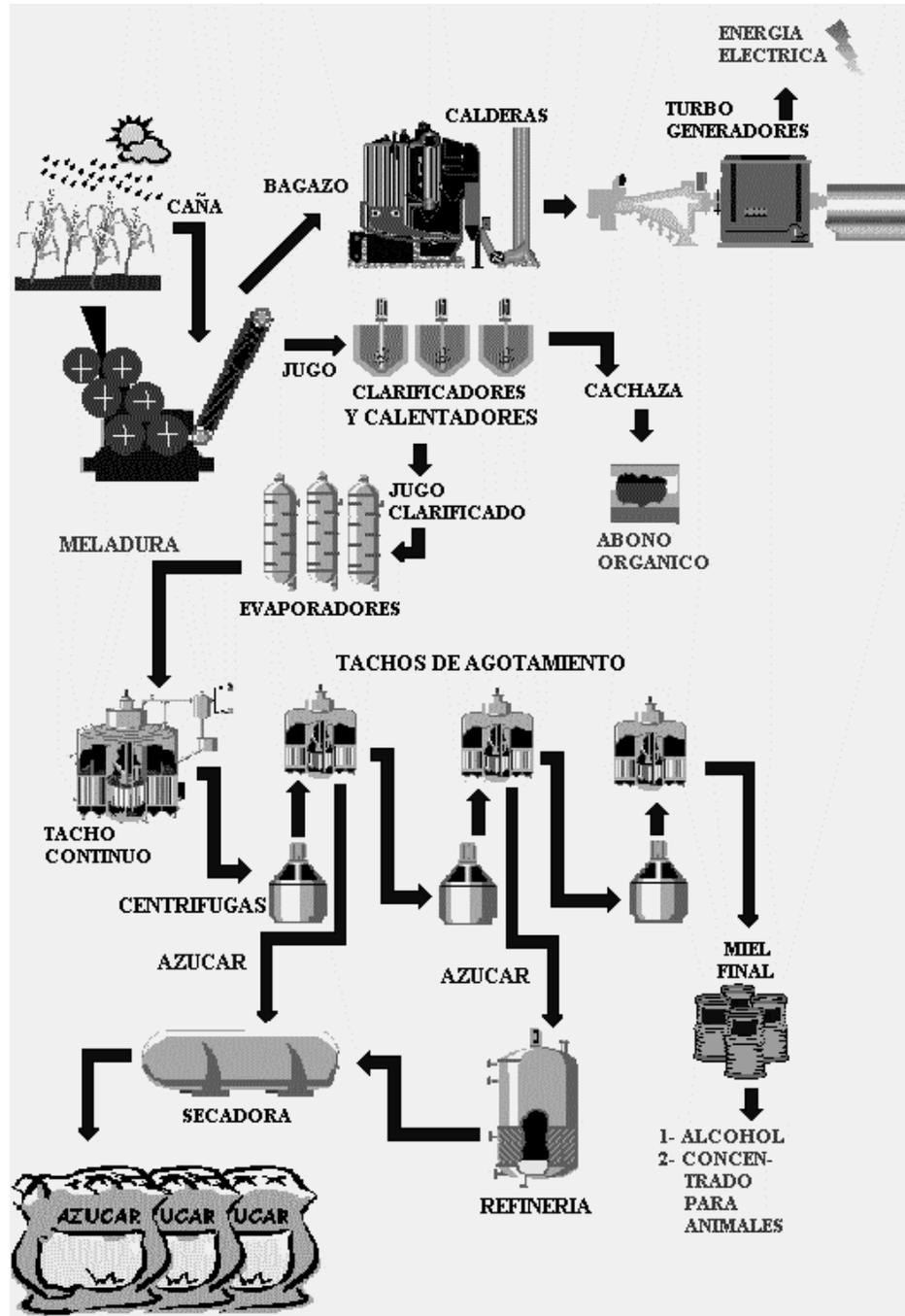


Fuente: Grupo Corporativo Santa Ana, División de Recursos Humanos

En las centrifugas se recibe la masa de los tachos, aquí se separa el grano de la miel. El azúcar es enviada a una secadora y enfriadora, luego es transportada al envasado o a bodegas a granel para su distribución.

En las calderas se genera todo el vapor necesario para el funcionamiento de las turbinas, turbogeneradores y cocimientos en el proceso de fabricación. Los hornos de las calderas son alimentados con bagazo, que es transportado por conductores de tablillas o bandas transportadoras.

Figura 2 – Proceso agroindustrial del azúcar



Fuente: Grupo Corporativo Santa Ana. División Industrial

## **2. CÁLCULO Y DISEÑO ELÉCTRICO COCINA INDUSTRIAL**

### **2.1. Antecedentes del proyecto**

La industria azucarera lleva implícita la visión de beneficio a sus trabajadores y es por tal motivo que se ha creado un programa que tiene una infraestructura capaz de promover por medio de la tecnología necesaria y los métodos indicados la diversificación en la alimentación, alcanzando así un alto contenido energético en los productos que son suministrados a cada trabajador del corte de caña y que tiene como propósito lograr mejores resultados en el rendimiento de las personas y reducir, por medio de una buena nutrición, los problemas de salud.

Anteriormente se contaba con cinco cocinas que suministraban los alimentos, diversificadas por toda la región del departamento de Escuintla, en el lugar en donde se encuentran los frentes de corte de caña, y en cada una de ellas se tenía una capacidad instalada para poder cubrir la demanda de atender de 500 a 600 trabajadores en promedio.

La construcción de una cocina industrial dentro de las instalaciones de la planta genera grandes beneficios en el mejoramiento de la administración de la alimentación para los módulos habitacionales ubicados en las diferentes fincas productoras de caña, además de la implementación de nuevos métodos que la lleven a producir con los más altos estándares de calidad, de la manera más eficiente y al menor costo, brindando a los trabajadores una alimentación balanceada y nutritiva que repercutirá en alcanzar mayor rendimiento de parte de los mismos.

La diversidad de cocinas existentes y la distancia entre ellas hace que el mantenimiento que se le da a las instalaciones eléctricas en cada una no resulte eficiente, y se necesita mas tiempo para cubrir con el programa de mantenimiento para ellas. Con una sola cocina ubicada en las instalaciones de la planta de azúcar, facilitara su mantenimiento y con esto garantizar la continuidad en la producción. Además de que en la misma se instalara equipo especializado para cocinas de tipo industrial, lo que permitirá un mayor control en las buenas practicas de manufactura y el control sanitario.

Teniendo en las instalaciones de la planta una sola cocina industrial para la preparación de los alimentos, se podrá administrar de manera más eficiente la producción de los mismos y se tendrá una reducción de costos para la empresa en materia de mano de obra, insumos, control de costos, etc. lo que permitirá que la rentabilidad del proyecto sea elevada.

Con un control en la producción, la nueva tecnología y el aprovechamiento de los recursos del ingenio, como lo es el vapor, se tendrá un costo reducido al optimizar la operación, y esto se traducirá en beneficios a los trabajadores.

A su vez, se puede ahorrar tiempo para futuros trabajos en cuanto a mantenimiento, mejoras y/o implementaciones dadas a la misma, los cuales se traducen en términos económicos.

## 2.2. Cargas a instalar

**Tabla I – Descripción de las cargas que se van a instalar**

Unidades	Descripción	Fases	Voltaje (V)	Potencia (kW)
4	Sartén Eléctrico	3	208	12.00
1	Molino Nixtamal 5HP	3	208	3.73
3	Maquina Tortillera	1	208	6.44
2	Compresor Maquina de Hielo 3HP	1	208	2.24
1	Compresor Cuarto Frío 2HP	1	208	1.49
1	Compresor Cuarto Frío 1HP	1	208	0.75
1	Bomba Hidroneumática 2HP	1	208	1.49
1	Extractor de Aire 1 3/4HP	1	208	1.30
1	Extractor Tipo Hongo 2HP	1	208	1.49
2	Inyector Axial de Aire 1/2HP	1	208	0.37
2	Mezcladora de Masa 1HP	1	208	0.75
10	Lámpara de Sodio de Alta Presión	1	208	0.40
2	Tomacorrientes Especiales	1	208	5.00
18	Tomacorrientes Dobles	1	120	0.36
	Iluminación	1	120	1.35

La suma de las cargas da un total de capacidad instalada de 106.9 kW, que en su mayoría es carga monofásica.

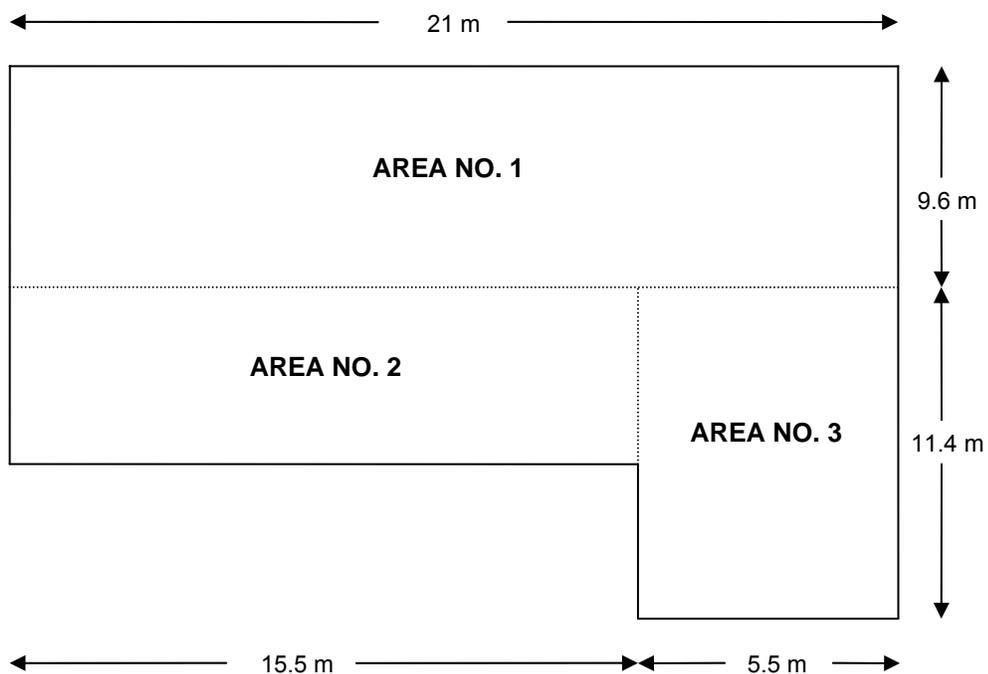
## 2.3. Cálculo lumínico

Las dimensiones del local donde funcionará la cocina industrial son de 21 mts. de largo por 21 mts. de ancho, lo que equivale a un área de 441 m<sup>2</sup>. Sin embargo, debido a las divisiones que tiene el local, para calcular más fácilmente la iluminación del local, la mejor opción es dividirlo en partes rectangulares como se muestra en la figura 3.

Al tener por secciones cada una de las áreas es más fácil diseñar un sistema de alumbrado para cada una de las áreas, simulando que cada una de ellas es un local cerrado

Según la información obtenida de la tabla II, la iluminación mínima recomendada por la I.E.S. para un local donde se van a preparar alimentos es de 300 lux; esto significa que el nivel de iluminación requerido mínimo en cualquier momento es de 300 luxes.

**Figura 3 – Distribución del local por áreas de trabajo**



El método que se va a utilizar para el cálculo es el de cavidades zonales; este método, como su nombre lo indica, divide al local en cavidades individuales: la del techo, la del local y la del piso. Para este caso se adoptara una versión simplificada del método, es decir que se utilizara solamente la cavidad del local, ya que las dos restantes en general no influyen de manera tan significativa dentro del la iluminación general del lugar.

La formula utilizada para el cálculo de la relación de cavidad local del área a iluminar es la siguiente:

$$RCL = \frac{5 \times hcl \times (L + A)}{(L \times A)}$$

**Tabla II – Algunos niveles de iluminación según I.E.S. y S.M.I.I.**

AREA O ACTIVIDAD	LUXES I.E.S 99%	LUXES S.M.I.I. 95%
REFINERIAS DE AZUCAR		
Clasificación	500	300
Inspección del color	2000	1100
CERVECERAS, INDUSTRIAS		
Elaboración, y lavado de barriles	300	200
Llenado (de botellas de latas, de barriles)	500	300
RESTAURANTES Y CAFETERIAS		
Área de Comedor		
Cajera	500	300
Del tipo intimo		
Con ambiente ligero	100	60
Con ambiente acogedor	30	30
Del tipo ordinario		
Con ambiente ligero	300	200
Con ambiente acogedor	150	100
Área de Servicio	300	200
Cocina		
Inspección, etiquetado y precio	700	400
Preparación de alimentos	300	200
General	100	60

Fuente: Illuminating Engineering Society, Mexico Chapter

La altura de trabajo es de 4.0 m en todas las áreas; se procede entonces a realizar el cálculo de la iluminación para cada una de las áreas:

### **Iluminación área no. 1**

Largo del área = 21.0 m

Ancho del área = 9.6 m

$$Rcl = \frac{5 \cdot hcl \cdot (L + A)}{(L \times A)} = \frac{5 \times 4.0 \times (21 + 9.6)}{(21 \times 9.6)} = 3.034$$

La luminaria escogida para esta aplicación es del tipo de sodio de alta presión de 400 Watts.

Para encontrar el coeficiente de utilización necesitamos la información proporcionada por el fabricante para el tipo de luminaria que vamos a instalar, que se observa en la figura 4; en ella se encuentran los valores para el c.u. para diferentes valores de la relación de cavidad de local y las reflectancias efectivas del techo y paredes.

- Rcl = 3.034
- Reflectancia de la pared = 80 %
- Reflectancia efectiva del techo = 70 %

Mediante una interpolación simple en la tabla de la figura 4, se encuentra que el coeficiente de utilización es de 74.76 %

En la figura 4 encontramos también los factores de depreciación por suciedad de la luminaria y el factor de depreciación lumínica, con los cuales se calcula el factor de mantenimiento de la lámpara.

