

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Instalación y Puesta en Marcha del Evaporador de Película Descendente
UOP20-X-PHW y su Aplicación en la Obtención de Concentrados de
Sulfato de Cobre, Jugo de Naranja y Glucosa.**

Carla Sofía Valdivieso Ramírez

**Tesis de grado presentada como requisito para
la obtención del título de Ingeniera Química**

**Quito
Enero de 2010**

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio Politécnico**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Instalación y Puesta en Marcha del Evaporador de Película Descendente
UOP20-X-PHW y su Aplicación en la Obtención de Concentrados de
Sulfato de Cobre, Jugo de Naranja y Glucosa.**

Carla Sofía Valdivieso Ramírez

Marcelo Albuja, Ing. MSc.
Director de la Tesis

Lourdes Orejuela, Ing. MSc.
Miembro del Comité de Tesis

Carlos Fabara, Dr. MSc.
Miembro del Comité de Tesis

Fernando Romo, Ing. MSc.
Decano del Colegio Politécnico

Quito, Enero de 2010

© Derechos de autor
Carla Sofía Valdivieso Ramírez
2010

Dedicatoria

A mi querida madre Nelly Ramírez, por su amor, dedicación y entrega total.

Agradecimientos

A Dios, por su guía y protección.

A mis padres: Nelly Ramírez y Luis Valdivieso, por su apoyo incondicional.

A mis queridos hermanos: Santiago y Linda Valdivieso, por ser mi alegría y fuente de inspiración en los momentos de debilidad y tristeza.

A todos mis apreciados maestros, por compartir su conocimiento, experiencia y sabiduría durante mi formación profesional.

A mis amigas: Nelly Rosas, Salomé Galeas, Jenny Shie y Patricia Pontón, por su apoyo, confianza y amistad sincera.

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como finalidad instalar y poner en marcha el Evaporador de película descendente UOP20-X-PHW que se encuentra ubicado en el laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Química e Ing. Química de la Universidad San Francisco de Quito. Luego de establecer las condiciones de operación y solucionar los problemas técnicos, se logró un funcionamiento del 100% del equipo. A continuación, se procedió a concentrar una solución de Sulfato de cobre, jugo de naranja natural y glucosa. La solución de CuSO_4 evaporada incrementó su concentración del 1% al 8.47% en peso. En el caso del jugo de naranja, el incremento fue del 9.6 % de sólidos solubles al 67.4%, valor que le permitió cumplir con la especificación señalada en la Norma COVENIN para concentrados de fruta. Durante la evaporación de la solución de glucosa se eliminó el 73.9% del agua de la solución inicial, esto permitió obtener un jarabe de glucosa con un contenido de sólidos del 75% y apariencia completamente cristalina. Por otra parte, el análisis de vitamina C realizado al jugo de naranja antes y después del tratamiento térmico mostró un pérdida del 10.6 % de su contenido inicial, lo cual asegura que los nutrientes menos termolábiles presentes en el mismo han sido poco afectados.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el evaporador de película descendente es una buena opción al momento de evaporar soluciones orgánicas termolábiles, solubles en agua y no conductoras de la electricidad.

ABSTRACT

The current project states its purpose as the installment and liftoff the Falling Film Evaporator UOP20-X-PHW which is located in the Unit Operations Laboratory of the Chemicals and Chemical Engineering Department of Universidad San Francisco de Quito. After establishing the operating conditions and solving technical difficulties, a 100% functionality of the equipment was achieved. The next process was to concentrate Copper Sulfate, orange juice and glucose. The evaporated solution of CuSO_4 increased its concentration from 1% to 8,47% in terms of weight. In the case of orange juice, the increase was 9,6% of soluble solids to 67,4%, value which allowed it to comply with the specification presented in the COVENIN standard for fruit concentrates. During the evaporation of the glucose solution 73,9% of water was eliminated from the initial compound, this allowed a glucose syrup to be obtained with a solid content of 75% and a completely crystal clear appearance. On the other hand, the analysis of C Vitamin made on the orange juice before and after the thermal treatment showed a loss of 10,6% of its initial content, which assures that the less thermolabile nutrients present, have been slightly affected. According to the obtained results, the falling film evaporator is a good option to employ when evaporating thermolabile, non electrical conductive and soluble in water organic solutions.

Índice de Contenidos

Introducción	xiii
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1 La Eliminación de Agua	1
1.1.1 Introducción.....	1
1.1.2 Problemas técnicos unidos a la eliminación de agua.....	2
1.1.3 Mecanismos de Eliminación del Agua	3
1.2 La Evaporación.....	3
1.2.1 Definición y Usos	3
1.2.2 Mecanismo de la Evaporación.....	5
1.2.3 Factores que afectan el proceso de evaporación.....	6
1.2.4 Métodos de operación de los evaporadores	8
1.2.5 Sistemas de Alimentación	9
1.2.6 Tipos de Evaporadores	11
1.2.7 Balance de masa y energía para un evaporador de simple efecto	15
1.2.8 Elevación del punto de ebullición de las soluciones	19
1.3 El Agua en los alimentos	20
1.3.1 Agua Libre y Agua Ligada	20
1.3.2 Actividad Acuosa	21
1.4 Evaporador de Película Descendente UOP20-X-PHW	22
1.4.1 Descripción del Equipo	22
1.4.2 Nomenclatura del Equipo	24
CAPITULO 2: PUESTA EN MARCHA DEL EVAPORADOR UOP20-X-PHW	28
2.1 Metodología de Trabajo.....	28
2.1.1 Revisión de las condiciones de operación	28

2.1.2	Instalación y Puesta en Marcha	28
2.1.3	Encendido del Equipo.....	37
2.1.4	Detección y solución de problemas	41
2.1.5	Apagado del Equipo	44
CAPITULO 3: APLICACIONES PRÁCTICAS DEL EVAPORADOR		
UOP20-X-PHW.....		45
3.1	Introducción.....	45
3.2	Calibración de los Sensores (S1) y (S2).....	45
3.3	Aplicaciones con Sulfato de Cobre	53
3.3.1	Práctica A	53
3.3.2	Práctica B.....	54
3.3.3	Práctica C.....	54
3.4	Aplicaciones con Jugo de Naranja.....	55
3.4.1	Materiales y Equipos	57
3.4.2	Metodología.....	57
3.4.3	Optimización del Proceso.....	58
3.4.4	Determinación de Vitamina C por el método de Tillmans.....	61
3.5	Aplicaciones con Glucosa	65
3.5.1	Materiales y Equipos	65
3.5.2	Metodología.....	65
CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		67
4.1	Calibración de los Sensores (S1) y (S2).....	67
4.2	Aplicaciones con Sulfato de Cobre	69
4.3	Aplicaciones con Jugo de Naranja.....	70
4.3.1	Optimización del proceso	70
4.3.2	Evaporación del jugo de naranja	72
4.4	Evaporación de la solución de Glucosa	73
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		75
5.1	Conclusiones	75

