

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“Diseño, construcción y validación de un equipo de
destilación de alcohol etílico”**

PRESENTADO POR

**VÍCTOR MANUEL ESPINAL PERLA
RENÉ WILFREDO JIMENEZ MORALES
KELVIN AARÓN PERAZA ARTEAGA
FRANCESCO RAINIERO TINETTI CASTRO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2009.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**“Diseño, construcción y validación de un equipo de
destilación de alcohol etílico”**

Presentado por :

**VÍCTOR MANUEL ESPINAL PERLA
RENÉ WILFREDO JIMENEZ MORALES
KELVIN AARÓN PERAZA ARTEAGA
FRANCESCO RAINIERO TINETTI CASTRO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**ING. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO
ING. ITALO ANDRÉS FLAMENCO CÓRDOVA**

San Salvador, Octubre de 2009.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO :

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. JUAN ANTONIO FLORES DÍAZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

ING. ITALO ANDRÉS FLAMENCO CÓRDOVA

AGRADECIMIENTOS

El esfuerzo para esta tesis no se hubiera podido haber hecho si no hubiera sido por estas personas: mi madre, que en paz descanse, mi abuela, mis hermanos, Carlos Salinas, Oscar Antonio Mendoza, mis compañeros de tesis, Wilfredo Jiménez, Claudia Montalvo, Ana Esther, Anabel Flores. Agradezco a todas estas personas que estuvieron conmigo y me apoyaron en los momentos más difíciles.

Víctor Manuel Espinal

Le doy gracias a Dios, a mis padres y a la vida por haberme dado la oportunidad de lograr mi objetivo. Agradezco también a Wilfredo Jiménez y Oscar Mendoza, por haber colaborado sin medida en tan ardua tarea.

Rene Wilfredo Jiménez

Le doy gracias primeramente a dios todo poderoso, a mis padres que unificaron esfuerzos para salir adelante con mis objetivos académicos, así como también al Ing. Gustavo Salomón Torres quien siempre nos fomento el buen animo para salir adelante con nuestro compromiso de trabajo de graduación a mis compañeros de tesis con los cuales salimos adelante en esta carrera y a todos aquellos amigos colegas de carrera que tuve el privilegio de conocer en el alma Mater, nuestra casa.

Kelvin Aaron Peraza

Agradezco al Ingeniero Gustavo Salomón la manera en como nos ha guiado por el buen camino en la universidad y demás aspectos de la vida en

general, ya que siempre nos ha motivado a dar lo mejor de nosotros y a hacerle frente a los problemas que se nos presenten.

Agradezco además a mi madrecita linda que siempre ha querido lo mejor para mi y se ha esforzado para sacarme adelante, así también a mi padre que siempre me ha brindado su apoyo incondicional cuando mas lo he necesitado.

Agradezco a mi novia Alicia, ya que siempre demostró un apoyo total a mi trabajo de graduación y siempre me motivó a dar lo mejor de mí durante toda la carrera. Gracias princesa porque siempre has estado cuando mas lo he necesitado.

Agradezco a mis compañeros de tesis Kelvin, Rene y Víctor, por toda la paciencia que hemos tenido entre los cuatro para sacar adelante este trabajo de graduación.

Francesco Rainiero Tinetti

DEDICATORIAS

Dedicado a mi madre que se esforzó tanto y dio hasta la vida para que yo pudiera ser alguien en la vida.

Víctor Manuel

Dedico mi trabajo a mi esposa e hijos que me han dado fuerza y animo para salir adelante. Ellos han sido parte importante de mi vida cuando he tropezado me han levantado.

Rene Wilfredo

Le dedico esta tesis a mis padres Marta Arteaga y Mario peraza, personas las cuales respeto y admiro, y que siempre me apoyaron en todo este proyecto de formación teniendo la confianza para creer en mi persona.

Kelvin Aaron

Dedico este trabajo de graduación a mi madrecita Ana Ruth que ha hecho mucho esfuerzo para sacarnos adelante a mí y a mis hermanos, y ahora le voy a otorgar mucha felicidad al verme graduado de ingeniero.

Francesco Rainiero

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido

CAPITULO 1

| | |
|--|----|
| 1.1. ALCOHOL ETÍLICO | 1 |
| 1.2. Historia y generalidades..... | 2 |
| 1.3. Propiedades físicas y químicas | 4 |
| 1.4. Procesos de producción..... | 6 |
| 1.4.1. Síntesis a partir del Carburo de Calcio | 6 |
| 1.4.2. Síntesis a partir de etileno y ácido sulfúrico..... | 7 |
| 1.4.3. Hidratación directa del etileno..... | 8 |
| 1.3.4. Síntesis a partir de dióxido de carbono | 9 |
| 1.4.5. Producción de alcohol etílico por fermentación..... | 10 |
| 1.5. Fermentación | 11 |
| 1.5.1. Definición..... | 11 |
| 1.5.2. Reseña histórica | 11 |
| 1.5.3 Tipos de fermentación..... | 13 |
| 1.5.4. Fermentación alcohólica | 14 |
| 1.5.5. Fermentaciones anaerobias. | 17 |
| 1.5.6 Fermentación aerobia | 17 |
| 1.5.7. Usos de la fermentación (alimentos) | 19 |
| 1.5.8. Usos de la fermentación (combustibles) | 20 |
| 1.5.9. Efectos de la fermentación | 21 |
| 1.6. Destilación..... | 22 |
| 1.6.1 Generalidades..... | 22 |
| 1.6.2. Descripción de la separación de mezclas por destilación | 24 |
| 1.6.3. Diagrama de punto de ebullición..... | 28 |
| 1.6.4. Métodos de destilación | 29 |
| 1.6.5. Destilación de equilibrio | 29 |
| 1.6.6. Destilación diferencial..... | 30 |
| 1.6.7. Rectificación..... | 30 |

| | |
|--|----|
| 1.6.8. Aparatos de destilación..... | 33 |
| 1.7. Procesos de transferencia de calor..... | 36 |
| 1.7.1. Transferencia de calor..... | 36 |
| 1.7.2. Teorías del calor..... | 36 |
| 1.7.3. Mecanismos de la transferencia de calor..... | 37 |
| 1.7.4. Transmisión de calor..... | 39 |
| 1.7.5. Calentadores tubulares..... | 39 |
| 1.7.6. Cambiadores de calor..... | 41 |
| 1.7.7. Cambiadores de calor de tubo concéntrico..... | 43 |
| 2.1. Diseño del proceso de destilación..... | 44 |
| 2.2. Cálculo del calor necesario para la evaporación..... | 46 |
| 2.2.1. Cálculo de entalpía de mezcla a $T=25^{\circ}\text{C}$ | 47 |
| 2.2.2. Cálculo de entalpía de mezcla a la temperatura de saturación..... | 47 |
| 2.2.3. Cálculo de calores..... | 48 |
| 2.3. Selección del recipiente generador de vapor..... | 52 |
| 2.3.1 Esfuerzos tangenciales..... | 54 |
| 2.3.2. Esfuerzos longitudinales..... | 55 |
| 2.3.3 Esfuerzos radiales..... | 55 |
| 2.3.4. Comparación de resultados..... | 55 |
| 2.4. Pérdidas de calor y aislamiento térmico..... | 58 |
| 2.4.1. Aislamiento térmico..... | 58 |
| 2.4.2. Pérdidas de calor..... | 59 |
| 2.4.3. Coeficiente exterior de película por convección..... | 60 |
| 2.4.4. Resistencias térmicas..... | 61 |
| 2.5. Diseño para proceso de fermentación..... | 64 |
| 2.5.1. Tipo de proceso para obtención de alcohol..... | 64 |
| 2.5.2. Selección de la materia prima..... | 64 |
| 2.5.3. Fermentación..... | 64 |
| 2.6. Diseño eléctrico del sistema destilador..... | 68 |
| 2.6.1 Circuito eléctrico para el destilador..... | 68 |
| 2.6.1.1 Sensores de nivel..... | 68 |
| 2.6.1.2 Sensor de temperatura..... | 69 |

| | |
|---|-----|
| 2.6.2 Diagramas eléctricos y lenguajes de programación..... | 70 |
| 3.1. Plan de mantenimiento | 79 |
| 3.1.1. Plan de mantenimiento quincenal..... | 79 |
| 3.1.2. Plan de mantenimiento mensual..... | 80 |
| 3.1.3. Plan de mantenimiento Trimestral | 81 |
| 3.1.4. Plan de mantenimiento anual | 81 |
| 3.2. Proceso de construcción..... | 82 |
| 3.2.1. Soporte de la maquina | 83 |
| 3.2.2. Calentador..... | 85 |
| 3.2.3. Equipos auxiliares | 86 |
| 3.3. Manual de procedimiento | 87 |
| 3.4. Validación..... | 90 |
| 3.4.1. Criterios de Validación | 90 |
| 3.4.2. Ejercicios de validación | 91 |
| 3.4.3. Tabla de resultados..... | 92 |
| 3.5. Presupuesto..... | 94 |
| 3.6. Planos de diseño | 98 |
| RECOMENDACIONES | 99 |
| CONCLUSIONES | 100 |
| Bibliografía | 102 |
| Anexos | 103 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Interior de una columna de destilación. Tomada de fundamentos y modelos de proceso de separación | 25 |
| Figura 2. Tipos de burbujeadores. Tomada de fundamentos y modelos de proceso de separación | 26 |
| Figura 3. Sección de un plato de contrapeso. Tomada de fundamentos y modelos de proceso de separación | 26 |
| Figura 4. Separación de los dos componentes de una mezcla binaria con caldera y condensador. Tomada de operaciones de separación en Ing. Química | 27 |
| Figura 5. Diagrama típico de puntos de ebullición a presión constante. Tomado de introducción a la Ing. Química | 28 |
| Figura 6. Representación esquematizada de una columna de rectificación convencional. Tomada de operaciones de separación en Ing. Química..... | 32 |
| Figura 7. Caldera de destilación construida con hierro fundido. Tomada de destilación y rectificación..... | 33 |
| Figura 8. Caldera de destilación para alquitrán. Tomada de destilación y rectificación..... | 34 |
| Figura 9. Calderín con baño de agua para la destilación de caldos alcohólicos. Tomada de destilación y rectificación..... | 34 |
| Figura 10. calderin fijo con serpentín de calefacción. Tomada de destilación y rectificación..... | 35 |
| Figura 11. Retorta tubular para el tratamiento de 75 toneladas de crudo de petróleo por hora. Tomada de destilación y rectificación. | 35 |
| Figura 12. Calentador tubular de un solo paso. Tomada de introducción a la Ing. química..... | 40 |
| Figura 13. Calentador de cabeza flotante con dos pasos. Tomada de introducción a la Ing. química. | 40 |
| Figura 14. Cambiador de líquido a líquido. Tomada de introducción a la Ing. química..... | 41 |
| Figura 15. Cambiador de tubos concéntricos. Tomada de introducción a la Ing. química..... | 43 |
| Figura 16. Diagrama de bloque en un proceso simple de fermentación..... | 67 |
| Figura 17. Soporte del destilador | 83 |
| Figura 18. Vista de Calentador | 85 |
| Figura 19. Diagrama de equipos auxiliares..... | 86 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Datos característicos de la mezcla etanol-agua a diferentes composiciones. | 104 |
| Tabla 2. Conductividad térmica de soluciones a 20 °C | 111 |
| Nomograma 1. Registro de calores específicos de líquidos. | 105 |
| Nomograma 1. (Continuación) Registro de calores específicos de líquidos. | 106 |
| Nomograma 2. Registro de conductividades térmicas de algunos líquidos..... | 107 |
| Nomograma 3. Determinación de viscosidades de diferentes líquidos. | 108 |
| Nomograma 3. (Continuación) Determinación de viscosidades de diferentes líquidos..... | 109 |
| Nomograma 3. (Continuación) Determinación de viscosidades de diferentes líquidos..... | 110 |
| Gráfica 1. Curva para el cálculo de la destilación en alambique sencillo..... | 112 |
| Gráfica 2. Variación de las concentraciones de vapor y de líquido con la cantidad de destilado en la destilación abierta. a, etanol-agua; b, benceno-tolueno; c, agua-ácido acético..... | 113 |
| Gráfica 3. Diagrama entalpía-concentración de la mezcla etanol-agua. | 114 |
| Gráfica 4. Representación de una curva típica de ebullición. | 115 |

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las distintas sociedades alrededor del mundo nos encontramos pasando por una crisis económica que ha venido a quebrar de manera inesperada todos los esquemas que se venían manejando de modelos económicos. La principal razón que ocasiono esta crisis es la escasez de petróleo provocada por el crecimiento en el consumo del mismo, debido a que hoy en día todo se mueve con petróleo. Es por ello que muchas industrias están buscando alternativas para producir energía y de esta manera dejar atrás la alta dependencia al uso del “oro liquido”.

Es así como nace la intención de realizar este proyecto el cual consiste en investigar sobre las diferentes maneras de producir etanol, el cual es una alternativa energética en sus diferentes usos; y de aquí la necesidad de que el ingeniero mecánico tome cartas en el asunto y sirva como un elemento importante en la historia con sus aportes a la industria.

El documento se divide en tres etapas. En la primera se desarrolla una investigación sobre los tipos tanto de fermentación como de destilación que ya existen para posteriormente escoger y plantear un diseño en particular de cada proceso, de los cuales el de destilación se llevara a construcción; así mismo se estudian los distintos mecanismos de transferencia de calor utilizados en procesos de destilación.

En la segunda etapa se llevaran a cabo los cálculos necesarios para diseñar el equipo de destilación y además para determinar las variables que son necesarias para la selección de materiales de construcción.

En la tercera y última etapa se lleva a cabo la construcción del equipo para destilación de alcohol etílico, previa elaboración de planos de construcción y análisis de costos. Se establece también un manual de operaciones así como uno de mantenimiento. Para finalizar y como objetivo principal del proyecto, se hará una prueba experimental para obtener alcohol etílico grado 90 a partir de una mezcla 50-50 de alcohol/agua.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y construir un equipo capaz de producir alcohol etílico a partir de la sustancia considerada en la investigación, tal como maíz, maicillo o jugo de caña de azúcar.

Objetivos Específicos

1. Establecer un proceso de fermentación que permita obtener un mosto a partir del cual se extraerá alcohol etílico.
2. Establecer los parámetros que conlleva el proceso de destilación y los distintos tipos de destilación por medio de los cuales se puede obtener alcohol etílico.
3. Definir los mecanismos de transferencia de calor que se presentan en un proceso de destilación.
4. Definir el proceso de destilación a utilizar analizando la viabilidad de los distintos procesos planteados.
5. Seleccionar los materiales a utilizar para la construcción del equipo de destilación tomando en cuenta las condiciones a las cuales se van a exponer.
6. Establecer un análisis de costos de construcción, el cual podrá ser usado por el lector de esta tesis para la reproducción del equipo de destilación.
7. Elaborar los planos de diseño los cuales se utilizarán durante el proceso de construcción.

8. Proporcionar las consideraciones necesarias a tomar en cuenta para el proceso de construcción del equipo.
9. Elaborar un manual de operaciones del equipo.
10. Definir un plan de mantenimiento para el equipo de destilación, con un lenguaje entendible a todo aquel que haga uso de él.
11. Validar el equipo, mediante una prueba experimental que permita comprobar que los cálculos se apegan a la práctica.
12. Obtener alcohol de noventa grados al final del experimento.



CAPITULO 1

1.1. ALCOHOL ETÍLICO

El alcohol etílico está familiarizado con las bebidas alcohólicas. En su forma no natural es usado como un solvente industrial y como materia prima para la manufactura de acetaldehído, acetato etílico, ácido acético, dibromito de etileno, glicol y muchos otros químicos orgánicos. El alcohol puro también puede ser utilizado para propósitos medicinales, farmacéuticos y saborizantes. En la industria la fermentación puede ser oxidante, es decir, en presencia de oxígeno, pero es una oxidación aeróbica incompleta, como la producción de ácido acético a partir de etanol.

La fermentación del alcohol etílico es realizada en forma cerrada por cualquier carbohidrato rico en substratos. La melaza, licor producido de desechos, permanecen después de la cristalización de la sucrosa y es usada ampliamente como materia prima en la fermentación alcohólica. La melaza blackstrap contiene 35-40% de sucrosa y 15-20% de azúcares invertidos (glucosa y fructuosa). La melaza hightest contiene 21-22% de sucrosa y 50-55% de azúcares invertidos. La mayoría de las melazas blackstrap no requieren otros nutrientes adicionales para realizar la fermentación del alcohol etílico. Sin embargo, las melazas hightest requieren cantidades considerables de sulfato de amonio y otras sales, como fosfatos. El contenido de nutrientes no azucarados de 50-lids de las melazas hightest es aproximadamente 7%, comparado con el 28-35% encontrado en las melazas blackstrap.

El alcohol etílico también puede ser producido por fermentación del almidón, suero o licor de desechos de sulfito. La fermentación de granos requiere un pre-tratamiento dado que la levadura no puede metabolizar directamente el almidón. Los granos (usualmente el maíz) son agrupados y calentados en una lechada acuosa para gelatinizar o solubilizar el almidón. Algunas enzimas líquidas



pueden ser añadidas a bajas temperaturas. El almidón líquido es enfriado alrededor de 65°C y tratado con amilasa de malta o de hongos para convertir el almidón en oligosacáridos. Luego, la levadura es añadida junto con amiloglucosidasa (o glucoamilasa) los cuales convierten los oligosacáridos en glucosa. El proceso de fermentación y refinación posteriores son los mismos que se realizan cuando se usa melaza como materia prima.

La producción del alcohol etílico es realizada a través de procesos eficientes y automáticos. El proceso de manufactura no es muy complejo y es fácil de realizar. El control de la contaminación y el mantenimiento y reparación de las maquinarias y equipos también son fáciles. Aquellas naciones con climas tropicales y sub-tropicales, con abundante producción de azúcar y maíz, podrían invertir en el establecimiento de alguna planta de producción que puede ser orientada tanto a la exportación como a la importación.¹

1.2. Historia y generalidades

El alcohol etílico es un líquido incoloro, combustible, de olor agradable y sabor picante, que hierve a 78.4°C y no es fácil de solidificar. Se le denomina también etanol, espíritu de vino, metilcarbinol, etc., su fórmula es C₂H₅OH. No se le encuentra en estado natural en grandes cantidades y las trazas que se hallan proceden de la fermentación espontánea de los azúcares de algunas frutas.

El etanol ha sido probablemente usado por el hombre desde el comienzo de su historia. En el antiguo texto sagrado de la India, el "Rig Veda*", se menciona la fabricación de *soma*, una bebida alcohólica obtenida por fermentación; por otra parte es ampliamente conocido el episodio bíblico de Noé (Génesis 13-21) en el cual se hace mención a las bebidas alcohólicas obtenidas por fermentación; igualmente aparecen diferentes jeroglíficos egipcios alusivos a las

¹ Véase Referencia 1



bebidas fermentadas. Se cree que los egipcios pasaron sus conocimientos a los árabes, los que estudiaron y mejoraron el arte de la destilación.

La palabra alcohol se deriva de la palabra árabe “puhl” o “pohol” que significa un polvo muy fino. Gradualmente, la palabra vino a significar esencia y finalmente obtuvo el significado que en la actualidad se le da. Raimundo Lulio (1235-1315) pone de relieve la propiedad del alcohol de ser un buen solvente; anota que en la mayor parte de los casos se encuentra impurificado por el agua y da un método para deshidratarlo por medio de la potasa fundida.

En el siglo XV está ya muy extendida la fabricación del alcohol, del que se hace un gran consumo como bebida. No obstante, el concepto de fermentación continuaba siendo una idea muy general y se aplicaba incluso a la reacción entre dos sustancias y muy especialmente si dicha reacción originaba un desprendimiento de gas.

En 1500, el conocimiento de la destilación era lo suficientemente detallado como para ameritar la publicación de un tratado sobre la materia: “Das kleine distillierbuch” por Brunswig. Sin embargo, la evolución del equipo y del proceso fue muy lenta y no fue hasta 1808 que se construyó la primera destilería comercial en Francia.

Con el avance de la química de la síntesis orgánica en la segunda mitad del siglo XIX, el alcohol se hizo indispensable como combustible y como solvente; pero su uso era aun caro debido a los altos impuestos. La desnaturalización del alcohol resolvió el problema de los impuestos e impulsó los usos del alcohol en la industria química.²

² Véase Referencia 9 pág. 1029-1032



1.3. Propiedades físicas y químicas

Hasta fines del siglo XVIII no se pudo encontrar alcohol completamente libre de agua, y su composición fue determinada por primera vez en 1808 por Nicolás de Saussure y fue confirmada en 1845 por Berthelot.

El alcohol es un compuesto ternario formado de carbono, oxígeno e hidrógeno; su grupo funcional es el hidroxilo unido directamente a un carbono. Las propiedades químicas del etanol son primordialmente las del grupo hidroxilo, pero en cierto número de reacciones tiene parte importante el grupo metilo. Por la acción de los ácidos orgánicos e inorgánicos, se forman los ésteres correspondientes, los cuales, por hidrólisis se descomponen en alcohol y en ácido.

El alcohol etílico reacciona con algunos metales y forma etóxidos. El etóxido sódico y el aluminico son muy usados en síntesis orgánica. El grupo hidroxilo es reemplazado por un halógeno con los reactivos usuales (haluros de hidrógeno y de fósforo). Por medio de la deshidratación del etanol se puede conseguir etileno o éter dietílico.

El etanol reacciona con el grupo carbonilo de aldehídos y cetonas para formar acetales. La oxidación del etanol produce etanal y si aquella continúa se forma el ácido acético.

Ingerido en pequeñas dosis y diluido, primero reanima el organismo, pero a continuación se produce un descenso en la temperatura del cuerpo, a la vez que actúa como narcótico. Tomado puro, o en grandes cantidades, es tóxico.

Dada su gran avidez por el agua, es excelente para impedir putrefacciones. Arde con llama azul, poco luminosa, pero muy caliente y en estado puro se inflama espontáneamente por la acción de los rayos del sol. Es fuertemente polar, debido al grupo hidroxilo, y disuelve sustancias polares, tales como los colorantes, nitrocelulosas y resinas. Absorbe oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y otros gases en mayor proporción que el agua. Su vapor es estable



hasta 300°C. A la temperatura del rojo se descompone en hidrógeno, etano, etileno, acetileno, etc. y en contacto con el polvo de zinc calentado al blanco, se convierte en etileno y calentado al rojo, en hidrógeno, metano y óxido de carbono.

El punto de ebullición de las mezclas agua y alcohol se eleva a medida que la solución se empobrece de alcohol, debido a que la presión de vapor del agua es menor que la del alcohol. Los vapores producidos por ebullición de estos líquidos alcohólicos son más ricos en alcohol que la solución de que proceden.

El alcohol etílico puro no se puede conseguir por destilación de soluciones acuosas ya que una mezcla del 95.57% de alcohol constituye un líquido de punto de ebullición constante de 77.65°C, inferior al punto de ebullición del alcohol puro.

El alcohol etílico se presenta corrientemente al mercado bajo las formas o clases siguientes:

- a) Alcohol industrial o de primera; con una riqueza alcohólica de 96.5°GL. (GL°: % en volumen de las soluciones alcohol-agua a 15°C) Se usa para la preparación de licores y una gran cantidad de fines científicos, sanitarios e industriales.
- b) Alcohol desnaturalizado; es aquel que resulta de la mezcla de alcohol industrial con alguna sustancia que lo haga impropio y desagradable para la bebida y que no pueda separarse fácilmente del alcohol, por medios físicos, químicos ni mecánicos.
- c) Alcohol de segunda; es aquel alcohol industrial que contiene impurezas volátiles producidas durante la fermentación.
- d) Alcohol absoluto; el cual tiene una riqueza de 99.7 – 99.8 °GL y un amplio uso en análisis químicos como en los de fisiología e histología y principalmente como carburante en motores de combustión interna cuando se combina con un 70-80% de gasolina.



e) Alcohol sólido; el cual se prepara haciendo una mezcla de alcohol desnaturalizado y jabón, pero mejor resultado se obtiene saturando el etanoato cálcico con alcohol; al solidificarse se presenta como una masa compacta, que se puede fraccionar en forma de pastillas, las cuales arden sin humo y con gran desprendimiento de calor.³

1.4. Procesos de producción

1.4.1. Síntesis a partir del Carburo de Calcio

En este proceso se trata carburo de calcio con agua para obtener acetileno, el cual tiene que ser purificado, antes de los posteriores procesos catalíticos, debido a las impurezas de azufre y de fósforo que envenenan los catalizadores.

El acetileno reacciona con el agua, en medio ácido y en presencia de sulfato de mercurio, dando lugar a la formación de aldehído-acético el que se reduce catalíticamente a etanol, con una corriente de hidrogeno a 160 - 170°C y utilizando como catalizador el níquel.

Las reacciones que se producen son:



Este proceso es particularmente adecuado cuando se dispone de energía barata, pues el carbón utilizado en el proceso se ocupa tanto para la producción

³ Véase Referencia 8 pág. 146-176



del carburo de calcio, como para la producción de alcohol, lo que da como resultado un gasto mucho mayor que en los procesos fermentativos de obtención de alcohol.

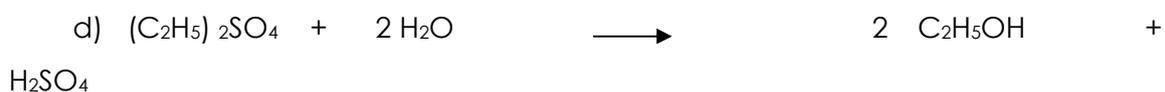
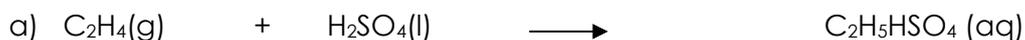
Del acetileno obtenido por la reacción a) se puede fabricar etileno mediante su hidrogenación:



Este etileno, al igual que el obtenido de otras fuentes, se puede utilizar también como materia prima para la síntesis del alcohol.

1.4.2. Síntesis a partir de etileno y ácido sulfúrico

Este fue el primer proceso de síntesis, utilizado comercialmente para producir etanol. Las reacciones que se dan en este proceso son como siguen:



En el proceso se lleva a cabo la absorción del etileno purificado, en torres conteniendo ácido sulfúrico al 95 .98%, a 135°F y bajo una presión de 100 psi, para obtener los sulfates de etilo. Estos sulfatos son hidrolizados continuamente



con agua y el alcohol etílico se puede purificar para producir alcohol al 95% ó alcohol anhidro.

El éter etílico que se obtiene como subproducto proviene de la reacción secundaria:



Si se usa etileno concentrado como alimentación, la eficiencia del absorbedor es cerca del 97%. El etileno que no se absorbe se lava con soda cáustica y se usa como combustible o se vuelve a purificar.

La solución de sulfatos pasa a un sistema de auto evaporación donde la presión disminuye a 25 psig para eliminar el etileno disuelto y la solución pasa a un hidrolizador. El tiempo de residencia en éste es alrededor de 2 horas a 160°F y los productos hidrolizados se mandan a columnas donde se separa el ácido sulfúrico (que sale al 45%) que se reconcentra para volver a usarlo. El alcohol etílico y el éter etílico formados se separan por destilación y el alcohol etílico es tratado luego según la calidad del alcohol que se quiera producir.

1.4.3. Hidratación directa del etileno

Todas las fábricas nuevas en donde se obtiene etanol sintético usan el proceso de hidratación directa que se basa en la reacción:



El éxito comercial del proceso depende termodinámicamente de lograr las siguientes condiciones:



- a) El uso de un catalizador que permita buenos rendimientos a bajas temperaturas.
- b) El uso de altas presiones.
- c) El uso de etileno de alta pureza para que se pueda recircular sin gran acumulación de inertes.

En 1945 se encontró que el ácido fosfórico es un catalizador activo -para esta reacción con la desventaja de que es volátil y tiene una gran afinidad con el agua. En el proceso la alimentación de etileno es comprimida a aproximadamente 1000 psig antes de unirla a la corriente de recirculación. Se añade agua en una relación de 0.6 moles de agua por mol de etileno y la mezcla se calienta a 300°C. Luego se pasa por el reactor catalítico donde una fracción de la mezcla se transforma a etanol. Puesto que la reacción es exotérmica los productos salen más calientes que la alimentación.

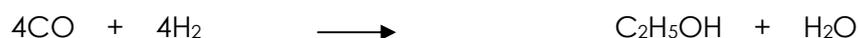
Los efluentes del reactor pasan a un intercambiador de calor donde son parcialmente condensados, después de lavarlos con soda cáustica diluida, se pasa a un segundo cambiador y sobre un separador de alta presión para dar una corriente líquida y otra gaseosa. El condensado se purifica y el vapor se recicla. La pureza del producto obtenido es del 95%.