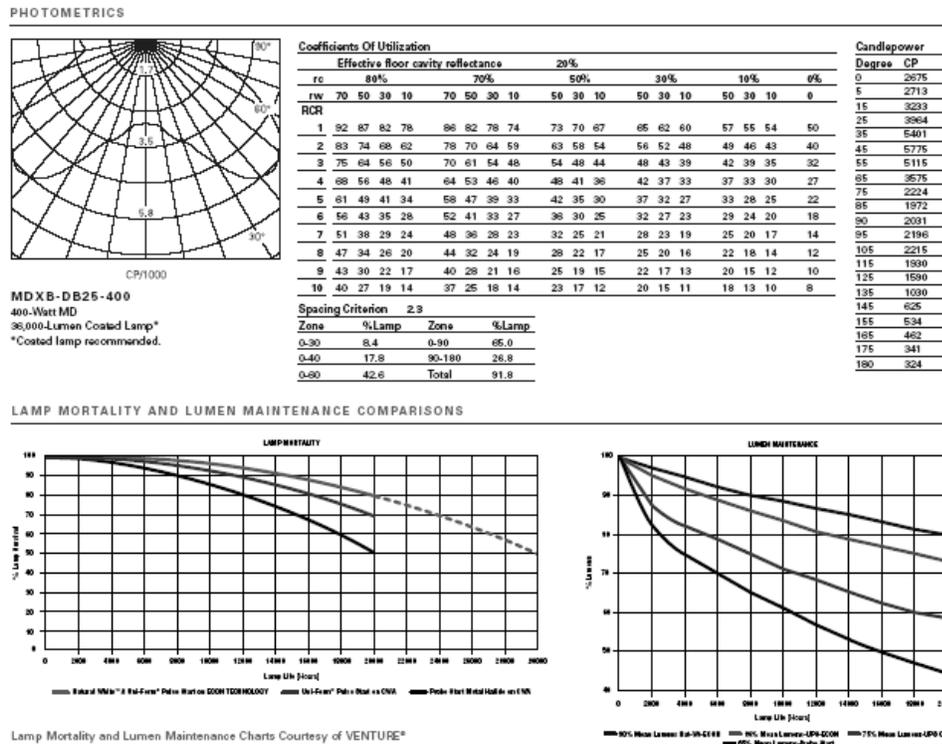
Factor de depreciación lumínica (L.L.D): 0.8

Factor de depreciación por suciedad (L.D.D): 0.8

Factor de Mantenimiento:  $0.8 \times 0.8 = 0.64 = 64 \%$

Este valor encontrado para el factor de mantenimiento va a ser el mismo para las distintas áreas a iluminar, por lo que se va a calcular una sola vez.

**Figura 4 – Información de la luminaria proporcionada por el fabricante**



Fuente: Cooper Lighting. XB Prismatic Direct Mount Benchmark

Numero de luminarias necesarias

$$\text{No. Lum.} = \frac{\text{Area} \cdot \text{Luxes}}{\text{Lumens} \cdot \text{C.U.} \cdot \text{F.M.}} = \frac{201.7 \times 300}{36,000 \times 0.7476 \times .64} = 3.51 \approx 4 \text{ luminarias}$$

El espaciamiento máximo recomendado (separación entre las luminarias) se puede encontrar en la información de la luminaria en la figura 4, es proporcionada por el fabricante, y viene dado como la relación entre la separación y la altura de montaje. Para este tipo de luminarias la Información es la siguiente:

$$S_{\max} \text{ Permitido} = \frac{S}{\text{M.H.}} \times \text{h.m.} = 2.3 \times 4 = 9.2 \text{ m}$$

Dividiendo la anchura del local entre el espaciamiento obtenemos las hileras de luminarias longitudinalmente:

$$\text{A lo largo} = \frac{L}{S_{\max}} = \frac{21}{9.2} = 2.28$$

En base al número de luminarias necesarias y a las dimensiones del local que se esta iluminando, se escogió un arreglo de 4 hileras a lo largo, valor que es un poco elevado, pero que permite una instalación mas adecuada y con mejor iluminación.

Como se redondearon las hileras obtenidas a valor superior, el espaciamiento entre luminarias es menor, lo cual se verifica a continuación:

$$S = \frac{L}{\# \text{ hileras}} = \frac{21}{4} = 5.25$$

Lo cual no sobrepasa el valor máximo recomendado de 9.2 m, por lo que se puede tomar el valor de 4 hileras

Ahora se dividen las luminarias calculadas entre las hileras para calcular las luminarias / hilera.

$$\text{Luminarias / hilera} = \frac{4}{4} = 1 \text{ luminaria}$$

Esto da un valor total de 4 luminarias en esta área; para esta cantidad de luminarias es necesario conocer el nivel de lux proporcionados al almacén el cual se obtiene:

$$E (\text{lux}) = \frac{\# \text{ lum.} \times \phi \times \text{c.u.} \times \text{f.m.}}{L \times A} = \frac{4 \times 36000 \times 0.7476 \times 0.64}{21 \times 9.6} = 341.76 \text{ lux}$$

Lo cual esta dentro del rango para el cual se calculó. Para encontrar la distancia entre luminarias a lo ancho del local, se dividen el ancho del almacén / # hileras

$$9.6 \text{ m} / 4 \text{ hileras} = 2.4 \text{ metros entre hileras}$$

Se requiere que la distancia de la luminaria a la pared sea la ½ de la distancia entre luminarias

$$2.4 \text{ m} / 2 = 1.2 \text{ m de la luminaria a la pared}$$

La distancia entre luminarias a lo largo del local se encuentra dividiendo el largo del almacén / luminarias x hileras

$$21 / (1 \times 4) = 5.25 \text{ metros entre hileras}$$

Como se requiere que la distancia de la luminaria a la pared sea la  $\frac{1}{2}$  de la distancia entre luminarias

$$5.25 \text{ m} / 2 = 2.6 \text{ m de la luminaria a la pared}$$

El mismo procedimiento desarrollado se realiza para las dos áreas restantes.

## **Iluminación área no. 2**

Largo del local = 15.51 m.

Ancho del local = 6.9 m.

$$Rcl = \frac{5 \cdot hcl \cdot (L + A)}{(L \times A)} = \frac{5 \times 4.0 \times (15.51 + 6.9)}{(15.51 \times 6.9)} = 4.185$$

Coeficiente de utilización: 66.7 %

Factor de Mantenimiento: 64 %

$$\text{No. Luminarias} = \frac{107.1 \times 300}{36,000 \times 0.667 \times .64} = 2.09 \approx 3 \text{ luminarias}$$

Numero de hileras: 3 hileras

Número de luminarias por hilera: 1 luminaria

Numero de luminarias totales: 3 luminarias

Nivel de iluminación del área de trabajo: 430 lux

Distancia entre luminarias a lo largo: 5.17 m. - 2.6 m. entre luminaria y pared

Distancia entre luminarias a lo ancho: 2.3 m. - 1.15 m. entre luminaria y pared

### **Iluminación área no. 3**

Largo del área = 11.68 m.

Ancho del área = 5.5 m.

$$Rcl = \frac{5 \cdot hcl \cdot (L + A)}{(L \times A)} = \frac{5 \times 4.0 \times (11.68 + 5.5)}{(11.68 \times 5.5)} = 5.349$$

Coefficiente de utilización: 59.26 %

Factor de Mantenimiento: 64 %

$$\text{No. Luminarias} = \frac{64.24 \times 300}{36,000 \times 0.5926 \times .64} = 1.41 \approx 2 \text{ Luminarias}$$

Numero de hileras: 2 hileras

Número de luminarias por hilera: 1 luminaria

Numero de luminarias totales: 2 luminarias

Nivel de iluminación del área de trabajo: 425 lux

Distancia entre luminarias a lo largo: 5.8 m. - 2.9 m. entre luminaria y pared

Distancia entre luminarias a lo ancho: 2.75 m. - 1.38 m. entre luminaria y pared

De esta manera se ha realizado una correcta distribución de la iluminación para la cocina industrial; se van a utilizar 9 lámparas en total divididas en dos circuitos y con un interruptor individual por área de trabajo

#### **2.4. Conductores e interruptores termomagnéticos**

Se va a desarrollar el cálculo para el molino de nixtamal, luego este mismo se va a generalizar para los demás equipos.

##### **Molino Nixtamal**

5 HP, 208 V, 3 fases

Potencia nominal aparente del motor

$$S = \frac{HP \times 746}{\eta \times f.p.} = \frac{5 \times 746}{0.83 \times .86} = 5225.55 \text{ VA}$$

Los valores de la eficiencia y el factor de potencia del motor se obtienen de la placa de datos del mismo.

La demanda máxima estimada es la cantidad aproximada de potencia que va a estar consumiendo el equipo según el tipo de uso que tenga dentro del proceso.

$$\text{D.M.E.} = \text{factor de demanda} \times S = 0.6 \times 5225.55 = 3135.33 \text{ VA}$$

Corriente nominal

$$I_{\text{NOM}} = \frac{\text{HP} \times 746}{\sqrt{3} \times V \times \eta \times \text{f.p.}} = \frac{5 \times 746}{\sqrt{3} \times 208 \times 0.83 \times 0.86} = 14.52 \text{ A}$$

Para encontrar la corriente nominal en los demás equipos, se divide la potencia del mismo en watts entre su voltaje nominal.

$$I = \frac{S(\text{VA})}{V}$$

La corriente de diseño se calcula para dimensionar el calibre del conductor con el que se va a conectar el equipo al tablero de distribución.

$$I_{\text{DIS}} = 1.25 \times I_{\text{NOM}} = 1.25 \times 14.52 = 18.15 \text{ A}$$

Para calcular la corriente del flipon se deben tomar en cuenta dos condiciones: si el equipo es un motor, este factor se encuentra según la tabla III en función de los HP del mismo; para los demás equipos se le da un factor del 1.25.

$$I_{\text{FLIP}} = \text{factor} \times I_{\text{NOM}} = 2 \times 14.52 = 29.04 \text{ A}$$

**Tabla III – Factor de corriente en motores para selección de la protección**

Potencia (HP)	Factor
0 – 10	2
10 - 25	1.75
> 25	1.5

Fuente: Curso Instalaciones Eléctricas  
Facultad de Ingeniería, USAC

Se presenta a continuación una tabla con el cálculo restante de las protecciones a utilizar en cada uno de los circuitos de distribución de la energía eléctrica dentro de la cocina industrial.

## 2.5. Tableros secundarios

La capacidad de los tableros secundarios se calcula en función de la demanda máxima estimada para cada uno

Tablero centro de carga no. 1

$$I_{dis.1} = \frac{D.M.E_{\text{tabl.1}} \times 1.25}{\sqrt{3} \times V} = \frac{42774 \times 1.25}{\sqrt{3} \times 208} = 148.59 \text{ A}$$

$$\text{Capacidad de barras} = 1.5 \times I_{dis} = 1.5 \times 148.59 = 222.88 \text{ A}$$

Numero de polos: 36

donde la D.M.E. es la suma de la carga estimada de los equipos conectados en el tablero de distribución.

Se escoge un tablero centro de carga, 3 fases, 4 hilos, 240 V, 36 polos, con barras principales de 225 amperios, capacidad de cortocircuito de 65 kA, barras de neutro y tierra física que va a tener los siguientes ramales:

- 4 interruptores termomagnéticos de 3 x 50 amperios,  $I_{cc} = 10$  kA
- 1 interruptores termomagnéticos de 3 x 30 amperios,  $I_{cc} = 10$  kA
- 2 interruptores termomagnéticos de 2 x 20 amperios,  $I_{cc} = 10$  kA
- 5 interruptores termomagnéticos de 1 x 20 amperios,  $I_{cc} = 10$  kA
- 2 interruptores termomagnéticos de 1 x 15 amperios,  $I_{cc} = 10$  kA

Tablero centro de carga no. 2

$$I_{dis.2} = \frac{D.M.E_{\text{tabl.2}} \times 1.25}{\sqrt{3} \times V} = \frac{32598 \times 1.25}{\sqrt{3} \times 208} = 113.24 \text{ A}$$

$$\text{Capacidad de barras} = 1.5 \times I_{dis} = 1.5 \times 106.61 = 169.86 \text{ A}$$

Numero de polos: 36

Se escoge un tablero centro de carga, 3 fases, 4 hilos, 240 V, 36 polos, con barras principales de 225 amperios, capacidad de cortocircuito de 65 kA, barras de neutro y tierra física que va a tener los siguientes ramales:

- 3 interruptores termomagnéticos de 2 x 40 amperios,  $I_{cc} = 10$  kA
- 8 interruptores termomagnéticos de 2 x 30 amperios,  $I_{cc} = 10$  kA
- 3 interruptores termomagnéticos de 2 x 20 amperios,  $I_{cc} = 10$  kA
- 2 interruptores termomagnéticos de 2 x 15 amperios,  $I_{cc} = 10$  kA

## 2.6. Tablero principal

La capacidad del tablero principal se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_{\text{dis}} = \frac{\text{D.M.E}_{\text{tot}} \times F_{\text{div}} \times 1.5}{\sqrt{3} \times V} = \frac{73,167.8 \times 0.7 \times 1.5}{\sqrt{3} \times 208} = 213.25 \text{ A}$$

$$\text{Capacidad de barras} = 1.5 \times I_{\text{dis}} = 1.5 \times 213.25 = 319.9 \text{ A}$$

En el tablero principal se va a colocar un interruptor principal de 400 amperios y  $I_{\text{CC}}$  de 100 kA, que va a alimentar a toda la instalación, y los dos interruptores para los tableros de distribución de la carga. Se instalo un tablero principal con barras de 3 x 400 amperios y barra neutral de 200 amperios.

## 2.7. Acometida eléctrica

Se calcula el calibre del conductor que se va a utilizar para alimentar el tablero principal de la instalación así como la capacidad del interruptor principal de la misma.

$$I_{\text{nom.}} = \frac{\text{Cap.Inst.}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{106,920}{\sqrt{3} \times 208} = 296.78 \text{ A}$$

Según las especificaciones para conductores, se escoge un conductor THW calibre 350 MCM, y un interruptor principal de tres polos con capacidad de 400 A.

## 2.8. Subestación eléctrica

La capacidad de la subestación eléctrica se calcula en base a la demanda estimada de la carga. Esta es 51,217.46 kVA, por lo que el transformador que se va a utilizar es del tipo seco para interior de 75 kVA, 480/208-120V.

Asimismo se calcula la capacidad del interruptor en la subestación del lugar que va a alimentar la instalación.

Corriente de Acometida lado primario:

$$I_{\text{nom. línea}} = \frac{\text{Carga(VA)}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{116,348}{\sqrt{3} \times 480} = 140.1 \text{ A}$$

Corriente de diseño:

$$I_{\text{cable}} = 1.25 \times I_{\text{nom. línea}} = 1.25 \times 140.1 = 175.1 \text{ A}$$

Corriente del flipon:

$$I_{\text{flip.}} = 1.25 \times I_{\text{nom. línea}} = 1.25 \times 140.1 = 175.1 \text{ A}$$

Para la subestación se va a instalar un transformador tipo seco de 75 KVA de capacidad, alimentado desde un interruptor de 200 A, desde la subestación del ingenio, con conductor THW calibre 2/0.