5.2 Recomendaciones	77
BIBLIOGRAFIA	78
ANEXO 1A	83
ANEXO 1B	83
ANEXO 1C	87
ANEXO 2A	88
ANEXO 2C	92

Índice de Gráficos

Figura 1.1	Proceso general de la evaporación	6
Figura 1.2	Evaporador de simple efecto	8
Figura 1.3	Evaporador de triple efecto	9
Figura 1.4	Tipos de Alimentación: (a) Directa; (b) Contra corriente; (c) Mixta;.....	10
Figura 1.5	Evaporador de tubos largos verticales.....	12
Figura 1.6	Evaporador de Película Agitada.....	13
Figura 1.7	Evaporador de película descendente.	14
Figura 1.8	Superficie de control para el balance de Masa y Energía	15
Figura 1.9	Evaporador UOP20-X-PHW del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la U.S.F.Q.	23
Figura 1.10	Componentes del Evaporador	24
Figura 1.11	Columna Evaporadora UOP 23-11 First Effect	25
Figura 1.12	Diagrama de Válvulas	26
Figura 2.1	Calentador Eléctrico.....	29
Figura 2.2	Intercambiador de placas.....	31
Figura 2.3	Condensador.....	32
Figura 2.4	Columna Evaporadora UOP23-11	34
Figura 2.5	Sistema de Agua caliente presurizado.....	36
Figura 2.6	Consola de Control.....	39
Figura 2.7	Bomba de Vacío	42
Figura 2.8	Relee de la bomba de vacío.....	43

Figura 3.1	Error del Sensor 1 vs Concentración KCl.....	48
Figura 3.2	Error del Sensor 2 vs Concentración KCl.....	49
Figura 3.3	Desviación del sensor (S1) con relación a la bibliografía.....	49
Figura 3.4	Desviación de (S2) con relación a la bibliografía	50
Figura 3.5	Ubicación de los Potenciómetros de conductividad.....	51
Figura 3.6	Error del Sensor (S1) vs Concentración.....	52
Figura 3.7	Error del Sensor (S2) vs Concentración.....	53
Figura 3.8	Diagrama de flujo de producción de concentrado de Naranja	56
Figura 3.9	Oxidación del Ac. Ascórbico en ácido dehidroascorbico (ADA).....	62

Índice de Tablas

Tabla 3-1	Valores de concentración registrados por los sensores S1 y S2.....	47
Tabla 3-2	Valores de concentración de la sol de KCl registrados por los sensores S1 y S2....	48
Tabla 3-3	Valores de concentración registrados por los sensores S1 y S2 calibrados	52
Tabla 3-4	Variaciones en la velocidad de Alimentación y Reflujo	60
Tabla 3-5	Condiciones óptimas de operación.....	60
Tabla 4-1	% Error registrado por (S1) y (S2).....	67
Tabla 4-2	Valores obtenidos del Balance de Masa y Energía para el CuSO_4	69
Tabla 4-3	Presión óptima para la evaporación del jugo de naranja.....	70
Tabla 4-4	Flujos de Alimentación y Reciclo óptimos para la evaporación del jugo de naranja	71
Tabla 4-5	% Sólidos solubles y mg de Vitamina C presentes en el jugo de naranja.....	72
Tabla 4-6	Condiciones óptimas de evaporación.....	73
Tabla 4-7	Concentración final de la Sol. de Glucosa	73

Introducción

Actualmente, gran parte de las industrias que operan a nivel mundial llevan a cabo procesos de evaporación previos a la obtención de los productos finales.

Durante la evaporación se elimina agua de una solución líquida y se obtiene una solución de mayor concentración; así se logra productos más estables y de mayor vida útil. Además, esta técnica permite reducir los costos de transporte y almacenamiento del producto terminado. Al mismo tiempo, la evaporación debido a su gran versatilidad, tiene aplicaciones en la industria química, oleoquímica, de alimentos, farmacéutica y petroquímica.

Las industrias química y petroquímica utilizan la evaporación para elaborar productos de alta calidad como: resinas, ceras, isocianatos, hidróxido de sodio, ácido láctico y la recuperación de valiosos catalizadores (3). En la industria oleoquímica, el proceso de evaporación se utiliza para tratar productos termo sensibles como la lecitina de soya, la vitamina A y la vitamina E.

En la industria alimenticia, se requiere de la evaporación durante la elaboración de productos como: azúcar, café, zumo de frutas, gelatina, leche en polvo, lacto suero, entre otros.

Por otra parte, la evaporación se emplea también en la protección del medio ambiente; entre sus principales aplicaciones se tiene: el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria química, el reciclaje de aceite automotriz y la recuperación de solventes.

Técnicas como la evaporación y en especial la evaporación al vacío, ofrecen varias ventajas al momento de realizar estos tratamientos, entre ellas se pueden citar: bajo consumo energético, elevado grado de automatización del tratamiento, equipos compactos que requieren poco espacio, limitado uso de reactivos químicos y en especial gran flexibilidad, ya que se tiene la posibilidad de tratar efluentes de distinta procedencia (13).

Considerando la importancia de esta técnica, el presente trabajo tiene como objetivo principal poner en operación el Evaporador didáctico de Película Descendente UOP20-X-PHW, que se encuentra ubicado en el laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Química e Ingeniería Química de la Universidad San Francisco de Quito.

Para lograr el objetivo planteado se va a proceder a la evaluación física del equipo, para determinar las condiciones reales y planificar su posterior instalación y puesta en marcha. Una vez armado el equipo, se van a realizar varios ensayos para probar su correcto funcionamiento. A continuación, se va a implementar las prácticas propuestas en el manual de operación como son: elaboración de balances de masa y energía para la columna evaporadora y la determinación de la eficiencia del proceso.