1.3.4. Síntesis a partir de dióxido de carbono

En este proceso el dióxido de carbono se reduce a monóxido de carbono pasándolo a través de carbón encendido:



En la síntesis de Fisher se produce también la siguiente reacción:





También se puede utilizar gas natural como materia prima. En este caso, el gas natural es sometido a una combustión parcial para convertirlo en una mezcla constituida principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno. La mezcla de monóxido e hidrógeno se pasa sobre un catalizador obteniéndose así el alcohol etílico. El proceso presenta grandes dificultades a causa de la sensibilidad de los catalizadores a las impurezas y por el elevado precio del hidrógeno, lo que hace este método muy caro.

1.4.5. Producción de alcohol etílico por fermentación

Para la producción de etanol por fermentación se puede partir de tres clases de materia prima:

- a) Sustancias sacarinas: melaza, sorgo, remolacha, caña de azúcar, etc.
- b) Sustancias feculentas: granos de cereales, tubérculos, etc.
- c) Sustancias celulósicas: madera, residuos agrícolas, etc.

Con todas estas materias primas se produce alcohol por fermentación de azúcares con levadura. Las materias sacarinas fermentan directamente; las feculentas contienen almidón que debe ser primero hidrolizado (con enzimas, malta, mohos o ácidos) a azúcares fermentables; y las celulósicas son convertidas a azúcares por hidrólisis con ácidos inorgánicos (aunque se está difundiendo el uso de la enzima celulosa para esta función).

Aunque actualmente la mayor parte del alcohol etílico es producido por los métodos de síntesis descritos previamente, es evidente que en países como el nuestro son eminentemente agrícolas y que carecen de recursos petrolíferos, la fermentación como proceso para producir alcohol etílico, sigue siendo la única alternativa factible. La descripción detallada de este proceso se encuentra en otra sección de este trabajo.⁴

⁴ Véase Referencia 3, Cap. 1



1.5. Fermentación

1.5.1. Definición

La fermentación es un proceso metabólico energético que comprende la descomposición de moléculas, tales como carbohidratos, de manera anaerobia. La fermentación ha sido utilizada desde tiempos antiguos en la preparación de alimentos y bebidas. El desarrollo químico ha revelado la naturaleza biológica del proceso de fermentación. El producto de la fermentación es el alcohol etílico, pequeñas cantidades de propanol, butanol, ácido acético, y ácido láctico; los alcoholes de alta concentración también se pueden formar.

En los seres vivos, la fermentación es un proceso anaeróbico y en él no interviene la mitocondria ni la cadena respiratoria. Son propias de los microorganismos, como algunas bacterias y levaduras. También se produce la fermentación en la mayoría de las células de los animales (incluido el hombre), excepto en las neuronas que mueren rápidamente si no pueden realizar la respiración celular; algunas células, como los eritrocitos, carecen de mitocondrias y se ven obligadas a fermentar; el tejido muscular de los animales realiza la fermentación láctica cuando el aporte de oxígeno a las células musculares no es suficiente para el metabolismo aerobio y la contracción muscular.⁵

1.5.2. Reseña histórica

La humanidad emplea la fermentación alcohólica desde tiempos inmemoriales para la elaboración de cerveza (empleando cereales) y del vino (empleando el fruto de la vid: la uva en forma de mosto) fundamentalmente. Los griegos atribuían el descubrimiento de la fermentación al dios Dionisio. Algunos procesos similares como el de la destilación alcohólica ya surgen en el año 1150 de la mano de Arnau de Vilanova. Fue un elemento más a considerar en el desarrollo histórico de la alquimia durante la Edad Media.

⁵ Véase Referencia 9, pág. 780-800



En el año 1764 se identificó el gas CO_2 resultante de la fermentación por el químico MacBride y en 1766 Cavendish lo describió como: "el gas existente en la atmósfera" determinando además la proporción de dióxido de carbono con respecto al azúcar empleado en el proceso, que rondaba el 57%. En esta época se empezó a descubrir, gracias a observaciones científicas, que la fermentación alcohólica se producía también en sustancias "no dulces". Antoine Lavoisier hizo experimentos en 1789 determinando las cantidades de los elementos intervinientes en la fermentación (carbono, oxígeno e hidrógeno).

Con el advenimiento de los descubrimientos químicos en el año 1815 el investigador francés Joseph Louis Gay-Lussac fue el primero en determinar una reacción de fermentación obteniendo etanol a partir de glucosa, a pesar de este logro los fundamentos de la fermentación alcohólica eran completamente desconocidos. Existe durante el siglo XIX un debate científico por establecer la hipótesis de la fermentación. Durante los años 1830s los químicos Jöns Jakob Berzelius y Justus von Liebig desarrollaron una teoría mecanicista que explica la fermentación, teorías que estaban en contraposición con las creencias de Louis Pasteur en el año 1857 que se fundamentaba en la "teoría vitalista" como explicación de los mecanismos básicos de la fermentación. Fue el mismo Pasteur que en el año 1875 demostró que la fermentación era un proceso anaeróbico (en ausencia de aire).

En el año 1818 Erleben, De La Tour en Francia, Schwann y Kützing en Alemania (1837) descubren que las levaduras (organismos microscópicos unicelulares) son la causa del proceso, pero no fue hasta que Eduard Buchner en el año 1897 descubre que la enzima zimasa es la responsable final de la fermentación alcohólica trabajo por el que recibe el premio Nóbel de Química. Este descubrimiento atrajo el interés de otros científicos, entre ellos Harden y Young quienes en el año 1904 mostraron que la zimasa perdía sus propiedades fermentativas bajo condiciones de diálisis, demostrando que la fermentación dependía de una sustancia de bajo peso molecular que se quedaba retenida en los finos poros de la membrana de la diálisis. La fermentación podía bajo estas



circunstancias volver a ser restablecida añadiendo simplemente de nuevo las levaduras, esta sustancia descubierta por Harden y Young se denominó cozimasa, y fue eventualmente encontrada como una mezcla de iones fosfatados y difosfato de tiamida. Sin embargo la caracterización de la cozimasa no fue completada hasta el año 1935.

El bioquímico Otto Heinrich Warburg en conjunción con Hans von Euler-Chelpin descubren en el año 1929 que el cofactor nicotinamida adenina dinucleótido (NADH) juega un papel muy importante en el proceso interno de la fermentación. Pronto en el año 1937 los investigadores Erwin Negelein y Hans Joachim Wulff comprueban que mediante la cristalización de los subproductos de la fermentación la enzima alcohol deshidrogenasa es protagonista en algunos subprocesos realizando un papel importante.

Los descubrimientos posteriores a partir del periodo que va desde mediados del siglo XX hasta comienzos del siglo XXI se centran exclusivamente en la mejora de los procesos de fermentación alcohólica y conciernen más a la optimización del rendimiento industrial bien sea mediante una buena selección de cepas de levaduras, de una temperatura de funcionamiento óptima, de cómo realizar fermentación en un proceso continuo: biorreactores.⁶

1.5.3 Tipos de fermentación

A continuación se mencionan los diferentes tipos de fermentación manejados por el hombre:

- Fermentación acética
- Fermentación alcohólica
- Fermentación butírica
- Fermentación de la glicerina
- Fermentación láctica

⁶ Véase Referencia 4.



- Fermentación pútrida

Para efectos del trabajo, solamente se hará mención en gran parte de la fermentación alcohólica y alguna otra fermentación importante.

1.5.4. Fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica (denominada también como fermentación del etanol o incluso fermentación etílica) es un proceso biológico de fermentación en plena ausencia de aire (oxígeno), originado por la actividad de algunos microorganismos que procesan los hidratos de carbono (por regla general azúcares: como pueden ser por ejemplo la glucosa, la fructosa, la sacarosa, el almidón, etc.) para obtener como productos finales: un alcohol en forma de etanol (cuya fórmula química es: $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) y dióxido de carbono (CO_2) en forma de gas. El etanol resultante se emplea en la elaboración de algunas bebidas alcohólicas, tales como el vino, la cerveza, la sidra, el cava, etc. Aunque en la actualidad se empieza a sintetizar también etanol mediante la fermentación a nivel industrial a gran escala para ser empleado como biocombustible.

La fermentación alcohólica tiene como finalidad biológica proporcionar energía anaeróbica a los microorganismos unicelulares (levaduras) en ausencia de oxígeno para ello disocian las moléculas de glucosa y obtienen la energía necesaria para sobrevivir, produciendo el alcohol y CO_2 como desechos consecuencia de la fermentación. Las levaduras y bacterias causantes de este fenómeno son microorganismos muy habituales en las frutas y cereales y contribuyen en gran medida al sabor de los productos fermentados. Una de las principales características de estos microorganismos es que viven en ambientes completamente carentes de oxígeno, máximo durante la reacción química, por esta razón se dice que la fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico.

La fermentación etílica ha sufrido algunas transformaciones con el objeto de aumentar la eficiencia química del proceso. Una de las mejoras más estudiadas en la industria es la posibilidad de realizar la fermentación alcohólica continua con el objeto de obtener mayores cantidades de etanol. Hoy en día el



procesamiento industrial de algunas bebidas alcohólicas como puede ser el vino o la cerveza se realizan en ambientes controlados capaces de ofrecer a un ritmo apropiado de estos productos de consumo al mercado. Esta vía ofrece una amplia materia de investigación en temas de eficiencia de biorreactores, empleando para ello teoría de sistemas de control.

Otra vía de investigación acerca de la mejora de los procesos industriales es la mejora de las cepas de levaduras (como puede ser la *Zymomonas Mobilis* que ofrece ventajas en los procesos continuos de fermentación), permitiendo la convivencia de una mayor densidad de las mismas durante la producción. Los métodos de fermentación continua se empezaron a patentar en la década de 1950 y desde entonces han hecho que la industria de las bebidas alcohólicas haya experimentado un crecimiento apreciable. Una de las características de la fermentación etílica industrial es la selección adecuada de las levaduras a inocular en el proceso de fermentación con el objeto de aumentar el rendimiento de la producción.

La fermentación industrial típica es esencialmente un proceso que se produce en un recipiente llamado fermentador o en general, biorreactor, mediante el cual determinados sustratos que componen el medio de cultivo (levaduras) son transformadas mediante la reacción microbiana en metabolitos y biomasa. Estos contenedores son herméticos y permiten retirar mediante canalizaciones apropiadas el dióxido de carbono resultante. Durante el proceso los microorganismos van aumentando de concentración en el transcurso de la reacción al mismo tiempo que el medio va modificando sus propiedades químicas y se forman productos nuevos como consecuencia de las reacciones anabólicas. Los tratamientos y el equipo necesario para obtener el mosto sacarificado, el cual se va a fermentar, dependerán de la materia prima de que se parta. Así por ejemplo, cuando son materias feculentas como las papas u otros tubérculos, se necesita el equipo necesario para su limpieza, cocción, molienda y sacarificación, antes de pasar al proceso de fermentación. Cualquiera que sea el origen del mosto sacarificado, éste debe ser diluido hasta una concentración



entre el 12 y el 18% de azúcar, pues una concentración muy alta inhibe la acción de la levadura debido al alcohol que se forma. El mosto diluido se pasa a grandes fermentadores donde se le añaden nutrientes (si son necesarios) y se le regula el pH hasta un valor entre 4.0 y 5.0 para facilitar la actividad de la levadura selecta y suprimir el crecimiento de otros microorganismos.

El inóculo de levadura se prepara aparte en recipientes en donde se esteriliza el medio, se añaden los nutrientes necesarios, se regula el pH, temperatura, etc. para el crecimiento óptimo de la levadura. El inóculo consiste en una cantidad que fluctúa entre el 5 y 10% en volumen de la cantidad de mosto que será fermentada. El tiempo de fermentación varía entre 30 y 72 horas dependiendo, entre otros factores, de la composición del mosto, concentración del azúcar, temperatura, pH, etc. La fermentación es anaeróbica y con desprendimiento de CO₂.

La temperatura óptima varía entre 25 y 35°C y es usualmente deseable mantener la temperatura entre 32 y 33°C. El licor fermentado es llamado vino o cerveza y contiene entre el 6 y el 9% de alcohol. La fermentación alcohólica generalmente se lleva a cabo de manera discontinua, aunque se han desarrollado métodos y experimentado nuevas técnicas para llevarla a cabo en forma continua. El vino o cerveza es destilado en una columna destiladora y luego purificado en una columna rectificadora. Ambas torres son usualmente del tipo de casquetes de burbujeo. Este es el mínimo equipo necesario para la producción de alcohol industrial.

Para la producción de alcohol de 96 - 96.5°GL de uso farmacéutico (alcohol fino) se debe añadir una columna para eliminar los productos de bajo punto de ebullición y para la producción de alcohol absoluto se necesita una columna que le elimine el agua. La mayoría de los avances en el proceso de destilación se han orientado hacia el ahorro del consumo de vapor y el mejoramiento de la calidad del alcohol.⁷

⁷ Véase Referencia 1



1.5.5. Fermentaciones anaerobias.

La fermentación anaerobia es comparativamente una operación sencilla. El medio estéril contenido en un fermentador también estéril, se inocula con el organismo apropiado, el organismo se multiplica rápidamente y la fermentación comienza. En las dos fermentaciones anaerobias más importantes, la de producción de alcohol por la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y en la formación de butanol-acetona por acción de la bacteria *Clostridium acetobutylicum*, se producen cantidades substanciales de CO₂ y CO₂ y H₂, respectivamente. Dicha substancias deben ser convenientemente eliminadas del fermentador y pueden recuperarse como subproductos. En las plantas de obtención de butanol los gases de un fermentador pueden ser utilizados para desplazar el oxígeno atmosférico del espacio vacío de otros de los fermentadores.⁸

1.5.6 Fermentación aerobia

Con el desarrollo de las fermentaciones aerobias la industria fue capaz de producir una gama de productos. Mucho de los cuales no están en competencia con los productos de síntesis. Se precisaron técnicas nuevas y mejoradas, así como mejores equipos y esto motivo el planteo de problemas de producción nuevos que fueron resueltos favorablemente, su aparición fue motivada por el lecho de que deben mantenerse condiciones de trabajos mas delicadas. La fermentaciones aerobias, tal como indica su nombre requiere grandes cantidades de oxígeno substanciales, los microorganismos aerobios no son capaces de proliferar en sistemas anaerobios y la solubilidad del oxígeno en el agua (7 ppm a 37 °C) impide la absorción inicial de suficiente oxígeno disuelto para satisfacer las necesidades constantes de los organismos. En el laboratorio pueden alcanzarse aerobia o al menos semi-aerobias, utilizando una delgada capa de un líquido en un Erlenmeyer o un fernbach.

El microorganismo crece habitualmente sobre la superficie a medida que el aire se difunde en el medio. La absorción puede aumentarse mediante

⁸ Véase Ref. 9 pág. 217-220



agitación del cultivo agitando los recipientes en incubación sobre plataformas adecuadas.

En la fermentación en gran escala se obtienen por diversos caminos, el primero es simplemente la realización a gran escala del método de la capa líquida poco profunda o método del plato. El medio estéril se coloca en plato de poca profundidad y se inocula con el organismo adecuado que se establece como una cutícula sobre la superficie del mismo. Los platos o bandeja se apilan en compartimientos en los cuales el aire estéril es forzado a circular sobre su superficie de modo que exista una atmósfera rica en oxígeno y sea arrastrado el CO₂ o cualquier gas que se produzca en la fermentación.

Las desventajas evidentes del método son las considerables cantidades de trabajo manual y equipo que se requiere.

El método más práctico de fermentación es el denominado del tanque profundo o aerobio sumergido utilizado universalmente excepto para ciertos caso especiales. En este método el aireamiento continuo del medio con agitación adecuada, permite el crecimiento exuberante del microorganismo de la masa del medio. Las velocidades de fermentación son mayores por este método que con otro precisando un menor consumo de energía y pudiendo emplear equipos de gran tamaño. Todas estas ventajas presenta, sin embargo problemas adicionales se precisa aire estéril en grandes volúmenes puesto que es costumbre inyectar en el medio de un cuarto a un volumen de aire por minuto por cada volumen del medio. El aire debe dispersarse finamente de modo que exista una gran superficie para la transferencia de oxígeno para el medio circundante. Los fermentados están equipados frecuentemente en su fondo, serpentines o tubo cruzados en los que se han practicados gran numero de perforaciones (rociadores). Pueden colocarse agitadores mecánicos por encima de los rociadores de aire, las burbujas de aire atraviesan todo el medio y expulsan el aire empobrecido de los tanques no es deseable la coalescencia de las burbujas pero puede hacerse poca cosa para impedirla.



El aire estéril se produce generalmente haciendo pasar aire comprimido a través de filtros estériles rellenos de lana de vidrio o carbón, en este tipo de filtro los microorganismos son separados del aire probablemente por la acción de fuerzas electrostáticas e inercia, la densidad aparente, el diámetro de las fibras o de las partículas y la distribución de las fibras contribuyen a la eficacia de la filtración. Desgraciadamente no basta un eficacia del 99.9 % ya que unas pocas células que pasen a través del filtro y pase en medio de fermentación pueden multiplicarse y dar problema rápidamente.⁹

1.5.7. Usos de la fermentación (alimentos)

El beneficio primario de la fermentación es la conversión del mosto en vino, cebada en cerveza y carbohidratos en dióxido de carbono para hacer pan. La fermentación de los alimentos sirve a 5 propósitos generales:

- Enriquecimiento de la dieta a través del desarrollo de una diversidad de sabores, aromas y texturas en los substratos de los alimentos.
- Preservación de cantidades substanciales de alimentos a través de ácido láctico, etanol, ácido acético y fermentaciones alcalinas.
- Enriquecimiento de substratos alimenticios con proteína, aminoácidos, ácidos grasos esenciales y vitaminas.
- Detoxificación durante el proceso de fermentación alimenticia.
- Disminución de los tiempos de cocinado y de los requerimientos de combustible.

La fermentación tiene algunos usos exclusivos para los alimentos. Puede producir nutrientes importantes o eliminar antinutrientes. Los alimentos pueden preservarse por fermentación, la fermentación hace uso de energía de los alimentos y puede crear condiciones inadecuadas para organismos indeseables. Por ejemplo, avinagrando el ácido producido por la bacteria dominante, inhibe el crecimiento de todos los otros microorganismos.

⁹ Véase Referencia 9 pág. 220-223



1.5.8. Usos de la fermentación (combustibles)

El empleo principal de los procesos de fermentación por parte del ser humano ha ido dirigido, desde muy antiguo, a la producción de etanol destinado a la elaboración de bebidas alcohólicas diversas. Esta situación cambió en el siglo XX ya que desde la crisis del petróleo de los '70 los estudios e investigaciones acerca de posibles combustibles alternativos han sido de gran interés para los gobiernos de todo mundo. Dentro de los estudios de biotecnología se ha intentado emplear el etanol resultante de la fermentación alcohólica de los desechos agrícolas en la obtención de biocombustibles (bioetanol) empleados en los motores de vehículos. Se ha intentado centrar los estudios en los reactores de fermentación continua con la esperanza de poder obtener no sólo grandes cantidades de etanol, sino que se aumente la eficiencia de los mismos. La investigación acerca de los substratos más adecuados, así como el empleo de levaduras de alto rendimiento es objeto de constante estudio.

El etanol fue una de las fuentes energéticas de combustible que más demanda mundial genera a comienzos del siglo XXI (con la excepción del petróleo), en el año 2004 los Estados Unidos produjeron más de 12.5×10^9 litros de etanol lo que supone un 17% de incremento sobre el año 2003. No obstante la generación de CO₂ durante el proceso pone en alarma acerca de su uso, debido a las consecuencias que puede traer para el cambio climático.

Los usos del etanol en la industria son amplios y van desde la elaboración de productos cosméticos, productos de limpieza, etc. Se ha investigado la posibilidad de emplear la fermentación efílica en el tratamiento de los vertederos de basura logrando de esta forma biocombustible, los estudios no han arrojado aplicaciones concluyentes. No obstante el empleo de la fermentación alcohólica tiene un éxito potencial en el tratamiento de los residuos de la industria alimenticia. Un proceso industrial muy investigado a comienzos del siglo XXI es la fermentación en estado sólido empleada en la bio-medicación y en la biodegradación de productos de desecho, la transformación biológica de



residuos agroindustriales, en la producción de compuestos bio-activos, de enzimas, de ácidos orgánicos, bio-pesticidas, biocombustibles y compuestos aromáticos, entre otros.

1.5.9. Efectos de la fermentación

Los efectos de la fermentación etílica se derivan de los productos resultantes del proceso que son liberados de una forma u otra al medio ambiente: el etanol y el dióxido de carbono. Los efectos de la fermentación dependerán de como se trate cada uno de estos subproductos. Uno de los efectos más sorprendentes se encuentra en la contaminación etílica existente en algunos insectos que se alimentan de frutas y del néctar de las flores, un ejemplo claro son las abejas. De la misma forma puede intoxicar a los pájaros que se alimentan de algunas bayas maduras ya parcialmente fermentadas.

La fermentación alcohólica en pequeña escala se produce de la misma forma en las raíces de algunas plantas que son regadas de manera muy frecuente, la falta de aireación del terreno hace que las condiciones anaeróbicas que necesitan las levaduras actúen pudiendo envenenar el suelo mediante un aumento de la concentración de etanol lo que se traduce en una disminución de la capacidad de producción de las mismas.

Otro aspecto importante es el efecto que produce en el cuerpo humano el consumo reiterado en los humanos de bebidas alcohólicas procedentes de la fermentación etílica ya que el etanol es una potente droga psicoactiva con un nivel de efectos secundarios además de la adicción que genera su consumo habitual. Los lugares donde se realiza la fermentación de algunas bebidas alcohólicas (generalmente sótanos) suelen ser peligrosos ya que el dióxido de carbono 'desplaza' al oxígeno pudiendo causar asfixia a las personas que se encuentren en estos lugares.

Para la operación básica de fermentación se han propuesto tres modalidades fundamentales:



- 1- fermentación discontinua
- 2- fermentación continua (sistema de recipiente uno)
- 3- fermentación continua (sistema de recipiente múltiple)

En la práctica comercial se utilizan operaciones discontinuas la mayor parte de las ventajas teóricas de las fermentaciones continuas se hayan contrapesadas por las enormes dificultades inherentes al mantenimiento de un sistema de cultivo puro cuando se manipulan grandes cantidades de caldos de cultivo. La fermentación continua precisa también un cultivo microbiano que no se deteriore a medida que se producen nuevas generaciones de células, requerimiento que no es fácil de cumplir.

Los intervalos de fermentación son los necesarios para alcanzar la concentración de producto más económicas. Las velocidades de formación de producto varían durante el ciclo. Al principio, (fase de incubación) el inóculo va multiplicándose hasta alcanzar un máximo de la población celular. Hacia el final de dicha fase el producto comienza a acumularse y se inicia la fase de formación del producto.

La tercera fase es la disminución de productividad, resultado de la actuación de factores tales como disminución del sustrato, acumulación de substancias tóxicas al organismo, alteración del cultivo, Etc.¹⁰

1.6. Destilación

1.6.1 Generalidades

Los aparatos de destilación y rectificación sirven para separar mezclas de líquidos en sus partes integrantes o para descomponerlas en mezclas de líquidos de composición diferente a la inicial.

¹⁰ Véase Referencia 1.



Con el nombre de destilación se entiende, en general el desprendimiento de vapor de un líquido y la condensación de líquido (licuefacción) a partir de este vapor. El vapor condensado tiene una composición diferente a la del líquido inicial. También puede descomponerse este en varias mezclas de distintas composiciones, que se llaman fracciones, por el procedimiento designado como destilación fraccionada.

La destilación fue durante muchos siglos el único procedimiento físico para variar la concentración de mezclas de líquidos puros, o para aislar determinados líquidos (por Ej., los aceites esenciales). Solo más tarde, a causa de las exigencias prácticas de un mayor enriquecimiento de la mezcla inicial en uno de sus componentes (p. Ej., el alcohol en la mezcla alcohol-agua), se ideó un nuevo método que hizo posible la separación en una sola operación de una mezcla líquida en sus componentes puros (p. Ej., la mezcla benceno tolueno-xileno.). Este procedimiento se designó con el nombre de rectificación. En ella se ponen en contacto en contracorriente el líquido y el vapor. El esclarecimiento de los procesos físicos que intervienen en la rectificación ha ido pareja al desarrollo de los aparatos químicos necesarios para su realización, y va unida también al desarrollo de los conocimientos científicos, que recientemente han recibido un impulso considerable.¹¹

El término destilación se emplea algunas veces para designar aquellos procesos en los que se vaporiza uno de los constituyentes de una solución. Por ejemplo, la destilación del agua. No obstante, en general esta denominación sólo se aplica correctamente a aquellas operaciones en las que la vaporización de una mezcla produce una fase vapor que contiene uno de los constituyentes en mayor cantidad y se desea recuperar uno o más de estos constituyente en estado casi puro. Así, la separación de una mezcla de alcohol y agua en sus componentes, es una destilación, mientras que la separación de una salmuera en sal y agua es una evaporación, aun en aquellos casos en que el producto sea únicamente el agua condensada y no la sal.

¹¹ Véase Referencia 8. Pág. 75-80



La exigencia básica para la separación de los componentes de una mezcla por destilación es que la composición del vapor sea diferente a la composición del líquido con el cual se encuentra en equilibrio. Si la composición del vapor es la misma que la del líquido, el proceso de destilación no podrá efectuar la separación. Teóricamente, la destilación nunca producirá la separación de un componente puro, aunque prácticamente el producto pueda obtenerse con un grado de pureza garantizado económicamente.¹²

Puesto que para la realización práctica de la rectificación han de producirse vapores y condensarse líquidos, dentro del aparato de rectificación podemos distinguir el dispositivo de rectificación propiamente dicho en el que tiene lugar el contacto de las fases en contracorriente, y los intercambiadores de calor anexos para la evaporación, la condensación y el enfriamiento. La estrecha unión de la destilación con la rectificación hace que resulte adecuada la denominación común de aparatos de destilación y rectificación con la que se designan los dispositivos empleados para la realización de ambos procesos.¹³

1.6.2. Descripción de la separación de mezclas por destilación

Como ya se ha mencionado el objetivo general de la destilación es la separación de las sustancias que tienen diferentes presiones de vapor a una temperatura dada, la palabra destilación tal como se usa, hace referencia a la separación física de una mezcla en dos o más fracciones que tiene puntos de ebullición diferentes.

Si se calienta una mezcla líquida compuesta de dos materiales volátiles, el vapor que se libera tendrá una mayor concentración del componente de más bajo punto de ebullición comparado con la del líquido del cual fue formado. Por el contrario, si se enfría un vapor caliente, el componente con el punto de ebullición más alto tiene una tendencia a condensarse en una mayor proporción

¹² Véase Referencia 2. Pág. 252- 256.

¹³ Véase Referencia 8. Pág.75-80



que el de menor punto de ebullición. Las primeras destilerías de alcohol para bebidas aplicaron estos conceptos fundamentales. Aunque en la antigüedad se conocía y practicaba la destilación y un destilador comercial había sido desarrollado por Coffey en 1832, la teoría de la destilación no fue estudiada sino hasta que se conoció el trabajo de Sorel en 1893. Otras personas que habían realizado algunos trabajos al respecto fueron Lord Rayleigh y Lewis. La tecnología actual a permitido la separación por destilación en gran escala de etilbenceno p-xileno, los cuales tienen solamente una diferencia en los puntos de ebullición de 3.9° F.

Ahora bien una columna de destilación consiste de una serie de platos (o bandejas). En operación normal hay una cierta cantidad de líquido en cada plato y se hace algún arreglo para que los vapores que ascienden pasen a través del líquido y hagan contacto con él. El líquido descendente fluye hacia abajo desde el plato de arriba a través de una bajante, atraviesa el plato siguiente, luego sobre un vertedero y después sobre otro bajante hacia el plato inferior tal como se presenta en la figura 1.

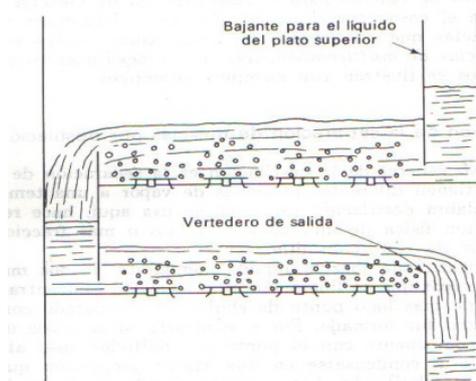


Figura 1. Interior de una columna de destilación. Tomada de fundamentos y modelos de proceso de separación

Por muchos años se usaron burbujeadores (de los cuales se presenta una gran variedad de ellos en la figura 2 para realizar el contacto entre el vapor y el líquido.