## 2.9. Red de tierra

El conductor de tierra se conecta de la carcasa de los equipos a la barra de tierra, el cual establece una condición equipotencial en toda el área de la instalación, y esta conectado a los electrodos de tierra. El Código Nacional de Electrificación, NEC por sus siglas en inglés, establece que la resistencia

Tabla 4 – Descripción cálculo eléctrico para cocina industrial

U	DESCRIPCION	FASE	POTENCIA HP	V VA	η	f.p.	FD	D.M.E	Inom	Idis.	FC	Ifilip	Cond.	Filipon
4	Sartén 240/480V	3		12000	208		0.6	28800.0	33.35	41.69		41.69	3#8, 1#12	3x50
1	Molino 240/480V	3	5	5225	208	0.83	0.86	3135.0	14.52	18.15	2	29.04	4#12	3x30
3	Maquina Tortillera	1		6776	208			12196.8	30.95	38.69		38.69	3#10	2x40
1	Bomba Hidroneumática	1	2	2275	208	0.79	0.83	1365.0	10.94	13.67	2	21.88	3#12	2x30
2	Compresor Maq. Hielo	1	3	3289	208	0.81	0.84	1973.5	15.81	19.77	2	31.62	3#12	2x30
1	Extractor Tipo Hongo	1	2	2275	208	0.79	0.83	1365.0	10.94	13.67	2	21.88	3#12	2x30
1	Extractor de Aire	1	1.75	2016	208	0.78	0.83	1209.9	9.69	12.12	2	19.38	3#12	2x30
2	Inyector Axial de Aire	1	0.5	740	208	0.72	0.70	444.05	3.56	4.45	2	7.12	3#14	2x15
1	Compresor Cuarto Frio	1	2	2275	208	0.79	0.83	1365.0	10.94	13.67	2	21.88	3#12	2x30
1	Compresor Cuarto Frio	1	1	1400	208	0.74	0.72	840.1	6.73	8.41	2	13.46	3#12	2x20
2	Mezcladora de Masa	1	1	1400	208	0.74	0.72	840.1	6.73	8.41	2	13.46	3#12	2x20
5	Lámpara Sodio de Alta Presión	1		480	208			2400.0	11.54	14.42		14.42	3#14	2x20
4	Lámpara Sodio de Alta Presión	1		480	208			1920.0	9.23	11.54		11.54	3#14	2x20
2	Tomas 208V Maquina de Hielo	1		5000	208			8000.0	24.04	30.05		30.05	3#10	2x30
3	Tomacorrientes Cuartos	1		360	120			864.0	9	11.25		11.25	3#12	1x20
4	Tomacorrientes Entrada	1		360	120			1152.0	12	15		15	3#12	1x20
3	Tomacorrientes Marmitas	1		360	120			864.0	9	11.25		11.25	3#12	1x20
4	Tomacorrientes Pared Lateral	1		360	120			1152.0	12	15		15	3#12	1x20
4	Tomacorrientes Sartenes	1		360	120			1152.0	12	15		15	3#12	1x20
9	Iluminación Cuartos	1		100	120			900.0	7.5	9.38		9.38	2#14	1x15
3	Iluminación Reflectores	1		150	120			450.0	3.75	4.69		4.69	2#14	1x15

Totales 75,372 VA

máxima de la conexión a tierra debe no exceder los 25  $\Omega$ . Sin embargo, por seguridad, es práctica común que para subestaciones pequeñas la resistencia de tierra esté entre los valores de 1 a 5  $\Omega$ .

Para la instalación de sistema de tierra para el proyecto, se colocaron tres varillas de cobre de 5/8" de diámetro por 8' de largo, conectadas al tablero principal utilizando cable calibre 1/0.

Se hizo la medición de la red de tierra para verificar el valor de la resistencia y se encontró que tiene un valor de 2.8  $\Omega$ , que es un valor aceptable para este tipo de instalación.

#### **2.10. Documentación del proyecto**

Dentro de la documentación se incluye el diagrama unifilar de la instalación y los diagramas de fuerza e iluminación, que permiten tener el conocimiento necesario para trabajos o ampliaciones a la distribución eléctrica existente.

Figura 5 - Diagrama Unifilar

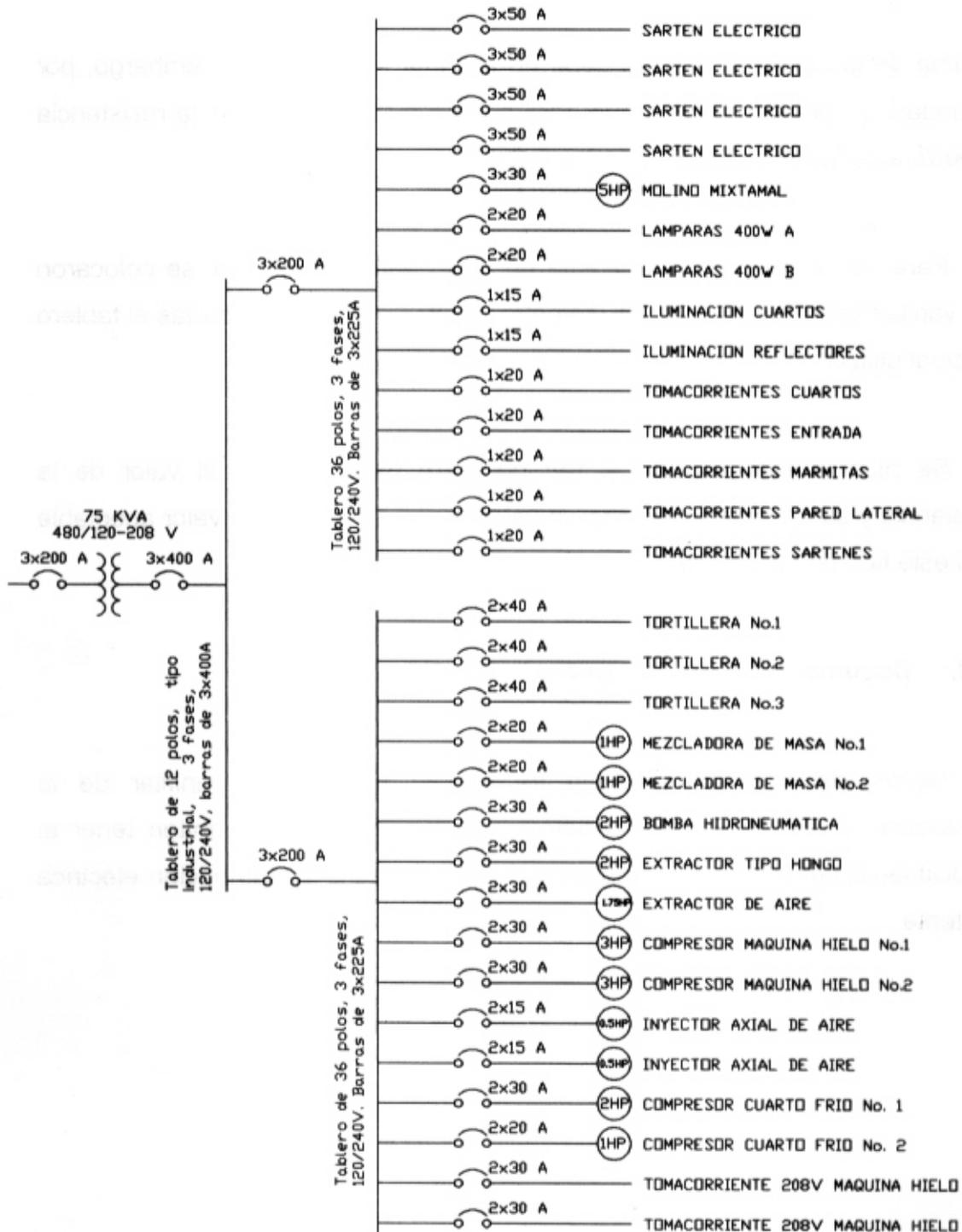


Figura 6 - Diagrama de Fuerza

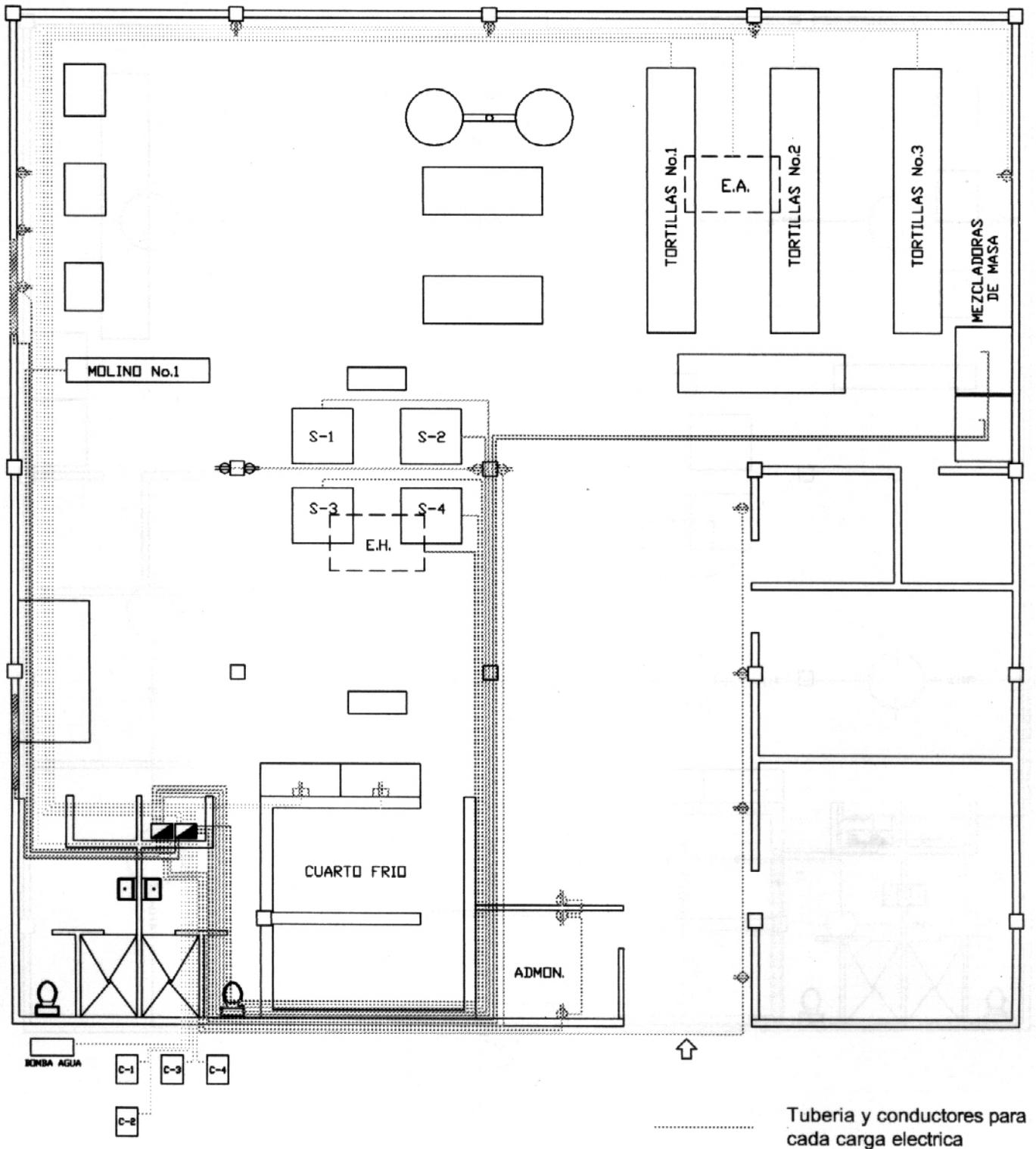
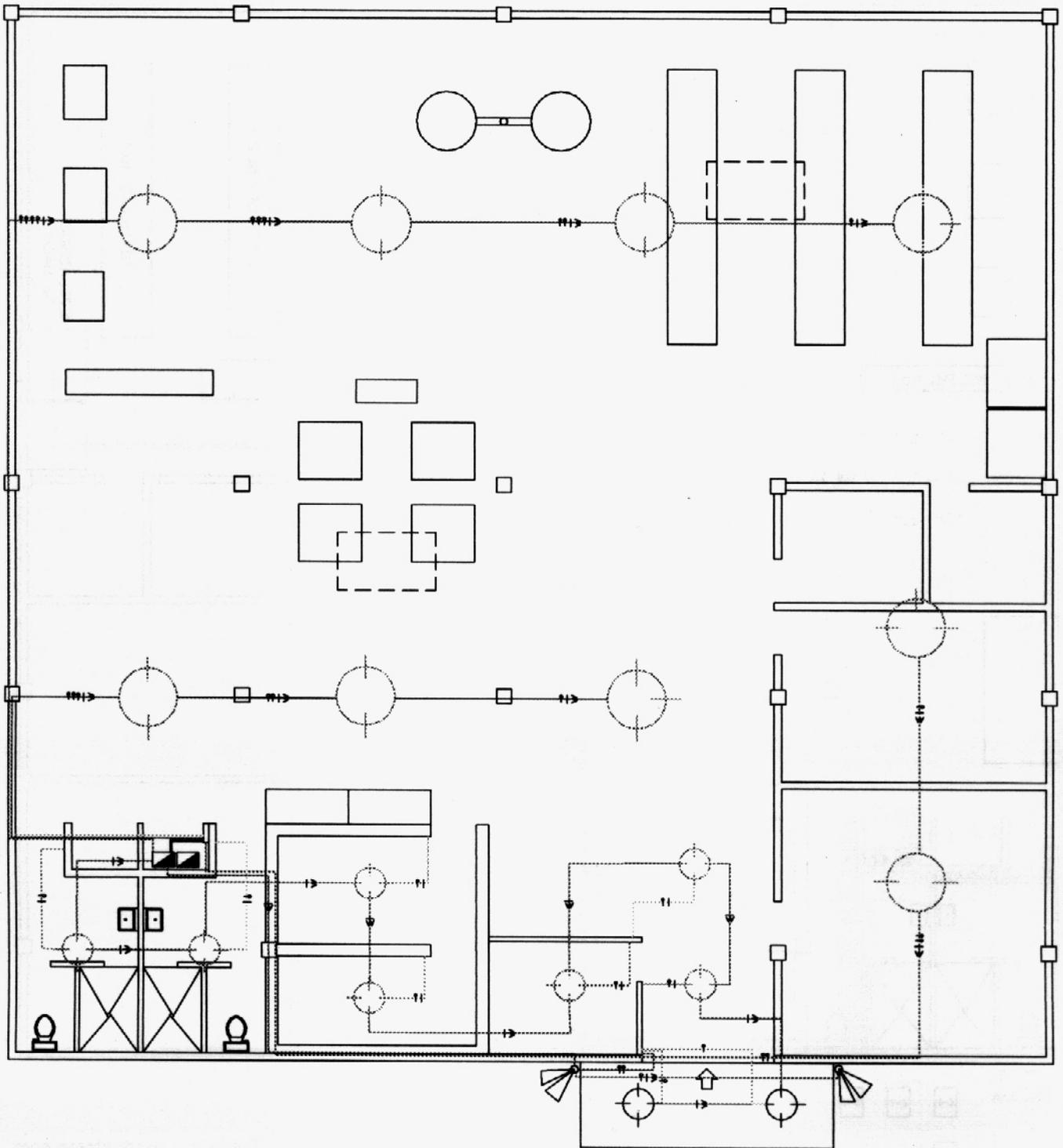


Figura 7 - Diagrama de Iluminacion



### **3. GUIA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA COCINA INDUSTRIAL**

El equipo eléctrico se debe seleccionar e instalar atendiendo a ciertos aspectos, como lo son la seguridad y confiabilidad. Para mantener estas características debe establecerse un programa de mantenimiento, de acuerdo a las necesidades de cada equipo. Algunos elementos requieren atención diaria, otros, semanal y otros pueden ser revisados con menos frecuencia.