Como aplicaciones al proceso de evaporación, se van a concentrar jugo de naranja extraído mecánicamente de naranjas frescas y una solución de glucosa proveniente de la hidrólisis enzimática del almidón del banano verde. Para ello, se va a determinar las condiciones óptimas de operación. Una vez concentrado el jugo de naranja y la glucosa, se deberá determinar el contenido de sólidos totales y el porcentaje de vitamina C remanente en el jugo y compararlos con los valores establecidos por las normas correspondientes. Con estas aplicaciones se ampliaría el uso del evaporador ya que se tiene la posibilidad de trabajar con soluciones de diferentes características.

Al poner en operación el evaporador Falling Film, se facilita la realización de prácticas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y el desarrollo de proyectos de investigación.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 La Eliminación de Agua

1.1.1 Introducción

Bajo el término “eliminación de agua” se agrupan diversos tipos de operaciones unitarias como: secado, evaporación, destilación, cristalización y congelación, los cuales obedecen en principio a las mismas leyes y sus objetivos son casi los mismos (8).

La eliminación de agua permite reducir considerablemente la masa y el volumen de los alimentos, lo que conlleva un importante ahorro en almacenaje y transporte: 10 toneladas de leche se reducen a 1 tonelada de polvo, por lo cual la exportación de leche en polvo requiere 10 veces menos barcos de los que serían necesarios para el transporte de la cantidad equivalente de leche líquida (8).

Además, al privar al alimento de agua libre se reduce su actividad acuosa con lo cual se incrementa su estabilidad microbiológica, química y vida útil (8).

Del gran número de productos que sufren procesos en los cuales se elimina parte de su contenido de agua se pueden citar a los zumos de frutas, residuos de cervecería, leche, lactosuero, cacao, azúcar, ácidos grasos omega-3, lecitina de soya, vitamina A y E, etc.

La industria de los alimentos no es la única que utiliza estas técnicas, la industria de la química fina, farmacéutica y cosmética también lo hacen, principalmente en la recuperación de solventes. Además, hoy en día la eliminación de agua constituye una parte muy importante en la obtención de biodiesel (3).

1.1.2 Problemas técnicos unidos a la eliminación de agua

Todo proceso de eliminación de agua tropieza con dos problemas principales:

- Primero, el riesgo de alteración de la calidad del producto debido a los tratamientos térmicos, ya que estos pueden provocar la pérdida de vitaminas, reacciones de pardeamiento, pérdida de aromas, etc. Estos efectos adversos requieren de mucho control porque reducen de manera significativa la calidad nutritiva y organoléptica de los productos tratados. Sin embargo, existen técnicas de eliminación de agua que permiten limitar los efectos no deseados porque trabajan con bajas temperaturas, lamentablemente estas técnicas son las más costosas (8).
- Segundo, el consumo de energía es un factor muy importante a tomar en cuenta ya que el sector industrial global destina alrededor del 20% de su consumo de energía a las operaciones de eliminación de agua. El sector agro-alimentario destina el 60% de su consumo energético en el proceso de secado y las industrias láctea, azucarera y de tratamiento de granos juntas consumen dos tercios de la energía gastada por las industrias agro-alimentarias. De acuerdo a estas cifras, estas tres ramas de la industria agro-alimentaria tienen en común una fuerte actividad de eliminación de agua y por ende tienen un alto consumo energético (8).

Por otra parte, si se quiere limitar el consumo de energía se puede optar por técnicas menos costosas, pero surge nuevamente el problema de la calidad del producto, ya que estas técnicas con frecuencia son las que más alteran las propiedades del mismo (8).

1.1.3 Mecanismos de Eliminación del Agua

La eliminación de agua de un producto puede realizarse por vía mecánica o por vía térmica.

- *La eliminación de agua por vía mecánica* tiene carácter limitado ya que técnicas como la centrifugación, filtración y prensado permiten eliminar únicamente una parte del agua libre de los productos tratados, ninguna de ellas permite disminuir la humedad de un producto más allá del 60%. Además, debido a que los tratamientos mecánicos son bruscos, la fase eliminada no es agua pura sino que está constituida por una parte de extracto seco, lo cual disminuye la calidad del producto terminado. La ventaja de este tipo de técnicas es su bajo consumo de energía ya que eliminan la fracción de agua no ligada.(3)
- Por otra parte, *la eliminación de agua por vía térmica* permite eliminar hasta un 97 % de humedad de los productos, lo cual les confiere mayor estabilidad y vida útil. Sin embargo, la pérdida de sabor, aroma y calidad nutritiva junto con el mayor requerimiento energético, constituyen algunas de las desventajas al aplicar estas técnicas (12).

Entre las técnicas de eliminación de agua por vía térmica se encuentra la evaporación, el secado, la destilación y la cristalización (8).

1.2 La Evaporación

1.2.1 Definición y Usos

La evaporación es un método de eliminación de agua por ebullición, el cual permite obtener productos finales de mayor concentración, manteniendo el estado líquido de los mismos (11).

La evaporación se realiza por medio de la adición de calor al producto líquido a concentrar, así se lo lleva a la temperatura de ebullición, se vaporiza una parte del solvente y se obtiene el

producto concentrado (9). Esta concentración por evaporación se logra aprovechando la diferencia de volatilidades existentes entre el agua y los solutos (6). Cabe notar que en la mayor parte de evaporaciones el solvente es el agua.

La evaporación difiere del secado en que el residuo es un líquido y no un sólido, a su vez difiere de la destilación ya que el vapor generado está constituido por un solo componente y, aún cuando el vapor sea una mezcla, en la evaporación no se intenta separar el vapor en fracciones. Finalmente, la evaporación difiere de la cristalización en que su interés reside en concentrar una solución y no en formar cristales (9).

La evaporación es una operación unitaria muy versátil ya que puede aplicarse a un sinnúmero de productos, entre los cuales se puede mencionar: ceras, resinas, hidróxido de sodio, pre-polímeros, glicerina, jarabes, zumos de frutas, leche, café, azúcar, cacao, gelatina, etc.

Los principales objetivos de la evaporación son los siguientes:

- Concentrar alimentos como los zumos de frutas, leche y café antes de su deshidratación, congelación o esterilización (6).
- Reducir la actividad acuosa con el fin de incrementar la estabilidad microbiológica y química de los productos finales.(8)
- Aumentar el contenido de sólidos totales en productos como mermeladas y melazas (6).
- Reducir costos de almacenamiento y transporte (8).
- Inducir la cristalización (8).
- Suministrar productos de uso más cómodo para el consumidor como son los concentrados de fruta para diluir, sopas, pastas de tomate, etc. (6).
- Recuperar subproductos de las corrientes efluentes (3).