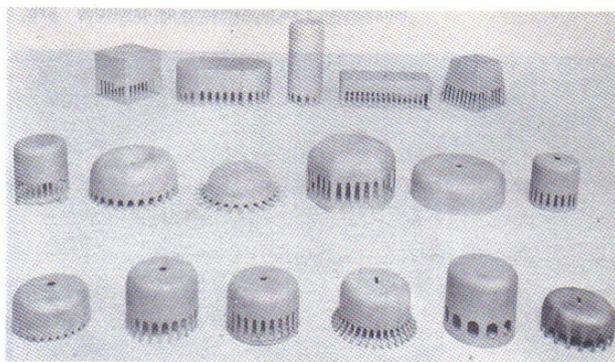


Figura 2. Tipos de burbujeadores. Tomada de fundamentos y modelos de proceso de separación

Estos dispositivos de contacto, promueven la producción de pequeñas burbujas de vapor con áreas superficiales relativamente grandes. Los desarrollos recientes de dispositivos para colocar en contacto las corrientes de vapor y las corrientes de líquido tienden a desplazar el uso de los burbujeadores. Las columnas nuevas comúnmente son equipadas ya sea con platos de contrapeso (ver figura 3) que algunas veces son llamados platos válvulas o platos perforados.

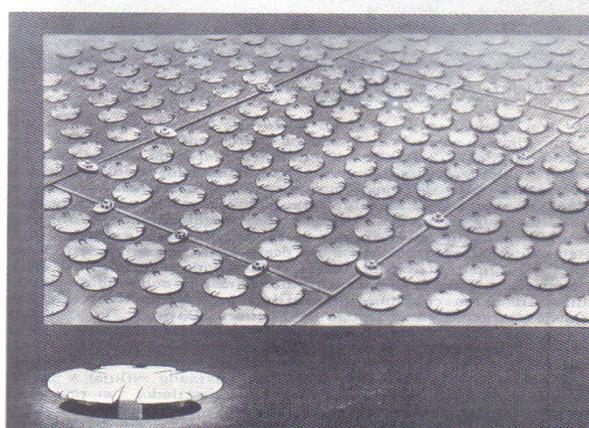


Figura 3. Sección de un plato de contrapeso. Tomada de fundamentos y modelos de proceso de separación

En los platos de válvulas, estas se abren ampliamente a medida que aumenta la velocidad del vapor y se cierran cuando disminuye la velocidad del



vapor. Este abrir y cerrar permite que la válvula permanezca sumergida en el líquido y por consiguiente mantiene un sello de líquido sobre un rango amplio de flujos de líquido y vapor.

Se han construido columnas de destilación hasta una altura de 200 pies y se han utilizados diámetros hasta de 44 pies.

Tal como se indica en la figura 4 el vapor V_n final después de salir del plato superior entra al condensador en donde es parcial o total mente condensado. El liquido formado es recogido en un acumulador de donde la corriente de liquido L_n (llamado reflujo) y la corriente de productos de cabeza D (llamado destilado) son retirados. Cuando el vapor de cabeza V_n se condensa totalmente el estado liquido y el destilado D es retirado como liquido, el condensador recibe la denominación de condensador total. Si el vapor V_n se condensa parcialmente al estado liquido para producir el reflujo L_n y el destilado D como vapor, el condensador se denomina condensador parcial. La cantidad de reflujo líquido se expresa comúnmente en términos de la relación de reflujo L_n/D .

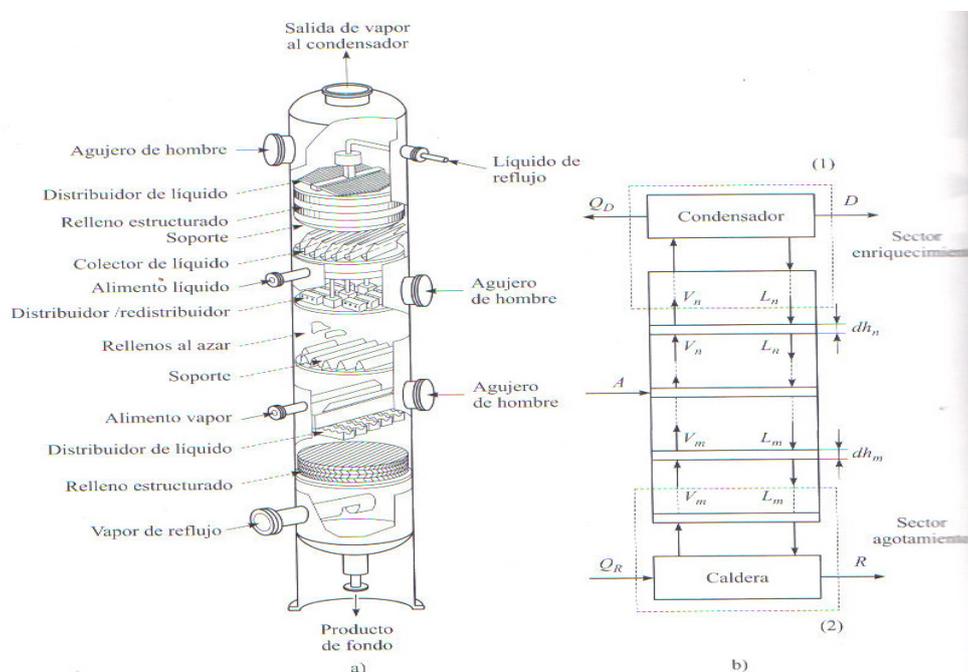


Figura 4. Separación de los dos componentes de una mezcla binaria con caldera y condensador. Tomada de operaciones de separación en Ing. Química



El líquido que sale del plato inferior de la columna entra al hervidor en donde es parcialmente vaporizado. El vapor producido puede fluir nuevamente hacia arriba hasta la columna y el líquido es retirado desde el hervidor y se denomina cola producto de fondo R. En la práctica, el hervidor generalmente está localizado por fuera de la columna.¹⁴

1.6.3. Diagrama de punto de ebullición

La figura 5 representa la relación que existe entre el punto de ebullición y la composición de equilibrio, a presión constante, para todas las mezclas de un líquido A (de punto de ebullición T_A) y un líquido B (de punto de ebullición T_B) siendo el líquido A el volátil. En tal diagrama se ha representado las temperaturas en ordenadas y las composiciones en abscisas.

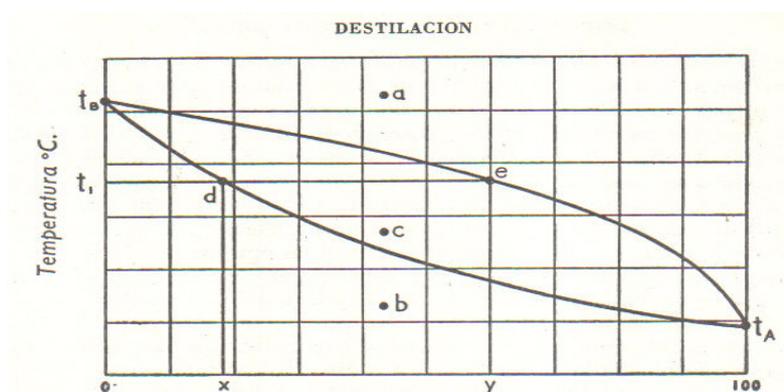


Figura 5. Diagrama típico de puntos de ebullición a presión constante. Tomado de introducción a la Ing. Química

El diagrama está formado por dos curvas, cuyos extremos coinciden. Cualquier punto de la curva superior (por ejemplo el e) corresponde a un vapor que tiene por composición la marcada por su abscisa y , y que por condensación a la temperatura correspondiente a su ordenada T_1 produce un líquido de composición x . cualquier punto de la curva inferior (tal como el d) que tiene la

¹⁴ Véase Referencia 6. Pág. 45-62



composición indicada por su abcisa x , corresponde a un líquido que comenzará a hervir produciendo un vapor de composición y ; todo ello a la temperatura T_1 . Cualquier par de punto (como los e y d) que están situados sobre la misma horizontal, representa composiciones de líquido y vapor que se encuentran en equilibrio a la temperatura indicada por la horizontal que pasa por los dos.¹⁵

1.6.4. Métodos de destilación

En la práctica, la destilación puede llevarse a cabo por dos métodos principales. El primero implica la producción de un vapor por ebullición de la mezcla líquida que se quiere separar, condensando seguidamente a estos vapores, sin llevar ninguna porción del líquido condensado como reflujo al calderín para que se ponga en contacto con el vapor que se desprende. En el segundo método se envía una parte del condensado al calderín de tal forma que este retorno se encuentra en íntimo contacto y en contracorriente con los vapores que se desprenden y van hacia el condensador. Este último método tiene una importancia grande que ha recibido el nombre especial de "rectificación".

1.6.5. Destilación de equilibrio

Existen dos tipos importantes de destilación que no implican rectificación; el primero de ellos es la denominada destilación de equilibrio o destilación relámpago y el segundo es el de destilación sencilla o destilación diferencial. La destilación de equilibrio implica la vaporización de una fracción determinada de una carga de líquido, manteniendo tanto el líquido como el vapor formado, en íntimo contacto hasta el final de la operación, de forma que el vapor está siempre en equilibrio con el líquido, retirando el vapor y condensándolo. La relación entre las composiciones del líquido y del vapor al final del proceso son las que corresponden al diagrama de equilibrio de la mezcla destilada.

¹⁵ Véase Referencia 2. Pág. 252-254



La destilación de equilibrio no es de gran importancia en la destilación de dos componentes. Este método se utiliza con sistemas multicomponentes, como en la refinación del petróleo, donde la mezcla que es el petróleo se calienta a presión en alambiques formados por tubos, se elimina la presión y el líquido calentado se vaporiza por la expansión brusca que se produce en condiciones aproximadas a las de equilibrio con el líquido recalentado.

1.6.6. Destilación diferencial

En la destilación diferencial o destilación sencilla, el vapor que se genera al hervir el líquido se va separando a medida que se forma del contacto con él y seguidamente se condensa. La destilación diferencial se aproxima a los procesos comerciales discontinuos en los que el vapor se elimina a medida que se va formando sin condensación apreciable. No obstante, este proceso no es efectivo como método de separación, especialmente en el caso en que los componentes a separar tengan muy alejados sus puntos de ebullición y los métodos que producen separaciones claramente definidas no son necesarios aun cuando sea posible utilizarlos.¹⁶

1.6.7. Rectificación

La rectificación, segundo de los métodos de destilación mencionados anteriormente a recibido gran desarrollo y es la más usado en la práctica como método de separación. Una unidad de rectificación consta de un a) calderín y hervidor en donde se genera el vapor, b) una columna de rectificación o fraccionamiento a través de la cual ascienden los vapores para ponerse en contacto en contracorriente con el líquido que desciende, c) un condensador que condensa los vapores que salen por la parte superior de la columna, enviando parte de este líquido condensado (el reflujo) nuevamente a la columna para que descienda en contracorriente con los vapores que ascienden, y descargando el resto del líquido como producto destilado.

A medida que el líquido desciende por la columna se va enriqueciendo en los componentes de la mezcla que tiene punto de ebullición más elevado y a

¹⁶ Véase Referencia 2. Pág. 264-267



medida que la corriente de vapor asciende por la columna se va enriqueciendo en los componentes de punto de ebullición más bajo. En consecuencia la columna es un aparato apropiado para poner a estas dos corrientes en íntimo contacto de tal forma que la corriente de vapor tienda a vaporizar los componentes de punto de ebullición bajo que lleva la corriente líquida y esta a su vez tiende a condensar los componentes de punto de ebullición elevados que lleva la corriente de vapor. La cabeza o parte superior de la columna está más fría que su base o fondo por lo que la corriente de líquido va calentándose a medida que desciende y la de vapor va enfriándose a medida que asciende. Esta transmisión de calor se efectúa entre el contacto del líquido y vapor y por ello se precisa que exista un contacto muy íntimo.¹⁷

La rectificación es la operación de separación de los componentes de una mezcla líquida o gaseosa, más utilizada, generalmente más económica y de la que se dispone mayor información.

- En ella las dos fases fluidas inmiscibles entre las que se desarrolla la transferencia de materia se originan por ebullición o condensación parcial de la mezcla, líquida o vapor a separar, respectivamente.
- Debido a la gran diferencia de densidades, las fases fluyen fácilmente en contracorriente por acción de la gravedad.
- Al acumularse progresivamente los componentes más volátiles y ligeros en el vapor ascendente y los más fijos y pesados en el líquido descendente se establece un gradiente de temperatura a lo largo de la columna.

Tanto para mantener como para formar el vapor habrá que comunicar energía, tanto con el alimento, muchas veces saturado o recalentado, como por la base de la columna, mediante la caldera o de ambos modos. Teniendo presente los siguientes factores limitativos:

¹⁷ Véase Referencia 2. Pág. 264-267



- intervalos de temperatura requeridos, a veces demasiados grandes o pequeños para ser económicos
- las presiones de operación pueden resultar demasiado elevadas o reducidas conduciendo a costes de instalación prohibitivos.
- Condiciones desfavorables de equilibrio.

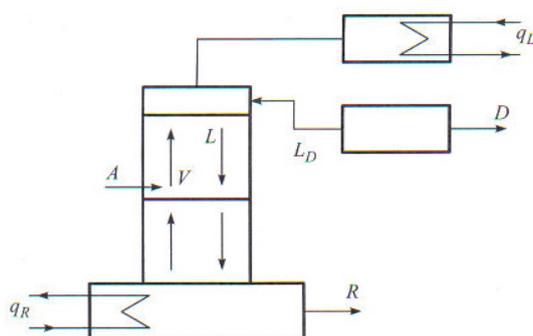


Figura 6. Representación esquematizada de una columna de rectificación convencional. Tomada de operaciones de separación en Inq. Química

En la figura 6 se representa en forma esquematizada una columna convencional donde llevar a cabo la operación de rectificación o destilación, con caldera, condensador y sectores de enriquecimiento y agotamiento. La corriente de alimentación entra en la columna con caudal A , saliendo de la misma como producto de cabeza la corriente de destilado con caudal D y como producto de fondo la corriente residual o residuo con caudal R . La corriente reflujo entra en la columna desde el condensador con un caudal L_D , conociéndose la relación L_D/D , como razón de reflujo externa, para distinguirla de la relación L/V , que se conoce como razón de reflujo interna, que puede variar de etapa a etapa dentro del sector de enriquecimiento y análogamente en el sector de agotamiento. L es el caudal genérico del líquido que cae a lo largo de la columna en uno u otro sector y V es el correspondiente de vapor que asciende desde la caldera por el sector de agotamiento y continua por el correspondiente de enriquecimiento. El caudal de calor que se extrae en el condensador se



representa por q_D ; mientras que el que se suministra en la caldera se representa por q_R .¹⁸

1.6.8. Aparatos de destilación

Para la realización de la destilación se emplea en general aparatos calentados externamente, o en los que se ha introducido un sistema de calefacción. Su construcción depende de la mezcla a destilar y del sistema de calefacción empleado. La figura 7 muestra un calderón de hierro colado con camisa de vapor.

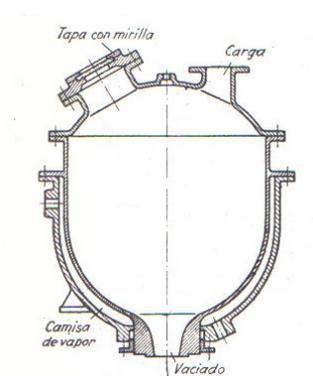


Figura 7. Caldera de destilación construida con hierro fundido. Tomada de destilación y rectificación

Para la destilación de alquitrán se emplea un recipiente cilíndrico de acero, calentado externamente por las paredes y el fondo figura 8

¹⁸ Véase Referencia 5. Pág. 237-239

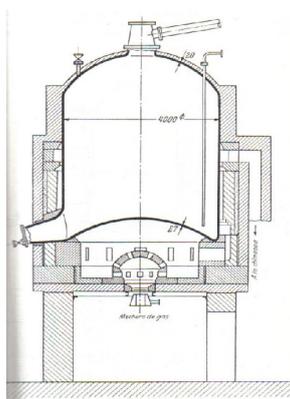


Figura 8. Caldera de destilación para alquitrán. Tomada de destilación y rectificación.

En la destilación de mostos son perjudiciales para la calidad del producto las elevadas temperaturas de la pared del recipiente obtenidas por contacto directo de los gases de combustión sobre ellos.

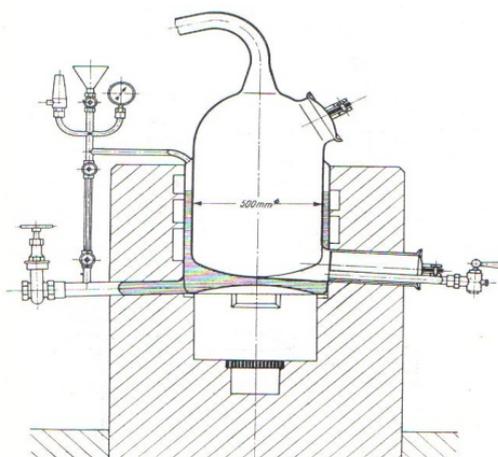


Figura 9. Calderin con baño de agua para la destilación de caldos alcohólicos. Tomada de destilación y rectificación.

Para evitar esto es conveniente interponer entre ambos una capa de agua, como se indica en la figura 9 cuando se requiera una mayor potencia de calefacción puede introducirse un serpentín de vapor en el interior del calderin figura 10. En casos particulares se utiliza sistemas desmontables de tubos rectos en el interior de recipientes cilíndricos.

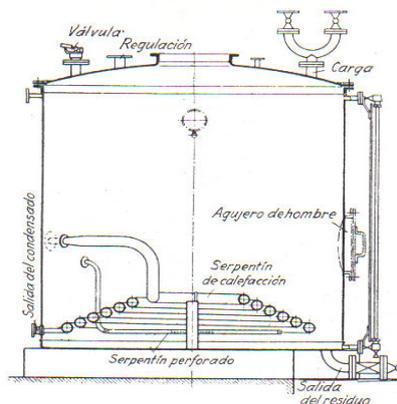


Figura 10. calderin fijo con serpentín de calefacción. Tomada de destilación y rectificación.

El aparato mas empleado en la gran industria para la realización de la destilación cerrada es el calentador tubular de la industria del petróleo esquematizado en la figura 11.

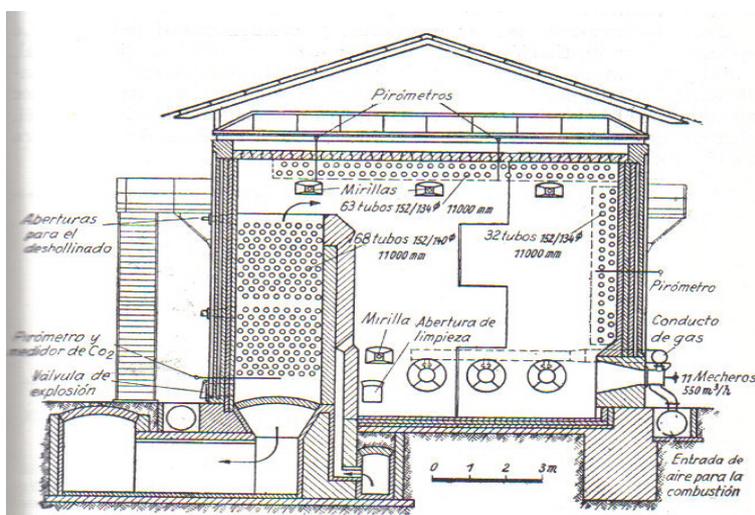


Figura 11. Retorta tubular para el tratamiento de 75 toneladas de crudo de petróleo por hora. Tomada de destilación y rectificación.

Se emplea para la calefacción y evaporación parcial del petróleo o el alquitrán, en conexión con la columna de rectificación. Cuando se trata de obtener fracciones del petróleo se evapora del 40 al 60 % de este, calentando el



líquido desde 150° C hasta 300-350° C. el líquido a calentar circula por el interior de los tubos, y estos se calientan exteriormente mediante la combustión de aceite, gas o carbón. Los tubos rectos se unen en serpentín mediante tubos curvados de acero fundido.¹⁹

1.7. Procesos de transferencia de calor

1.7.1. Transferencia de calor

La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuentes y recibidores. 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 un receptor independiente es, sin embargo inherentemente muy diferente. Generalmente la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación.

1.7.2. Teorías del calor

El estudio de la transferencia de calor se facilitara grandemente mediante una mejor comprensión de la naturaleza del calor. Es necesario comenzar el estudio 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 pierda la rigidez. En la fase gas, la presencia de energía termodinámica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que pueden permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado. También se ha

¹⁹ Véase Referencia 8. Pág. 86-88



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

Para una misma sustancia en sus diferentes fases, sus varias propiedades térmicas tienen diferente orden de magnitud. Por ejemplo el calor específico por unidad de masa es muy bajo para los sólidos, alto para los líquidos y usualmente de valores intermedios para los gases. Así mismo, en cualquier cuerpo que absorba o pierda calor, deben guardar especiales consideraciones respecto a si el cambio es de calor latente o de calor sensible, o de ambos. Mas aun, se conoce también que una fuente caliente es capaz de grandes excitaciones subatómicas, a tal grado que emite energía sin ningún contacto directo con el receptor. Y este es el principio fundamental de la radiación cada tipo de intercambio recibe sus propias peculiaridades.

1.7.3. Mecanismos de la transferencia de calor

Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres estas son, conducción, convección y radiación.

La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo, la dirección del flujo de calor será a ángulos rectos a la superficie, si las superficies de la pared son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Supóngase que una fuente de calor existe a la izquierda de una pared y que existe un receptor en el extremo derecho, se dice que el flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la superficie y el área. Si A es el área de una pared y t es la temperatura en cualquier punto de la pared y x es el grueso d en dirección del flujo de calor, la cantidad del flujo de calor es dada por:

$$dQ = kA \left(- \frac{dt}{dx} \right) \quad [\text{Kw}]$$



El termino $-dt/dx$ se llama gradiente de temperatura y tiene un signo negativo si se supuso una temperatura mayor en la cara de la pared en donde $x = 0$ y menor en la cara donde $x = X$. en otras palabras la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura dt que impulsa el calor a través de la pared de espesor dx .

La constante de proporcionalidad k es peculiar a la conducción de calor por conductividad y se reconoce como conductividad térmica. Aun cuando la conducción de calor se asocia usualmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, con sus respectivas limitaciones.

La convección es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezcla. Supóngase que un recipiente con un líquido se coloca sobre una llama caliente. El líquido que se encuentra en el fondo del recipiente se calienta y se vuelve menos denso que antes, debido a su expansión térmica. El líquido adyacente al fondo también es menos denso que la porción superior fría y ascendiendo a través de ella, transmitiendo su calor por medio de mezcla conforme asciende. La transferencia de calor del líquido caliente del fondo del recipiente al resto, es convección natural o convección libre. Si se produce cualquier otra agitación, tal como lo provoca un agitador, el proceso es de convección forzada.

Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito en una ecuación que imita la forma de la ecuación de conducción y es dada por:

$$dQ = hAdt \quad [\text{Kw}]$$

La constante de proporcionalidad h es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación, y debe ser evaluado experimentalmente. Se llama coeficiente de transferencia de calor, la ecuación anterior se le conoce como ley de enfriamiento de Newton.



La radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente a un receptor, parte de la energía se absorbe por el receptor y parte es reflejada por él. Basándose en la segunda ley de la termodinámica, Boltzman estableció que la velocidad a la cual una fuente da calor es:

$$dQ = \sigma \varepsilon dAT^4 \quad [\text{Kw}]$$

Esto se conoce como la ley de la cuarta potencia, T es la temperatura absoluta. Σ Es una constante dimensional pero ε es un factor peculiar a la radiación y se llama emisividad. La emisividad, igual que la conductividad térmica k o el coeficiente de transferencia de calor h, debe también determinarse experimentalmente.²⁰

1.7.4. Transmisión de calor

El problema de calentamiento más corriente que se presenta en la industria, es la transmisión de calor desde un fluido a otro a través de una pared metálica. Los fluidos que intervienen pueden ser: los dos líquidos, los dos gases o uno líquido y otro gaseoso.

Un caso muy corriente es el de transmitir el calor desde vapor de agua que se condensa a un líquido; el caso especial muy importante de este método de transmisión, es decir, desde vapor de agua que se condensa a un líquido hirviente, es tan importante que ha recibido un nombre especial (evaporación). Otro caso, como la transmisión de calor desde vapor de agua que se condensa a un líquido hirviente, desde un fluido caliente a otro frío y desde vapor de agua a un gas determinado, Etc.

1.7.5. Calentadores tubulares

La forma más sencilla de que un calentador tubular se presenta es en la figura 12 que corresponde a un calentador tubular de un solo paso.

²⁰ Véase Referencia 7. Pág. 13-17.

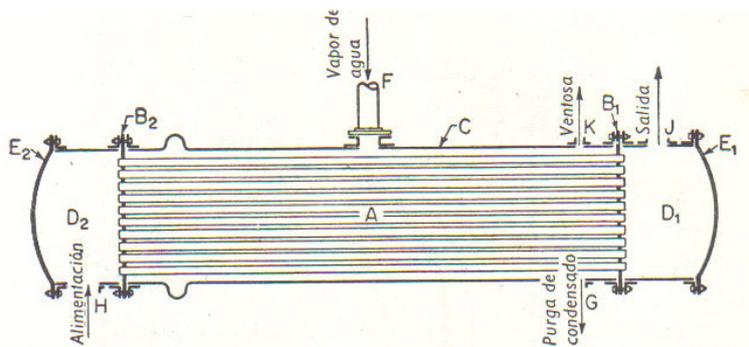


Figura 12. Calentador tubular de un solo paso. Tomada de introducción a la Ing. química.

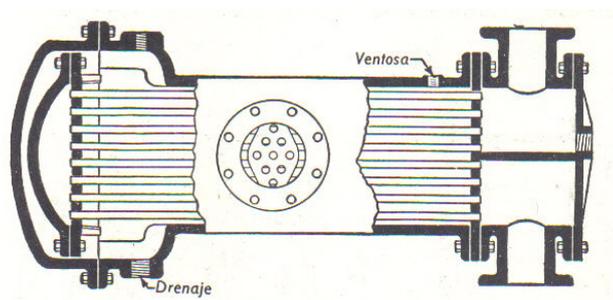


Figura 13. Calentador de cabeza flotante con dos pasos. Tomada de introducción a la Ing. química.

Consiste esencialmente en un paquete de tubos paralelos A, los extremos de los cuales están mandrilados a dos placas tubulares B₁ y B₂. El paquete de tubos está rodeado por una carcasa cilíndrica C y va previsto de dos cámaras de distribución, D₁ y D₂, una a cada extremo, y de dos tapas, E₁ y E₂. El vapor de agua u otro vapor cualquiera se introducen por el conducto F en el interior del espacio que rodea a los tubos, el vapor condensado se elimina por la purga G. El fluido que se va calentar se bombea al interior de una cabeza de distribución D₂ a través del conductor H, para luego a través de los tubos y de otra cabeza de distribución y sale por J. cualquier gas incondensable que acompañe al vapor se elimina por la purga K. la ventaja de este tipo de construcción es que pueden montarse grandes superficies de calentamiento en un volumen pequeño.



Una consecuencia de colocar una gran superficie en un calentador del tipo de la figura 14, es que el área de la sección recta de los tubos es muy grande también y, por tanto, la velocidad del fluido en el interior de ellos, pequeña. La velocidad, y por tanto el coeficiente de la transmisión de calor, puede aumentarse colocando un calentador multipaso.

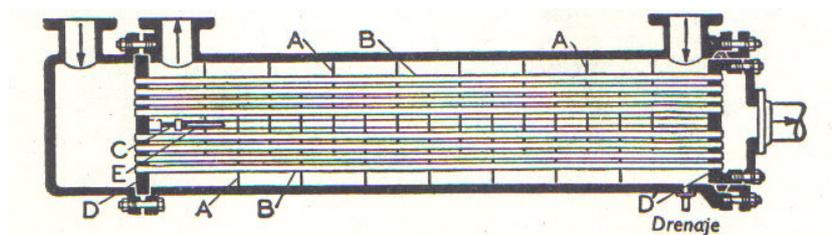


Figura 14. Cambiador de líquido a líquido. Tomada de introducción a la Ing. química.

La construcción de un multipaso disminuye la sección recta de paso del fluido y aumenta la velocidad del mismo con el correspondiente incremento en el coeficiente de transmisión de calor. Las desventajas son: primero, que el calentador es ligeramente más complicado, y segundo, que la pérdida por fricción a través del aparato aumenta debido al efecto de la velocidad en la caída de presión por fricción y la multiplicación de las pérdidas por entrada y salida.

Velocidades excesivamente bajas economiza potencia para el bombeo, pero exigen un calentador grande y, por consiguiente mucho más caro; para grandes velocidades se ahorra en el costeo de la primera instalación del calentador, pero no llega con mucho para suplir el coste de la potencia de bombeo.