Un programa de mantenimiento debe ser incorporado en el diseño eléctrico de la instalación, por lo que también se deben cumplir ciertos requerimientos necesarios para la implementación del mismo, como lo son el espacio para trabajar en los equipos, acceso fácil para la inspección, facilidad para el muestreo y las pruebas necesarias, así como una fuente de energía alterna si la instalación no puede quedarse desenergizada. El programa de mantenimiento debe cumplir los siguientes objetivos:

- Limpieza

La suciedad y la acumulación de polvo afectan la ventilación del equipo, lo que causa un exceso de calor en los mismos reduciendo la vida útil del aislamiento. La superficie de los equipos debe ser limpiada regularmente para minimizar los daños que puedan ocurrir a causa del polvo y la suciedad.

- Control de humedad

La humedad es responsable de reducir la resistencia dieléctrica en varios materiales aislantes, por lo que se recomienda reducir al mínimo las posibles entradas de humedad a los equipos. Incluso en lugares cerrados y para equipos bien sellados, la condensación producida por los cambios de temperatura debe reducirse al mínimo aplicando una fuente de calor, de tal manera que no existan cambios de temperatura y así evitar fallas del aislante y daño en los equipos.

- Ventilación adecuada

Algunos equipos están diseñados con vías de acceso para ventilación, que permiten disipar el calor en algunas superficies aislantes. El cambio de filtros, la revisión de los ventiladores y la limpieza del equipo debe hacerse regularmente para mantener en buenas condiciones el sistema de ventilación.

- Reducir la corrosión

La corrosión afecta la integridad del gabinete de los equipos, reduciendo su vida útil, por lo que al observar un punto de corrosión se deben tomar las medidas adecuadas para evitar que se continúe su deterioro y posible daño permanente.

- Mantenimiento de conductores

La superficie de los conductores revela problemas causados por sobrecalentamiento, daño en el recubrimiento, o falta de uniformidad en las superficies de contacto; se recomienda apretar las conexiones periódicamente para evitar que se suelten y puedan ocasionar daños a los equipos y a las personas alrededor. Las condiciones mencionadas deben

corregirse mediante el uso del equipo adecuado de protección, regulando los ciclos de operación y cualquier otra acción que resulte necesaria.

- Registro de información

Un control adecuado de las inspecciones y mantenimientos realizados, pruebas y reparaciones sirve de base para prevenir y corregir fallas futuras así como de criterio para la selección futura de equipos.

### **3.1. Mantenimiento mediante órdenes de trabajo**

Actualmente se está llevando a cabo el proceso de implementación de un tipo de mantenimiento preventivo en la empresa, por medio de actividades programadas dentro de órdenes de trabajo; este tipo de mantenimiento consiste en planificar las actividades que se le van a asignar a cada trabajador y se le entrega una orden de trabajo para cada una de las tareas que va a realizar. Cada tarea incluye las actividades específicas que deben realizarse dentro de la misma.

Al utilizar un programa de mantenimiento por medio de órdenes de trabajo se puede planificar desde el inicio de la época de no zafra la fecha en que se va a trabajar el mantenimiento de la cocina industrial, de tal manera que para esta fecha se puedan tener en bodega los repuestos y el material necesario para la realización de las actividades dentro del mantenimiento, así como también se puede llevar un mejor control de la mano de obra asignada a estas tareas.

Con lo anterior se pretende optimizar los recursos y minimizar el tiempo empleado dentro de la reparación.

### **3.1.1. Mantenimiento para las instalaciones de iluminación**

Los objetivos principales del mantenimiento en la iluminación de las instalaciones de la cocina industrial es aumentar el rendimiento de cada luminaria, disminuir las pérdidas al mínimo, y aumentar así el nivel lumínico.

Los factores de bajo rendimiento en la iluminación provocan cerca del 90% de pérdidas en el sistema de alumbrado, por lo que se deben de tomar en cuenta a la hora de planificar una determinada tarea de mantenimiento. Estos factores se listan a continuación: acumulaciones de suciedad y polvo, envejecimiento de las lámparas, focos, balastros, bases, etc., bajos voltajes, difusores quebrados, sucios, colores de reflexión de cielo, paredes, piso, ventanales, superficies de escritorios, maquinaria y fallas en general.

Dentro del programa de mantenimiento se deben contemplar las siguientes actividades: cambio de lámparas fundidas o agotadas, la limpieza de las lámparas y los difusores de las mismas, las luminancias de las paredes y techo. La finalidad es que se mantenga una correcta distribución de la iluminación en el lugar y un prolongado tiempo de vida de los equipos.

### **3.1.2. Mantenimiento para la instalación eléctrica**

Es de vital importancia que toda instalación eléctrica cuente con un mantenimiento preventivo, en el cual se le dé una lubricación y limpieza a las partes móviles de los dispositivos instalados para evitar falsos contactos y que se deterioren los dispositivos que se encuentran en la instalación. Las mediciones necesarias que se utilizarán para esta tarea son medir el voltaje y la corriente de cada equipo que esté funcionando en la instalación, así como

revisar que no tenga ningún contacto a tierra. Se puede medir además la frecuencia, así como el factor de potencia.

### **3.1.3. Mantenimiento del transformador**

El transformador de la instalación es del tipo seco; como todos los equipos, este tipo de transformadores requieren de un mantenimiento adecuado para garantizar una operación favorable. Es por eso que deben programarse inspecciones periódicas al mismo, de tal manera que realizando las acciones preventivas o correctivas necesarias se pueda asegurar una buena operación del transformador.

El ambiente en el que se encuentra instalado el transformador va a determinar la frecuencia con que deben hacerse las inspecciones al transformador; bajo condiciones favorables de limpieza y en ambientes secos, una revisión anual o poco frecuente es suficiente, sin embargo, bajo condiciones severas es necesaria una revisión mas frecuente.

Con el transformador desenergizado se procede a descubrirlo y a realizar una inspección buscando acumulaciones de polvo en las superficies aislantes o en espacios que dificulten la libre circulación de aire hacia los devanados; deben buscarse conexiones sueltas, evidencias de sobrecalentamiento, corrosión, oxido y deterioro de la cubierta para tomar las acciones correctivas necesarias.

Los efectos de la humedad son observables solamente cuando el transformador se pone fuera de servicio y se deja enfriar a la temperatura ambiente. En este caso se le colocan al transformador fuentes de calor que lo mantengan a una temperatura superior a la temperatura ambiente y así evitar la

posibilidad de condensación con la consiguiente absorción de humedad por parte de los devanados y aislamientos. Es importante revisar que el transformador no presente signos de humedad cuando se vaya a poner nuevamente en operación.

### **3.2. Visitas programadas**

Las visitas equivalen a inspecciones o verificaciones que se realizan periódicamente en las máquinas o instalaciones para comprobar su estado, detectar posibles focos de averías o seguir la evolución de las anomalías aparecidas para corregirlas antes de que degeneren en avería; con una programación adecuada, se consigue no afectar las operaciones que se realicen dentro de las instalaciones de la cocina.

## **4. ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO Y SU INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE**

### **4.1. Torre de enfriamiento**

Una torre de enfriamiento o torre de refrigeración es un dispositivo utilizado para disminuir la temperatura del agua caliente que proviene de un circuito de enfriamiento mediante la transferencia de calor y materia con el aire que circula por el interior de la torre.

El siguiente estudio esta realizado para una torre de enfriamiento de tiro inducido y de tipo contracorriente, con una capacidad de 25,000 GPM, la cual se utiliza para la unidad de condensación del turbogenerador de 25 MW, y para el agua de enfriamiento de los turbogeneradores del área de cogeneración en el ingenio.

#### **4.1.1. Descripción de operación de la torre**

La torre de enfriamiento recibe agua a una temperatura elevada y produce la evaporación de una parte de la misma, devolviendo el resto del agua enfriada al circuito. El principio físico en el que se basa se denomina enfriamiento evaporativo, que se logra al pasar una corriente de aire por una región donde se pulveriza agua, donde debido a la baja humedad relativa, parte de la corriente de agua líquida se evapora. Con el fin de conseguir la evaporación, se crea una

fuerte corriente de aire mediante el empleo de ventiladores; esta corriente de aire se dirige en dirección contraria a la del agua

El agua entra siempre por la parte superior y es distribuida de tal forma que establezca el mejor contacto posible con el aire atmosférico que asciende procedente de la parte inferior de la torre. Para lograr este efecto el agua se reparte uniformemente, con ayuda generalmente de unos pulverizadores, sobre un arreglo de láminas que aumenta el tiempo y la superficie de contacto entre ambos fluidos; este contacto conduce a una pequeña evaporación de parte del agua. En la figura 8 se puede observar la operación de la torre de enfriamiento.

Una vez establecido el contacto entre el agua y el aire, tiene lugar una cesión de calor del agua hacia el aire. Ésta se produce debido a dos mecanismos: la transmisión de calor por convección y la transferencia de capor desde el agua al aire por conducción, con el consiguiente enfriamiento del agua debido a la evaporación. En la transmisión de calor por convección, se produce un flujo de calor en dirección al aire que rodea el agua a causa de la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos. En la transmisión de calor por conducción, el agua caliente y el aire seco intercambian calor al entrar en contacto y como resultado se evapora una porción del agua debido a la diferencia de presiones.

Con el fin de evitar que se produzcan pérdidas de agua al arrastrarse gran cantidad de gotas por la corriente de aire, se emplea un dispositivo denominado separador de gotas, situado a la salida de la corriente de aire. En la parte inferior se sitúa, como es lógico, una bandeja cuya misión es la de recoger todo el agua que cae, una vez enfriada. En la bandeja se encuentra instalado un sensor de nivel, con el que se regula el nivel del agua, de tal forma que permite

la entrada de agua de renovación a medida que se producen pérdidas en el circuito.

Como ya se mencionó, la torre es de tiro inducido y de flujo a contracorriente. El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del arreglo de láminas, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto. La ventaja que tiene este tipo de torre es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento. Se observa en la figura 8 que el aire entra a través de más de una de las paredes de la torre, con lo que se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire. Sin embargo, la elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista el riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática y en un aumento de la potencia de ventilación.

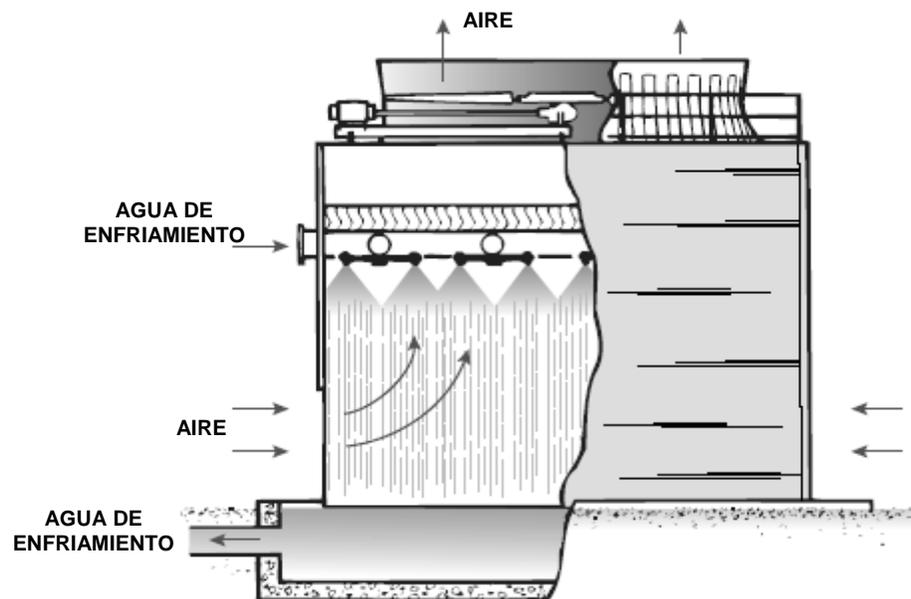
#### **4.1.2. Función dentro del proceso**

La torre de enfriamiento opera dentro del ciclo del condensador, el cual se utiliza para reducir la contrapresión de las turbinas a fin de extraer la máxima energía térmica del vapor, además de recuperar el condensado con bajo contenido de minerales para agua de alimentación de la caldera a su temperatura total.

En el condensador, el vapor entra por la parte superior, se condensa cuando se hace contacto con los diversos tubos fríos y cae al pozo caliente en el fondo del casco, como condensado, el cual retorna al sistema de alimentación para volverse a usar.

El agua de enfriamiento circula a lo largo de los tubos, por medio de una bomba centrífuga de gran caudal. Las superficies de los tubos que están más frías que el vapor, hacen que este se condense, se reduzca su volumen y se produzca un vacío. La torre de enfriamiento se encarga de mantener un flujo de agua fría constante y limpia, que permite una mejor operación del condensador, y una mejor eficiencia en la generación de energía eléctrica.

**Figura 8 – Diagrama de operación de la torre de enfriamiento**



Fuente: Cooling tower basic theory and practice  
<http://www.marleyct.com/publications.asp>

#### **4.1.3. Tratamiento del agua**

En el ciclo de enfriamiento se extrae el calor del agua de proceso para su reutilización, sin embargo, una parte la misma se evapora al ambiente lo que hace necesario que este líquido perdido se reemplace continuamente. En este proceso, es posible que el agua que se inyecta contenga sólidos en suspensión,

que si se añaden a los del agua de la torre y a los que puedan provenir del ambiente, pueden ocasionar incrustaciones en el material, que son dañinos para la estructura. Para eliminar estos sólidos se mantiene constantemente una purga del agua en la torre a través de una compuerta de desfogue; el agua perdida se repone con agua de pozo para mantener el nivel en el sistema.

El mantenimiento de la eficiencia del sistema de enfriamiento es de vital importancia para garantizar la correcta operación del condensador; el elemento fundamental de este sistema es el agua, la cual es susceptible a ser afectada por la formación de algas, las bacterias, sólidos en suspensión, etc.

Frente a estas formaciones, el agua recibe tratamiento mediante la adición de cloro y biocida, los cuales sirven para desinfectar el agua, evitando que se formen bacterias y algas. Además, se le adiciona tratamiento anticorrosivo para evitar el desgaste de la tubería y los elementos metálicos que están en contacto con el agua; el antiincrustante se le añade para evitar la formación de capas de material en la estructura las cuales tienen un efecto dañino sobre la misma.