1.2.2 Mecanismo de la Evaporación

“La evaporación es esencialmente una operación de transferencia de masa, la cual necesita la activación previa del agua, esto se logra mediante el aporte de cierta cantidad de energía en forma de calor” (8). Tanto la transferencia de masa como la de calor se desdoblan en una fase externa y una interna:

- “*Transferencia de calor externa*, desde la fuente de calor hacia la superficie del producto” (8).
- “*Transferencia de calor interna*, desde la superficie hacia el centro del producto” (8).
- “*Transferencia de masa interna*, desde el centro hacia la superficie del producto” (8).
- “*Transferencia de masa externa*, desde la superficie del producto hacia el medio exterior” (8).

La forma más usual de aportar calor a los procesos de evaporación es a través de la condensación del vapor de agua, ya que el vapor al ponerse en contacto con una superficie a menor temperatura condensa sobre ella, de modo que el calor latente o de condensación, al ser mayor que el calor sensible, se transfiere por conducción a través de la pared y posteriormente por convección al líquido. De esta manera se logra elevar su temperatura, lo cual permite que parte del agua de la solución a evaporar pase al estado de vapor y posteriormente sea eliminada (8). En la figura 1.1 se muestra el principio general de la evaporación.

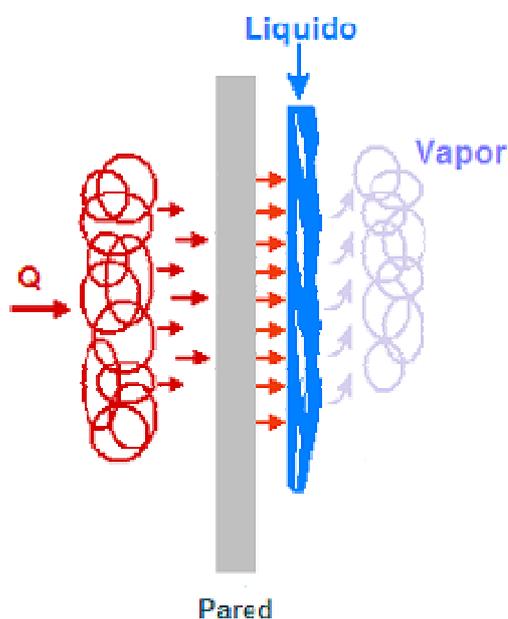


Figura 1.1 Proceso general de la evaporación (De Carla Valdivieso)

1.2.3 Factores que afectan el proceso de evaporación

Las propiedades físicas y químicas de las soluciones a concentrar tienen un efecto considerable sobre el tipo de evaporador que debe usarse y sobre la temperatura y presión del proceso. A continuación se analizan algunas de ellas (7).

- *La Concentración.* Por lo general, la alimentación que entra a un evaporador es bastante diluida y tiene muchas de sus propiedades físicas parecidas a las del agua. Sin embargo, a medida que aumenta su concentración, la solución adquiere mayor densidad y viscosidad hasta que se transforma en saturada, lo cual impide una transferencia de calor adecuada.

La ebullición continua de una solución saturada da lugar a la formación de cristales, que es preciso separar, pues de lo contrario los tubos se obstruyen (9).

- *La Sensibilidad de los materiales a la temperatura.* Muchos productos químicos, farmacéuticos, en especial los alimentos se deterioran cuando se someten a temperaturas moderadas durante tiempos relativamente cortos. Para concentrar estos materiales se necesitan técnicas especiales para reducir tanto la temperatura del líquido como el tiempo de calentamiento (9).
- *La Formación de Espumas.* En algunos casos, los materiales constituidos por soluciones cáusticas, soluciones de alimentos como la leche desnatada y algunas soluciones de ácidos grasos, forman espuma durante la ebullición. Esta espuma es arrastrada por el vapor que sale del evaporador y puede producir pérdidas de material (7).
- *Las Incrustaciones.* Algunas soluciones depositan costras sobre la superficie de calentamiento. En estos casos, el coeficiente global de transferencia disminuye progresivamente hasta que llega un momento en que es preciso interrumpir la operación del evaporador para limpiar los tubos (9).
- *Materiales de construcción.* Seleccionar los materiales adecuados para la construcción del evaporador es un aspecto importante ya que permite prevenir problemas como la corrosión y contaminación del producto. El costo de la mayoría de materiales como el cobre, níquel y acero inoxidable es elevado, por ello resulta deseable obtener elevadas velocidades de transferencia de calor con el fin de minimizar los costos de equipo (9).

1.2.4 Métodos de operación de los evaporadores

Existe dos tipos de operaciones que los evaporadores pueden llevar a cabo, estas son: operación de simple efecto y operación de múltiple efecto.

- *La evaporación de simple efecto* se da cuando se utiliza un sólo evaporador, lo que caracteriza a esta operación es que el vapor procedente del líquido en ebullición pasa a un condensador para luego ser desechado; por tanto, utiliza de forma ineficaz el vapor (9). En la figura 1.2 se muestra un evaporador de simple efecto.

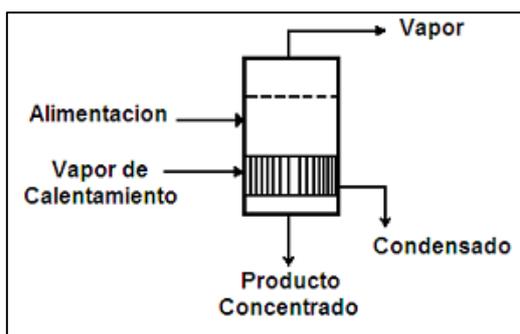


Figura 1.2 Evaporador de simple efecto. (De Carla Valdivieso)

- *La evaporación de múltiple efecto* se da cuando se utiliza un conjunto de evaporadores, denominándose primer efecto al primer evaporador, segundo efecto al segundo evaporador y así sucesivamente. La característica principal de este tipo de operación es que el vapor procedente del líquido en ebullición del primer efecto se emplea como vapor de calefacción del segundo, y el producido en éste se emplea como calefacción del tercero, etc. Siendo el primer evaporador el que recibe el vapor vivo procedente de un generador de vapor.