1.7.6. Cambiadores de calor

Mientras que el término calentador cubre muchos dispositivos para transmitir calor desde un fluido a otro, este término se reserva con frecuencia para aquellos casos en los que el calor se transmite desde un vapor que se condensa, a un líquido. Los calentadores citados anteriormente se han proyectado



principalmente para este objeto. En tal caso, el coeficiente de película del lado del vapor de la superficie calentadora es normalmente mucho más elevado que el coeficiente de película del lado del líquido y, por tanto, en estos calentadores se ha prestado atención a las altas velocidades del líquido. La sección recta por el exterior de los tubos es grande por lo que la velocidad del vapor es pequeña pero por los altos valores de coeficiente de la película del lado del vapor esto no es una desventaja.

Cuando se ha de transmitir el calor desde un líquido a otro o desde un gas a otro el aparato se conoce corrientemente con el nombre de cambiador de calor. En este caso, los dos coeficientes de película, por el interior y el exterior de los tubos, son del mismo orden de magnitud. Puesto que el coeficiente global de transmisión U está más aproximado al más pequeño de estos dos coeficientes, al incrementar uno de ellos sin incrementar el otro no existe proporcionalidad efectiva en el incremento de U . en consecuencia, en los cambiadores de calor es de desear incrementar la velocidad del fluido que circula por el exterior de los tubos mejor que la del que circula por el interior.

Pero debido a consideración estructurales, es raro que se puedan colocar los tubos en las placas tubulares tan próximas, que la sección de paso de fluido por el exterior de los tubos sea menor que la sección de paso de los tubos y por tanto la velocidad del fluido exterior de los tubos es menor que del que circula por el interior, en construcción como la correspondiente a la figura 12. Para remediar esto, se colocan pantallas en el exterior de los tubos que alargan el camino y disminuyen la sección recta del paso del segundo fluido. Una construcción de este tipo se representa en la figura 14.

En este tipo de construcción las pantallas A están formadas por dos discos de metal con un sector cortado. Llevan tantas perforaciones como tubos el cambiador B se colocan en una posición correcta por medio de una o más varillas guías C, que están aseguradas entre las placas tubulares D y D' por medio de tornillos. Para que las pantallas queden debidamente espaciadas, se emplean



trozos de tubos B del mismo empleado en el calentador, colocados sobre las varillas guías C como separadores de las pantallas.

1.7.7. Cambiadores de calor de tubo concéntrico

Cuando las condiciones son tales que la relación entre el volumen del líquido en el interior de los tubos, la velocidad deseada y el tamaño de tubo da como resultado un pequeño número de tubos de paso, la construcción más sencilla es el cambiador de calor de tubos concéntricos como el representado en la figura 15.

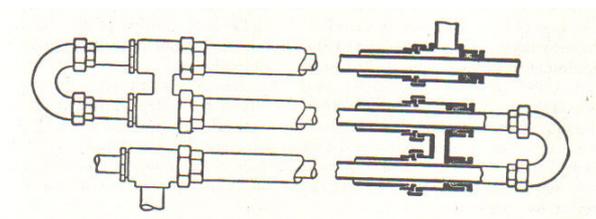


Figura 15. Cambiador de tubos concéntricos. Tomada de introducción a la Ing. química.

Este cambiador consiste en unos accesorios especiales que se conectan a las tuberías normales de hierro, de forma que uno de los líquidos fluye por la tubería interior y el otro fluye por el espacio anular que queda entre las dos tuberías. El cambiador consta de cierto número de pasos que se colocan casi invariablemente en columnas verticales. Si se precisa más de una tubería por paso, se conectan en paralelo al número de columnas que sean necesarias.²¹

²¹ Véase Referencia 2. Pág. 164-170.



CAPITULO 2

2.1. Diseño del proceso de destilación.

Para el diseño del proceso se tomaron en cuenta las siguientes variables:

1. Se asume una concentración de mezcla inicial de 50% en peso de etanol.
2. La presión de trabajo es de 1 atmósfera.
3. La temperatura a la cual el sistema logrará la evaporación es $T=81.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ver tabla 1 del apéndice).
4. Obtención de una mezcla destilada de $(75 \pm 5)\%$ en peso de etanol según tabla en apéndice.
5. Se dispondrá una producción de destilado de 3.0 litros en 1 hora.

Haciendo uso de las ecuaciones que se muestran a continuación junto con las figuras 1 y 2 del anexo se establecerá las condiciones iniciales, el proceso a seguir y los resultados de la destilación.

$$\ln \frac{B_1}{B_2} = \int_{\varepsilon_{F2}}^{\varepsilon_{F1}} \frac{d\varepsilon_F}{\varepsilon_D - \varepsilon_F} = J_1 - J_2 \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$\frac{E}{B^*} = \frac{B_1 - B_2}{B_1} \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$\varepsilon_E = \frac{B_1 \cdot \varepsilon_{F1} - B_2 \cdot \varepsilon_{F2}}{B_1 - B_2} \quad [\text{Ec. 3}]$$



Datos que son necesarios para el cálculo del proceso:

$$\rho_{\mu} = 0.935 \left[\frac{Kg}{l} \right] \quad (\text{Densidad de mezcla tomada del apéndice})$$

$$B_2 = 40 [Kg] \quad (\text{Carga de residuo dato que es necesario asumir})$$

$$\varepsilon_{F2} = 30\% \quad (\text{Porcentaje en peso del residuo es asumido})$$

Según figura 1 (ver anexo) $J_1 = 1.65$ y $J_2 = 1$ con ecuación las ecuación es anteriores tenemos $B_1 = 76.62Kg$

Ahora $B_1 = 76.62$ Kg y 50% en peso y $B_2 = 40$ Kg con 30% en peso representan las coordenadas extremas, que se utilizaran para el cálculo de la concentración del destilado.

$$\varepsilon_E = (B_1 \varepsilon_{f1} - B_2 \varepsilon_{f2}) / (B_1 - B_2)$$

$$\varepsilon_E = (76.62 * 0.5 - 40 * 0.3) / (76.62 - 40)$$

$$\varepsilon_E = 71.84\% (\text{peso})$$

La cantidad de destilado es 1.5 lt con densidad de 0.935KG/l

$$E = 1.405 \text{ kg}$$

Usando la ecuación 2 despejada tenemos:

$$B^* = E \times \left(\frac{B_1}{B_1 - B_2} \right)$$

$$B^* = 1.402 \times \left(\frac{76.62}{76.62 - 40} \right)$$

$$B^* = 2.934 \text{ Kg}$$



Que corresponde a 3.14 L de Mezcla en cantidad inicial para obtener un destilado de 1.5 lt a 71.84% en peso de etanol.

| Carga | Litros | Kg | % |
|-----------|--------|-------|-------|
| Inicial | 3.14 | 2.934 | 50 |
| Residuo | 1.64 | ----- | 30 |
| Destilado | 1.5 | 1.402 | 71.84 |

2.2. Cálculo del calor necesario para la evaporación.

Para el cálculo será necesario dos tipos de calor llamándole a uno calor sensible que llevara a la mezcla de 25°C a la temperatura de saturación que en este caso es de 81.9°C, luego contamos con el calor de ebullición que hará su labor a temperatura constante.

Es necesario establecer un flujo másico y los dispondremos de 3.0 l/h aproximadamente 0.779E-3 kg/s

Para encontrar el calor sensible asumiremos c_p constante en fase líquida para cada sustancia pura, luego utilizaremos la formula siguiente para calculo de entalpía.

$$h_{\mu} = h_1x_1 + h_2x_2 \quad [\text{Ec. 4}]$$



El valor límite de calor sensible es el inicio de la saturación para ello y para encontrar el calor de ebullición se hará uso del diagrama entalpía concentración visto en la figura 3 del anexo. Se tendrá que tomar en cuenta ciertas variables que se mencionaran en el momento de su utilización.

2.2.1. Calculo de entalpía de mezcla a T=25°C

$$c_{p-agua} = 4.187 \left[\frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \right]$$

$$c_{p-etanol} = 2.840 \left[\frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \right]$$

$$h_{t-25^{\circ}C} = x(h_{e\text{ etanol}} + h_{agua})$$

$$h_{t-25^{\circ}C} = 0.5(c_{p-etanol} \cdot T + c_{p-agua} \cdot T)$$

$$h_{t-25^{\circ}C} = 0.5(25)(4.187 + 2.840)$$

$$h_{t-25^{\circ}C} = 87.84 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

2.2.2. Cálculo de entalpía de mezcla a la temperatura de saturación.

Para obtener la entalpía a la temperatura de saturación (81.9°C) podemos hacer uso del diagrama entalpía concentración del anexo (figura 3).

$$h_f = 68.77 \left[\frac{Kcal}{Kg} \right] = 287.76 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$h_f = h_{sat}$$



El proceso siguiente se realizara sobre la isoterma y por medio del grafico encontraremos:

h_g : entalpia de vapor

h_{fg} : entalpia de vaporización

$$h_g = 349.85 \left[\frac{Kcal}{Kg} \right] = 1463.81 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$h_{fg} = 281.08 \left[\frac{Kcal}{Kg} \right] = 1176.07 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

2.2.3. Cálculo de calores.

Hallando el calor sensible tenemos:

$$q_s = \dot{m}(h_{sat} - h_{T-25^\circ C}) \quad [Ec. 5]$$

$$q_s = 0.779 \times 10^{-3} (287.76 - 87.84)$$

$$q_s = 155.73 \text{ w}$$

Para encontrar el calor de ebullición tenemos:

$$Q = \frac{q}{A} = h\Delta T \quad [Ec. 6]$$

Cuando ΔT debe ser 10 °C para que nos encontremos en ebullición nucleada (ver figura 4 del apéndice).

Antes se debe establecer el coeficiente de película "h" para ello hay que encontrar el numero de Nusselt y el equivalente de longitud para ser utilizado en el cálculo.



$$Nu = \frac{h\ell}{k} \quad [\text{Ec. 7}]$$

$$\ell = \frac{c_p \rho_L \sigma T_{sat}}{(h_{vap} \rho_v)^2} \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde:

$$Nu = 2.63E - 3 \left(\frac{k\Delta T \rho_L}{h_{vap} \rho_v \mu} \right)^{1.86} \text{Pr}^{0.952} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Cuando $\left(\frac{k\Delta T \rho_L}{h_{vap} \rho_v \mu} \right) \text{Pr}^{1/3} \geq 1.6$ (condición);

$$Nu = 3.91E - 3 \left(\frac{k\Delta T \rho_L}{h_{vap} \rho_v \mu} \right) \text{Pr}^{2/3} \quad [\text{Ec. 10}]$$

Cuando $\left(\frac{k\Delta T \rho_L}{h_{vap} \rho_v \mu} \right) \text{Pr}^{1/3} < 1.6$

Para el cálculo se utiliza el siguiente sumario de variable obtenidas de las diferentes tablas y figuras que se encuentran en el anexo, algunas de ellas se encuentran en otros sistemas pero por simplicidad han sido llevadas todas al sistema internacional.

$$c_p = 0.913 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ \text{C}} \right] = 3.823 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ \text{C}} \right]$$

$$k = 0.272 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{mh}^\circ \text{C}} \right] = 0.316 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^\circ \text{C}} \right]$$



$$\mu = 2.55[\text{cpoise}] = 2.55E-3 \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \right]$$

$$h_{fg} = 281.08 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right] = 1176.07 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$$

$$\rho_L = 935 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\rho_v = 0.5045 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k} = 27$$

$$\sigma = 0.00033 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$

Introduciendo estas variables en la condición tenemos:

$$\left(\frac{k \Delta T \rho_L}{h_{\text{vap}} \rho_v \mu} \right) \text{Pr}^{1/3}$$
$$\left(\frac{0.316 \times 10 \times 935 E - 3}{1176.07 \times 0.5045 \times 2.55 E - 3} \right) (\text{Pr})^{1/3} = 5.86$$

Podemos notar que este valor es mayor que 1.6 entonces:

$$Nu = 2.63E-3 \left(\frac{k \Delta T \rho_L}{h_{\text{vap}} \rho_v \mu} \right)^{1.86} \text{Pr}^{0.952} \quad [\text{Ec. 9}]$$

$$Nu = 2.63E-3 (1.952)^{1.86} (27)^{0.952}$$

$$Nu = 0.210$$



Hallaremos la longitud equivalente usando la ecuación 8.

$$\ell = \frac{c_p \rho_L \sigma T_{sat}}{(h_{vap} \rho_v)^2} \quad [\text{Ec. 8}]$$

$$\ell = \frac{3.823E3 \times 935 \times 0.0003 \times 81.9}{(1176.07 \times 0.5045E3)^2}$$

$$\ell = 0.274E-6 [m]$$

Podemos encontrar el coeficiente de película (Ec 7).

$$Nu = \frac{h\ell}{k}$$

Despejando queda así:

$$h = \frac{kNu}{\ell}$$

$$h = \frac{0.316 \times 0.210}{0.274E-6}$$

$$h = 242.19 \left[\frac{KW}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

Entonces el calor es igual a:

$$Q = \frac{q}{A} = h\Delta T \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$Q = \frac{q}{A} = 242.19 \times 10$$



$$Q = \frac{q}{A} = 2,422.0 \left[\frac{KW}{m^2} \right]$$

Este calor representa el flujo de calor por unidad de área.

Para determinar la razón de calor para vaporizar 3 litros en 1 hora es

$$q_e = \dot{m} h_{vap} \quad [\text{Ec. 11}]$$

$$q_e = 0.779E - 3 \times 1176.07$$

$$q_e = 916.6 [W]$$

La superficie mínima de calentamiento será:

$$q_e = QA \quad [\text{Ec. 12}]$$

$$A = \frac{q_e}{Q}$$

$$A = \frac{0.9166}{2422.0}$$

$$A = 3.784E - 4 [m^2]$$

Con los datos anteriores se establece que se necesita un calor total de 1.07 KW para ello utilizaremos una resistencia de 1.5 KW según diseño.

2.3. Selección del recipiente generador de vapor.

Se ha seleccionado un tubo de acero inoxidable de diámetro comercial 4 pulgadas chapa 40 el cual presenta las siguientes características:

Forma: cilíndrica



Diámetro interno: 4.026 pulgadas = 102.26E-3[m]

Longitud: 0.6 [m] = 0.6 [m]

Espesor de la pared: 0.237 pulgadas = 6E-3[m]

Espesor de las tapaderas: 0.25 pulgadas = 6.35E-3[m]

Realizaremos un análisis de resistencia para ello se utilizará el concepto de “recipientes de paredes delgadas” y se enuncia así: Se dice que un recipiente a presión es de paredes delgadas, cuando la relación del espesor de paredes al radio del recipiente es tan pequeña que la distribución del esfuerzo normal en un plano normal a la superficie de la pared es esencialmente uniforme en todo su espesor.

Para los diferentes cálculos es necesario conocer la presión de vapor saturado de la mezcla a la temperatura de 81.9 °C.

Se utilizaran las relaciones de Antoine:

$$P_{vap} = \exp\left[A - \frac{B}{C + T}\right] \quad [\text{Ec. 13}] \quad ; \quad \text{donde } P_{vap} \text{ (KPa) y } T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

| | C₂H₅OH | H₂O |
|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| A | 16.6758 | 16.2620 |
| B | 3674.49 | 3799.89 |
| C | 226.45 | 226.35 |

Obtenemos los diferentes valores de presión a la temperatura del sistema en estado puro para cada estancia:

$$P_{vap(\text{etanol})} = 116.65 \text{ [KPa]}$$

$$P_{vap(\text{agua})} = 51.15 \text{ [KPa]}$$



Ahora se utilizaran las diferentes relaciones de mezcla como son:

$$P = x_1P_1 + x_2P_2 + \dots \quad [\text{Ec. 14}]$$

$$x_A = \frac{P - P_B}{P_A - P_B} \quad [\text{Ec. 15}]$$

Conociendo el estado inicial de la mezcla donde $X_a = 50\%$ de alcohol y haciendo unas modificaciones a la ecuación 15 tenemos:

$$x_{e\text{tan ol}} = \frac{P - P_{\text{agua}}}{P_{e\text{tan ol}} - P_{\text{agua}}}$$

$$P = x_{e\text{tan ol}} [P_{e\text{tan ol}} - P_{\text{agua}}] + P_{\text{agua}}$$

$$P = 0.5[116.65 - 51.15] + 51.15$$

$$P = 83.9[\text{KPa}]$$

Conociendo la presión de saturación del sistema (83.9KPa) es posible ahora encontrar los diferentes esfuerzos en el material.

2.3.1 Esfuerzos tangenciales.

Los esfuerzos tangenciales en un tanque sometido a presión se encuentran mediante la siguiente fórmula:

$$S_t = \frac{PD_i}{2e} \quad [\text{Ec. 16}]$$

Ahora:

$$S_t = \frac{83.9 \times 102.26}{2 \times 6}$$

$$S_t = 714.97[\text{KPa}]$$



2.3.2. Esfuerzos longitudinales.

Este esfuerzo es la mitad del esfuerzo tangencial y se encuentra evaluando la siguiente expresión:

$$S_l = \frac{PD_i}{4e} \quad [\text{Ec. 17}]$$

Ahora:

$$S_l = \frac{S_t}{2}$$

$$S_l = \frac{714.97}{2}$$

$$S_l = 357.48[\text{KPa}]$$

2.3.3 Esfuerzos radiales.

Para el caso podemos despreciar este tipo de esfuerzo ya que no hay fuerza que la produzca.

2.3.4. Comparación de resultados.

Para realizar una comparación de esfuerzos es necesario conocer las propiedades del material y estas han sido obtenidas por el proveedor:

Resistencia Elástica = 275 MPa

Resistencia Ultima = 480 MPa

Con estos datos podemos denotar que tiene una resistencia elevada respecto a las que se calcularon. En vista que se generar vapor se dará un factor de seguridad de 5 donde el esfuerzo tangencial será:



$$S_t = 714.97x5$$

$$S_t = 3.57[MPa]$$

En base a la teoría del esfuerzo normal máximo, se compara el esfuerzo tangencial con el esfuerzo en tensión del límite elástico.

$$S_{limite_elastico} = 275[MPa]$$

Entonces:

$$S_{limite_elastico} \gg S_t$$

Se concluye que el recipiente se encuentra sobrado para soportar la presión de trabajo.

Aplicando además, la teoría de la energía máxima de distorsión, se considera un elemento orientado de tal manera que sus caras se encuentran sometidas a esfuerzos principales. Donde deben cumplirse las siguientes relaciones.

$$\sigma_1 = S_t$$

$$\sigma_2 = S_t$$

$$\sigma_3 = S_r$$

Donde estos se relacionan mediante la Ec.:

$$S_y = \frac{1}{2^{1/2}} [(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2]^{1/2} \quad [\text{Ecc. 18}]$$

Donde S_y es el esfuerzo de fluencia del material.

Sustituyendo.



$$S_y = \frac{1}{2^{1/2}} \left[\left(S_t - \frac{S_t}{2} \right)^2 + \left(\frac{S_t}{2} \right)^2 + (S_t)^2 \right]^{1/2}$$

$$S_y = \frac{1}{2^{1/2}} \left[(714.97 - 357.48)^2 + (357.48)^2 + (714.97)^2 \right]^{1/2}$$

$$S_y = 619.18 [KPa]$$

Ahora como

$S_y \gg 619.18$ KPa, se concluye que el recipiente resiste.



2.4. Pérdidas de calor y aislamiento térmico.

2.4.1. Aislamiento térmico.

Cualquier material o dispositivo que ofrece una alta resistencia a la transmisión de calor por conducción, radiación o convección puede usarse como aislante.

Un buen material aislante además de la alta resistencia a la transmisión de calor, tiene otras características relacionadas con la aplicación que se le dé, si hay que usarlo a temperaturas altas tiene que ser capaz de soportar estas temperaturas sin deterioro. Si hay que usarlo a temperaturas bajas debe estar protegido contra la humedad o no ser afectado por ella.

Los materiales aislantes deben ser inodoros y no absorber olores, resistentes a la putrefacción o desintegración y no servir de alimento a insectos.

La elección del tipo de material aislante, así como el espesor a usar se depende del costo; otros factores que deben considerarse son, la fácil aplicación y el costo del calentamiento que la aislación ha de proteger.

En general puede considerarse que los materiales aislantes consisten de pequeños espacios de aire rodeados de paredes sólidas. La baja conductividad térmica de estos materiales, se atribuye a la baja conductividad térmica del aire encerrado en los intersticios o células del material y en la extensión superficial relativamente pequeña del material sólido a través del cual puede ser llevado el calor por conducción.



Para bajas diferencias de temperatura a ambos lados del aislamiento, los materiales de más baja densidad aparentemente mostrarán las más bajas conductividades térmicas. Para mayores diferencias de temperatura, se producirán corrientes de convección dentro de los espacios aéreos y reducirán el poder aislante de estos materiales

Considerando que en el mercado local, se encuentra en mayor disposición la fibra de vidrio, se selecciona esta para el aislamiento del recipiente generador de vapor.

2.4.2. Pérdidas de calor.

Para el cálculo de las pérdidas es necesario conocer los coeficientes de transferencia de calor interno y externo, y entonces con ellos poder calcular sus respectivas resistencias. Estas pérdidas serán cuantificadas a partir de las siguientes características:

Tubo acero inoxidable con longitud 0.6m, Diámetro interno de 4.026 pulgadas, diámetro externo 4.5 pulgadas, con una conductividad térmica de 14.9 (W/m²K).

Será recubierto con un aislante de fibra de vidrio, espesor de 2.5cm con conductividad térmica de 0.05 (W/m²K) y los alrededores se encuentran a 25°C.

Entonces tenemos un tubo vertical:

Material: Acero Inoxidable

Diámetro interno: 102.26E-3 [m]

Diámetro externo: 114.3E-3 [m]

Conductividad térmica del tubo: 14.9 [W/m²C]

Temperatura del fluido: 81.9 [°C]

Temperatura del ambiente: 25 [°C]



Material del aislante: Fibra de Vidrio

Conductividad térmica del aislante: 0.05 [W/m°C]

Se sabe que del cálculo de calor se obtuvo el coeficiente de película por convección a $T = 81.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el interior del tubo.

2.4.3. Coeficiente exterior de película por convección.

Sabiendo que es aire el exterior, para encontrar el coeficiente de película a 25°C se tiene la siguiente ecuación:

$$h = 1.127(\Delta T)^{1/3} \quad [\text{Ec. 19}]$$

Cuando GrPr de 10^9 a 10^{12} ó $L > 0.4$; y

$$h = 1.217\left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{1/4} \quad [\text{Ec. 20}]$$

Cuando GrPr de 10^4 a 10^9 ó $L < 0.4$

Donde h en [Kcal/hm²°C]

Como $L > 0.4$ m entonces sustituimos en la ecuación 19:

$$h_e = 1.127(\Delta T)^{1/3} \quad [\text{Ec. 19}]$$

$$h_e = 1.127(81.9 - 25)^{1/3}$$

$$h_e = 4.33 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^2\text{ }^{\circ}\text{C}} \right]$$



$$h_e = 5.04 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

2.4.4. Resistencias térmicas.

Teniendo las conductividades térmicas y los coeficientes de película interior y exterior se procede a hacer los respectivos cálculos para determinar las resistencias térmicas individuales y la total.

Se hallará primero las áreas de contacto interior y exterior, donde el diámetro interior será el diámetro interno del tubo y el diámetro exterior será la suma del diámetro exterior del tubo más dos veces el espesor del aislamiento.

Después con estos datos puede encontrarse los valores de las resistencias convectivas y en forma conjunta los valores de las resistencias conductivas, se presentan de forma general las ecuaciones a utilizar para cada uno de los casos:

$$A = \pi DL \quad [\text{Ec. 20}]$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad [\text{Ec. 21}]$$

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi kL} \quad [\text{Ec. 22}]$$

Tenemos entonces los valores de las áreas utilizando la Ec. 20:

$$A_i = \pi D_i L$$

$$A_e = \pi D_e L$$

$$A_i = \pi \times 102.26E - 3 \times 0.6$$

$$A_e = \pi \times 164.3E - 3 \times 0.6$$



$$A_i = 0.193[m^2]$$

$$A_e = 0.310[m^2]$$

Se procede a calcular las resistencias individuales:

$$R_{conv-1} = \frac{1}{h_i A_i} = \frac{1}{(242.19E3)(0.193)} = 0.021E-3 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

$$R_{tubo} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_{tubo} L} = \frac{\ln\left(\frac{114.3}{102.26}\right)}{2\pi(14.9)(0.6)} = 0.002 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

$$R_{aislamiento} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_{aislamiento} L} = \frac{\ln\left(\frac{164.3}{114.3}\right)}{2\pi(0.05)(0.6)} = 1.92 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

$$R_{conv-2} = \frac{1}{h_e A_e} = \frac{1}{(5.04)(0.31)} = 0.64 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$

Ya que todas las resistencias se encuentran en serie la suma de las cuatro nos dará la resistencia total.

$$R_{total} = R_{conv-1} + R_{tubo} + R_{aislamiento} + R_{conv-2}$$

$$R_{total} = 0.021E-3 + 0.002 + 1.92 + 0.64$$

$$R_{total} = 2.562021 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$$



La velocidad de pérdida de calor es representada mediante:

$$\dot{q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad [\text{Ec. 23}]$$

$$\dot{q} = \frac{81.9 - 25}{2.56}$$

$$\dot{q} = 22.21 [W]$$

Se puede determinar algunos datos adicionales como son la caída de temperatura a través del tubo y el aislamiento. Modificando la Ec. 23 y despejando tenemos:

$$\Delta T = \dot{q} R$$

Para el tubo:

$$\Delta T_{tubo} = \dot{q} R_{tubo}$$

$$\Delta T_{tubo} = (22.21)(0.002)$$

$$\Delta T_{tubo} = 0.044 [^{\circ}C]$$

Para el aislamiento:

$$\Delta T_{aislamiento} = \dot{q} R_{aislamiento}$$

$$\Delta T_{aislamiento} = (22.21)(1.92)$$

$$\Delta T_{aislamiento} = 42.64 [^{\circ}C]$$

Esto significa que la mayor caída de temperatura representativa es la del aislamiento y de esta forma se protege el calor interno.



2.5. Diseño para proceso de fermentación

2.5.1. Tipo de proceso para obtención de alcohol

Aunque actualmente la mayor parte de alcohol etílico es producido por los métodos de síntesis a través de reacciones que son derivados del petróleo, es evidente que en el país carece de recursos petrolíferos; la fermentación, como proceso para producir alcohol etílico, sigue siendo la única alternativa factible.

2.5.2. Selección de la materia prima

Para la producción de etanol por fermentación se puede partir de tres clases de materia prima:

- a) sustancias sacarinas: melaza, sorgo, remolacha, caña de azúcar, etc.
- b) Sustancias feculentas: granos cereales, tubérculos, etc.
- c) Sustancias celulósicas: madera, residuos agrícolas, etc.

Con todas estas materia primas se produce el alcohol por fermentación de azúcares con levadura. Las materias primas sacarinas fermentan directamente; las feculentas, contienen almidón que debe ser primero hidrolizado (con enzimas, malta, mohos o ácidos) o azúcares fermentables; y las celulósicas son convertidas a azúcares por hidrólisis con ácidos inorgánicos (aunque se está difundiendo el uso de la enzima celulasa para esta función).

Es decir, que la selección para la materia prima estará orientado a tipos de sustancias sacarinas evidentemente el proceso hace más fácil, no se necesitará uso de catalizadores para realizar el proceso.

2.5.3. Fermentación.

Para el tipo de mosto que se utilizará, este debe ser diluido hasta una concentración entre el 12 y el 18% de azúcar, pues una concentración muy alta inhibe la acción de la levadura debido al alcohol que se forma. El mosto diluido se pasa a fermentadores donde se le añaden nutrientes (si son necesarios) y se



regula el pH hasta un valor entre 4.0 y 5.0 para facilitar la actividad de la levadura selecta y suprimir de otros microorganismos.

El inóculo de levadura se prepara aparte en recipientes en donde se esteriliza el medio, se añaden los nutrientes necesarios, se regula el pH, temperatura, etc. Para el crecimiento óptimo de la levadura. El inóculo consiste en una cantidad que fluctúa entre el 5 y 10 % en volumen de la cantidad de mosto que será fermentada.

El tiempo de fermentación varía entre 30 y 72 horas dependiendo, entre otros factores, de la composición del mosto, concentración de azúcar, temperatura, pH, etc. La fermentación anaeróbica y con desprendimiento de CO₂.