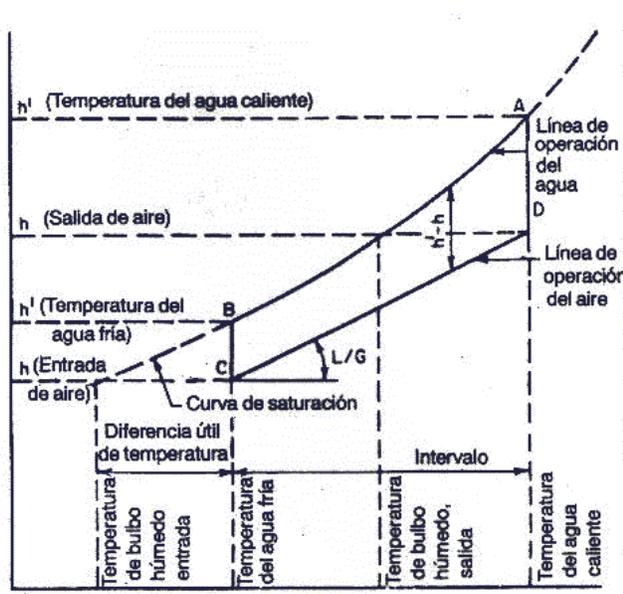
#### **4.1.4. Transferencia de calor**

La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento, es la que desarrolló Merkel. Este análisis se basa en la diferencia del potencial de entalpía como fuerza impulsora.

Se supone que cada partícula de agua esta rodeada por una película de aire y que la diferencia de entalpía entre la misma y el aire circundante proporciona la fuerza impulsora para el proceso de enfriamiento.

En la figura 9 se ilustran las relaciones del agua y el aire y el potencial impulsor que existe en una torre de flujo a contracorriente, en donde el aire fluye en sentido paralelo, pero siguiendo una dirección opuesta al flujo del agua

**Figura 9 – Diagrama de enfriamiento**



Fuente: Ernesto Delgado Ch. **Torres de enfriamiento**  
<http://www.monografias.com/trabajos10/toen/toen.html>

La línea de operación del agua esta representada por la línea AB y se especifica por medio de las temperaturas del agua de la torre en la entrada y salida. La línea de operación del aire principia en C, verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de entrada de bulbo húmedo. La línea BC, representa la fuerza impulsora inicial ( $h' - h$ ). El aire que sale de la torre se representa por medio del punto D y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada de la línea CD sobre la escala de temperaturas.

Las temperaturas de bulbo húmedo representan la temperatura del aire al contacto con el agua a la entrada y salida de la torre de enfriamiento.

Despreciando cualquier cantidad de intercambio de calor que pueda darse en las paredes de la torre, la ganancia de calor en el aire debe ser igual a la pérdida de calor en el agua. Dentro de la corriente de aire, la tasa en la ganancia de calor esta dada por la siguiente expresión  $G (h_2 - h_1)$ , de manera similar, dentro de la corriente de agua, la tasa de pérdida de calor es  $L (t_1 - t_2)$ .

Entonces, en función de las dos expresiones anteriores, al establecer el balance de calor dentro de la torre de enfriamiento, este quedaría de la siguiente manera:

$$G(h_2 - h_1) = L(t_1 - t_2)$$

donde:

$h_1$  = Entalpía del aire de entrada, Btu/lb aire seco

$h_2$  = Entalpía del aire de salida, Btu/lb aire seco

$t_1$  = Temperatura de agua caliente que entra a la torre, °F

$t_2$  = Temperatura de agua fría que sale de la torre, °F

$G$  = Flujo de aire seco, en lb/min.

$L$  = Flujo de agua, en lb/min.

Sin embargo, debido al proceso de evaporación que se da dentro de la torre, el flujo de agua que sale de esta es menor que el flujo que entra, y un adecuado balance de calor debe explicar esta leve diferencia. Como la tasa de evaporación debe ser igual a la tasa de cambio en la humedad de la corriente de aire, la tasa de calor perdido representada por este cambio en la humedad puede ser expresada como

$$G(H_2 - H_1)(t_2 - 32)$$

donde:

$H_2$  = Cociente de la humedad del aire entrante, lb vapor/lb aire seco

$H_1$  = Cociente de la humedad del aire saliente, lb vapor/lb aire seco

Esta expresión representa el calor requerido para elevar la temperatura del líquido evaporado de la base (32°F) a la temperatura del agua fría.

Incluyendo esta pérdida de calor durante la evaporación, se puede expresar el balance total de calor entre el aire y el agua como una ecuación diferencial

$$Gdh = Ldt + GdH (t_2 - 32)$$

## **4.2. Ciclo Rankine que opera con el turbogenerador de 25 MW**

### **4.2.1. Características de operación**

La generación de energía eléctrica se realiza por medio de un generador eléctrico de corriente alterna, cuyo rotor va acoplado a una turbina de vapor que lo hace girar. En esta configuración la energía mecánica es producida en una turbina mediante la expansión de vapor de alta presión generado en una caldera convencional.

La forma en que se hace girar el rotor de la turbina es por medio de alabes montados al rotor y que al chocar con el flujo de vapor se ponen en movimiento transformándose así la energía cinética del vapor en energía mecánica, que será convertida en energía eléctrica en el generador. A su paso por los alabes

de la turbina, el vapor va perdiendo presión hasta llegar a la última etapa, pasa al escape y va al condensador donde se condensa debido al contacto con la tubería adentro de la cual está circulando agua fría.

Al condensarse el vapor se produce una presión de vacío que hace más eficiente el trabajo de la turbina, pues a la vez que evita la contrapresión permite que el vapor transformado en condensado sea alimentado de nuevo a la caldera para iniciar de nuevo el ciclo.

Generalmente, las plantas generadoras de potencia con vapor emplean el ciclo Rankine. Este ciclo se concibe como un recurso para emplear las características del agua, como fluido de trabajo y manejar el cambio de fase entre líquido y vapor.

Realizando algunas modificaciones al ciclo Rankine simple se puede lograr un mejor aprovechamiento del vapor y por consiguiente, aumentar su eficiencia. Una forma consiste en sobrecalentar el vapor que sale de la caldera, mediante la circulación del vapor por tubos expuestos a los gases de combustión calientes o alguna otra fuente con una temperatura superior a la temperatura de saturación de la caldera, por consiguiente, el vapor que entra a la turbina tiene una entalpía superior a la del ciclo de Rankine simple.

El sobrecalentamiento del vapor que sale de la caldera tiene el efecto de elevar la calidad a la salida de la turbina hasta un valor superior al del caso de un ciclo con vapor saturado.

Una parte del vapor de la turbina se extrae a presiones diferentes en uno o más sitios de diversas etapas de la tubería y se pasa por uno o más

calentadores del agua de alimentación. Esto se realiza para precalentar el agua de entrada a la caldera logrando mejorar la temperatura media termodinámica en la calefacción de la misma. Además, si se emplease todo el vapor, la calidad de la mezcla vapor-liquido que sale de la turbina y se condensa reducirá considerablemente, lo cual es un efecto indeseable.

#### **4.2.2. Descripción de los componentes**

##### **4.2.2.1. Caldera**

La caldera es del tipo Bigelow con una capacidad de 260,000 lbs/hr de generación de vapor. Opera a una presión de 850 psi, con una temperatura de 900 °F.

La superficie calefactora esta formada principalmente por la superficie de caldeo por radiación que constituyen las cuatro paredes del hogar.

La caldera esta constituida principalmente por domos, el inferior, se le llama recipiente de lodos, es soportado a la caldera exclusivamente por los tubos curvos que están conectados al domo superior.

En el domo superior están montados los separadores de vapor y deflectores, los cuales separan las partículas de agua y el vapor, de la mezcla de ambos elementos que desde los tubos de evaporación llega al domo y sale al colector del sobrecalentador.

El suministro del agua de alimentación está en el mismo domo, la cual se reparte proporcionalmente a lo largo de él, por medio de una tubería que tiene unos orificios para la salida del agua se encuentra en la posición mas baja del nivel normal de agua de la caldera, con el fin de calentar de antemano el agua de alimentación, antes de hacer contacto con la superficie del domo.

La caldera tiene instalado un equipo de combustión, de tal manera que puede quemar opcionalmente bagazo, diesel o bunker. La combinación de estos combustibles puede utilizarse para el servicio, pero bajo ciertas condiciones.

El suministro del aire para la combustión es a través de un ventilador de tiro forzado, que generalmente lo toma de la atmósfera y lo suministra en cantidades apropiadas según sea la relación, ya que varía ampliamente de acuerdo con los componentes del combustible y el poder calorífico. Sin embargo, la cantidad de oxígeno o aire necesario para producir una libra de vapor, es aproximadamente la misma para un mismo tipo de combustible.

La extracción de gases de combustión se hace por medio de dos ventiladores de tiro inducido y esta en función de la presión del hogar, la cual no varia en cualquier condición de carga manteniéndose una presión de columna estática de 2.5 " H<sub>2</sub>O.

#### **4.2.2.1.1. Bombas de agua de alimentación**

La caldera cuenta con tres bombas centrifugas de alimentación de agua con la capacidad suficiente para soportar la producción máxima de vapor y las

perdidas dada la gran diversidad de intercambiadores de calor que existen en la cabeza dinámica total.

Una de las bombas posee el tipo de lubricación hidrostática, controlada con medidores de nivel; las dos restantes cuentan con un sistema de auto lubricación, ya que en el eje esta instalada una bomba de engranajes.

#### **4.2.2.2. Turbina de vapor**

Una turbina de vapor es una maquina que convierte la energía cinética lineal de un flujo de vapor a alta presión en movimiento rotacional transformándolo en trabajo útil mecánico.

Una turbina proporciona un flujo suave e ininterrumpido de potencia para altas velocidades de rotación, y proporciona un mejor uso de la energía calorífica en el vapor puesto que el metal de la turbina puede soportar la alta temperatura del vapor y descargar a una presión muy baja, lo que la incluye dentro de las turbinas de condensación.

La turbina es de 25,000 kW de potencia, es de tipo axial y gira a una velocidad de 3,600 RPM. Su presión de operación es de 850 psi a una temperatura de 900 °F.

Cuenta con toberas estacionarias que están situadas a la salida de la caja de vapor y teniendo tal forma que permiten que el vapor se expande y alcance velocidades relativamente altas, por lo que esta velocidad es

aprovechada para producir un movimiento a los alabes del rotor, absorbiendo así toda la energía cinética que lleva el flujo de vapor al salir de las toberas.

#### **4.2.2.3. Calentadores agua de alimentación**

En el circuito del agua de alimentación se encuentran operando los siguientes equipos:

Intercambiadores de calor cerrados del tipo de carcaza y tubos; son calentadores de baja presión, montados horizontalmente en cascada y cuyo drenaje esta directamente conectado al condensador, el control se hace por medio de una válvula de acción automática, al aprovechar la diferencia de presiones.

Calentador abierto de contacto directo, que se calienta con una purga de la turbina, se utiliza como desaireador o desgasificador. El repuesto del agua al ciclo es controlado por el nivel del pozo caliente del condensador. El derrame por alto nivel descarga al tanque de agua de repuesto.

Calentadores de alta presión, del mismo tipo de los calentadores de baja presión, con montaje horizontal y sus drenes están conectados directamente al desaireador. Estos además envían el agua caliente al domo de la caldera.

#### **4.2.2.4. Condensador**

El condensador que se utiliza en la central térmica es del tipo de tubos y carcaza. Esta compuesto por una carcaza tubular de gran diámetro. El interior

de la carcaza tiene un gran haz de tubos por el interior de los cuales circula agua de refrigeración. El vapor entra por el exterior de la carcaza y rodea el haz de tubos. Como los tubos están más fríos que el vapor, este condensa. Las gotas de condensado que se forman en los tubos van cayendo al fondo de la carcaza. Allí se recolectan en un recipiente que recibe el nombre de “pozo caliente”.

Como la temperatura de condensación es muy inferior a 200 °F y suele estar muy cercana a la temperatura ambiente, la presión dentro del condensador está por debajo de la presión atmosférica y típicamente está por debajo de los 2.95” Hg absolutos. Esto hace que la máquina que opera entre la caldera y el condensador disponga de un mayor salto de presión utilizable.

El objetivo del condensador es bajar la presión contra la cual descarga la turbina. Esto permite mejorar el rendimiento del ciclo, pues aumenta la diferencia de presiones entre las cuales opera la máquina. Para que esto se logre, el agua de refrigeración que circula por el condensador debe mantener una temperatura fría constante, de tal manera que el vacío que se forma en el condensador se mantenga a una presión de 27” Hg. El condensado con bajo contenido de minerales que se forma se utiliza como agua de alimentación de la caldera.

El condensador esta dividido en dos partes, lo que permite que pueda trabajar con la mitad de su capacidad total, pudiéndose así realizar el mantenimiento por partes sin necesidad de interrumpir la generación de energía eléctrica. Tiene además un sistema de retrolavado que permite su limpieza en caso quedaran partículas sólidas en la tubería.

Tiene una superficie de condensación de 30,000 pie<sup>2</sup> para una capacidad de 190, 000,000 BTU/h y un condensado de 200,000 lb/h.

#### **4.2.2.4.1. Torre de enfriamiento**

La torre de enfriamiento recibe agua a una temperatura elevada y produce la evaporación de una parte de la misma, devolviendo el resto del agua ya enfriada al circuito de refrigeración del condensador. Este dispositivo permite mantener un flujo constante de agua fría dentro del condensador, y así mantener las condiciones necesarias para una correcta operación del mismo y por consiguiente un aumento en la eficiencia del ciclo de vapor.

La torre de enfriamiento es de la marca Marley, esta diseñada para una capacidad de recirculación de 25,000 GPM de agua, a un diferencial de temperatura de aproximadamente 20 °F.

#### **4.2.2.5. Bombas de condensado**

Estas bombas son del tipo centrifugas de capacidad total, la que esta determinada por el flujo en el condensador, y se encargan de enviar el agua que se almacena en el tanque del condensador hacia los calentadores de baja y llegar al desaireador, donde las bombas de alimentación recibirán el fluido que se llevara a la caldera.

### **4.2.3. Eficiencia del ciclo Rankine**

Al llevar a cabo la prueba de comportamiento del sistema es indispensable seguir ciertas normas antes de empezar la misma, con el fin de que los resultados sean lo más exactos que se puedan.

Inicialmente se necesita hacer un estudio de la instalación, para poder conocer los equipos y ubicar donde están colocados los instrumentos de medición.

Se traza un diagrama de flujos de la instalación, en donde se van a establecer los puntos en los que es necesario conocer las condiciones de presión y/o temperatura, para encontrar los valores de entalpía, entropía y volumen específico.

Es necesario que todos los instrumentos estén bien calibrados, ya que en el análisis se parte de la suposición de que todas las lecturas tomadas de los instrumentos son reales y reflejan el comportamiento exacto del sistema de vapor.