Las temperaturas de ebullición, en este tipo de evaporadores, van disminuyendo de efecto a efecto (11). En la figura 1.3 se muestra el gráfico de un evaporador de triple efecto.

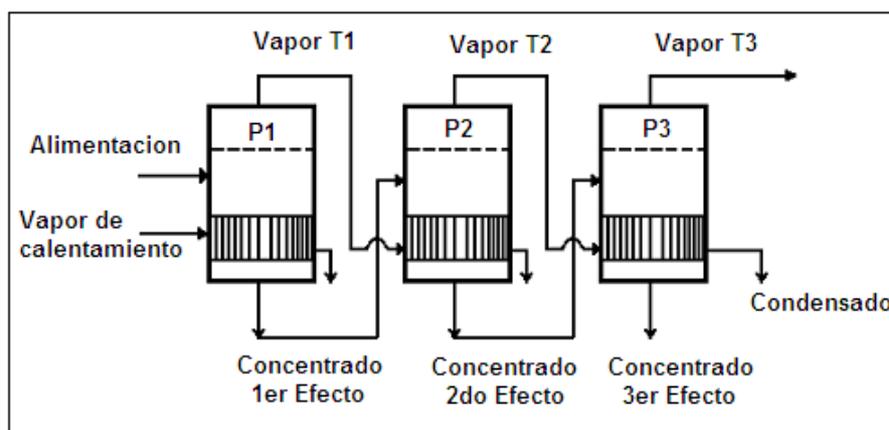


Figura 1.3 Evaporador de triple efecto. (De Carla Valdivieso)

1.2.5 Sistemas de Alimentación

Los sistemas de alimentación reciben distinto nombre según el sistema de circulación seguido por el líquido a concentrar, denominándose:

a) Alimentación Directa

La alimentación es directa cuando la dirección de la corriente del vapor de calefacción y del líquido a concentrar es la misma.

b) Alimentación en Contra Corriente

La alimentación es en contra corriente cuando la dirección de la corriente del vapor de calefacción y del líquido a concentrar son contrarias, entrando el líquido por el último efecto

c) Alimentación Mixta

La alimentación es mixta cuando en una parte del sistema la dirección de las corrientes es directa y en otra es en contracorriente.

d) Alimentación en Paralelo

Este tipo de alimentación se caracteriza porque la alimentación entra simultáneamente en todos los efectos y el líquido concentrado procedente de cada efecto se une en una sola corriente (11).

A continuación en la figura 1.4 se muestra los cuatro tipos de alimentación:

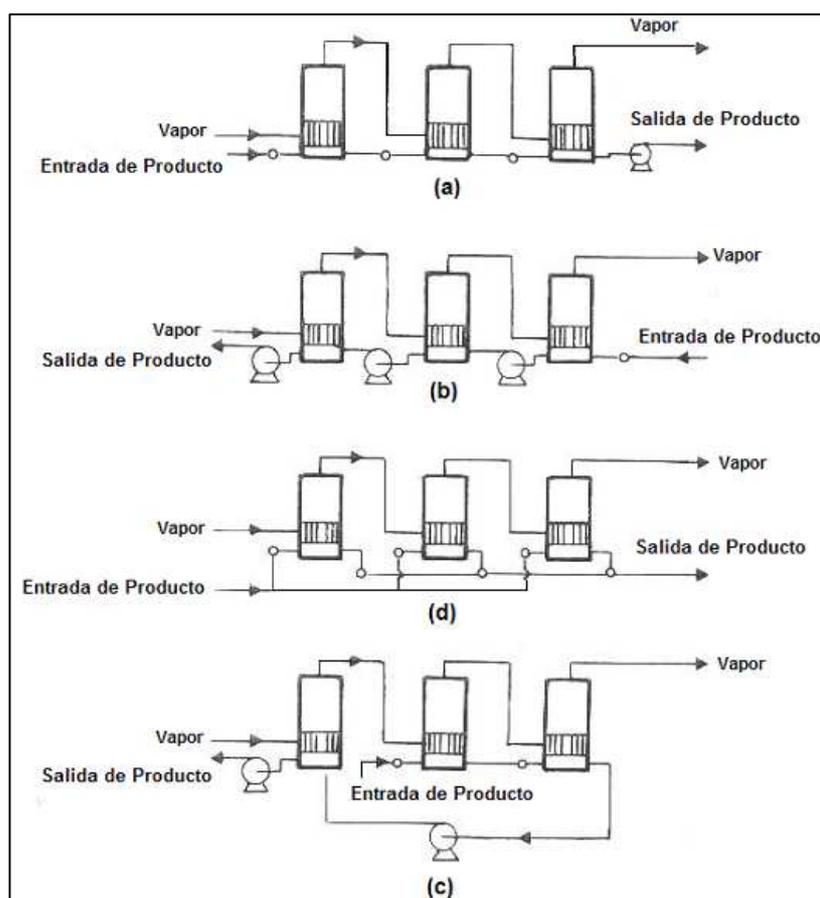


Figura 1.4 Tipos de Alimentación: (a) Directa; (b) Contra corriente; (c) Mixta; (d) Paralelo. (De Brenan y col. (1976)

1.2.6 Tipos de Evaporadores

Los tipos de evaporadores tubulares que utilizan vapor como medio de calentamiento son: Evaporadores verticales de tubos largos y Evaporadores de película agitada.

a) Evaporadores verticales de tubos largos

El cuerpo de calentamiento de estos equipos es tubular y están dispuestos de forma vertical, características que les permiten lograr velocidades altas para el lado del líquido y coeficientes de transferencia de calor elevados. Dentro de este tipo de evaporadores se encuentran los evaporadores de película ascendente, descendente y de circulación forzada. El principio de operación en inicio es similar: el vapor de calentamiento fluye por el lado de la coraza mientras que el líquido a concentrar fluye por el interior de los tubos, la variante en cada caso es la forma en la cual se realiza la alimentación. En el caso de los evaporadores de película ascendente, la alimentación ingresa por la parte inferior, mientras que en los de película descendente ingresa por la parte superior. La utilización de uno u otro tipo de evaporador está relacionada con la naturaleza del líquido que se desea concentrar, en el caso de líquidos sensibles al calor, se opta por evaporadores de película descendente.