La temperatura óptima varía entre 25 y 35 °C y es usualmente deseable mantener la temperatura entre 32 y 33 °C. El licor fermentado contiene entre 6 y 9 % de alcohol

A pesar de los avances que se han realizado en el desarrollo de la fermentación, se considera aún más adecuado el proceso de fermentación discontinua debido principalmente a:

- La fermentación continua es adecuada para grandes volúmenes de producción
- El equipo de fermentación continua es mucho más especializado que el ocupado en la discontinua, por lo que es menos flexible en lo que se refiere a su utilización y posibles modificaciones.
- El costo del equipo e instrumentación es mayor para la fermentación continua
- Es difícil mantener una alta productividad de la levadura el proceso continuo



- En un proceso continuo, las operaciones de esterilización son más complicados y difíciles

Al mosto sacarificado se le regula el pH hasta un valor d 4.5 con acido sulfúrico y la temperatura de fermentación se debe mantener entre 28 y 32 °C.

El inóculo será de 10% en volumen y se preparará con la materia prima en un tanque cerrado fermentador.

El tiempo de fermentación debe ser de 60 a 72 horas.

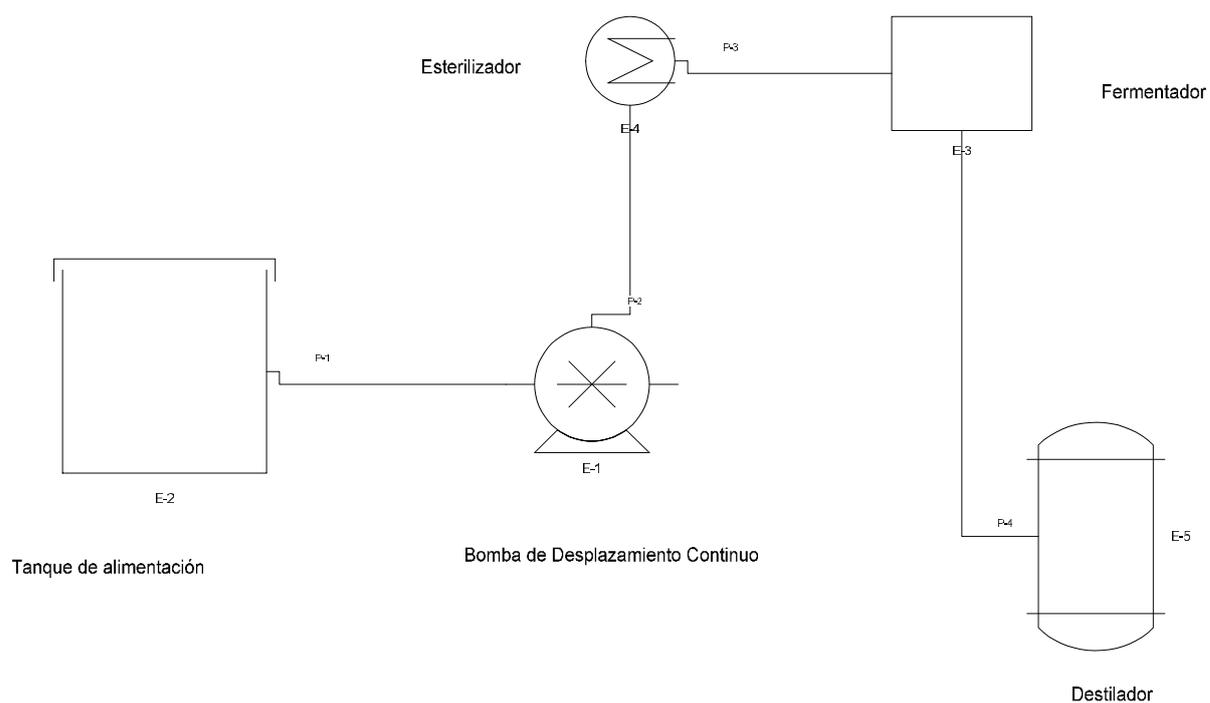


Figura 16. Diagrama de bloque en un proceso simple de fermentación



2.6. Diseño eléctrico del sistema destilador.

El sistema contara de señales eléctricas ya se a través de sensores o de señales discretas.

2.6.1 Circuito eléctrico para el destilador.

La secuencia del sistema utilizara sensores de niveles que me indicaran el paso y la descarga del flujo que se está evaporando, de la misma forma utilizara un sensor de temperatura que me indique o muestre en una pantalla los valores de temperatura que se mantendrá en cierto rango, este a la vez regulara la cantidad de calor para compensar las variaciones de temperatura cuando el flujo descargue.

2.6.1.1 Sensores de nivel.

El nivel de líquido en un recipiente se puede medir en forma directa monitoreando la superficie del líquido, o de forma indirecta relacionando la altura. En forma directa tenemos los sensores tipo “flotador”, este utiliza un brazo o varilla de una palanca que gira haciendo contacto sobre un actuador que genera una señal que en este caso para permitirá la entrada de la mezcla (alcohol-agua).

Se tiene también los sensores capacitivos pero tiene la desventaja de no trabajar a altas temperaturas.

El espacio que utiliza estos tipos de sensores utilizan un gran espacio, este inconveniente generara deficiencia en el sistema.

El tipo de sensor que se utilizará serán de tipo electrodos, del cual se conectará a una fuente de 5 voltios ya que el espacio que utiliza es adecuado para el tipo de destilador.



2.6.1.2 Sensor de temperatura.

De los diferentes tipos de sensores tenemos los siguientes:

Termoresistivos, termopares, termistores, tiras bimetalicas.

- Los termoresistivos son adecuados trabajando señales y medirlas para transformarlas a un valor, la desventaja que tiene este tipo de sensor es la linealidad de la temperatura respecto al voltaje, es decir, a cierto valor se comporta lineal pero tiene una inestabilidad para transformar la señal, se necesitaría un circuito que compensa esa desalineación.
- Los termopares tienen la ventaja de manejar bastante bien la linealidad y la compensación de señales, el inconveniente que presenta es el alto costo.
- Las tiras bimetalicas son excelentes para enviar señales “todo o nada” pero presenta la dificultad que no mide respecto a un valor o referencia.
- El termistor tiene la ventaja de tener excelente linealidad y bajo costo

El sensor que se utilizara en el destilador será el LM35 ya que este tiene todas las características para la operación que maneja el destilador este generalmente trabaja entre 4 y 5 voltios, genera aproximadamente $10\text{mv}/^{\circ}\text{C}$, su rango de temperatura pueda estar entre -30 a 150°C .

El diseño del circuito deberá ser capaz de medir la temperatura, mantener los valores en cierto rango y que el usuario puede cambiar dependiendo de las necesidades, lo ideal sería trabajar el rango entre la temperatura de ebullición de la mezcla pero para efectos de análisis y conveniencia se dispondrá que este circuito de la opción de cambiarlo.



El funcionamiento de este circuito es el siguiente, primero el voltaje del pin out del LM35, lo vamos a duplicar a través de un juego de amplificadores operacionales (LM358), el cual está configurado como amplificador no inversor, la salida del Amplificador, lo conectamos al puerto de amplificador, el cual está configurado como conversor A/D a 8 bit, este dato se almacena en la variable dato, el cual lo dividimos para d 2, con la finalidad de estabilizar la señal que ingresa del pin OUT del LM35. Si la temperatura permanece entre 77 °C y 81°C, no se enviará una señal para regular la resistencia eléctrica ya sea para calentar mas o enfriar, si deseamos modificar los rangos de temperatura, presionamos el pulsador E, con los otros 2 botones aumentamos o disminuimos la temperatura mínima a comparar, y una vez que estemos de acuerdo presionamos la tecla, luego nos pide programar la temperatura máxima, procedemos igual que el caso anterior y cuando presionemos la tecla E, parpadeará tres veces el led, indicando que los nuevos valores ya fueron guardados en la memoria no volátil.

El lenguaje para programa el microcontrolador fue en lenguaje C, se muestra el mnemónico de la programación que se hizo.

```
DEFINE LCD_DREG PORTB          *bit de datos del LCD empezando*

DEFINE LCD_DBIT 0              *POR B.0,B.1,B.2 Y B.3*

DEFINE LCD_RSREG PORTB        *bit de registro del LCD conectar*

DEFINE LCD_RSBIT 5             *en el puerto B.5*

DEFINE LCD_EREG PORTB         * bit de Enable conectar en el puertoB4

DEFINE LCD_EBIT 4

DEFINE ADC_BITS 8              *fije número de bits del resultado

                                (5,8,10)

DEFINE ADC_CLOCK 3             *Fije EL CLOCK (re=3)

DEFINE ADC_CLOCK 3             *Fije el tiempo de muestreo en Us
```



DEFINE ADC_SAMPLUES 50 *es el numero de microsegundo que el
Programa espera entre fijar el
canal
y comenzar la conversión A/D.

TRISA=%1 *El puerto A es de entrada.*

ADCON1=%00001110 *El puerto A.0 es conversor de los
Demás digitales.

dato **VAR BYTE** *Crear variable dato para guardar*

tempbaj **VAR BYTE**

tempalt **VAR BYTE**

x **VAR BYTE**

releF **VAR** port D.2 *nombre de los pines*

tempbaj **VAR** portD.3

led **VAR** portD.4

enter **VAR** portD.5

bsubir **VAR** portD.6

bbajar **VAR** port D.7

EEPROM 0, (77,81)

Inicio: *3 parpadeos del led que indica
funciona

FOR X=1 TO 3

HIGH led



PAUSE 200

LOW led

PAUSE 200

NEXT

READ 0,tempbaj ;lee la EEPROM 0 y lo guarda en tempbaj

READ 1, tempalt ;lee la EEPROM 1 y lo guarda en tempalt

Sensar;

ADCIN 0, dato ;leer el canal 0 (AO) y guarde en dato

LCDOUT \$fe,1, "T.mi T.actu T.ma" ;limpiar LCD y sacar texto

dato=dato/2 ;el dato dividir para 2

LCDOUT \$fe,\$c6, DEC dato,"oC" ;display el decimal de dato

LCDOUT \$fe,\$c0,DEC tempbaj,"oC" ;display el decimal de tempbaj

LCDOUT \$fe,\$cc,DEC tempalt, "oC" ;display el decimal de tempalt

FOR x=1 to 50 ;repetir 50 veces

IF entr=0 THEN grabarla

PAUSE 10

NEXT

IF dato<tempbaj then calentar ;si dato es <tempbajar ir a calentar

IF dato> tempalt THEN enfriar

LOW releC:LOW releF

GOTO sensar



Calentar:

HIGH relec:LOW releF

GOTO sensar

Enfriar:

HIGH releF:LOWreleC

GOTO sensar

Grabar la:

GOSUB soltar

GOTO grabar 1

Sumar 1:

GOSUB soltar

IF tempbaj > 40 **THEN** grabar 1

Tempbaj= tempbaj +1

GOTO grabar 1

Grabar A:

GOSUB soltar

WRITE 0, tempbaj

Grabar 2:

LCDOUT \$fe,1, "Programar temp."

LCDOUT \$f, \$cO, "alta=",dec tempalt,"oC"

PAUSE 100



IF bbajar=0 **THEN** restar 2

IF bsubir=0 **THEN** sumar 2

IF enter=0 **THEN** grabar B

GOTO grabar 2

Restar 2:

GOSUB soltar:

GOSUB soltar

IF tempalt< 5 **THEN** grabar 2

Tempalt=tempalt-1

GOTO grabar2

Sumar 2:

GOSUB soltar

IF tempalt >50 **THEN** grabar2

Tempalt=tempalt+1

GOTO grabar2

grabarB:

GOSUB soltar

WRITE 1,tempalt ;escribir en la dirección 1 de la EEPROM

GOTO inicio

Soltar:

HIGH led



PAUS 150

LOW led

IF bbajar=0 **THEN** soltar2

IF bsubir=0 **THEN** soltar2

IF enter=0 **THEN** soltar2

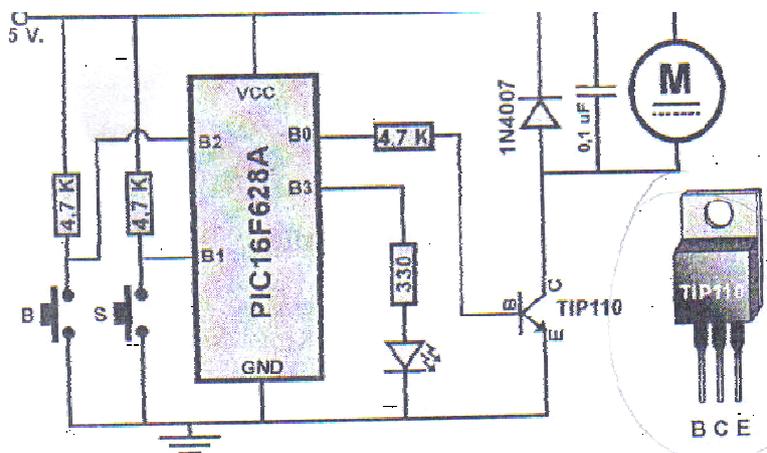
PAUSE 100

RETURN

END



Diagrama para control del motor de las bombas:



El lenguaje de programación será el siguiente:

```
botsubir VAR portb.1 ;nombre para el pin B1
botbajar VAR portb.2 ;nombre para el pin B2
LED VAR portb.3 ;nombre para el pin b3
FREC VAR BYTE ;variable FREC tamaño 255
bandera VAR BIT ;variable bandera de 1 bit
FREC=125 ;valor inicial para variable FRECUENC
HIGH LED ;Encender el led para saber que
enciende
PAUSE 500 ;por medio segundo
LOW LED ;apagar el led
PROG:
PWM PORTB.O,FREC,30 ;Sacar PWM 30 ciclos de 125s
LOW LED ;apagar el led
```



```
IF botsubir=0 THEN subir           ;si pulsa el boton S ir a subir
IF botbajar=0 THEN bajar          ;si se pulsa el botón B ir a bajar
Bandera=0                          ;bandra cargado con cero
GOTO PROG
SUBIR
IF FREC>249 THEN aviso            ;si supera a 249 ir a aviso
IF bandera=1 THEN proa            ;si la bandera esta en 1 salir
HIGH LED                          ;encender el led
bandera=1                          ;cargar la bandera con uno
FREC=FREC+25                       ;sumar 25 a la variable FREC
GOTO PROG                          ;lr a prog
BAJAR:
IF FREC< 26 THEN aviso            ;si baja de 26 ir a aviso
IF bandera=1 THN proa              ; si la bandera esta en 1 salir
HIGH LED                          ; encender el led
Bandera=1                          ;cargar la bandera con uno
FREC=FREC-25                       ;restar 25 a la variable frecuencia
GOTO proa                          ;ir a proa
Aviso:
HIGH led                          ;enceder led
GOTO PROG                          ;lr a proa
```



CAPITULO 3

3.1. Plan de mantenimiento

Un plan de mantenimiento es recomendable en todos los equipos ya que da un parámetro a seguir previamente establecido según criterio del fabricante o diseñador.

Las bases necesarias para establecer los tiempos óptimos de mantenimiento y los objetivos a cumplir en cada uno de ellos es de igual forma el diseñador el que decide cuales serán los equipos a intervenir dentro de un todo (maquina), estas bases de decisión son tomadas de acuerdo a: ritmos de desgastes, lubricación, horas de uso, ambiente de trabajo, tiempo de vida, entre otros.

Se dará un plan de mantenimiento dadas las tareas a realizar y con tiempos o periodos de realización entre ellos como quincenal, mensual, trimestral, anual.

3.1.1. Plan de mantenimiento quincenal

Este mantenimiento será necesario para que el equipo se encuentre en condiciones aceptables en cuanto a suciedad que se acumula en sus alrededores o bien podemos decir limpieza externa, también incluirá una inspección de partes la cual consiste en verificar que no existan deterioros ya sea de índole mecánico o eléctrico, luego se procederá a realizar un reporte de fallas en el caso de que existan para ser reparadas.



3.1.2. Plan de mantenimiento mensual

Este mantenimiento será más calificado e implica que la persona que lo realice tenga un criterio para la detección de fallas y conciencia de las tareas que esta realizando.

Muestra de esto es que el técnico operador tendrá que poner en marcha ciertas partes del equipo y detectar si existiesen ruidos o anomalías en las partes móviles, calentamientos o vibraciones.

El detalle de tareas a realizar será:

- Limpieza externa del equipo
- Inspección visual de partes (búsqueda de deterioros)
- Operación de válvulas: esta tarea consiste en abrir y cerrar las válvulas de manera tal que estas operen de manera fácil e eficiente de no ser así proceder a una lubricación.
- Arranque de las bombas: el objetivo de arrancar las bombas es verificar la operación de las mismas y detectar si existieran fallas tales como un consumo de corriente anormal, calentamiento, vibración.
- Mientras operan las bombas se puede hacer una inspección de cero fugas
- Inspeccionar las botoneras del sistema eléctrico
- Realizar pruebas con el calentador
- Verificar consumos de corriente

Al finalizar elaborar un reporte de mantenimiento y anexarlo en la bitácora de la maquina.



3.1.3. Plan de mantenimiento Trimestral

Este mantenimiento requerirá que el técnico operador que realice la tarea tenga conocimientos similares al descrito anteriormente o en el mejor de los casos más experimentado.

Las tareas a realizar son básicamente las mismas que el mantenimiento mensual con algunas actividades agregadas tales como:

- Reapreté de pernos en base de las bombas
- Reapreté de tornillos en paneles eléctricos
- Reapreté en pernería, soportes, uniones, Etc.
- Inspección de soldaduras
- Prueba del equipo

3.1.4. Plan de mantenimiento anual

El mantenimiento anual será exhaustivo llamado de tal forma mantenimiento mayor, este así como los incisos anteriores requerirá de un técnico con capacidades similares y aun mejor ya que se procederá el desmontaje de partes y la inspección individual de los sistemas y equipos auxiliares.

Con el objetivo de garantizar el funcionamiento y la disponibilidad del equipo, se desmontara cada una de las bombas, calentador, recipiente colector, resistencia, panel eléctrico, Etc. A estas partes desmontadas se les realizaran las pruebas pertinentes para verificar el buen funcionamiento de no ser así se recomendará el reemplazo.

Para el caso de los tanques y recipientes, se realizara limpieza interna y en caso de que existiera se debería hacer una prueba ultrasónica para verificar si posee un espesor aceptable para el buen funcionamiento o para descartar la posibilidad de la formación de poros.



El tiempo estimado para la realización de este mantenimiento es de 40 horas como máximo al finalizar las tareas es necesario hacer una prueba para descartar fallas existentes. El mantenimiento termina con la emisión de un reporte detallando cualquier anomalía y las tareas realizadas durante las horas de trabajo, ahora el ciclo inicia nuevamente hasta que alcanza el año de trabajo.

3.2. Proceso de construcción

Después de efectuar el diseño de las diferentes partes del equipo destilador, así como seleccionar los elementos y dispositivos necesarios para su correcto funcionamiento, se procederá a efectuar la construcción del mismo.

Con el objeto de facilitar la construcción se detalla a continuación la descripción de las operaciones y equipo necesario para la realización.



3.2.1. Soporte de la maquina

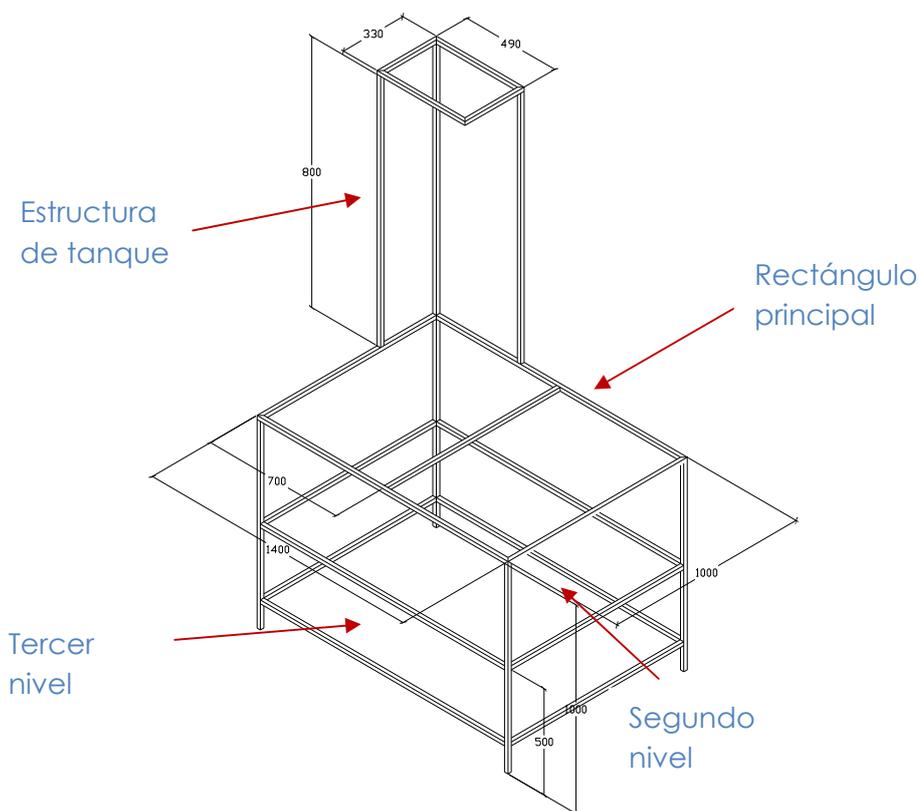


Figura 17. Soporte del destilador

Tal como su nombre lo indica el soporte de la maquina tiene como función principal el soportar el peso de los elementos que componen la maquina, se observa según la figura sus diferentes dimensiones y cabe mencionar que su fabricación se hará de tubo estructural de $\frac{3}{4}$ de pulgadas.

Las herramientas a utilizar para la elaboración del soporte será: marco de sierra, sierras, cinta métrica, escuadras (por lo menos dos), tizas, aparato de soldadura y electrodos.

El Proceso de fabricación inicia con el corte de los diferentes elementos del Rectángulo principal los cuales son cuatro trozos de tubo dos con dimensiones de 1.4 metros y dos de 1 metro, estos en sus aristas serán cortados con ángulos de 45



para lograr hacer el acople a 90 grados y obtener un rectángulo como se muestra en la figura.

Con ayuda de una escuadra y cartabón se alinean los tubos a 90 y luego se procede a realizar puntos de soldadura en las uniones. Cuando ya se cuenta con el rectángulo principal se cortan cuatro tubos con longitud de 1 metro que se soldaran y simularan las patas de la bancada.

Así como se observa en la figura existe un segundo y tercer nivel el cual consta de a partes cada uno con pares de tubos con dimensiones 1.4 menos dos veces el tamaño del tubo y de 1 metro menos dos veces el tamaño del tubo, estos se dispondrán de tal manera que formen rectángulos inferiores y le darán estabilidad a la estructura total.

En la parte superior se procederá a realizar una estructura la cual servirá para la elevación de un recipiente que contendrá la mezcla a destilar, las dimensiones que se presentan son cuatro patas de 0.8 metros y la formación de un rectángulo de 0.49×0.33 de metro. Cuando toda la estructura esta punteada con soldadura se procederá a la inspección de los tramos y si todo se encuentra en buen estado se hará la soldadura final a todas las partes.



3.2.2. Calentador

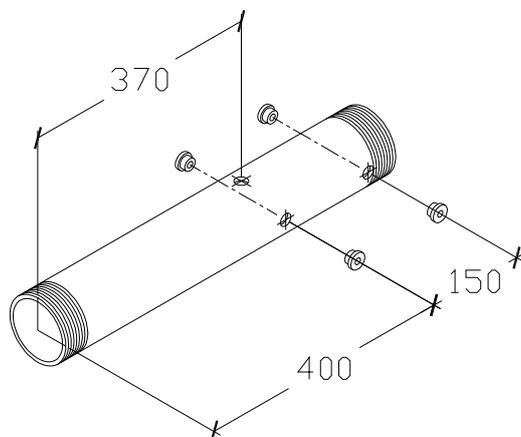


Figura 18. Vista de Calentador

El Calentador es un recipiente por medio del cual se introducirá una resistencia que calentará la mezcla hasta una temperatura deseada de esta forma se formarán burbujas de vapor y serán trasladadas hasta el condensador, la función principal de este recipiente es contener la mezcla dispuesta a evaporar.

La construcción del recipiente se inicia con la obtención de un tubo de cuatro pulgadas chapa 40 de acero inoxidable con longitud de 0.7 de metro, luego es necesario que en el torno se haga un roscado en los extremos así como se observa en la figura, estas roscas serán para adaptar unos tapones hembra que serán modificados para tener entradas y salidas de fluidos.

En los extremos se instalarán sensores de nivel a 180 grados dispuestos de tal forma y con distancias longitudinales intermedias que diferenciarán el alto y bajo nivel. A 90 grados con respecto a estos sensores se colocarán dos termocuplas las cuales su función será censar temperatura del fluido. Para estos arreglos será necesario perforar el tubo en forma transversal según la figura y hacer las diferentes roscas donde se acoplarán los sensores.



3.2.3. Equipos auxiliares

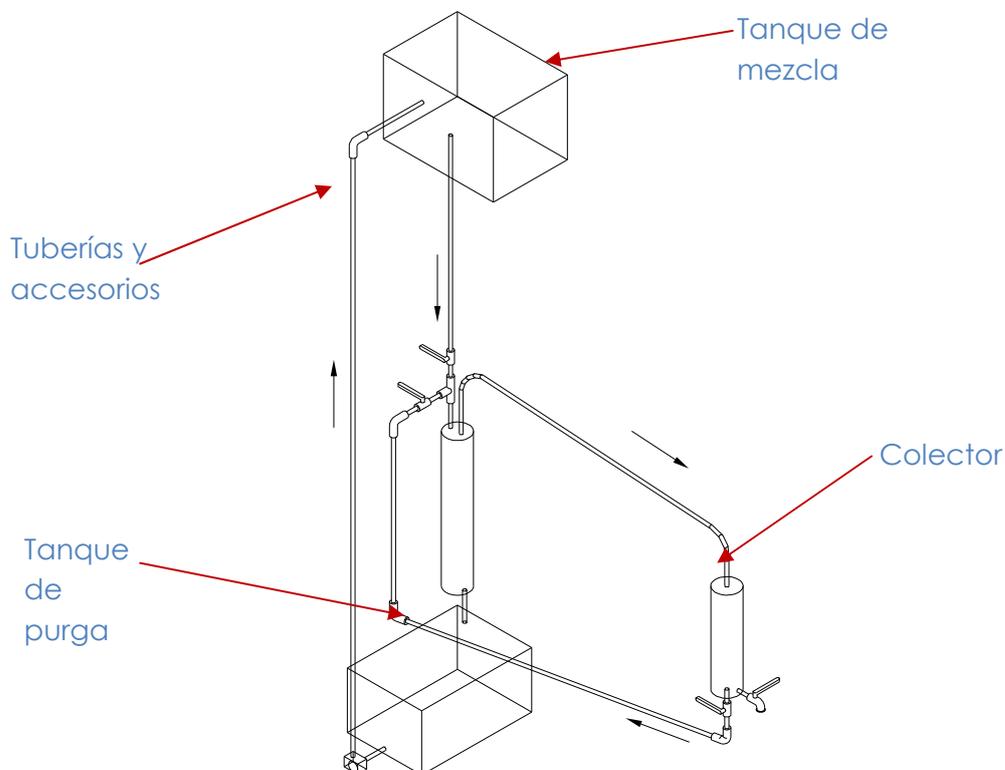


Figura 19. Diagrama de equipos auxiliares.

Dentro de los equipos auxiliares tenemos el tanque de Mezcla, el colector, el tanque de purga, las tuberías y accesorios. Podemos mencionar que los tanques de mezcla han sido reciclados y se ha requerido la fabricación de los mismos pero se hará una breve descripción.

Los tanques de mezcla y de purga son de acero inoxidable de espesor 1/8 de pulgada sus dimensiones externas son 0.32 de ancho por 0.48 de largo y 0.3 de alto medidas tomadas en metros. Ambos recipientes son iguales.

En el caso de la tubería se ha dispuesto de tal forma que se cortan de acuerdo a la distancia que se requiera y luego se harán las roscas con tarraja para acoplarlos a los diferentes accesorios, toda la tubería es de 1/2 en acero



inoxidable. Se cuenta con seis válvulas las cuales nos darán las aperturas y cierre de los diferentes flujos de trabajo.

El colector es también un tubo de acero inoxidable de 4 pulgadas con chapa 40 pero su fabricación es más sencilla que la del calentador ya que solo requiere de una cubierta la cual puede ser móvil y la de fondo. En la parte de abajo se le instalara un grifo para poder hacer el retiro del fluido terminado y tendrá en el fondo una tubería que contendrá una especie de purga pero de mayor concentración que la original para que vuelva a circular en el calentador y de esta forma mejorar las condiciones del proceso.