Para el registro de los datos se va a utilizar un sistema de monitoreo por computadora, de tal manera que se obtenga el promedio de los datos en una determinada cantidad de tiempo y así obtener información mas precisa del sistema.

#### 4.2.3.1. Bases teóricas para la prueba

La ecuación de la energía aplicada a un proceso cíclico estacionario exige que el calor neto que entra (calor suministrado) sea igual al trabajo neto que sale. De ahí que el rendimiento para el sistema este representado por la expresión

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{sum}}}$$

El trabajo neto se representa como la diferencia de trabajo realizado por la turbina a la salida del sistema y por las bombas para circular el condensado de regreso a la caldera. Entonces, el rendimiento para el ciclo Rankine queda representado como

$$\eta = \frac{W_{T,\text{sal}} - W_{B,\text{ent}}}{Q_{\text{sum}}}$$

El trabajo realizado por las bombas esta representado como la diferencia de entalpías del fluido entre la entrada y la salida de la misma,  $h_{\text{sal}} - h_{\text{ent}}$ . Sin embargo, un método alternativo consiste en calcular el trabajo isentrópico de la bomba con la ecuación de trabajo en régimen estacionario, y si se considera que el volumen específico del agua líquida desde el estado de saturación al estado de líquido comprimido en las condiciones dadas tiene una variación menor al 1%, el trabajo de la bomba se determina a menudo con la precisión deseada mediante la relación

$$W_{B,\text{ent}} = v_{f,\text{ent}} (P_{\text{sal}} - P_{\text{ent}})$$

siendo  $v_{f,i}$  el volumen específico del líquido en la entrada del líquido a la bomba.

El trabajo realizado por la turbina de vapor se considera también como una diferencia de entalpías, sin embargo, como a esta se le extraen fracciones del flujo de vapor para calentar el agua de alimentación de la caldera, el trabajo que efectúa deberá considerar también esta condición.

El calor suministrado al sistema por unidad de masa se puede como la diferencia de entalpías a la entrada y salida del generador de vapor, a presión constante.

$$q_{\text{sum}} = h_{\text{sal}} - h_{\text{ent}}$$

Según la Comisión Nacional de la Electricidad en México, la eficiencia térmica del sistema de cogeneración con turbina de vapor, es del 52% como se puede observar en la tabla V. Se observa además que este sistema es además el que ofrece un mayor aprovechamiento del vapor sobre otros sistemas, y por consiguiente, una generación eléctrica mas elevada.

**Tabla V – Eficiencias de diferentes tecnologías de cogeneración**

Tecnología de Cogeneración	Eficiencia Térmica
Turbina de vapor	52 %
Turbina de gas sin post combustión.	47 %
Turbina de gas con post combustión.	42 %
Ciclo combinado	33 %
Motor reciprocante (aprovechando calor de gases de combustión y calor del sistema de enfriamiento)	20 – 30 %
Microturbina	50 %

Fuente: CONAE . **Tecnologías de cogeneración**  
<http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp>

#### 4.2.3.2. Prueba de comportamiento del sistema de vapor

Para el desarrollo de la prueba se obtuvieron los siguientes datos promedio en un reporte efectuado desde el sistema de monitoreo por computadora que maneja la información del comportamiento del ciclo de vapor.

Generación eléctrica	23.5 MWH
Caudal de vapor	232.73 klb/h
Presiones	
Vapor sobrecalentado salida de la caldera	830.34 psia
1ª extracción	291.88 psia
2ª extracción	125.95 psia
3ª extracción	18.32 psia
4ª extracción	6.00 psia
Desaireador	11.75 psia
Bomba de alimentación caldera	941.59 psia
Bomba de condensados	88.69 psia
Atmosférica	29.52 “ Hg
Condensador	-27.39 “Hg
Temperaturas	
Vapor seco salida de la caldera	899.45 °F
Pozo caliente en el condensador	103.2 °F
Desaireador	240.34 °F
Salida agua calentador 1 de alta presión	403.48 °F
Entrada agua calentador 2 de alta presión	244.70 °F
Entrada agua calentador 1 de alta presión	330.72 °F
1ª extracción	752.81 °F
2ª extracción	669.05 °F
3ª extracción	340.18 °F

4ª extracción	205.27 °F
Condensados calentador de baja presión	109.83 °F
Condensados calentador 1 de alta presión	499.78 °F
Condensados calentador 2 de alta presión	283.78 °F
Salida de agua calentador de baja presión	108.80 °F

La presión absoluta en el condensador es igual a la suma de la presión manométrica medida en el condensador y la presión atmosférica medida, por lo que se tiene

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{man}}$$

$$P_{\text{abs}} = 29.52 - 27.39 = 2.13 \text{ "Hg (1.05 psia)}$$

Con los datos que se tomaron a la hora de la prueba en los siguientes puntos se encuentran los valores del volumen específico y la entalpía en las tablas correspondientes al estado del vapor en cada punto.

Punto (1) – Salida de la caldera

$$T = 899.45 \text{ °F}$$

$$P = 830.34 \text{ psia}$$

$$h = 1454.52 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (2) – 1ª extracción

$$T = 752.81 \text{ °F}$$

$$P = 291.88 \text{ psia}$$

$$h = 1396.824 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (3) – 2ª extracción

$$T = 669.05 \text{ °F}$$

$$P = 125.95 \text{ psia}$$

$$h = 1362.449 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (4) – 3ª extracción

$$T = 341.18 \text{ °F}$$

$$P = 18.32 \text{ psia}$$

$$h = 1211.106 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (5) – 4ª extraccion

$$T = 205.27 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$P = 6.0 \text{ psia}$$

$$h = 1150.547 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (6) – Condensador

$$T = 110 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$h_g = 1109.205 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (7) – Agua condensada

$$T = 103.2 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$P = 1.05 \text{ psia}$$

$$v_f = 0.01614 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

Punto (8) – Bomba de condensados

$$T = 103.2 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$P = 88.69 \text{ psia}$$

$$h = 71.461 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (9) – Salida cal. B.P.

$$T = 108.8 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$P = 88.69 \text{ psia}$$

$$h = 77.049 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (10) – Salida del desaireador

$$T = 240.34 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$P = 88.69 \text{ psia}$$

$$h = 208.95 \text{ BTU/lbm}$$

$$v_f = 0.017 \text{ ft}^3/\text{lbm}$$

Punto (11) – Bomba alim. caldera

$$T = 244.7 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$P = 941.59 \text{ psia}$$

$$h = 215.161 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (12) – Salida cal. 2 A.P.

$$T = 330.72 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$P = 941.59 \text{ psia}$$

$$h = 303.005 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (13) – Salida cal. 1 A.P.

$$T = 403.48 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$P = 941.59 \text{ psia}$$

$$h = 379.625 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (14) – Drenaje cal. 1 A.P.

$$T = 499.78 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$h_f = 379.625 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (16) – Drenaje cal. 2 A.P.

$$T = 283.78 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$h_f = 253.056 \text{ BTU/lbm}$$

Punto (18) – Drenaje cal. B.P.

$$T = 109.83 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$h_f = 78.02 \text{ BTU/lbm}$$

#### 4.2.3.2.1. Balance térmico de los calentadores del ciclo

Este balance de calor esta basado en el principio de conservación de la energía el cual postula que la cantidad de calor que se suministra debe ser igual a la cantidad de calor que se aprovecha. De este balance se va a encontrar la fracción de vapor de agua extraída de la turbina en cada una de las purgas.

Calentador 1 de alta presión

$$m_1 h_2 + h_{12} = m_1 h_{14} + h_{13}$$

$$m_1 = \frac{h_{13} - h_{12}}{h_2 - h_{14}} = \frac{379.625 - 303.005}{1396.824 - 487.7}$$

$$m_1 = 0.084$$

Calentador 2 de alta presión

$$m_2 h_3 + m_1 h_{15} + h_{11} = (m_1 + m_2) h_{16} + h_{12}$$

$$m_2 = \frac{m_1 (h_{16} - h_{15}) + (h_{12} - h_{11})}{h_3 - h_{16}} = \frac{0.084(253.056 - 487.7) + (303.005 - 215.161)}{1362.449 - 253.056}$$

$$m_2 = 0.061$$

Desaireador

$$m_3 h_4 + (m_1 + m_2) h_{17} + (1 - m_1 - m_2 - m_3) h_9 = h_{10}$$

$$m_3 = \frac{(m_1 + m_2)(h_9 - h_{17}) + (h_{10} - h_9)}{h_4 - h_9} = \frac{(0.084 + 0.061)(77.049 - 253.056) + (208.953 - 77.049)}{1211.106 - 77.049}$$

$$m_3 = 0.094$$

### Calentador de baja presión

$$m_4 h_5 + (1 - m_1 - m_2 - m_3) h_8 = m_4 h_{18} + (1 - m_1 - m_2 - m_3) h_9$$

$$m_4 = \frac{(1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_9 - h_8)}{h_5 - h_{18}} = \frac{(1 - 0.084 - 0.061 - 0.094)(77.049 - 71.462)}{1150.547 - 78.02}$$

$$m_4 = 0.004$$

### 45.2.3.2.2. Rendimiento térmico del ciclo

Como se mencionó anteriormente, el rendimiento térmico está dado como la razón entre el trabajo neto efectuado y el calor suministrado del ciclo.

El trabajo interno de la turbina está dado por el flujo de vapor que sale de cada extracción multiplicado por la diferencia de entalpías entre la entrada y la salida de la extracción, y por la eficiencia adiabática de la misma.

$$w_T = 1(h_1 - h_2) + (1 - m_1)(h_1 - h_3) + (1 - m_1 - m_2)(h_1 - h_4) + (1 - m_1 - m_2 - m_3)(h_1 - h_5) + (1 - m_1 - m_2 - m_3 - m_4)(h_5 - h_6)$$

$$w_T = 1(1454.528 - 1396.824) + (1 - 0.084)(1454.528 - 1362.449) + (1 - 0.084 - 0.061)(1454.528 - 1211.106) + (1 - 0.084 - 0.061 - 0.094)(1454.528 - 1150.547) + (1 - 0.084 - 0.061 - 0.094 - 0.004)(1150.547 - 1109.205)$$

$$w_T = 612.841 \text{ BTU/lbm}$$

$$w_{TC} = \eta_T w_T = 0.824 \times 612.841$$

$$w_{TC} = 504.981 \text{ BTU/lbm}$$

Se calcula ahora el trabajo realizado por las bombas; el valor calculado se debe dividir entre la eficiencia de las bombas pues en la realidad el trabajo realizado por la bomba no es un proceso adiabático

Bomba de condensados

$$w_B = \frac{v_7(P_8 - P_7)}{\eta_B} = \frac{0.016(88.69 - 1.05)}{0.80}$$

$$w_B = 1.75 \text{ BTU/lbm}$$

Bombas de alimentación calderas

$$w_B = \frac{v_{10}(P_{11} - P_{10})}{\eta_B} = \frac{0.017(941.59 - 88.69)}{0.8}$$

$$w_B = 18.124 \text{ BTU/lbm}$$

El calor suministrado por el generador de vapor esta dado como la diferencia de la entalpía a la entrada y la salida, multiplicada por la eficiencia de la misma.

$$q_{\text{sum}} = \eta_c(h_1 - h_{13}) = 0.8514(1454.528 - 379.625)$$

$$q_{\text{sum}} = 915.172 \text{ BTU/lbm}$$

El rendimiento térmico de el sistema de vapor será igual a

$$\eta_t = \frac{w_{\text{neto}}}{q_{\text{sum}}} = \frac{w_T - (w_{BC} + w_{BAC})}{q_{\text{sum}}}$$

$$\eta_t = \frac{504.98 - (1.75 + 18.124)}{915.172}$$

$$\eta_t = 0.53$$

#### 4.2.3.2.3. Razón de vapor por kilovatio

Esta dado por la cantidad de kilovatios que se generan por cada libra de vapor que se produce en la caldera. Para este desarrollo, la cantidad de trabajo que realiza la turbina es

$$w = h_{\text{ent}} - h_{\text{sal}} = 1454.528 - 1109.205$$

$$w = 345.323 \text{ BTU/lbm}$$

Energía producida por la turbina esta dada por

$$U_T = w \times \phi_{\text{vap}} = 345.323 \times 232.75 \times 10^3$$

$$U_T = 80.37 \times 10^6 \text{ BTU/h}$$

En función de la energía producida por la turbina se puede calcular la energía eléctrica en el generador, según la relación  $1\text{kW} = 3412 \text{ BTU}$

Por lo tanto, la energía eléctrica producida en el generador es igual a

$$U_{\text{EG}} = U_T / 3412 = 80.37 \times 10^6 / 3412 = 23555.1 \text{ kW/h}$$

Entonces, la razón de vapor por kilovatio generado va a estar dada como el cociente entre el flujo de vapor que se expansiona en la turbina y la energía eléctrica que se produce con esta cantidad de vapor.

$$RV = \frac{\phi_{\text{vap}}}{E.E_G} = \frac{232.75 \times 10^3}{23555.1} = 9.88 \text{ lb}_{\text{vap}} / \text{kW}$$



## CONCLUSIONES

1. El diseño de la instalación eléctrica para la cocina industrial cumple con las necesidades de seguridad, orden y limpieza que se trabajan dentro de la empresa. De esta manera se puede asegurar que el sistema es confiable, seguro para el personal que labora en el lugar, flexible para las ampliaciones y accesible para el mantenimiento.
2. Los cálculos realizados se hicieron siguiendo las recomendaciones hechas por las normas correspondientes a este tipo de instalaciones eléctricas, lo que permitió hacer una correcta selección de los dispositivos de protección y conductores eléctricos que se instalaron, para que trabajen correctamente y se pueda prolongar la vida de la instalación.
3. El mantenimiento eléctrico para las instalaciones de la cocina industrial incluye los aspectos necesarios para que se mantenga el buen funcionamiento de los equipos y se pueda prolongar el tiempo de vida útil de los mismos y en general de todos los elementos que conforman la instalación eléctrica.
4. Con base en el análisis termodinámico efectuado sobre el ciclo regenerativo de la unidad de 25 MW, se pudo determinar que el rendimiento térmico del ciclo es del 53%, valor por encima del publicado por la CONAE (52%), lo que indica que el sistema convierte correctamente la energía del vapor en energía mecánica para la generación de energía eléctrica.

5. La razón de libras de vapor consumidas por kilovatio generado disminuye con la operación de la torre de enfriamiento operando dentro del proceso, de un valor estimado de 10.8 a 9.88, que sugiere un aumento en la eficiencia del ciclo comparada con la operación anterior, donde se utilizaba agua de enfriamiento proveniente del río Guacalate para la recirculación dentro del condensador.
6. La correcta operación de la torre de enfriamiento genera grandes beneficios al proceso, como lo es un menor consumo de combustible en la caldera, una mejor operación del condensador y de la turbina, y un mayor aprovechamiento del vapor generado, que se traduce en el aumento del rendimiento térmico del ciclo.
7. La torre de enfriamiento transfiere al ambiente el calor que extrae del agua de recirculación en el condensador, y envía de regreso agua fría a una temperatura constante. Esto permite que la condensación del vapor se realice a la misma temperatura y se mantenga constante el valor de 27 "Hg de presión de vacío en el condensador.