En los evaporadores de circulación forzada, la alimentación ingresa por la parte inferior del evaporador, pero para ello se emplea una bomba ubicada entre las líneas de salida del concentrado y la de alimentación, con esto se logra forzar la circulación del líquido en el interior de los tubos y aumentar el coeficiente de transferencia de calor de la película. Este tipo de evaporadores son útiles para tratar líquidos viscosos (7).

El Evaporador UOP20-X-PHW ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la U.SF.Q reúne todas las características de un evaporador de película descendente, por ello en

la sección 1.2.6.1 se explica con mayor detalle el funcionamiento de este tipo particular de evaporadores. La figura 1.5 muestra un evaporador de tubos largos verticales.

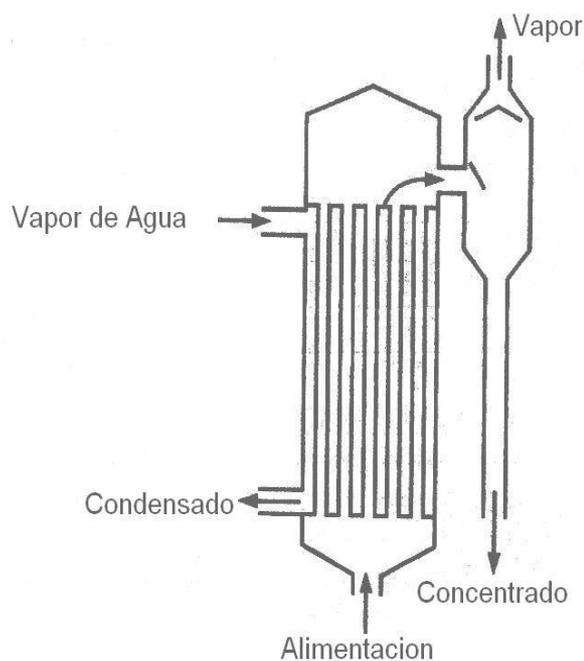


Figura 1.5 Evaporador de tubos largos verticales. (De McCabe(2002))

b) Evaporadores de película agitada

Este tipo de evaporadores tienen como objetivo principal reducir la resistencia a la transferencia de calor por parte del líquido, para ello aumentan su turbulencia de manera mecánica. Este efecto se logra colocando un tubo encaquetado que contiene un agitador interno, así el líquido ingresa por la parte superior del tubo y a medida que fluye hacia abajo se dispersa en forma de película turbulenta por acción de las aspas. La solución concentrada sale por el fondo, el vapor pasa por un separador y es eliminado por la parte superior. Este tipo de evaporadores se utilizan para tratar materiales muy viscosos, pues el coeficiente de

transferencia de calor es mayor que en el modelo de circulación forzada (9). La figura 1.6 muestra un evaporador de película agitada.

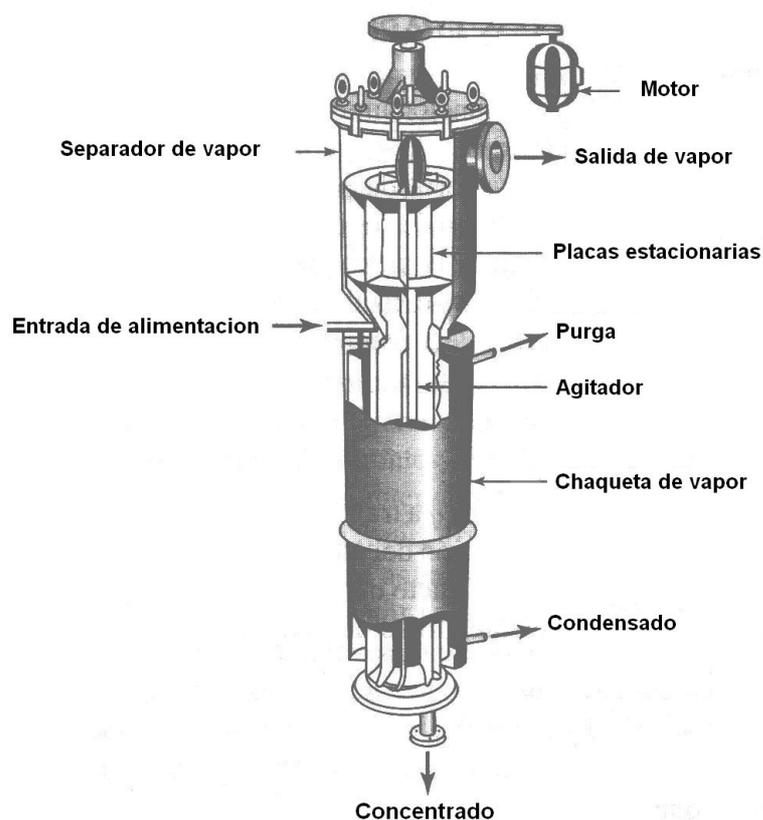


Figura 1.6 Evaporador de Película Agitada. (De McCabe(2002))

1.2.6.1 Evaporadores de Película Descendente

En los evaporadores de película descendente, el líquido alimentado entra por la parte superior, desciende como una película delgada por el interior de los tubos calentados por el vapor de agua y sale a mayor concentración por la parte inferior. A continuación, el vapor procedente

del líquido es arrastrado hacia abajo junto con el líquido concentrado, para ser posteriormente separado en un ciclón.

Este tipo de evaporadores se utilizan para concentrar una gran variedad de productos incluyendo los termo-sensibles y moderadamente viscosos como el jugo de naranja, ya que permiten trabajar con tiempos de residencia cortos, elevados coeficientes de transferencia de calor y una gran eficiencia energética (9).