3.3. Manual de procedimiento

El equipo construido será de fácil manejo para todo aquel que disponga utilizarlo. El panel de control tendrá pocos controladores para facilitar el uso del mismo. A continuación se propondrá un Manual de Procedimiento para el usuario:

1. Verificar que todos los tanques abiertos a la atmosfera se encuentren en condiciones adecuadas de limpieza.
2. Verter la materia prima en el tanque de materia prima (tanque superior).
3. Conectar el equipo a la fuente de corriente.
4. Encender el equipo con el switch de encendido (switch rojo).
5. Establecer el rango de temperaturas a trabajar. Para acceder a cada campo del sistema, ingresar con el botón enter (pulsador amarillo). Para incrementar o disminuir su valor se utiliza el botón de flechas.
6. Para aceptar el rango de temperaturas a trabajar, presionar enter.
7. Establecer el número de ciclos que operara el sistema. Para cambiar de campo, utilizar el botón next (pulsador verde).



8. Luego de haber establecido el rango de temperaturas a trabajar y el numero de ciclos del sistema, se procederá a hacer una prueba de cada uno de los elementos que controla el sistema, según el campo test.
9. Accesar al campo test.
10. Para comprobar el funcionamiento de cada elemento, se activa y desactiva con el botón enter, y se cambia de elemento con el botón next.
11. Verificar que todas las válvulas de bola estén cerradas.
12. Habiendo comprobado el funcionamiento de todos y cada uno de los elementos, se procede a correr el sistema (ubicar el campo run system).
13. La pantalla nos indica LLENANDO. De esta forma se procede a abrir la válvula 1.
14. El primer silbato indica que se alcanzo el 50% del volumen del tanque.
15. El segundo silbato indica que se alcanzo el 100% del volumen del tanque y debe proceder a cerrar válvula 1.
16. De forma automática, la resistencia comenzara a calentar la mezcla hasta que alcance el rango de temperatura previamente ajustado.
17. Cuando se alcance la temperatura minima del rango, comenzara a trabajar la bomba 2 y esta trabajara dentro del rango de temperaturas, para ayudar a condensar el vapor.
18. Cuando el sistema este evaporando, y el nivel de mezcla en el tanque calentador baje al 50% de su volumen, se desconectara automáticamente la resistencia y el ciclo habrá terminado.
19. según se consideren el número de ciclos a trabajar, se procede a activar manualmente la bomba 3 para transportar el condensado nuevamente al tanque calentador.



20. Cuando se hayan completado los ciclos de trabajo establecidos por el usuario, se extrae el condensado abriendo la válvula 3.

21. Habiendo terminado de trabajar, se procede a expulsar la purga del tanque calentador mediante la válvula 5.

Todos los pasos anteriores sirven para el manejo adecuado del equipo, por lo tanto deben seguirse al pie de la letra.



3.4. Validación

En esta etapa se desarrollaran los ensayos necesarios para comprobar si los objetivos del trabajo de graduación se cumplen.

Para llevar a cabo la etapa de validación, esta se subdivide en tres etapas que son: Criterios de validación, Ejercicios de validación y la Evaluación de Resultados.

Los criterios de validación determinaran el camino a seguir durante la etapa de ensayos de laboratorio. Los ejercicios de validación se desarrollaran las veces que sea necesario hasta obtener lo más aproximado los valores esperados. Para terminar, la evaluación de resultados es la etapa que nos permite comparar el diseño matemático con la practica real, y de esta manera poder establecer recomendaciones y conclusiones.

3.4.1. Criterios de Validación

Los criterios de validación que se tomaron en cuenta son los mismos criterios para el diseño del equipo destilador, los cuales son los siguientes:

1. Se asume una concentración de mezcla inicial de 50% en peso de etanol.
2. La presión de trabajo es de 1 atmósfera.
3. La temperatura a la cual el sistema logrará la evaporación es $T=81.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ver tabla 1 del apéndice).
4. Obtención de una mezcla destilada de $(75 \pm 5)\%$ en peso de etanol según tabla en apéndice.
5. Se dispondrá una producción de destilado de 3.0 litros en 1 hora.



3.4.2. Ejercicios de validación

Se llevaron a cabo varias prácticas con el equipo, siguiendo los pasos establecidos en el Manual de Procedimiento hasta obtener el punto más óptimo de funcionamiento.

✚ Primera Prueba.

Se vertieron tres galones de alcohol de noventa grados y tres galones de agua en el tanque de materia prima para iniciar la práctica, de esta forma se consigue la concentración de 45% de alcohol etílico, aproximadamente. La temperatura de inicio del sistema fue de 27 grados Celsius. El tiempo en que se obtuvo la primera cantidad de destilado fue de 22 minutos y la temperatura de 78 grados Celsius, el tiempo que duró la destilación desde el nivel máximo al nivel mínimo en el tanque calentador es 8 minutos.

Se colocó una carga de 1.5 galones de la disolución anterior y se obtuvo un volumen de destilado de ½ galón.

Este procedimiento se realizó tres veces, obteniéndose tres muestras de alcohol destilado, de medio galón cada una, lo cual suma un galón y medio.

La concentración del destilado obtenido fue de 47°G.L.

✚ Segunda Prueba.

Se drenó el tanque superior conteniendo la mezcla de 45% de alcohol etílico. Luego se colocó en el tanque el destilado de las primeras 3 muestras (un galón y medio) y se redestiló. Al finalizar esta segunda prueba, se obtiene una muestra de medio galón de destilado al cual se le determinó el contenido alcohólico usando un alcoholímetro gay – lussac.

La concentración del destilado obtenido fue de 53°G.L.



✚ Tercera Prueba.

Se introduce como materia prima 1.5 galones de una mezcla alcohol – agua al 16% de alcohol etílico. Se ajusta la temperatura a 77 grados Celsius y esta no se modificara hasta obtener condensado.

La concentración del destilado obtenido fue de 25°G.L.

✚ Cuarta Prueba.

Se introduce 1.5 galones de una mezcla alcohol – agua al 10% en concentración de alcohol. Se ajusta la temperatura a 84 grados Celsius y se mantendrá constante hasta obtener condensado.

La concentración del destilado obtenido fue de 23°G.L.

3.4.3. Tabla de resultados.

En el análisis de resultados se le hace la prueba de concentración de alcohol al producto destilado de cada una de las cuatro pruebas, así como también a la materia prima de cada prueba.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

✚ **Primera Prueba**

- Materia prima 47°G.L.
- Producto Destilado 47°G.L.

✚ **Segunda Prueba**

- Materia prima 47°G.L.
- Producto destilado 53°G.L.

✚ **Tercera Prueba**

- Materia prima 16°G.L.



- Producto destilado 25°G.L.

Cuarta Prueba

- Materia prima 15°G.L.
- Producto destilado 23°G.L.

Se puede observar que en cada prueba realizada, se incrementa la concentración de alcohol, a excepción de la primera, pero no se alcanzan los niveles deseados de concentración. Estos resultados pueden ser originados por distintos factores que afectan el funcionamiento eficiente del equipo, entre los cuales se pueden mencionar:

- ✓ La fuga de masa representada como vapor de alcohol que se escapa por el orificio de apertura a la atmosfera del tanque condensador.
- ✓ La poca transferencia de calor que podría estar presentándose en el intercambiador de calor (condensador), lo cual no contribuye a una completa condensación de los vapores de alcohol que circulan por la tubería interna.



3.5. Presupuesto

Para la adecuada construcción del equipo para destilación de alcohol, se seleccionaron los materiales de mejor calidad y de un costo no muy elevado para disminuir la inversión inicial.

Con las anteriores consideraciones, se detallara a continuación el presupuesto necesario:

| Cantidad | Descripción | Precio Unitario (\$) | Precio Total (\$) |
|----------|---|----------------------|-------------------|
| 9 | Varilla TIG Acero Inox 3/32x36" | 0.80 | 7.20 |
| 1 | Lentes de seguridad claros | 5.76 | 5.76 |
| 10 | Tubo industrial cuadrado chapa 20 de 1" | 5.90 | 59.00 |
| 1 | Adaptador roscado 3/8x1.5" | 3.15 | 3.15 |
| 1 | Disco para corte de metal | 1.02 | 1.02 |
| 12 | Tornillo goloso 1/2x10 | 0.0155 | 0.19 |
| 1 | Broca de titanio 10.5 mm | 2.37 | 2.37 |
| 1 | Broca de titanio 12mm | 2.85 | 2.85 |
| 1 | Broca de titanio 16.5mm | 6.49 | 6.49 |
| 1 | Disco de corte | 1.36 | 1.36 |
| 1 | Anillo acero inox 1/2" | 2.90 | 2.90 |
| 1 | Codo acero inox 1/2x90° | 2.50 | 2.50 |
| 1 | Unión universal acero inox 1/2" | 6.49 | 6.49 |
| 2 | Cinta teflón 3/4 | 0.40 | 0.80 |
| 1 | Niple acero inox 1/2x3" | 18.80 | 18.80 |



| | | | |
|--------|--|--------|-------|
| 2 | Cinta teflón ½ | 0.25 | 0.50 |
| 1 | Adaptador hembra PVC ½ | 0.15 | 0.15 |
| ½ | Esmalte verde manzana | 22.00 | 11.00 |
| 2 | Lija 100 | 0.95 | 1.90 |
| ¼ | Pintura anticorrosiva blanca | 4.70 | 4.70 |
| 1 | Botella solvente | 2.90 | 2.90 |
| 5 | Foco piloto rojo neon 12V | 1.00 | 5.00 |
| 5 | Foco piloto verde neon | 1.00 | 5.00 |
| 1 | Switch on-off cuadrado 125V | 0.5876 | 0.59 |
| 2 | Push button SW | 0.3390 | 0.68 |
| 1 | Switch pin dc 12V 20A/dc 30V 10A | 2.67 | 2.67 |
| 1 | Fusible chasis con soporte | 0.45 | 0.45 |
| 1 | Fusible europeo 2A | 0.17 | 0.17 |
| 1 | On-off pin lighted SW | 0.78 | 0.78 |
| 1 | 5V DC 40X40X20mm 0.21A | 0.99 | 0.99 |
| 10 | Conector scotchlok Amarillo | 0.13 | 1.30 |
| 3 | Conector scotchlok gris | 0.05 | 0.15 |
| 1 | Tapadera cuadrada plástica | 0.25 | 0.25 |
| 1 | Caja cuadrada 4x4 PVC | 0.85 | 0.85 |
| 1 | Cincho plástico negro 7" | 9.00 | 9.00 |
| 20 mts | Cable eléctrico Vulcan 16-2 | 0.53 | 10.60 |
| 15 mts | Tubo conduit flexible 3/8" | 0.45 | 6.75 |
| 4 | Conector para tubo flexible conduit 3/8" | 0.79 | 3.16 |



| | | | |
|---------|---|-------|--------|
| 4 | Rodo giratorio rueda hule 100mm | 3.55 | 14.20 |
| 2 | Unión universal PVC ½" | 1.18 | 2.36 |
| 1 | Válvula bola PVC ½" | 3.40 | 3.40 |
| 2 | Adaptador macho PVC ½" | 0.08 | 0.16 |
| 1 | Pegamento PVC tangit 25ml | 1.90 | 1.90 |
| 1 | Bushing galvanizado 3/4x1/2" | 0.80 | 0.80 |
| 2 | Abrazadera universal inox ½ a 1 1/4" | 0.66 | 1.32 |
| 1 galón | Solvente naphta | 13.70 | 13.70 |
| 1 | Tirro blue bold | 1.05 | 1.05 |
| 1 | Pintura spray | 6.00 | 6.00 |
| 2 | Lija 3M 180 | 0.95 | 1.90 |
| 1 | Lija 3M 80 | 1.04 | 1.04 |
| 1 | Botella thinner corriente | 1.85 | 1.85 |
| 1 | Tirro | 1.55 | 1.55 |
| 1 lb | Electrodo para acero inox 3/32" | 10.99 | 10.99 |
| 4 | Unión universal ½" acero inox | 7.63 | 30.50 |
| 1 | Pieza de tubo ½" acero inox (4 mts largo) | 65.54 | 65.54 |
| 6 | Codo ½" acero inox roscados | 3.05 | 18.30 |
| 1 | Tee ½" acero inox | 3.96 | 3.96 |
| 6 | Válvula bola acero inox ½" | 16.95 | 101.70 |
| 3 | Tapón hembra acero inox 4" | 38.42 | 115.26 |
| 3 mts | Conductor TSJ 3x16 | 0.82 | 2.46 |
| 3 mts | Coraza plástica conduflex ½" | 0.49 | 1.47 |



| | | | |
|-------|---|----------|----------|
| 1 | Tomacorriente macho 15A polarizado | 0.85 | 0.85 |
| 4 | Tornillo estufa galvanizado 5/32 | 0.07 | 0.28 |
| 4 | Tuerca hexagonal | 0.02 | 0.08 |
| 1 | Machuelo para cañería ½" | 7.49 | 7.49 |
| 6 | Anillo ORING 1/8" | 0.17 | 1.02 |
| 2 | Anillo ORING 3/32" | 0.20 | 0.40 |
| 1 | Dado para perno UNC 1 1/2x1/8" | 4.49 | 4.49 |
| 1 | Platina acero inox 3/8x6 (4 lb) | 7.91/lb | 31.64 |
| 3 | Aluminio T6 6061 3/4x20cm (0.35 lb) | 8.48/lb | 8.91 |
| 1 | Nylamid 2" (0.80 lb) | 15.66/lb | 12.53 |
| 1 | Pila alcalina 9V | 3.20 | 3.20 |
| 2 | Nicle acero inox 1/2x5" | 3.70 | 7.40 |
| 2 | Terminal macho espiga c/f 16-14 | 0.10 | 0.20 |
| 2 | Terminal hembra espiga c/f 16-14 | 0.19 | 0.38 |
| 1 | Tarjeta electrónica | 145.00 | 145.00 |
| 3 | Bomba centrifuga ¼ HP grado alimenticio | 255.00 | 765.00 |
| TOTAL | | | 1,580.70 |

Se puede observar que el costo aproximado de la inversión es de US\$1,580.70.



Planos de diseño



RECOMENDACIONES

1. Para que la separación del alcohol etílico se de adecuadamente y se puedan alcanzar mayores niveles de concentración en el producto destilado, debe revisarse la transferencia de calor que se hace en el intercambiador de calor, así como la fuga de vapor de alcohol en el agujero de apertura a la atmosfera del tanque de condensado, así como otras fugas posibles en el sistema. Además se recomienda realizar un balance de materia y energía por componente y unidad de transferencia de calor, a efectos de tener una caracterización del sistema.
2. Debe llevarse a cabo el mantenimiento respectivo planteado en el apartado 3.1 para evitar distintos problemas que puedan presentarse tales como la corrosión de algún elemento del equipo.
3. Es necesario seguir las instrucciones del Manual de Procedimiento del apartado 3.3 para asegurar la eficiencia del equipo.
4. Las bombas a instalar deben ser NECESARIAMENTE de GRADO ALIMENTICIO para evitar la contaminación del fluido de trabajo y garantizar la calidad del alcohol etílico producido.
5. El equipo podría ser empleado en prácticas de laboratorio, tanto de Ingeniería Mecánica como de Ingeniería Química, para mejorar el sistema y favorecer la enseñanza de los principios de operación del equipo, además de aprovechar la realización de los mantenimientos requeridos para evitar el deterioro del equipo.



CONCLUSIONES

1. Se diseño y se construyo un equipo capaz de destilar alcohol etílico a partir de una mezcla alcohol – agua de cualquier concentración.
2. El equipo fue construido con los materiales adecuados existentes en el mercado, tales como acero inoxidable en tuberías, tanques y válvulas para asegurar el buen funcionamiento del mismo y la no contaminación del fluido de trabajo.
3. El presupuesto establecido puede tener variaciones en el tiempo dependiendo de la disponibilidad de los materiales en el mercado. Los precios del presupuesto de construcción de este equipo en particular, son los más económicos en el mercado actual, basado en cotizaciones de por lo menos tres lugares según la existencia del producto, y el tipo de materiales empleados.
4. Los planos de diseño pueden ser tomados como una guía de construcción pero estos NO limitan la creatividad para adecuar de mejor manera el equipo o agregar o quitar elementos según sea la necesidad.
5. Se elaboro un Manual de Procedimiento para facilitar al usuario la manipulación del equipo de destilación, tanto en sus partes mecánicas como válvulas, así como también en su parte electrónica la cual es el panel de control.
6. Se establece una guía de Mantenimiento quincenal, mensual, trimestral y anual para garantizar el buen funcionamiento del equipo, así como también para alargar la vida útil de los elementos del mismo.
7. Se concluye que el equipo destilador opera en forma adecuada, requiriéndose de ajustes para mejorar la eficiencia de la destilación. Este



equipo además de ser empleado para destilar soluciones alcohólicas de diferente concentración, podría ser utilizado para la destilación o purificación de otros solventes de bajo peso molecular, tales como alcoholes, cetonas y otros hidrocarburos. Se recomienda que el equipo sea retomado en las prácticas de laboratorio de las carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química, para efectos didácticos o para la producción de agua, etanol u otro solvente. En este ultimo caso, se deberán realizar los ensayos previos correspondientes.



Bibliografía

1. Angulo, Ernesto. *La Wikipedia*. Wikipedia. 5 de Enero de 2007.
http://es.wikipedia.org/wiki/Fermentaci%C3%B3n_alcoh%C3%B3lica (último acceso: 21 de Marzo de 2008).
2. Badger, Walter L. *Introduccion a la Ingenieria Quimica*. Madrid: McGraw Hill, 1965.
3. Benítez, Francisco Armando Chávez. «Producción de alcohol etílico a partir de la malanga.» San Salvador, 1981.
4. Bustamante, Carlos. *Monografias*. 14 de Agosto de 2006.
<http://turnkey.taiwantrade.com.tw/showpage.asp?subid=149&fdname=FOOD+MANUFACTURING&pagename=Planta+de+produccion+de+alcohol+etílico> (último acceso: 20 de Marzo de 2008).
5. Cuesta, Martinez de la, y Rus Martinez. *Operaciones de Separacion en Ingenieria Quimica: Metodos de Calculo*. Madrid: Pearson Educacion, 2004.
6. Holland, Charles D. *Fundamentos y Modelos de Procesos de Separacion*. Madrid: Prentice Hall, 1981.
7. Kern, Donald Q. *Procesos de Transferencia de Calor*. Mexico D.F.: Continental, 1987.
8. Kirschbaum, Emil. *Destilacion y Rectificacion*. Madrid: Aguilar, 1954.
9. Riegel, E.R. *Quimica industrial*. Barcelona: Grijalbo, 1964.
10. Barderas, A. V. (1994). *Problemas de transferencia de Calor*. Mexico D.F.: Limusa.
11. Cengel, Y. A. (2003). *Transferencia de Calor*. Mexico D.F.: Mc Graw Hill.

Anexos

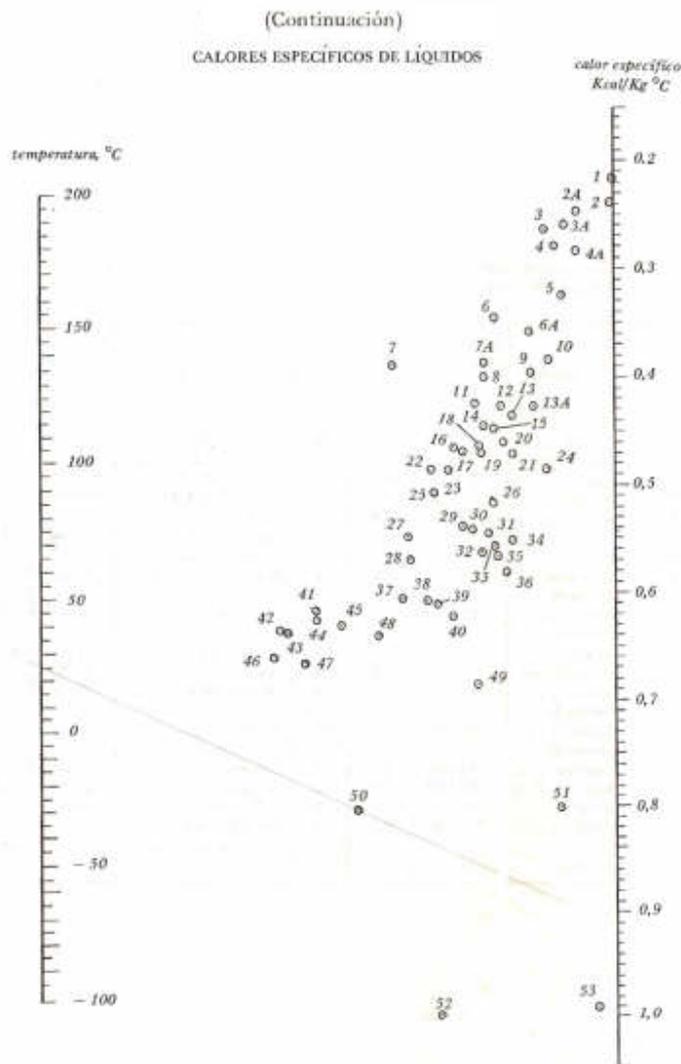
| Mezcla: Etanol-Agua | | | | Etanol-Agua | | | | Etanol-Agua | | | |
|--|---|--------------------|------------------|---|----------------|------------------|---|--------------------|------------------|--|--|
| Presión: 760 mm = 1,0332 at | | | | 760 mm = 1,0332 at | | | | 760 mm = 1,0332 at | | | |
| Liq., Mol % Pe. % comp. vol. | Temp. ^a ebull., °C (Peso %) | Vapor | | Temp. ^a ebull., °C (Peso %) | Vapor | | Temp. ^a ebull., °C (Peso %) | Vapor | | | |
| | | Mol % | Peso % Etanol | | Mol % | Peso % Etanol | | Mol % | Peso % Etanol | | |
| 0 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | | |
| 1 | 98,90 | 10,0 | 6,5 | | 8,8 | 9,5 | | 10,3 | 11,6 | | |
| 3 | 96,75 | 24,8 | 20,5 | | 23,9 | 23,4 | | 23,5 | 25,2 | | |
| 5 | 94,95 | 32,2 | 38,0 | | 32,5 | 34,9 | | 32,5 | 35,2 | | |
| 10 | 91,45 | 43,7 | 52,0 | | 44,0 | 51,4 | | 44,4 | 51,2 | | |
| 15 | 88,95 | 50,1 | 59,5 | | 49,7 | 60,3 | | 49,6 | 60,1 | | |
| 20 | 87,15 | 53,2 | 64,8 | | 53,2 | 65,4 | | 52,9 | 65,4 | | |
| 25 | 85,75 | 55,4 | 68,6 | | 55,6 | 68,5 | | 55,2 | 69,0 | | |
| 30 | 84,65 | 57,5 | 71,4 | | 57,9 | 71,1 | | 57,3 | 71,2 | | |
| 35 | 83,75 | 59,4 | 73,3 | | 59,9 | 73,2 | | 59,2 | 72,8 | | |
| 40 | 83,10 | 61,4 | 74,7 | | 61,8 | 74,7 | | 61,3 | 74,4 | | |
| 45 | 82,45 | 63,2 | 75,9 | | 63,7 | 75,9 | | 63,2 | 75,7 | | |
| 50 | 81,90 | 65,2 | 77,1 | | 65,7 | 75,2 | | 65,2 | 76,8 | | |
| 55 | 81,45 | 67,6 | 78,2 | | 67,7 | 78,5 | | 67,3 | 78,0 | | |
| 60 | 81,00 | 70,3 | 79,4 | | 69,9 | 79,8 | | 69,7 | 79,4 | | |
| 65 | 80,60 | 72,6 | 80,7 | | 72,4 | 81,1 | | 72,3 | 80,8 | | |
| 70 | 80,20 | 75,4 | 82,2 | | 75,3 | 82,5 | | 75,3 | 82,2 | | |
| 75 | 79,80 | 78,60 | 83,9 | | 78,5 | 84,1 | | 78,3 | 83,7 | | |
| 80 | 79,35 | 82,08 | 85,9 | | 81,0 | 85,8 | | 81,8 | 85,7 | | |
| 85 | 78,95 | 85,82 | 88,3 | | 85,64 | 88,28 | | 85,6 | 88,18 | | |
| 90 | 78,50 | 89,84 ¹ | 91,3 | | 89,74 | 91,28 | | 87,30 ¹ | 91,21 | | |
| 95 | 78,15 | 94,66 | 95,04 | | 94,53 | 95,03 | | 89,43 ² | 95,07 | | |
| 97 | 78,20 | 96,81 | 96,86 | | 96,68 | 96,87 | | | 96,80 | | |
| 99 | 78,25 | 98,95 | 98,93 | | 98,88 | 98,89 | | | 98,86 | | |
| 100 | 78,30 | 100,00 | 100,00 | | 100,00 | 100,00 | | | 100,00 | | |
| Cita | 57 | 57 | 57 | (4,27) | 1 | 1 | (4,27) | 17 | 17 | | |
| | (4,27) | (7,18) | | | (7,18, 29,42) | (29,43) | | (7,18, 29,42) | | | |
| | (29,43) | (29,42) | | | (43,64, 83,98) | (45,68) | | (43,64, 83,98) | | | |
| | (45,68, 69) | (43,64, 83,98) | | | (107,113) | (69) | | (107,113) | | | |
| Mezcla | 62 j Diagrama VII | | | 62 k | | | 62 l | | | | |
| Az.º | 89,40 | 95,57 | | 89,22 | 95,36 | | 89,43 | 95,59 | | | |

Tabla 1. Datos característicos de la mezcla etanol-agua a diferentes composiciones. Tomada de Destilación y rectificación (Tabla B-56 pág. 379).

Calores específicos de líquidos.
(El número corresponde al del punto en la gráfica siguiente).

| Núm. | Líquido | Intervalo de temperatura °C | | Núm. | Líquido | Intervalo de temperatura °C | |
|------|--------------------------------------|-----------------------------|--------|------|---|-----------------------------|--------|
| | | Mínima | Máxima | | | Mínima | Máxima |
| 26 | Acetato de amilo | 0 | 100 | 50 | Etanol, 50% . . . | 20 | 80 |
| 24 | Acetato de etilo | -50 | 25 | 36 | Éter etílico | -100 | 25 |
| 32 | Acetona | 20 | 50 | 31 | Éter isopropílico . . . | -80 | 20 |
| 29 | Ácido acético | 0 | 80 | 25 | Etilbenceno | 0 | 100 |
| 48 | Ácido clorhídrico, 30% . . . | 20 | 100 | 2A | Freón-11 (CCl ₃ F) | -20 | 70 |
| 29 | Ácido sulfúrico 98% | 10 | 45 | 6 | Freón-12 (CCl ₂ F ₂) | -40 | 15 |
| 55 | Agua | 10 | 200 | 4A | Freón-21 (CHCl ₂ F) | -20 | 70 |
| 37 | Alcohol amílico | -50 | 25 | 7A | Freón-22 (CHClF ₂) | -20 | 60 |
| 27 | Alcohol bencílico | -20 | 50 | 3A | Freón-113 (CCl ₂ F-CClF ₂) | -20 | 70 |
| 41 | Alcohol isoamílico | 10 | 100 | 38 | Glicerina | -40 | 20 |
| 52 | Amoniaco | -70 | 50 | 39 | Ciclool | -40 | 200 |
| 30 | Anilina | 0 | 150 | 28 | Heptano | 0 | 60 |
| 25 | Benceno | 10 | 80 | 35 | Hexano | -80 | 20 |
| 1 | Bromuro de etilo | 5 | 25 | 43 | Isobutanol | 0 | 100 |
| 44 | Butanol | 0 | 100 | 47 | Isopropanol | -20 | 50 |
| 8 | Clorobenceno | 0 | 100 | 40 | Metanol | -40 | 20 |
| 4 | Cloroformo | 0 | 50 | 14 | Naftaleno | 90 | 200 |
| 10 | Cloruro de bencilo | -30 | 50 | 12 | Nitrobenceno | 0 | 100 |
| 49 | Cloruro de calcio sol, 25% | -40 | 20 | 34 | Nonano | -50 | 25 |
| 13 | Cloruro de etilo | -30 | 40 | 33 | Octano | -50 | 25 |
| 13A | Cloruro de metilo | -80 | 20 | 16 | Óxido de difenilo | 0 | 200 |
| 51 | Cloruro de sodio, sol, 25% | -40 | 20 | 20 | Prídina | -50 | 25 |
| 21 | Decano | -80 | 25 | 45 | Propanol | -20 | 100 |
| 6A | Dicloroetano | -30 | 60 | 2 | Sulfuro de carbono | -100 | 25 |
| 5 | Diclorometano | -40 | 50 | 3 | Tetracloroetileno | -30 | 140 |
| 22 | Difenilmetano | 30 | 100 | 5 | Tetracloruro de carbono | 10 | 60 |
| 15 | Difenilo | 80 | 120 | 23 | Tolueno | 0 | 60 |
| 11 | Dióxido de azufre | -20 | 100 | 19 | Xileno, orto | 0 | 100 |
| 16 | Duotherm A | 0 | 200 | 18 | Xileno, meta | 0 | 100 |
| 42 | Etanol, 100% | 30 | 80 | 17 | Xileno, para | 0 | 100 |
| 46 | Etanol, 95% | 20 | 80 | 7 | Yoduro de etilo | 0 | 100 |

Nomograma 1. Registro de calores específicos de líquidos. Tomada de Problemas de Transferencia de Calor (Apéndice VI pág. 510).