## RECOMENDACIONES

1. Evaluar los distintos planes de mantenimiento que actualmente se realizan para determinar cuál es el que mejor se adapta a las condiciones de operación y las necesidades de mantenimiento dentro de la cocina industrial.
2. Implementar un plan de mantenimiento para la torre de enfriamiento, que cumpla con los principales requisitos para el sostenimiento de la eficacia del sistema que son el control adecuado de la calidad del agua de circulación y un programa para mantener el equipo limpio y en buenas condiciones.
3. Para estudios más específicos de rendimiento térmico en sistemas de vapor se debe tomar en cuenta las pérdidas tanto en las líneas de vapor y agua, así como en el interior de los equipos que operan dentro de los mismos.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Bratu, Neaugu y Campero Littlewood, Eduardo. **Instalaciones Eléctricas**. 2ª ed. Mexico: Alfaomega, 1992
2. De León Escobar, Gustavo Adolfo. Experiencias en el montaje de un turbogenerador con condensador. Tesis Ing. Mec. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería
3. Enríquez Harper, Gilberto. **Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión**. 2ª ed. México: Editorial Limusa, 2000
4. Figueroa Vásquez, Francisco Arturo. Optimización de la operación de la unidad de 25 megavatios de la central termoeléctrica Santa Ana. Tesis Ing. Mec. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería
5. **General Maintenance**. (Colección Electrical maintenance hints, volumen 1). U.S.A: Westinghouse Electric Corporation Printing Division, 1984
6. **IEEE Recommended practice for electric power distribution for industrial plants. Std. 141-1976** (Colección The IEEE color book series, The IEEE Red Book) s.l: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1976
7. **Industrial Equipment Maintenance**. (Colección Electrical maintenance hints, volumen 2). U.S.A: Westinghouse Electric Corporation Printing Division, 1984
8. Kern, Donald Q. **Procesos de Transferencia de Calor**. Mexico: CECSA, 1987

9. **Reference material, tables, and formulas.** (Colección Electrical maintenance hints, volumen 4). U.S.A: Westinghouse Electric Corporation Printing Division, 1984
  
10. Wark, Kenneth y Richards, Donald E. **Termodinámica.** 6ª ed. España: McGraw-Hill, 2001.
  
11. **SPX Cooling Technologies**  
[www.marleyct.com/publications.asp](http://www.marleyct.com/publications.asp)  
noviembre de 2005 – febrero 2006



A.2.	Sistemas de Vapor	84
A.2.1.	Principios de transferencia de calor	84
A.2.1.1.	Teorías del calor	84
A.2.1.2.	Mecanismos de transferencia de calor	85
A.2.1.2.1.	Conducción	86
A.2.1.2.2.	Radiación	87
A.2.1.2.3.	Convección	87
A.2.2.	Ciclos de potencia de vapor	88
A.2.2.1.	Ciclo de Carnot	89
A.2.2.2.	Ciclo Rankine	90

## **A. MARCO DE REFERENCIA**

### **A.1. Instalaciones eléctricas**

#### **A.1.1. Definición de instalación eléctrica**

Se entiende por instalación eléctrica al conjunto integrado por canalizaciones, estructuras, conductores, accesorios y dispositivos que permiten el suministro de energía eléctrica desde las centrales generadoras hasta el centro de consumo, para alimentar a las máquinas y aparatos que la demanden para su funcionamiento.

Para que una instalación eléctrica sea considerada como segura y eficiente se requiere que los productos empleados en ella estén aprobados por las autoridades competentes, que esté diseñada para las tensiones nominales de operación, que los conductores y sus aislamientos cumplan con lo especificado, que se considere el uso que se dará a la instalación y el tipo de ambiente que se encontrará.

#### **A.1.2. Objetivo de una instalación eléctrica**

Puede decirse que el objetivo fundamental de una instalación eléctrica es el cumplir con los requerimientos planteados durante el proyecto de la misma, tendientes a proporcionar el servicio eficiente que satisfaga la demanda de los aparatos que deberán ser alimentados con energía eléctrica. Para dar apoyo a lo anterior citado tendrán que cumplirse los factores siguientes:

- Seguridad contra accidentes e incendios  
Ya que la presencia de la energía eléctrica significa un riesgo para el humano, se requiere suministrar la máxima seguridad posible para salvaguardar su integridad así como la de los bienes materiales.
  
- Eficiencia y economía  
En este rubro deberá procurarse conciliar lo técnico con lo económico y es donde el proyectista deberá mostrar su ética profesional para no perjudicar al cliente.
  
- Accesibilidad y estética  
Es necesario ubicar adecuadamente cada parte integrante de la instalación eléctrica, sin perder de vista la funcionabilidad y la estética.
  
- Mantenimiento  
Con el fin de que una instalación eléctrica aproveche al máximo su vida útil, resulta indispensable considerar una labor de mantenimiento preventivo adecuado.

### **A.1.3. Elementos que constituyen una instalación eléctrica**

Dentro de una instalación eléctrica es posible encontrar diversos elementos que intervienen en ella, y varían de acuerdo con el tipo de instalación que se pretenda realizar. Por este motivo se presenta solamente una descripción general de los elementos mas comúnmente encontrados en una instalación del tipo industrial.

#### **A.1.3.1. Acometida**

Se entiende por acometida el punto donde se hace la conexión entre la red eléctrica, propiedad de la compañía suministradora, y el alimentador que abastece al usuario.

Generalmente se instalan pararrayos en las terminales de la acometida con el fin de proteger la instalación y el equipo contra ondas de alto voltaje provenientes de descargas atmosféricas y/o maniobras en la red de suministro.

#### **A.1.3.2. Equipo de medición**

Es el equipo que la empresa suministradora instala en la acometida para medir el consumo de energía eléctrica que tiene el usuario, de acuerdo a las especificaciones del contrato de compra-venta. El equipo esta sellado para evitar que agentes externos afecten su funcionamiento y se encuentra colocado en un lugar accesible para su lectura y revisión.

#### **A.1.3.3. Transformador**

El transformador es un dispositivo utilizado para cambiar el nivel de voltaje de suministro al nivel de voltaje requerido. El tipo de transformador se escoge según las necesidades de voltaje y la capacidad instalada que tendrá el proyecto a realizar.

#### **A.1.3.4. Interruptores**

Es un dispositivo diseñado para abrir o cerrar un circuito por el cual circula una corriente, en algunos casos puede cumplir la función de proteger contra sobrecargas y/o cortocircuitos si cuenta con los dispositivos adecuados.

El interruptor debe estar en un lugar de fácil acceso y manipulación para que en caso de una emergencia se pueda desenergizar fácilmente la instalación y equipo, por lo que debe ser capaz de soportar las corrientes de cortocircuito que pudieran ocurrir.

##### **A.1.3.4.1. Interruptor termomagnético**

Es el interruptor más utilizado para desconectar y proteger, contra sobrecargas y cortocircuitos, los circuitos de alimentación en la instalación eléctrica. Tiene un elemento electrodinámico que le permite actuar rápidamente ante la presencia de un cortocircuito; para la protección contra sobrecargas utiliza un elemento térmico bimetálico.

#### **A.1.3.5. Tableros**

Se entiende por tablero un gabinete metálico donde colocan instrumentos, interruptores, arrancadores y/o dispositivos de control; es de estos de donde parten todos los circuitos de la instalación, lo que permite que la misma sea ordenada, segura y confiable.

#### **A.1.3.5.1. Tablero general**

Se colocan inmediatamente después de los transformadores de media/baja tensión, se les conoce como centros de carga. Contienen un interruptor principal de donde se conectan barras que distribuyen la energía a diferentes circuitos a través de interruptores derivados.

Una característica particular de estos tableros son los elevados valores de las corrientes nominales y de corto circuito que pueden soportar, por lo que su estructura debe ser robusta para soportar los requerimientos electrodinámicos y el peso de aparatos de gran tamaño.

#### **A.1.3.5.2. Tableros de distribución o derivados**

Los aparatos alojados en estos tableros son principalmente interruptores automáticos de tamaño estándar y tipo modular, y también pueden tener una amplia gama de otros dispositivos de control, señalización, etc.

Las corrientes nominales y de cortocircuito de los tableros de distribución secundaria son menores que aquellas del tablero principal.

#### **A.1.3.6. Arrancador**

Se utiliza para el arranque y paro de los motores eléctricos, esta compuesto por un interruptor, un contactor electromagnético y un relevador bimetalico.

El contactor consiste básicamente de una bobina con un núcleo de hierro que cierra o abre un juego de contactos al energizar o desenergizar una bobina.

Un arrancador puede tener: botones para restablecer los disparos por sobrecarga; botones para arranque, paro y prueba; luces indicadoras; tablillas de terminales para conectar el motor; unidades de control remoto y otros elementos de control.

#### **A.1.3.7. Centro de control de motores**

Los centros de control de motores están destinados al control y a la protección centralizada de los motores; por lo tanto, comprenden los aparatos relacionados con la operación coordinada de maniobra y protección y aquellos auxiliares de control y señalización. Cada motor tiene asignada una unidad o caja del centro de control, de modo que sea posible intervenir con seguridad sobre una sola unidad de salida, sin cortar la alimentación de otros usuarios.

#### **A.1.3.8. Plantas de emergencia**

Las plantas de emergencia se utilizan para protegerse contra posibles fallos en el suministro de la energía eléctrica, lo que asegura un servicio continuo a la totalidad de la instalación o a una parte vital de la misma, a pesar de las interrupciones que pudieran darse en la red tales como caídas de voltaje, falla en alguna fase o interrupción del servicio.

Las plantas de emergencia constan de un motor de combustión interna acoplado a un generador de corriente alterna. La conexión y desconexión de

este sistema de emergencia se hace a través de interruptores de doble tiro que transfieren la carga de un sistema a otro ya sea de manera automática o manual.

#### **A.1.3.9. Puesta a tierra**

El objetivo de un sistema de tierras en una instalación eléctrica es proporcionar una superficie equipotencial alrededor de la instalación, que tenga un potencial tan uniforme como sea posible y lo más próximo a cero, o al potencial absoluto de tierra, con vistas a asegurar que:

- Todas las partes de los aparatos que se conecten al sistema de tierras estén al potencial de tierra.
- Los operadores y personal de la instalación, estén siempre al potencial de tierra.

#### **A.1.3.10. Simbología**

En la tabla A.1 se presentan algunos de los símbolos más comúnmente usados en los diagramas unifilares de instalaciones eléctricas que facilitan la comunicación entre los instaladores y proyectistas.

#### **A.1.4. Iluminación**

A fin de prefijar la iluminación apropiada para una zona, es necesario en primer lugar analizar la tarea visual a desarrollar y determinar la cantidad y tipo de

**Tabla VI – Simbología Eléctrica**

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
	Tablero de distribución
	Lámparas
	Reflector para intemperie
	Interruptores: simple, doble y triple
	Conductores: línea, neutro y tierra
	Conductores: retorno y puente
	Tubería empotrada en losa o pared
	Tubería empotrada en piso
	Tomacorriente de 120V doble polaridad
	Tomacorriente de 220V

Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.  
Curso Instalaciones Eléctricas

iluminación que proporcione el máximo rendimiento visual y cumpla con las exigencias de seguridad y comodidad de acuerdo a las normas internacionales preestablecidas. El segundo paso consiste en seleccionar el equipo de alumbrado que proporcione la luz requerida de la manera más satisfactoria.

#### **A.1.4.1. Análisis de la tarea visual**

En la tarea visual influyen una serie de factores que nos permiten dar una idea de las necesidades del proyecto, de los que los más importantes son probablemente el acabado de los objetos a iluminar, la naturaleza del material del que están hechos con respecto a la transmisión de luz, el grado del efecto tridimensional y las características de reflexión de los alrededores más inmediatos.

Distintas combinaciones de estos factores pueden dar lugar a una infinita variedad de problemas de alumbrado; la selección del mejor tipo de alumbrado para una situación determinada lleva consigo la consideración de la cantidad de luz, el grado de difusión, la dirección y la calidad espectral. La cantidad adecuada de luz para realizar cómodamente una tarea visual concreta es siempre un requisito fundamental. Algunos tipos de trabajos se llevan a cabo mejor con luz muy difusa, al objeto de eliminar las sombras. Otras admiten una fuerte componente direccional, lo que incluso es preferible en algunos casos en los que deben apreciarse irregularidades de contorno y superficie.

En algunas aplicaciones, las imágenes reflejadas de una fuente de bajo brillo en una zona extensa pueden mejorar la visibilidad, aunque se encuentren en un sitio distinto del banco de trabajo normal.

#### **A.1.4.2. Selección de equipo**

En la práctica, la selección de la fuente y del equipo depende tanto de razones económicas como de la naturaleza de la tarea visual y del contorno. La extensión y la forma de la zona a iluminar, la reflectancia de las paredes, techos y suelos, las horas de funcionamiento anuales, la potencia nominal y otros

factores menos importantes deben tenerse en cuenta al seleccionar el equipo idóneo que habrá de ser económico tanto por su funcionamiento como por su instalación.

#### **A.1.4.3. Ambiente agradable**

La gente realiza mejor sus trabajos en un ambiente en el que está a gusto. Por ello, el proyecto de un buen alumbrado incluye consideraciones que conciernen a todo el contorno. A menudo se puede hacer mucho en este sentido coordinando las combinaciones de colores modelos de luz y el entramado de los interiores con la selección de la fuente de luz y las luminarias.

#### **A.1.4.4. Forma del local**

Al proyectar instalaciones de alumbrado general, es preciso considerar la forma del local para seleccionar una luminaria que tenga la distribución adecuada independientemente de la altura del montaje, las luminarias de distribución ancha son adecuadas para locales anchos con respecto a ella. A no ser que se trate de verticales, las luminarias de iluminación estrecha son recomendables en habitaciones altas y estrechas para dirigir la luz hacia la zona de trabajo mejor que hacia la parte superior de las paredes donde sería menos útil.

La capacidad de una luminaria para dirigir la luz hacia el plano de trabajo en locales de diversas formas puede juzgarse comparando los coeficientes de utilización para las distintas formas de local.