A continuación, en la Figura 1.7 se muestra un Evaporador de Película descendente:

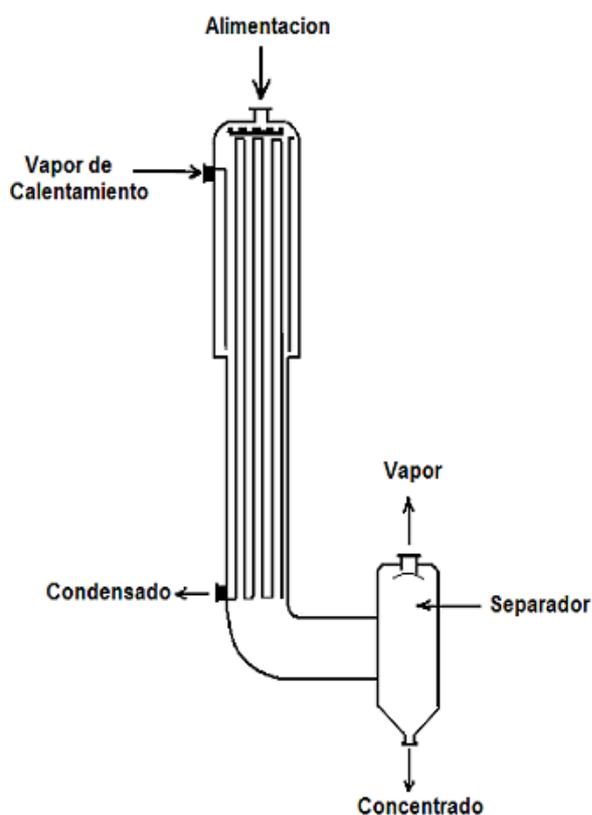


Figura 1.7 Evaporador de película descendente. (De Carla Valdivieso)

1.2.7 Balance de masa y energía para un evaporador de simple efecto

Para calcular el grado de concentración, las necesidades energéticas y el tiempo de evaporación, es preciso efectuar balances de masa y energía en torno al evaporador.

a) Balance de Masa

El balance de masa establece que la masa que entra al evaporador es igual a la masa que sale del mismo. La superficie de control del proceso se muestra en la figura 1.8.

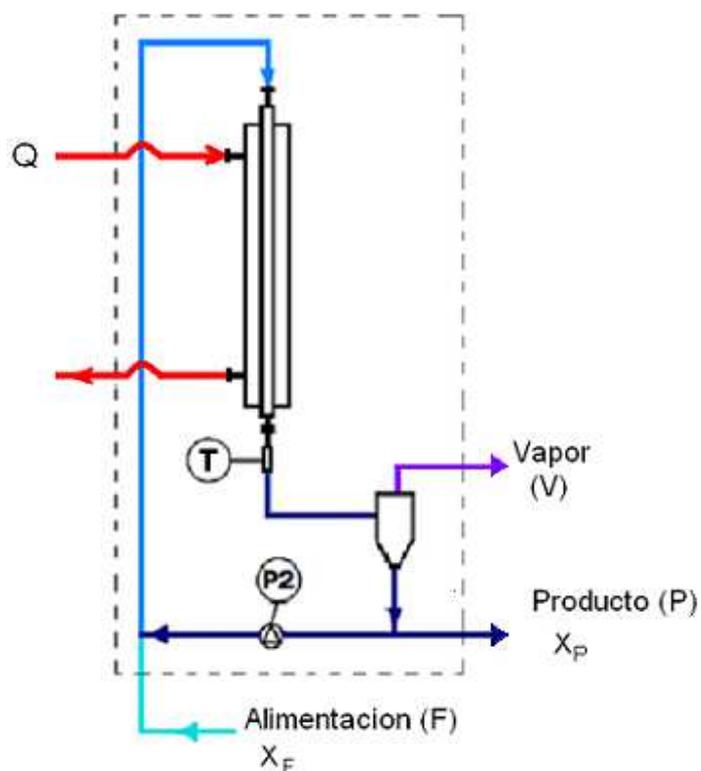


Figura 1.8 Superficie de control para el balance de Masa y Energía. (De Carla Valdivieso)

donde:

X_F = fracción molar del soluto en corriente de alimentación F

X_P = fracción molar del soluto en corriente de producto P

El balance de masa total establece que la masa que entra al evaporador es igual a la masa del producto más la masa de agua evaporada que salen del mismo. El balance de masa, según McCabe (9), se resume en las siguientes expresiones:

$$F = P + V \quad [1.1]$$

Balance con respecto a los solutos:

$$F * X_F = P * X_P \quad [1.2]$$

Balance con respecto al agua:

$$F * (1 - X_F) = P * (1 - X_P) + V \quad [1.3]$$

b) Balance de Energía

El balance de energía establece que el calor total que entra al sistema es igual al calor que sale del mismo; por tanto, según McCabe (9), se tiene que:

$$\underbrace{Q \text{ alimentación} + Q \text{ entregado al sistema}}_{Q \text{ entra}} = \underbrace{Q \text{ del producto concentrado} + Q \text{ del agua evaporada}}_{Q \text{ sale}} \quad [1.4]$$

Si se reemplazan los datos en la Eq. [1.4] se tiene:

$$F * h_F + S * (h_g - h_l) = P * h_p + V * h_v \quad [1.5]$$

donde:

h_F = entalpía de la solución diluida

h_P = entalpía de la solución concentrada

h_V = entalpía del agua evaporada

h_g = entalpía del vapor de calentamiento

h_l = entalpía del líquido que se condensa en el calentamiento

$\lambda = (h_g - h_l)$ = calor latente de condensación del vapor de agua

S = flujo del vapor de calentamiento

Entonces, el calor para el lado del vapor esta dado por la relación:

$$Q_S = S * (h_g - h_l) = S * \lambda \quad [1.6]$$

donde:

Q_S = Velocidad de transferencia de calor a través de la superficie de calentamiento desde el vapor de agua

En ausencia de pérdidas de calor, el calor transferido desde el vapor de calentamiento hacia los tubos es igual al calor transferido desde los tubos al líquido, por tanto: $Q_S = Q$

Al reemplazar la Eq. [1.5] en la Eq. [1.6] se tiene:

$$Q = Q_S = S * \lambda = P * h_P + V * h_V - F * h_F \quad [1.7]$$

donde

Q = velocidad de transferencia de calor desde la superficie de calentamiento hacia el líquido

Si se utiliza el coeficiente global de transferencia de calor, el balance de energía para el evaporador se expresa de la siguiente forma:

$$Q = U * A * \Delta T \quad [1.8]$$

donde

$$U = \text{coeficiente global de transferencia de calor} \left[\frac{\text{Watts}}{\text{m} \cdot \text{°K}} \right]$$

A = área de transferencia de calor

ΔT = diferencia de temperatura entre el fluido calefactor y el producto

c) Economía del evaporador

La economía de la evaporación (E), relaciona los kilogramos de agua evaporada por cada kilogramo de vapor utilizado en la evaporación y está dada por la siguiente relación:

$$E = \frac{V}{S} \quad [1.9]$$

Los factores que afectan la economía del evaporador son: la temperatura de la alimentación y el número de efectos.