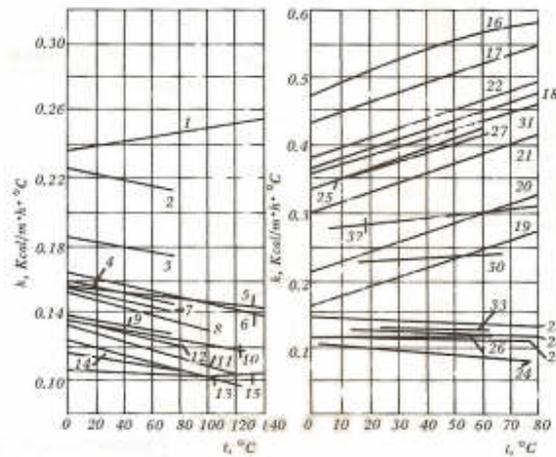
Fuente: J.H. Perry, *Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York, 5a. ed. 1969.

Nomograma 1. (Continuación) Registro de calores específicos de líquidos. Tomada de Problemas de Transferencia de Calor (Apéndice VI pág. 511).

Coefficientes de conductividad térmica de algunos líquidos.

| Sustancia | No. de la curva | Sustancia | No. de la curva | Sustancia | No. de la curva |
|-------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| Aceite de ricino . . . | 5 | Alcohol etílico | | Cloruro de sodio | |
| Aceite de vaselina . . | 15 | al 40% | 21 | al 25% | 18 |
| Acetona | 8 | Alcohol etílico | | Éter dietílico | 29 |
| Ácido acético | 7 | al 20% | 22 | Glicerina anhidra . . . | 1 |
| Ácido clorhídrico | | Alcohol isopro- | | Glicerina al 50% . . . | 25 |
| al 30% | 27 | pílico | 12 | Hexano | 26 |
| Ácido fórmico | 2 | Alcohol metílico | | Nitrobeneno | 10 |
| Ácido sulfúrico | | al 100% | 3 | Octano | 33 |
| al 98% | 30 | Alcohol metílico | | Queroseno | 28 |
| Agua | 16 | al 40% | 32 | Sulfuro de carbono | 23 |
| Alcohol butílico . . . | 9 | Amoniaco al 26% . . | 31 | Tetracloruro de | |
| Alcohol etílico | | Anilina | 6 | carbono | 24 |
| al 100% | 4 | Benceno | 11 | Tolueno | 13 |
| Alcohol etílico | | Cloruro de calcio | | Xileno | 14 |
| al 80% | 19 | al 25% | 17 | | |
| Alcohol etílico | | | | | |
| al 60% | 20 | | | | |

Equivalencia en SI: 1 kcal/(m·h·°C) = 1.163 W/(m·K).



Fuente: K.F. Pávlov. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. Ed. MIR. Moscú. 1981. Tabla XXIX, pág. 565 y fig. X, pág. 593.

Nomograma 2. Registro de conductividades térmicas de algunos líquidos. Tomada de Problemas de Transferencia de Calor (Apéndice XIV pág. 521).

Nomograma para determinar la viscosidad de líquidos.
 (X y Y son las coordenadas para determinación de la viscosidad, según la gráfica de la página 525)

| Líquido | X | Y | Densidad a 20°C kg/l |
|---------------------------------------|------|------|-------------------------|
| Aceite de linaza | 7.5 | 27.2 | 0.930-0.938 (15°) |
| Acetaldehído | 13.2 | 4.8 | 0.783 (18°) |
| Acetato de amilo | 11.8 | 12.5 | 0.879 |
| Acetato de butilo | 12.3 | 11.0 | 0.882 |
| Acetato de etilo | 13.7 | 9.1 | 0.901 |
| Acetato de metilo | 14.2 | 8.2 | 0.924 |
| Acetato de vinilo | 14.0 | 8.8 | 0.932 |
| Acetona, 100% | 14.5 | 7.2 | 0.792 |
| Acetona, 55% | 7.9 | 15.0 | 0.948 |
| Ácido acético, 100% | 12.1 | 14.2 | 1.049 |
| Ácido acético, 70% | 9.5 | 17.0 | 1.069 |
| Ácido butírico | 12.1 | 15.3 | 0.964 |
| Ácido clorhídrico, 31.8% | 13.0 | 16.6 | 1.157 |
| Ácido clorosulfónico | 11.2 | 18.1 | 1.787 (25°) |
| Ácido fórmico | 10.7 | 15.8 | 1.220 |
| Ácido isobutírico | 12.2 | 14.4 | 0.949 |
| Ácido nítrico, 95% | 12.8 | 13.8 | 1.493 |
| Ácido nítrico, 69% | 10.8 | 17.0 | 1.367 |
| Ácido propiónico | 12.8 | 13.3 | 0.992 |
| Ácido sulfúrico, 110% | 7.2 | 27.4 | 1.98 |
| Ácido sulfúrico, 98% | 7.0 | 24.8 | 1.836 |
| Ácido sulfúrico, 60% | 10.2 | 21.3 | 1.498 |
| Agua | 10.2 | 13.0 | 0.998 |
| Alcohol alílico | 10.2 | 14.3 | 0.854 |
| Alcohol amílico | 7.5 | 18.4 | 0.817 |
| Amoniaco, 100% | 12.6 | 2.0 | 0.817 (-79°) |
| Amoniaco, 26% | 10.1 | 13.9 | 0.904 |
| Anhídrido acético | 12.7 | 12.8 | 1.832 |
| Anilina | 8.1 | 18.7 | 1.022 |
| Anisol | 12.3 | 13.5 | 0.990 |
| Benceno | 12.5 | 10.9 | 0.879 |
| Bromo | 14.2 | 13.2 | 3.119 |
| Bromotolueno | 20.0 | 15.9 | 1.41 |
| Bromuro de etilo | 14.5 | - | 1.431 |
| Bromuro de propilo | 14.5 | 9.6 | 1.353 |
| Butanol | 8.6 | 17.2 | 0.810 |
| Ciclohexanol | 3.9 | 24.3 | 0.962 |
| Clorobenceno | 12.3 | 12.4 | 1.107 |
| Cloroformo | 14.4 | 10.2 | 1.489 |
| Clorofluoreno, orto | 13.0 | 13.3 | 1.082 |
| Clorotolueno, meta | 13.3 | 12.5 | 1.072 |
| Clorotolueno, para | 13.3 | 12.3 | 1.070 |
| Cloruro de calcio, sol. 25% | 6.6 | 15.9 | 1.228 |
| Cloruro estánnico | 13.3 | 13.8 | 2.326 |
| Cloruro de etilo | 14.8 | 6.0 | 0.917 (6°) |
| Cloruro de metilo | 15.0 | 3.8 | 0.952 (0°) |
| Cloruro de propilo | 14.4 | 7.3 | 0.890 |
| Cloruro de sodio, sol. 25% | 10.2 | 16.6 | 1.186 (25°) |
| Cloruro de sulfúrico | 15.2 | 12.4 | 1.667 |
| Cresol, meta | 3.5 | 20.3 | 1.054 |
| Dibromocetano | 12.7 | 15.8 | 2.495 |
| Diclorometano | 13.2 | 12.2 | 1.256 |
| Diclorometano | 14.6 | 8.9 | 1.356 |
| Difenilo | 12.0 | 18.3 | 1.992 (73°) |

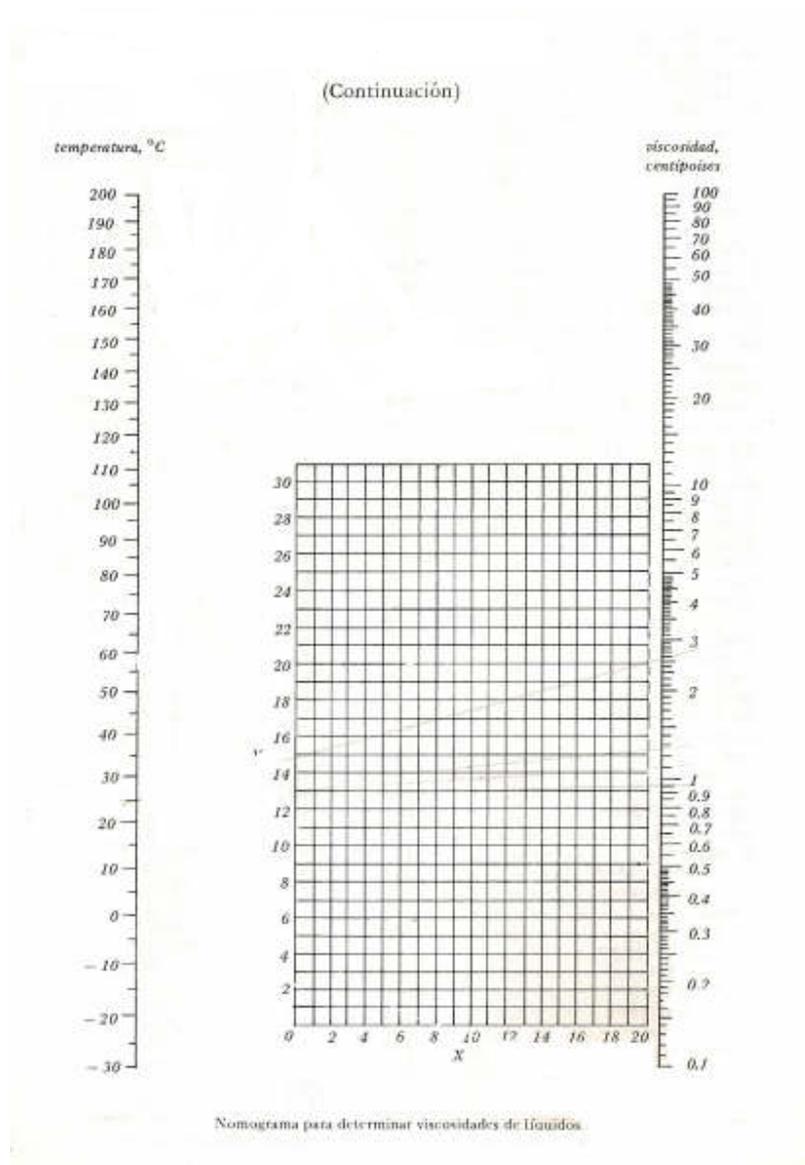
Nomograma 3. Determinación de viscosidades de diferentes líquidos. Tomada de Problemas de Transferencia de Calor (Apéndice XIX pág. 526).

(Continuación)

| | | | |
|-------------------------|------|------|--------------|
| Dióxido de azufre | 15.2 | 7.1 | 1.434 (0°) |
| Dióxido de carbono | 11.6 | 0.5 | 1.101 (-57°) |
| Etanol, 100% | 10.5 | 13.8 | 0.789 |
| Etanol, 95% | 9.8 | 14.5 | 0.804 |
| Etanol, 40% | 6.5 | 16.6 | 0.935 |
| Eter etílico | 14.5 | 5.5 | 0.708 (25°) |
| Etilbenceno | 13.2 | 11.5 | 0.867 |
| Fenol | 6.9 | 20.8 | 1.071 (25°) |
| Formiato de etilo | 14.2 | 8.4 | 0.925 |
| Freón-11 | 14.4 | 9.0 | 1.494 (17°) |
| Freón-12 | 16.8 | 5.6 | 1.486 (-30°) |
| Freón-21 | 15.7 | 7.5 | 1.426 (0°) |
| Freón-22 | 17.2 | 4.7 | 3.87 (0°) |
| Freón-113 | 12.5 | 11.4 | 1.576 |
| Glicerina, 100% | 2.0 | 30.0 | 1.261 |
| Glicerina, 50% | 6.9 | 19.6 | 1.126 |
| Glicol | 6.0 | 23.6 | 1.113 |
| Heptano | 14.1 | 8.4 | 0.684 |
| Hexano | 14.7 | 7.0 | 0.659 |
| Hidróxido sódico, 50% | 3.2 | 25.8 | 1.525 |
| Isobutanol | 7.1 | 18.0 | 0.779 (26°) |
| Isopropanol | 8.2 | 16.0 | 0.789 |
| Keteno | 10.2 | 16.9 | 0.78-0.82 |
| Mercurio | 18.4 | 16.4 | 15.466 |
| Metanol, 100% | 12.4 | 10.5 | 0.792 |
| Metanol, 90% | 12.5 | 11.8 | 0.820 |
| Metanol, 40% | 7.8 | 15.5 | 0.935 |
| Metilacetona | 15.9 | 8.6 | 0.805 |
| Naftaleno | 7.9 | 18.1 | 1.145 |
| Nitrobeneno | 10.6 | 16.2 | 1.205 (18°) |
| Nitrotolueno | 11.0 | 17.0 | 1.16 |
| Octano | 13.7 | 10.0 | 0.703 |
| Octanol | 6.6 | 21.1 | 0.827 |
| Oxalato de dimilo | 11.0 | 16.4 | 1.079 |
| Oxalato de dimetiló | 12.5 | 15.8 | 1.148 (34°) |
| Oxalato de dipropilo | 10.5 | 17.7 | 1.058 (0°) |
| Pentacloroetano | 10.9 | 17.5 | 1.671 (25°) |
| Pentano | 14.9 | 5.2 | 0.650 (18°) |
| Propanol | 9.1 | 16.5 | 0.804 |
| Sodio | 16.4 | 13.9 | 0.97 |
| Sulfuro de carbono | 16.1 | 7.5 | 1.265 |
| Tetracloroetano | 11.9 | 15.7 | 1.608 |
| Tetracloroetileno | 14.2 | 12.7 | 1.624 (15°) |
| Tetracloruro de carbono | 12.7 | 13.1 | 1.595 |
| Tetracloruro de titanio | 14.4 | 12.5 | 1.726 |
| Tolueno | 13.7 | 10.4 | 0.866 |
| Trementina | 11.5 | 14.9 | 0.861-0.867 |
| Tribromuro de fósforo | 13.8 | 16.7 | 2.852 (15°) |
| Tricloroetileno | 14.8 | 10.5 | 1.466 |
| Tricloruro de arsénico | 13.9 | 14.5 | 2.163 |
| Tricloruro de fósforo | 16.2 | 10.9 | 1.574 |
| Xileno, orto | 13.5 | 12.1 | 0.881 |
| Xileno, meta | 13.9 | 10.6 | 0.867 |
| Xileno, para | 13.9 | 10.9 | 0.861 |
| Yoduro de etilo | 14.7 | 10.3 | 1.933 |
| Yoduro de propilo | 14.1 | 11.6 | 1.747 |

Fuente: A. Vian y J. Deón. *Elementos de Ingeniería Química*. Aguilar, 1976. Madrid. Tabla A, 2-14. Figs. 794, 795, 796.

Nomograma 3. (Continuación) Determinación de viscosidades de diferentes líquidos. Tomada de Problemas de Transferencia de Calor (Apéndice XIX pág. 527).



Nomograma 3. (Continuación) Determinación de viscosidades de diferentes líquidos. Tomada de Problemas de Transferencia de Calor (Apéndice XIX pág. 528).

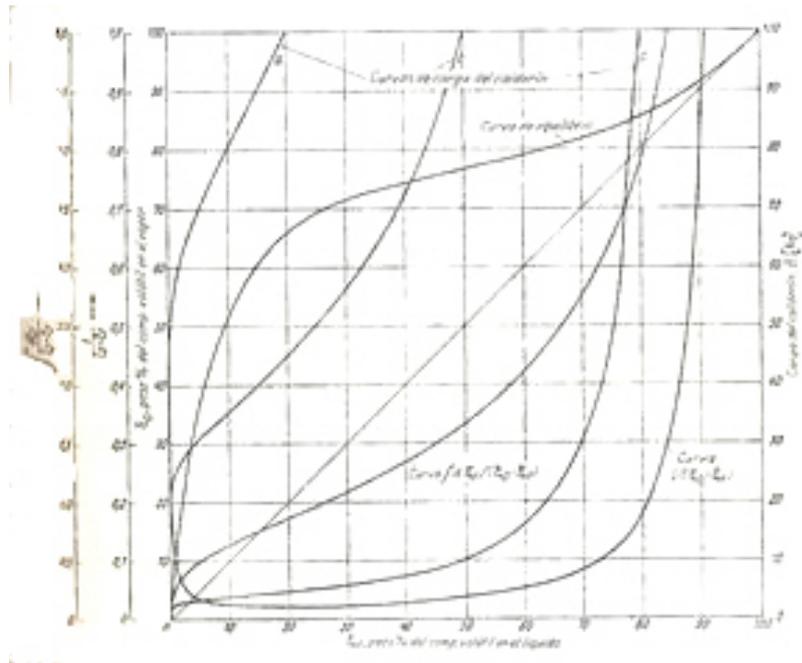
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SOLUCIONES A 20°C*

k en (Kcal) (m)/(m²) (°C) (hr)

| Soluto | 5 % | 10 % | 15 % | 20 % | 25 % | 30 % | 40 % | 50 % | 60 % | 70 % | 80 % | 90 % | 100 % |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NaOH | 0,528 | 0,538 | 0,544 | 0,549 | 0,552 | 0,555 | | 0,556 | | | | | |
| KOH | 0,516 | 0,517 | 0,516 | 0,514 | 0,508 | 0,501 | 0,485 | 0,461 | | | | | |
| HCl | 0,496 | 0,479 | 0,459 | 0,438 | 0,418 | 0,397 | | | | | | | |
| HNO ₃ | 0,504 | 0,494 | 0,482 | 0,470 | 0,459 | 0,447 | 0,427 | | | | | | |
| H ₂ SO ₄ | 0,507 | 0,498 | 0,489 | 0,479 | 0,470 | 0,458 | 0,434 | 0,407 | | | | | |
| H ₂ CrO ₄ | 0,507 | 0,500 | 0,491 | 0,483 | 0,473 | 0,464 | 0,444 | 0,419 | | | | | |
| H ₃ PO ₄ | 0,504 | 0,496 | 0,488 | 0,479 | 0,467 | 0,456 | 0,437 | 0,418 | | | | | |
| LiCl | 0,505 | 0,495 | 0,485 | 0,476 | 0,467 | 0,462 | | | | | | | |
| NaCl | 0,510 | 0,505 | 0,501 | 0,496 | 0,492 | | | | | | | | |
| NaBr | 0,507 | 0,498 | 0,489 | 0,479 | 0,470 | 0,458 | 0,433 | | | | | | |
| NaNO ₂ | 0,511 | 0,507 | 0,502 | 0,498 | 0,494 | 0,488 | 0,477 | | | | | | |
| Na ₂ SO ₄ | 0,513 | 0,511 | 0,511 | 0,510 | | | | | | | | | |
| Na ₂ SO ₃ | 0,514 | 0,514 | 0,516 | | | | | | | | | | |
| Na ₂ S ₂ O ₃ | 0,511 | 0,510 | 0,507 | 0,502 | 0,499 | 0,489 | 0,467 | | | | | | |
| Na ₂ CO ₃ | 0,516 | 0,520 | 0,523 | | | | | | | | | | |
| Na ₂ SiO ₃ | 0,517 | 0,520 | 0,523 | | | | | | | | | | |
| Na ₂ PO ₃ | 0,520 | 0,526 | | | | | | | | | | | |
| Na ₂ Cr ₂ O ₇ | 0,511 | 0,516 | 0,507 | 0,502 | 0,494 | 0,485 | 0,468 | 0,473 | | | | | |
| NaAcetato | 0,502 | 0,489 | 0,476 | 0,461 | 0,447 | 0,431 | | | | | | | |
| KCl | 0,505 | 0,495 | 0,489 | 0,480 | 0,470 | | | | | | | | |
| KNO ₃ | 0,508 | 0,501 | 0,494 | 0,486 | | | | | | | | | |
| K ₂ SO ₄ | 0,510 | 0,505 | | | | | | | | | | | |
| K ₂ CO ₃ | 0,511 | 0,508 | 0,505 | 0,500 | 0,492 | 0,485 | 0,464 | 0,437 | | | | | |
| MgCl ₂ | 0,502 | 0,492 | 0,482 | 0,468 | 0,456 | 0,443 | | | | | | | |
| MgSO ₄ | 0,511 | 0,508 | 0,504 | 0,500 | 0,493 | | | | | | | | |
| CaCl ₂ | 0,508 | 0,504 | 0,500 | 0,494 | 0,488 | 0,480 | 0,468 | | | | | | |
| SrCl ₂ | 0,510 | 0,505 | 0,501 | 0,494 | 0,488 | 0,482 | | | | | | | |
| BaCl ₂ | 0,510 | 0,507 | 0,501 | 0,495 | 0,491 | | | | | | | | |
| AgNO ₃ | 0,508 | 0,504 | 0,500 | 0,494 | 0,486 | 0,479 | 0,464 | 0,441 | | | | | |
| CuSO ₄ | 0,508 | 0,504 | 0,500 | | | | | | | | | | |
| ZnSO ₄ | 0,509 | 0,504 | 0,500 | 0,494 | 0,488 | 0,480 | | | | | | | |
| ZnCl ₂ | 0,505 | 0,495 | 0,485 | 0,473 | 0,461 | 0,447 | 0,418 | | | | | | |
| Pb(NO ₃) ₂ | 0,510 | 0,505 | 0,502 | 0,498 | 0,492 | 0,486 | | | | | | | |
| Al ₂ (SO ₄) ₃ | 0,505 | 0,498 | 0,488 | 0,476 | 0,464 | | | | | | | | |
| NH ₄ Cl | 0,500 | 0,486 | 0,471 | 0,456 | 0,441 | | | | | | | | |
| NH ₃ | 0,486 | 0,459 | 0,435 | 0,415 | 0,397 | 0,382 | | | | | | | |
| CH ₃ OH | | 0,462 | | 0,416 | | 0,372 | 0,318 | 0,299 | 0,266 | 0,236 | 0,211 | 0,190 | 0,174 |
| C ₂ H ₅ OH | | 0,455 | | 0,401 | | 0,354 | 0,300 | 0,272 | 0,238 | 0,208 | 0,184 | 0,162 | 0,144 |
| Glicerina | | 0,480 | | 0,447 | | 0,418 | 0,388 | 0,368 | 0,333 | 0,300 | 0,284 | 0,261 | 0,242 |

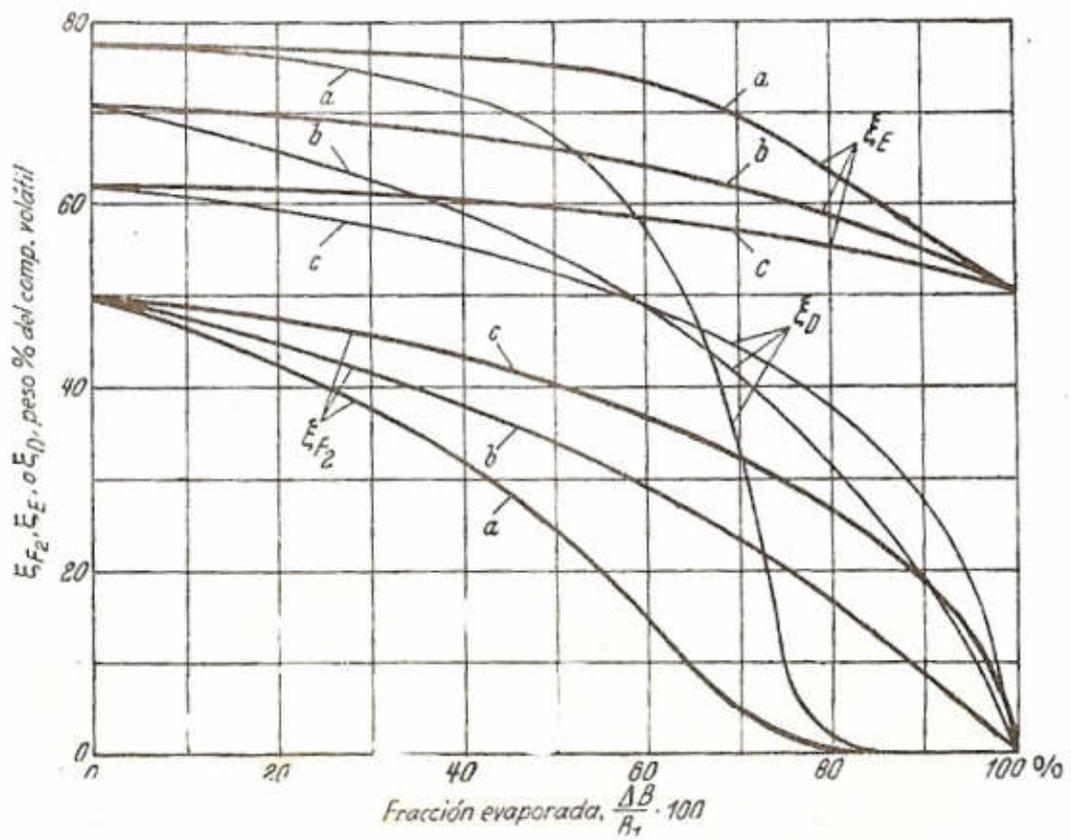
* Calculada según Riedel, *Chem.-Ing.-Tech.*, 23 : 62, 467 (1951). Riedel establece que para soluciones acuosas de electrolitos la conductividad a otras temperaturas puede ser calculada multiplicando las cifras de esta tabla por el factor $k_{20}/k_{t_{20}}$, donde k_{20} es la conductividad térmica del agua a la temperatura deseada, y $k_{t_{20}}$ la conductividad térmica del agua a 20°C (0,514).

Tabla 2. Conductividad térmica de soluciones a 20 °C

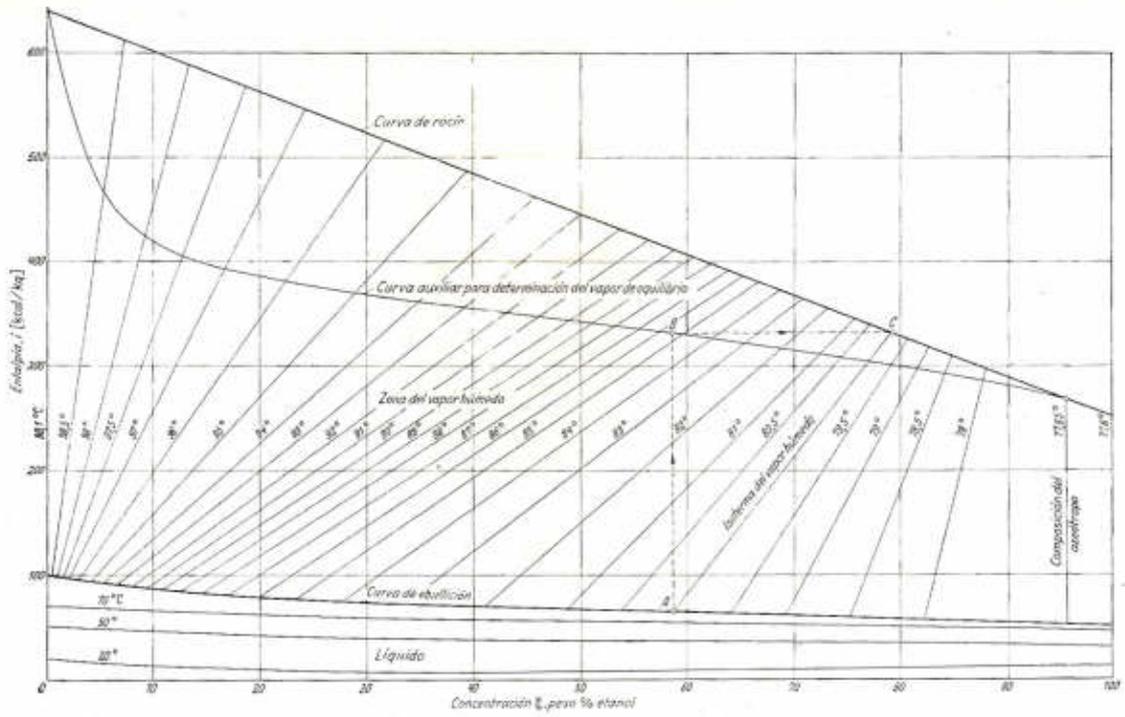


Gráfica 1. Curva para el cálculo de la destilación en alambique sencillo.