#### **A.1.4.5. Costos de mantenimiento**

En zonas cuyo alumbrado va ser utilizado casi continuamente, el costo inicial es de menos importancia comparado con el de mantenimiento. Así, las fuentes de alta eficacia, como por ejemplo las lámparas de mercurio, con vida larga y alta emisión luminosa, resultan muy interesantes para reducir los consumos y el mantenimiento. Por otra parte, en los casos en que las lámparas se utilizan durante periodos más cortos, el costo inicial es más importante y pueden ser recomendables las lámparas de filamentos a pesar de su eficacia mas baja. La potencia nominal es otra de las consideraciones fundamentales en la economía del alumbrado. Las mayores potencias nominales y unos costos mas elevados del equipo y de las lámparas serán justificables si redundan en un sistema de mayor eficacia y en una reducción de los costos de funcionamiento.

## **A.2. Sistemas de vapor**

### **A.2.1 Principios de transferencia de calor**

La ciencia de la termodinámica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia. La ciencia de la transferencia de calor esta relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor. Cuando se vaporiza una libra de agua o se condensa una libra de vapor, el cambio de energía en los dos procesos es idéntico. La velocidad a la que cualquiera de estos procesos puede hacerse progresar con una fuente o receptor independiente es, sin embargo, inherentemente muy diferente.

#### **A.2.1.1. Teorías del calor**

El estudio de transferencia de calor se facilitara grandemente mediante la comprensión de la naturaleza del calor. Sin embargo, debido a las muchas manifestaciones del calor que se han presentado, una teoría que cubra todas ellas no es posible definir. Para propósitos de estudios en ingeniería es necesario comenzar con información básica acerca de unos cuantos fenómenos.

Las fases de una sustancia simple, sólida, líquida y gaseosa, están asociadas con su contenido de energía.

- En la fase sólida, las moléculas o átomos están muy cercanos, dando esto rigidez.

- En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde la rigidez.
- En la fase del gas, la presencia de energía térmica adicional resulta en la separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que pueden permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado.

También se ha establecido que, dondequiera que ocurra un cambio de fase fuera de la región crítica, se involucra una gran cantidad de energía en esa transición.

#### **A.2.1.2. Mecanismos de transferencia de calor**

La transferencia de calor puede producirse mediante tres mecanismos distintos: conducción, radiación y convección. Cada uno se asocia a un mecanismo físico diferente.

Para calcular el flujo de calor a través de cualquier superficie sin utilizar el balance energético es necesario tener información sobre la densidad de flujo del calor. Este último término se refiere al flujo de calor por unidad de área y tiene dimensiones de:

$$q'' = \frac{[\text{energía}]}{[\text{longitud}]^2 \cdot [\text{tiempo}]}$$

Dependiendo de la situación, la densidad de flujo de calor puede no ser uniforme a lo largo de la superficie de interés. Entonces el flujo de calor a través de cualquier superficie puede calcularse a través de la densidad de flujo de calor mediante

$$\dot{Q} = \int_A q'' dA$$

donde  $q''$  puede variar con la posición en la superficie y la integral se realiza sobre toda el área.

#### **A.2.1.2.1. Conducción**

Es la transferencia de energía debido a las interacciones entre las partículas libres en el interior de un material las cuales transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura dentro del cuerpo. La transferencia de calor por conducción esta directamente relacionada con los gradientes de temperatura dentro del cuerpo y esta gobernada por la ley de Fourier de conducción de calor

$$d\dot{Q}_{\text{COND}} = -kA \frac{dT}{dx}$$

donde  $k$  es la conductividad térmica del material y  $A$  es la sección transversal en la posición  $x$ . El signo negativo es necesario, ya que, por convenio la densidad de flujo de calor se supone positiva cuando la energía se transfiere por conducción en el sentido de temperaturas decrecientes.

#### **A.2.1.2.2. Radiación**

La radiación involucra la transferencia de energía radiante entre dos cuerpos. La energía transferida por radiación puede emitirse desde una superficie y es el único mecanismo de transferencia de calor que puede producirse en el vacío. La densidad de flujo de radiación térmica emitida por una superficie se describe mediante la ecuación de Stefan – Boltzmann

$$q_{\text{RAD}}'' = \epsilon \sigma T_s^4$$

donde  $\epsilon$  es la emisividad de la superficie,  $\sigma$  es la constante de Stefan – Boltzmann y  $T_s$  es la temperatura absoluta de la superficie. Los valores numéricos de la emisividad pueden variar entre 0 y 1, dependiendo del tipo de superficie. La constante de Stefan – Boltzmann es una constante física igual a  $0.0173 \times 10^{-8}$  BTU/ (h.ft<sup>2</sup>.R<sup>4</sup>).

Los cálculos de transferencia de calor por radiación pueden ser muy complejos debido a la dependencia no lineal de las propiedades térmicas con la temperatura de la superficie y la capacidad de los materiales de absorber, transmitir y emitir radiación térmica.

#### **A.2.1.2.3. Convección**

Es la transferencia de calor de energía entre la superficie de un sólido y un líquido o gas debido al movimiento del fluido. El mecanismo real es una combinación de conducción en la interfase sólido – fluido y el movimiento del

fluido que lleva la energía. El flujo de calor por convección desde una superficie a un fluido se calcula utilizando como modelo la ley de enfriamiento de Newton.

$$\dot{Q}_{\text{CONV}} = hA(T_s - T_{\text{amb}})$$

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $A$  es el área de la superficie,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T_{\text{amb}}$  es la temperatura del fluido. El coeficiente de transferencia de calor depende del fluido y de su movimiento sobre la superficie.

### **A.2.2. Ciclos de potencia de vapor**

Los ciclos de potencia de vapor o dispositivos cíclicos generadores de potencia revisten de gran importancia en el estudio de la termodinámica ya que varios sistemas y maquinas se basan en su funcionamiento. Las plantas de potencia de vapor de agua trabajan fundamentalmente con el mismo ciclo básico, tanto si el suministro de energía proviene de diferentes medios.

Una de sus aplicaciones más importantes es la producción de potencia eléctrica mediante plantas de potencia de vapor; en esta configuración la energía mecánica es producida en una turbina, acoplada a un generador eléctrico, mediante la expansión de vapor de alta presión generado en una caldera convencional.

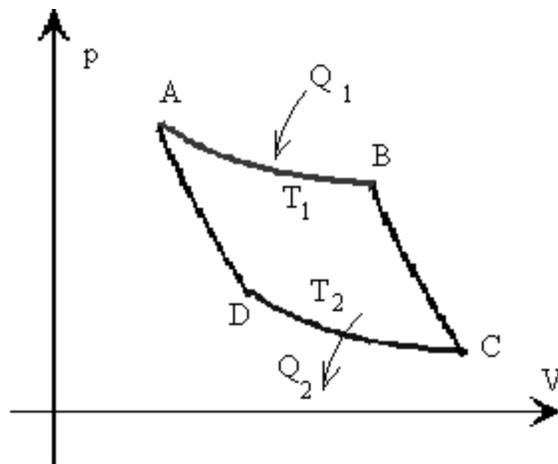
### A.2.2.1. Ciclo de Carnot

Se define ciclo de Carnot como un proceso cíclico reversible que utiliza un gas perfecto, y que sirve como patrón comparativo para todos los demás ciclos. Para este ciclo el rendimiento es el máximo posible. El ciclo de Carnot consta de cuatro procesos o transformaciones reversibles:

- Expansión isoterma.
- Expansión adiabática.
- Compresión isoterma.
- Compresión adiabática.

La representación gráfica del ciclo de Carnot en un diagrama p-V es el siguiente

**Figura 10 – Diagrama P-V de ciclo de Carnot**



Fuente: Termodinámica – Ciclo de Carnot. Universidad del País Vasco.  
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/carnot/carnot.htm>

Consideremos lo que sería una máquina de vapor perfecta; vamos a describir el ciclo partiendo del punto A, que corresponde al momento en que comienza la admisión del vapor debajo del émbolo. Esta expansión debe hacerse sin variación de temperatura, siguiendo la isoterma AB, a la temperatura  $T_1$  del vapor admitido. En B cesa la admisión y los gases se expanden siguiendo la curva BC, que es una porción adiabática entre las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ . Cuando el émbolo llega al punto C, hay un retroceso y un escape del vapor siguiendo la isoterma CD, a la temperatura  $T_2$ . En el punto D, el escape está cerrado y hay compresión con calentamiento en la porción adiabática DA.

Este ciclo que es el que debería seguir una máquina perfecta; tiene la propiedad de ser reversible, es decir, de poder ser recorrido indistintamente en un sentido o en otro, y de dar el rendimiento teórico máximo. Las aproximaciones al ciclo de Carnot pueden conseguirse únicamente en procesos que se realicen muy despacio y que, desde el punto de vista técnico, no tengan aplicación.

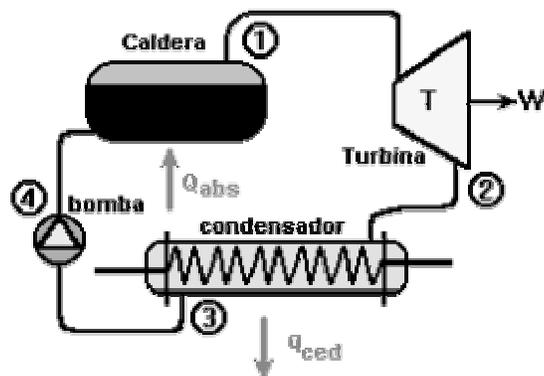
#### **A.2.2.2. Ciclo Rankine**

Las objeciones mencionadas anteriormente del ciclo de potencia de vapor de Carnot pueden eliminarse realizando dos modificaciones. Primero, el proceso de vapor húmedo que se condensa parcialmente a presión constante se lleva a cabo de manera que el vapor húmedo que sale de la turbina se condense por completo hasta el estado de líquido saturado a la presión de salida de la turbina. El proceso de compresión se realiza ahora mediante una bomba de líquidos, que eleva isoentrópicamente la presión del líquido que sale del condensador hasta la presión deseada para el proceso de expansión.

Segunda, durante este último proceso se sobrecalienta el fluido hasta una temperatura  $T_3$ , que es con frecuencia superior a la temperatura crítica. Este modelo de ciclo de planta de potencia de vapor recibe el nombre de ciclo Rankine.

En el ciclo de Rankine, se hace recircular siempre el mismo fluido en un ciclo cerrado reversible. Los componentes del ciclo de Rankine, también llamado el ciclo de la máquina de vapor estándar, pueden verse en la figura 11.

**Figura 11 – Esquema de bloques para ciclo de vapor Rankine**

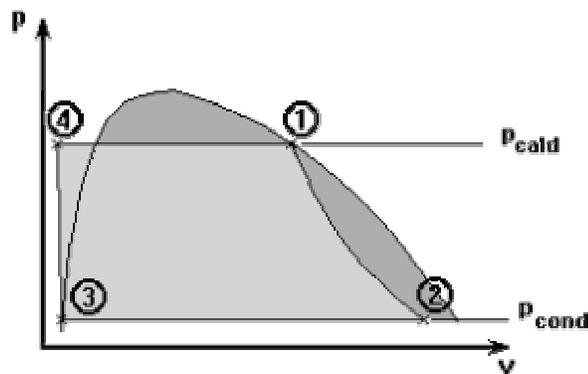


Fuente: Ciclos de vapor abierto y rankine. Ciclo de Rankine  
[http://tamarugo.cec.uchile.cl/~roroman/cap\\_08/cic-vapor.htm](http://tamarugo.cec.uchile.cl/~roroman/cap_08/cic-vapor.htm)

La bomba recolecta condensando a baja presión y temperatura, típicamente a una presión menor a la atmosférica, y comprime el agua hasta la presión de la caldera. Este condensado a menor temperatura de saturación en la caldera es inyectada a la caldera. En la caldera primero se calienta, alcanzando la saturación y luego se inicia la ebullición del líquido; se extrae el vapor de la caldera y luego se conduce el vapor a la turbina. Allí se expande, recuperando trabajo, hasta la presión asociada a la temperatura de condensación. El vapor que descarga la máquina entra al condensador donde

se convierte en agua al entrar en contacto con las paredes de tubos que están refrigerados en su interior (típicamente por agua). El condensado se recolecta al fondo del condensador, donde se extrae prácticamente como líquido saturado.

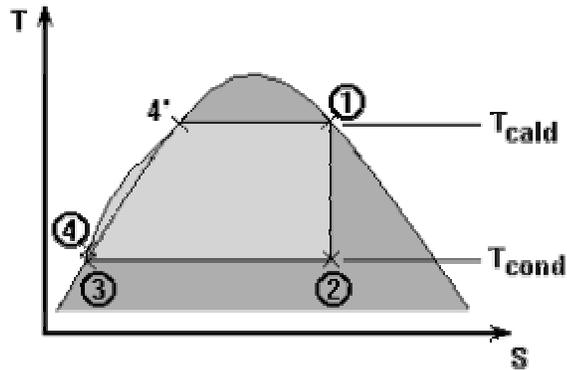
**Figura 12– Diagrama p-V para ciclo de vapor Rankine**



Fuente: Ciclos de vapor abierto y rankine. Ciclo de Rankine  
[http://tamarugo.cec.uchile.cl/~roroman/cap\\_08/cic-vapor.htm](http://tamarugo.cec.uchile.cl/~roroman/cap_08/cic-vapor.htm)

El diagrama p-V, del ciclo se describe como sigue: En (1), la caldera entrega el vapor saturado que se transporta a la turbina. Allí el vapor se expande entre la presión de la caldera y la presión del condensador, produciendo el trabajo W. La turbina descarga el vapor en el estado (2) hacia el condensador. Aquí se condensa a presión y temperatura constante, proceso (2) – (3), y del condensador se extrae líquido condensado en el estado (3). Luego la bomba aumenta la presión del condensado de  $p_{cond}$  a  $p_{cald}$ , proceso (3) – (4) y lo reinyecta en la caldera.

Figura 13 – Diagrama T-S para ciclo de vapor Rankine



Fuente: Ciclos de vapor abierto y rankine. Ciclo de Rankine  
[http://tamarugo.cec.uchile.cl/~roroman/cap\\_08/cic-vapor.htm](http://tamarugo.cec.uchile.cl/~roroman/cap_08/cic-vapor.htm)

El vapor está inicialmente en estado de saturación (1), luego el vapor se expande en la turbina generando trabajo, proceso (1) – (2); esta evolución se puede suponer adiabática. Si además se supone sin roce, se asimilará a una isentrópica. El vapor que descarga la turbina es admitido al condensador, donde condensa totalmente a temperatura y presión constantes, proceso (2) – (3), y sale de este en el estado (3) como líquido saturado. Ahora el condensado es comprimido por la bomba, proceso (3) – (4), aumentando su presión hasta la presión de la caldera. Si bien la presión aumenta en forma significativa, la temperatura casi no sube. Idealmente esta compresión también es adiabática e isentrópica, aunque realmente la entropía también aumenta. En el estado (4) el líquido está como líquido comprimido. Este se inyecta a la caldera, con un importante aumento de temperatura y entropía, hasta alcanzar la saturación, proceso (4) – (1). El proceso anterior se realiza dentro de la caldera; (4') se refiere al punto en el que se alcanza la saturación.