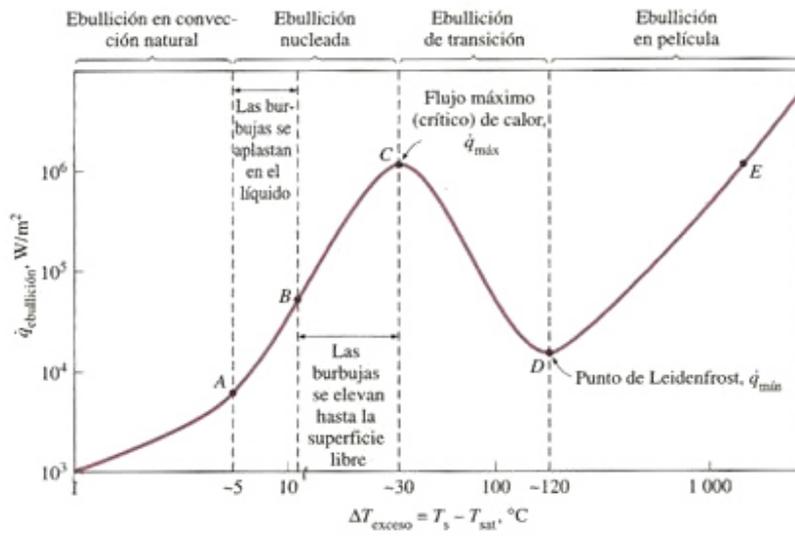
(Mezcla etanol-agua). Tomada de Destilación y rectificación (Fig. 2-2 pág. 77).



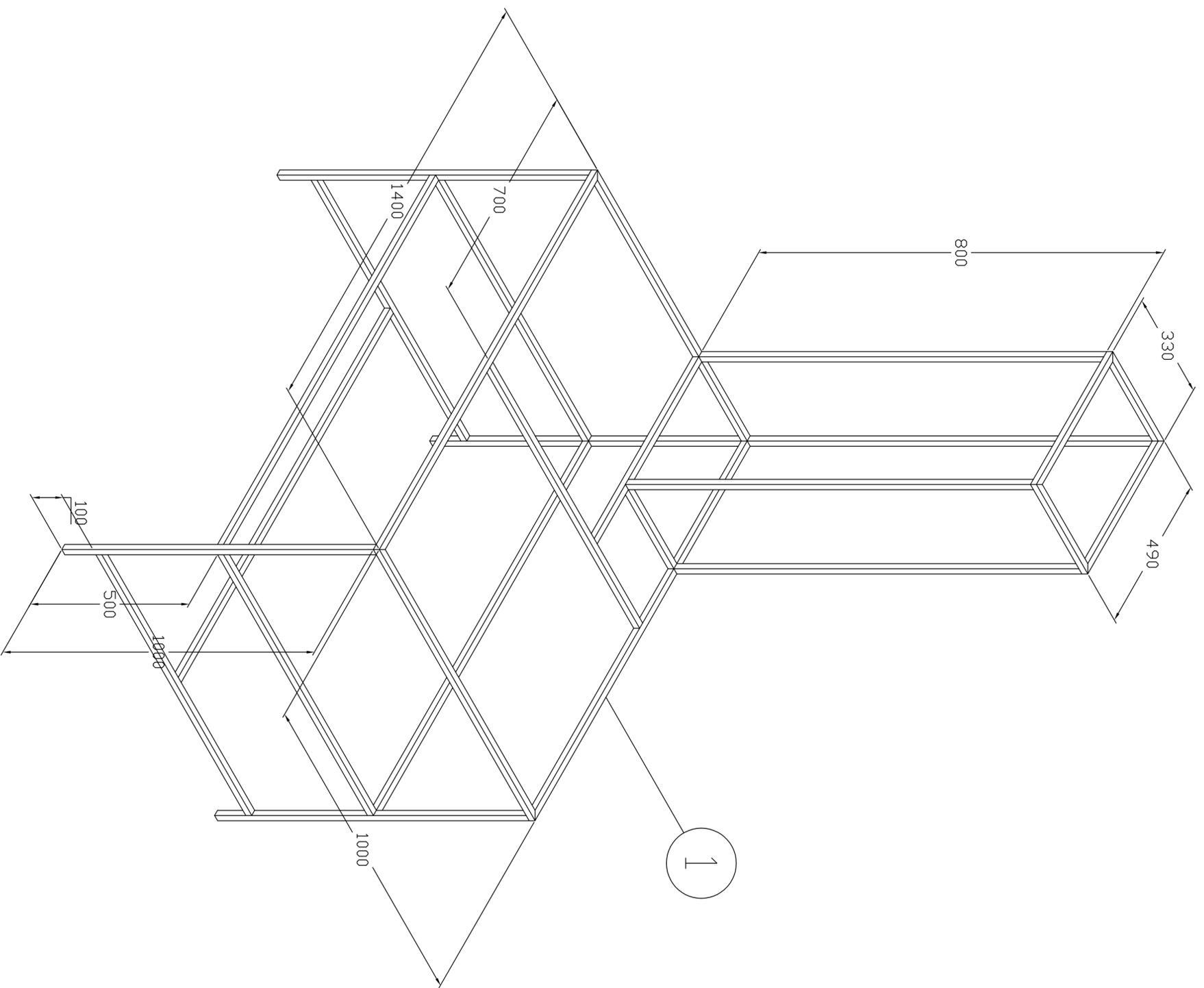
Gráfica 2. Variación de las concentraciones de vapor y de líquido con la cantidad de destilado en la destilación abierta. a, etanol-agua; b, benceno-tolueno; c, agua-ácido acético. Tomada de Destilación y rectificación (Fig. 2-6 pág. 82).



Gráfica 3. Diagrama entalpía-concentración de la mezcla etanol-agua. Tomada de Destilación y rectificación (Fig. 5-1 pág. 158).



Gráfica 4. Representación de una curva típica de ebullición. Tomada de Transferencia de Calor (Cengel)



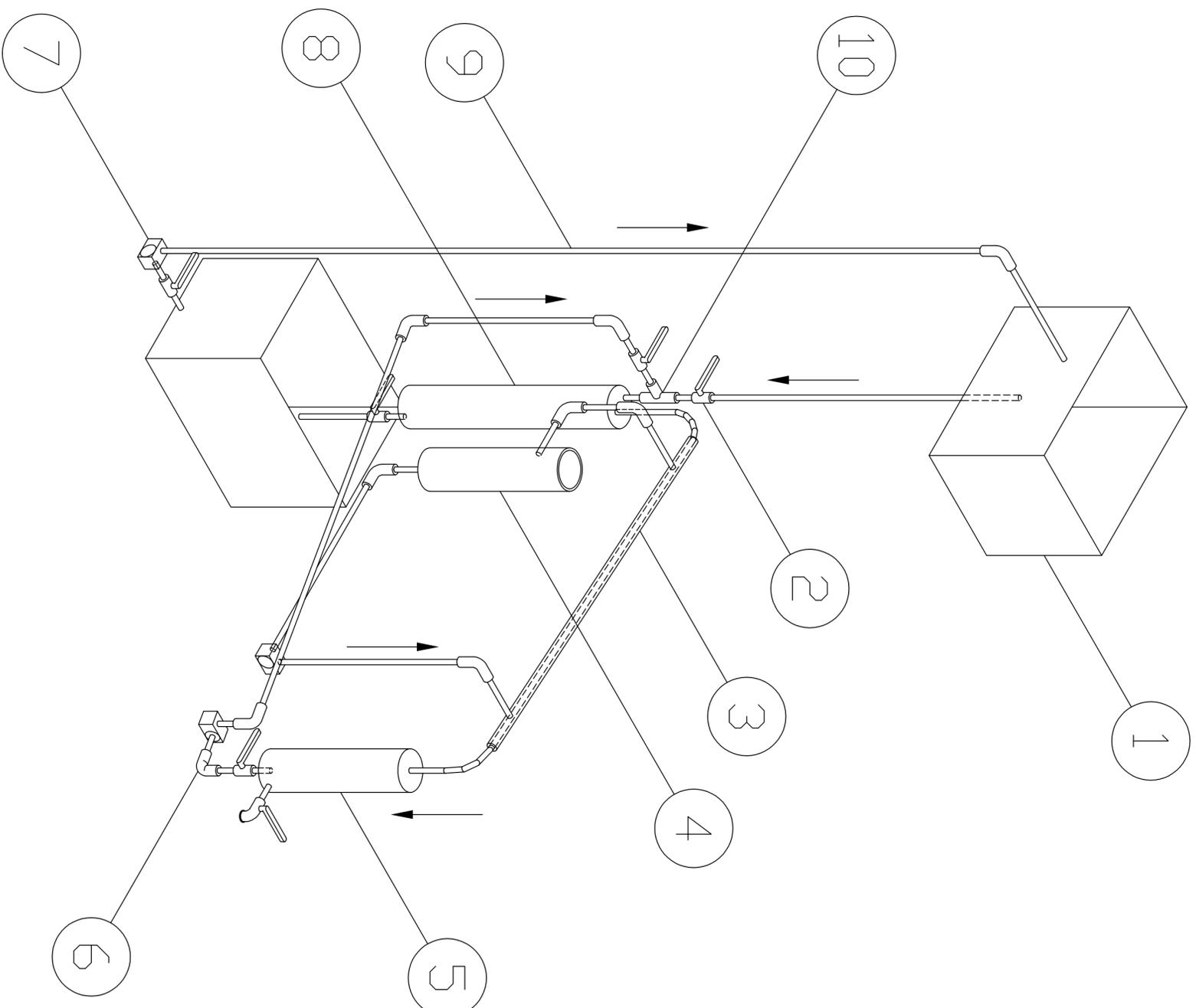
| Cantidad | Tubo estructural cuadrado | N° | ESPECIFICACION | MATERIAL Y DIMENSION | MODELO | PESO |
|----------|---------------------------|--------------|----------------|--|--------|------|
| 1 | DEMINACION Y OBSERVACION | 1 | 3 | ASTI 1020 | | |
| | Fecha | Nombre | Firma | UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA TRABAJO DE GRADUACION | | |
| | Dibujado año 2009 | F. Tinetti | | | | |
| | Comprobado año 2009 | Ing. Salomon | | | | |
| | Norma | | | | | |

ESC 1:10

BANCO DE TRABAJO

Sustituye a:

Sustituido por:



| | | | | | |
|---|----------------------------------|--------|-------------------|----------------|----------------------|
| 1 | Valvula Tee | 10 | ø $\frac{1}{2}$ " | ACERO INOX | |
| | Tuberio | 9 | ø $\frac{1}{2}$ " | ACERO INOX | |
| 1 | Tanque calentador | 8 | ø4" | ACERO INOX | |
| 3 | Bomba | 7 | Impulsor ø6" | | |
| 6 | Codo a 90 grados | 6 | ø $\frac{1}{2}$ " | ACERO INOX | |
| 1 | Tanque receptor de condensado | 5 | ø4" | ACERO INOX | |
| 1 | Tanque para agua del condensador | 4 | ø4" | ACERO INOX | |
| 1 | Tubo condensador | 3 | ø2" | ACERO INOX | |
| 7 | Valvula de bola | 2 | ø $\frac{1}{2}$ " | ACERO INOX | |
| 2 | Tanque de materia prima y purga | 1 | | ACERO INOX | |
| | DENOMINACION Y OBSERVACION | | N° | ESPECIFICACION | MATERIAL Y DIMENSION |
| | Fecha | Nombre | Firma | | |

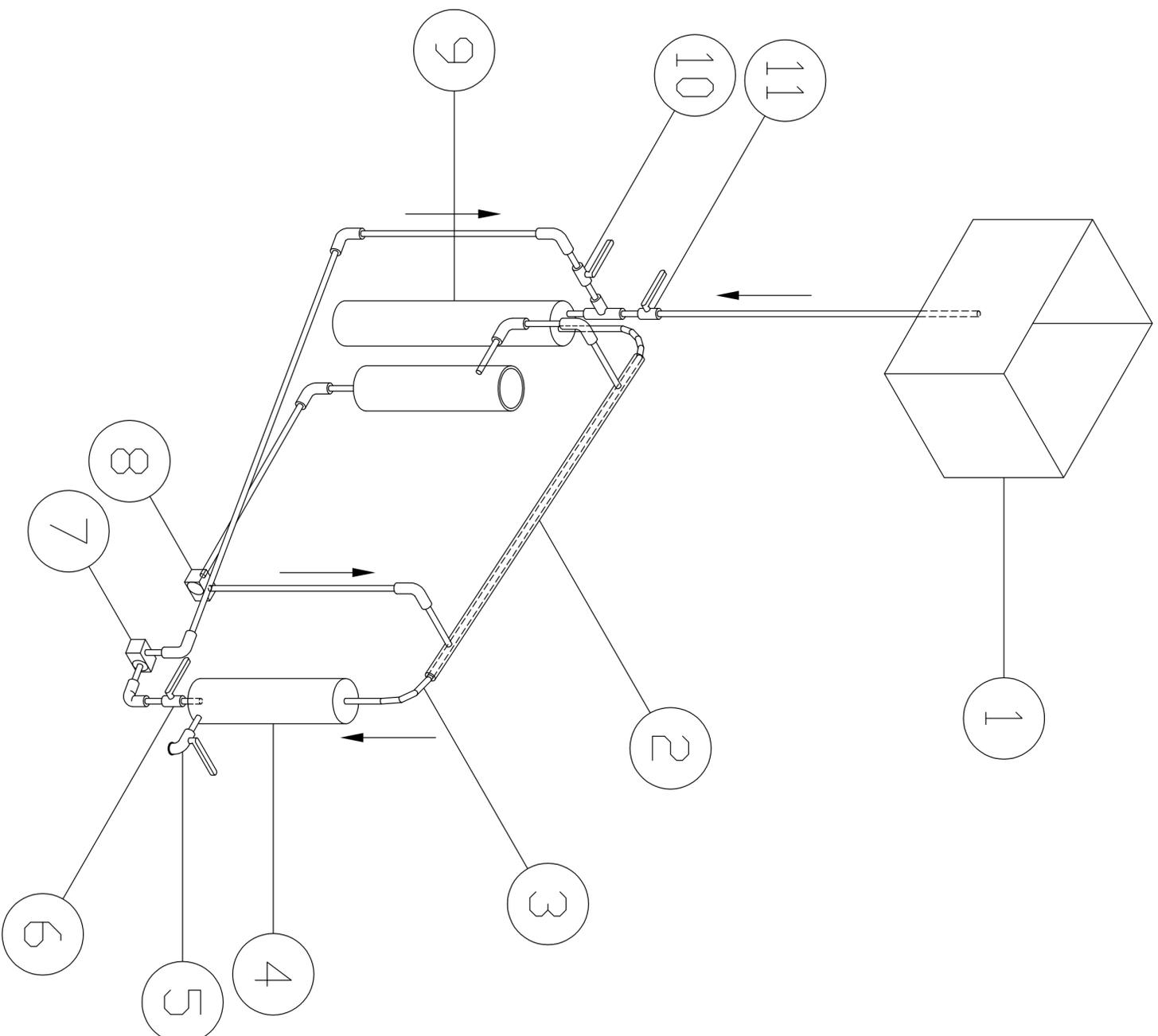
Dibujado año 2009 F. Tinetti
 Comprobado año 2009 Ing. Salomon
 Norma

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
 TRABAJO DE GRADUACION

ESC 140 DESTILADOR DE ALCOHOL

Sustituye a:

Sustituido por:



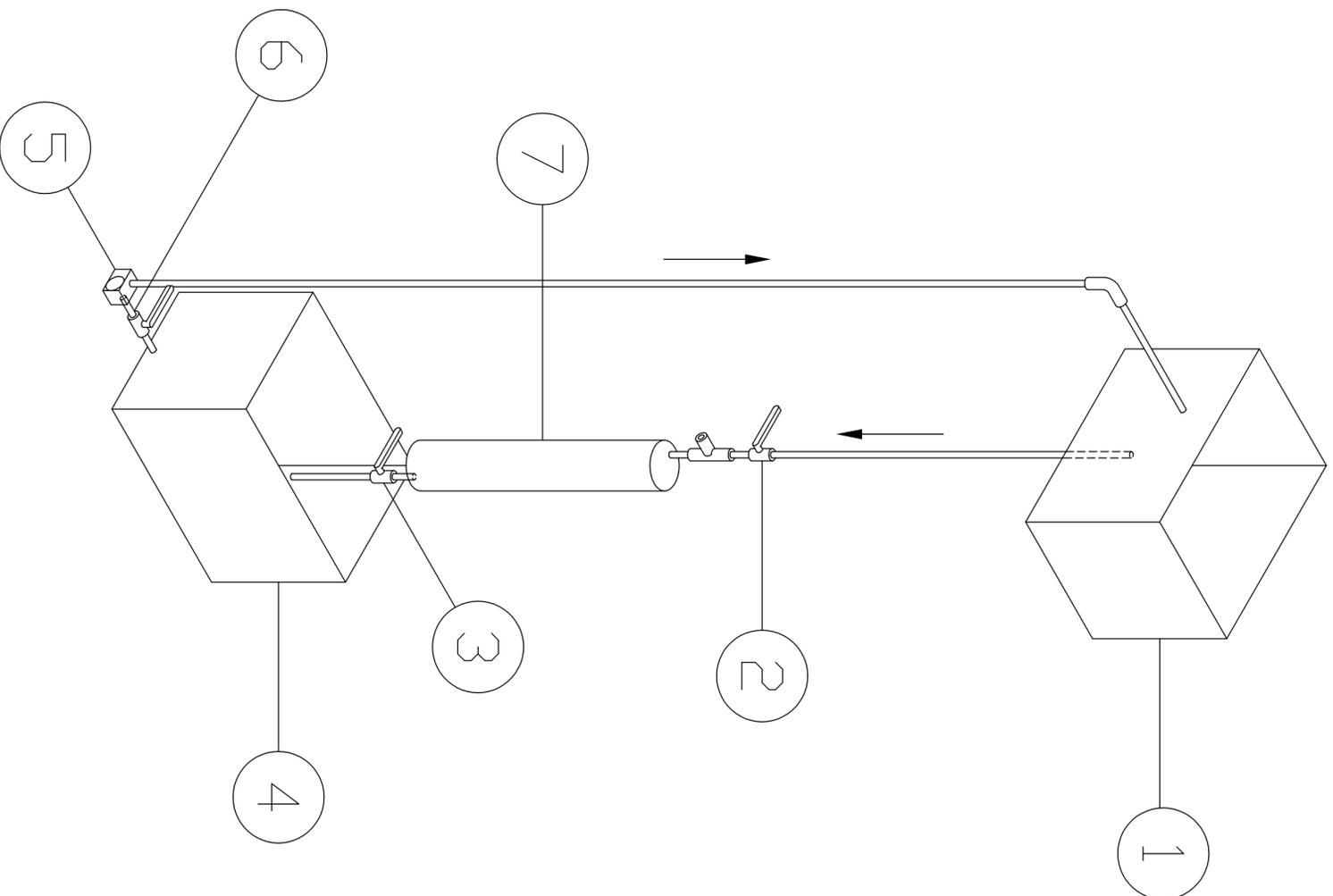
| | |
|----|---|
| 11 | Valvula 1 |
| 10 | Valvula 2 |
| 9 | Tanque calentador |
| 8 | Bomba 2 |
| 7 | Bomba 3 |
| 6 | Valvula 3 |
| 5 | Valvula 4 |
| 4 | Tanque condensador |
| 3 | Tuberia de vapor de alcohol |
| 2 | Tuberia de agua para ayudar a condensar el vapor de alcohol |
| 1 | Tanque de materia prima |

DESCRIPCION

| | | | | |
|-----|---------------------|--------------|-------|--|
| No. | Fecha | Nombre | Firma | UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA TRABAJO DE GRADUACION |
| | Dibujado año 2009 | F. Tinetti | | |
| | Comprobado año 2009 | Ing. Salomon | | |
| | Norma | | | |

ESC 1:10 FLUID DE VAPORIZACION Y CONDENSACION

Sustituye a:
Sustituido por:



| | |
|---|-------------------------|
| 7 | Tanque calentador |
| 6 | Valvula 6 |
| 5 | Bomba 1 |
| 4 | Tanque de purga |
| 3 | Valvula 5 |
| 2 | Valvula 1 |
| 1 | Tanque de materia prima |

| No. | DESCRIPCION |
|-----|-------------|
| | Fecha |
| | Nombre |
| | Firma |

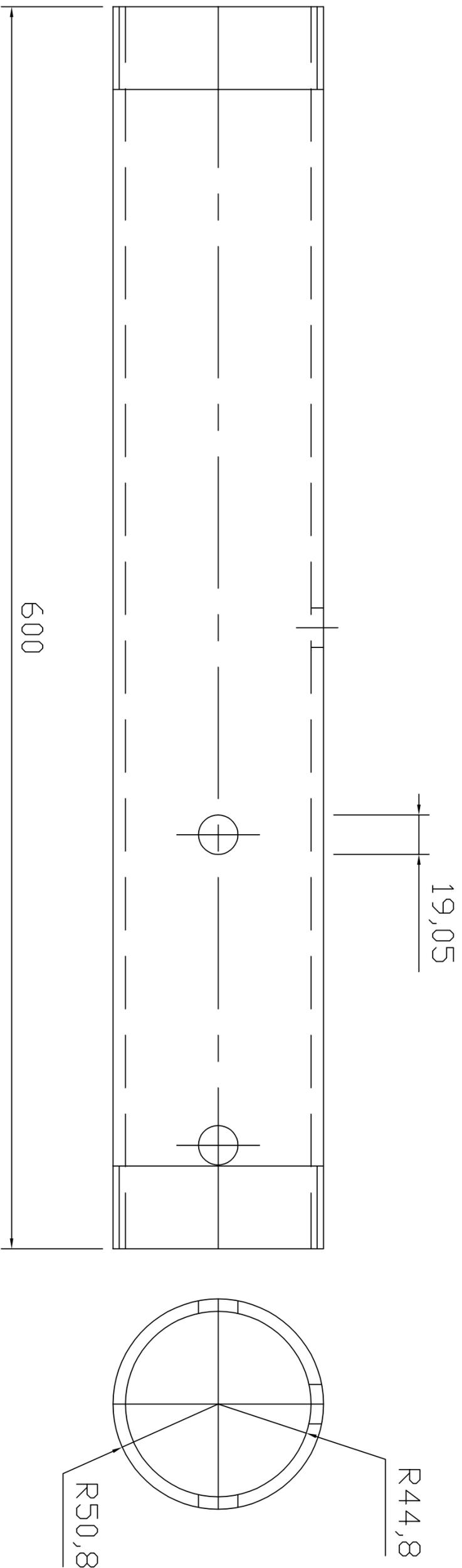
Dibujado año 2009 F. Tinetti

Comprobado año 2009 Ing. Salomon

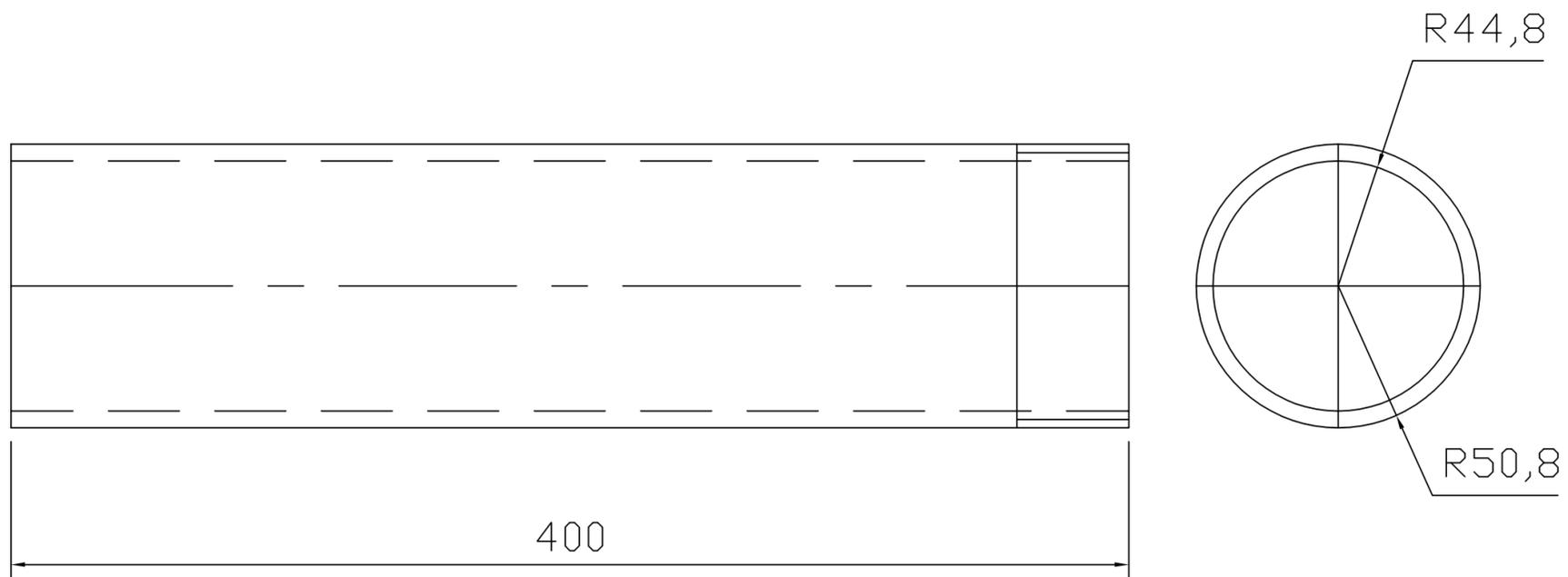
Norma

| | | |
|----------|----------------------------|-----------------|
| ESC 1:10 | FLUIDO DE RETORNO DE PURGA | Sustituye a: |
| | | Sustituido por: |

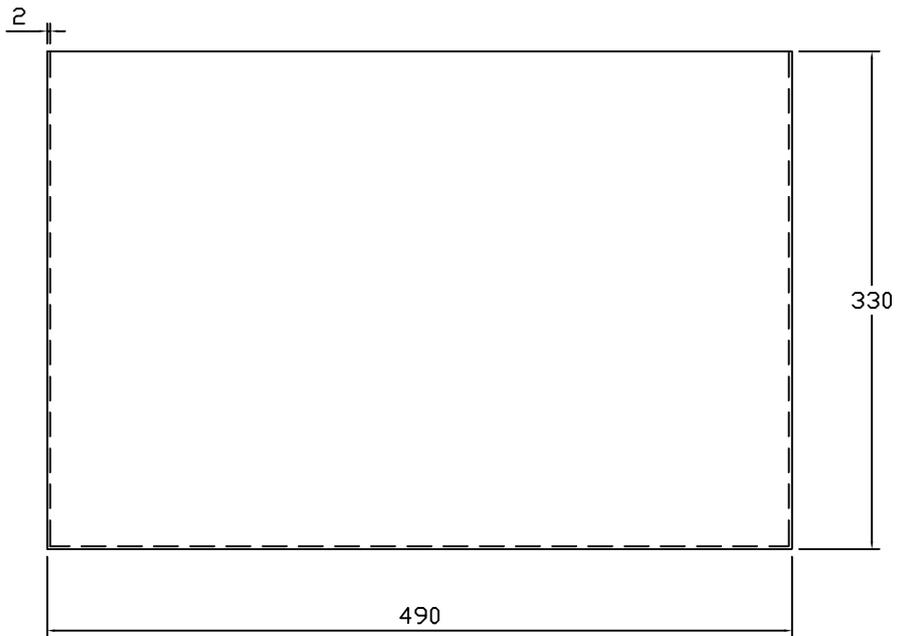
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
 TRABAJO DE GRADUACION



| | | | |
|---------------------|-------------------|-------|---|
| Fecha | Nombre | Firma | UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA INGENIERIA MECANICA TRABAJO DE GRADUACION |
| Dibujado año 2009 | F. Tinetti | | |
| Comprobado año 2009 | Ing. Salomon | | |
| Norma | | | |
| ESC 1:2 | TANQUE CALENTADOR | | |
| | | | Sustituye a: |
| | | | Sustituido por: |



| | Fecha | Nombre | Firma | UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA INGENIERIA MECANICA TRABAJO DE GRADUACION |
|------------|--------------------|--------------|-------|---|
| Dibujado | año 2009 | F. Tinetti | | |
| Comprobado | año 2009 | Ing. Salomon | | |
| Norma | | | | |
| ESC 1:2 | TANQUE CONDENSADOR | | | Sustituye a: |
| | | | | Sustituido por: |



| | | | | |
|------------|--|--------------|-------|---|
| | Fecha | Nombre | Firma | UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA INGENIERIA MECANICA TRABAJO DE GRADUACION |
| Dibujado | año 2009 | F. Tinetti | | |
| Comprobado | año 2009 | Ing. Salomon | | |
| Norma | | | | |
| ESC 1:5 | TANQUE DE MATERIA PRIMA Y TANQUE DE PURGA | | | |
| | | | | Sustituye a: |
| | | | | Sustituido por: |