La economía de la evaporación (η_o) para un evaporador que utiliza agua presurizada como medio calefactor, está dado por la expresión:

$$\eta_o = \frac{V * h_V}{S * (h_{12} - h_{11}) + F * h_F} \quad [1.10]$$

donde:

h_{11}, h_{12} = entalpía de las corrientes de agua presurizada a T_{11} y T_{12}

1.2.8 Elevación del punto de ebullición de las soluciones

La presión de vapor de la mayoría de soluciones acuosas es menor que la presión de vapor del agua a la misma temperatura; por tanto, la temperatura de ebullición de la solución será mayor que la del disolvente puro a una misma presión, denominándose a la diferencia entre ambas elevación en el punto de ebullición BPE (boiling point rise) (9). Para soluciones ideales, de acuerdo con la ley de Rault se tiene:

$$\Delta T_e = \frac{T_e^2 R x}{\lambda} \quad [1.11]$$

donde

ΔT_e = incremento de la T de ebullición en K

T_e = temperatura de ebullición del agua pura

R = constante de los gases 8.314 J/K mol

x = fracción final de soluto

λ = calor latente del agua pura

El BPE se debe restar de la temperatura de ebullición de la solución para determinar la temperatura de ebullición del agua dentro de la solución. A partir de este dato y con ayuda de las tablas de vapor de agua, se predice la presión de trabajo (11).

$$T_e' = T_{e \text{ Solucion}} - \Delta T_e \quad [1.12]$$

donde

$T_{e\text{ Solucion}}$ = temperatura de ebullición de la solución

T_e' = temperatura de ebullición del agua pura dentro de la solución

1.3 El Agua en los alimentos

El agua es esencial para la vida y constituye la mayor parte de los tejidos animales y vegetales, muchas de sus funciones y reacciones bioquímicas se llevan a cabo gracias a su interacción con el agua (14).

Todos los alimentos, incluyendo los deshidratados, contienen cierta cantidad de agua; por tanto, el contenido de agua en los mismos es determinante en la inhibición o la propagación de las diferentes reacciones, ya que estas pueden aumentar o disminuir la calidad nutritiva, sensorial y vida útil de los alimentos (2).

Algunos sistemas de conservación de alimentos tales como el secado, la concentración y la congelación permiten reducir el agua disponible en los alimentos y por ende inhiben el crecimiento de bacterias, hongos y levaduras (2).

1.3.1 Agua Libre y Agua Ligada

El agua que se puede extraer fácilmente de los alimentos al exprimirlos, cortarlos, o presionarlos se conoce con el nombre de *agua libre*, mientras que el agua que no se puede extraer fácilmente se llama *agua ligada* (14).

Además, agua libre es la que se volatiliza fácilmente, se pierde en el calentamiento, se congela primero y es la principal responsable de la actividad acuosa (2).

Por otra parte, muchos constituyentes de los alimentos pueden unirse o ligarse a moléculas de agua, así ésta no se puede eliminar fácilmente ya que contiene más uniones estructurales que

el agua libre. Por esta razón, el agua ligada no puede actuar como solvente para sales y azúcares y su presión de vapor es despreciable (14).

1.3.2 Actividad Acuosa

La actividad acuosa A_w se expresa como la relación que existe entre la presión de vapor del agua del alimento (P) y la presión de vapor del agua pura (P_0) así:

$$A_w = \frac{P}{P_0} \quad [1.13]$$

Esta fracción representa el grado de interacción del agua con los demás constituyentes, o la porción de agua disponible en un producto para sustentar las reacciones químicas, enzimáticas e intervenir en el crecimiento microbiano. Con base en este valor se puede predecir la estabilidad de un alimento. Según la FDA, el valor de la actividad acuosa debe ser menor a 0.85 para disminuir el efecto de las reacciones antes mencionadas (2). En la tabla 1.1 se muestra la actividad acuosa de algunos alimentos

Tabla 1.1. Actividad Acuosa de algunos Alimentos (De Badui. 1993)

Actividad Acuosa		Actividad Acuosa	
Frutas	0.97	Pan	0.96
Verduras	0.97	Mermelada	0.86
Jugos	0.97	Frutas secas	0.8
Huevos	0.97	Miel	0.75
Carne	0.97	Cereales	0.1
Queso	0.96	Azucar	0.1

1.4 Evaporador de Película Descendente UOP20-X-PHW

1.4.1 Descripción del Equipo

El evaporador UOP20-X-PHW con que cuenta la Universidad San Francisco de Quito en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, es parte de una serie de evaporadores didácticos diseñados por la compañía ARMFIELD para estudios superiores de Ingeniería Química.

Este es un evaporador de película descendente de un sólo efecto, el cual se caracteriza por que la alimentación ingresa por la parte superior de la columna evaporadora, desciende por gravedad en forma de película y sale a mayor concentración por la parte inferior.

El equipo en mención posee una columna evaporadora, la cual consta de un tubo de acero inoxidable, una camisa calefactora y una vaina aislante. El medio calefactor con el que opera el equipo es agua presurizada caliente, la cual circula continuamente por la camisa. Estos elementos están adosados a un bastidor vertical junto con un ciclón que separa el producto concentrado de sus vapores, éste está fabricado con vidrio transparente para que el proceso sea visible.

La unidad de evaporación posee varias bombas: una bomba para la alimentación de la solución que se quiere concentrar, una bomba para la recirculación del producto y una bomba para generar vacío. Además, cuenta con un sistema de precalentamiento eléctrico, un condensador, termocuplas para medir la temperatura en varios puntos del proceso y tres recipientes de recolección. Estos dispositivos están montados en un sólido soporte de acero. Al mismo tiempo, el evaporador incluye una consola de control con los componentes eléctricos y electrónicos que permiten operarlo desde un computador.

El software con que cuenta el equipo permite observar de forma directa la concentración de sulfato de cobre inicial y final, ya que las calcula en tiempo real a partir de las lecturas de temperatura y conductividad registradas (1).

A continuación, en la figura 1.9 se muestra el evaporador UOP20-X-PHW:



Figura 1.9 Evaporador UOP20-X-PHW del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la U.S.F.Q.

(Del Manual de Operación Armfield)

1.4.2 Nomenclatura del Equipo

Para instalar y poner en marcha el equipo es necesario conocer la nomenclatura que se va a emplear durante el proceso. A continuación, se muestran los diagramas principales:

a) Componentes del Evaporador

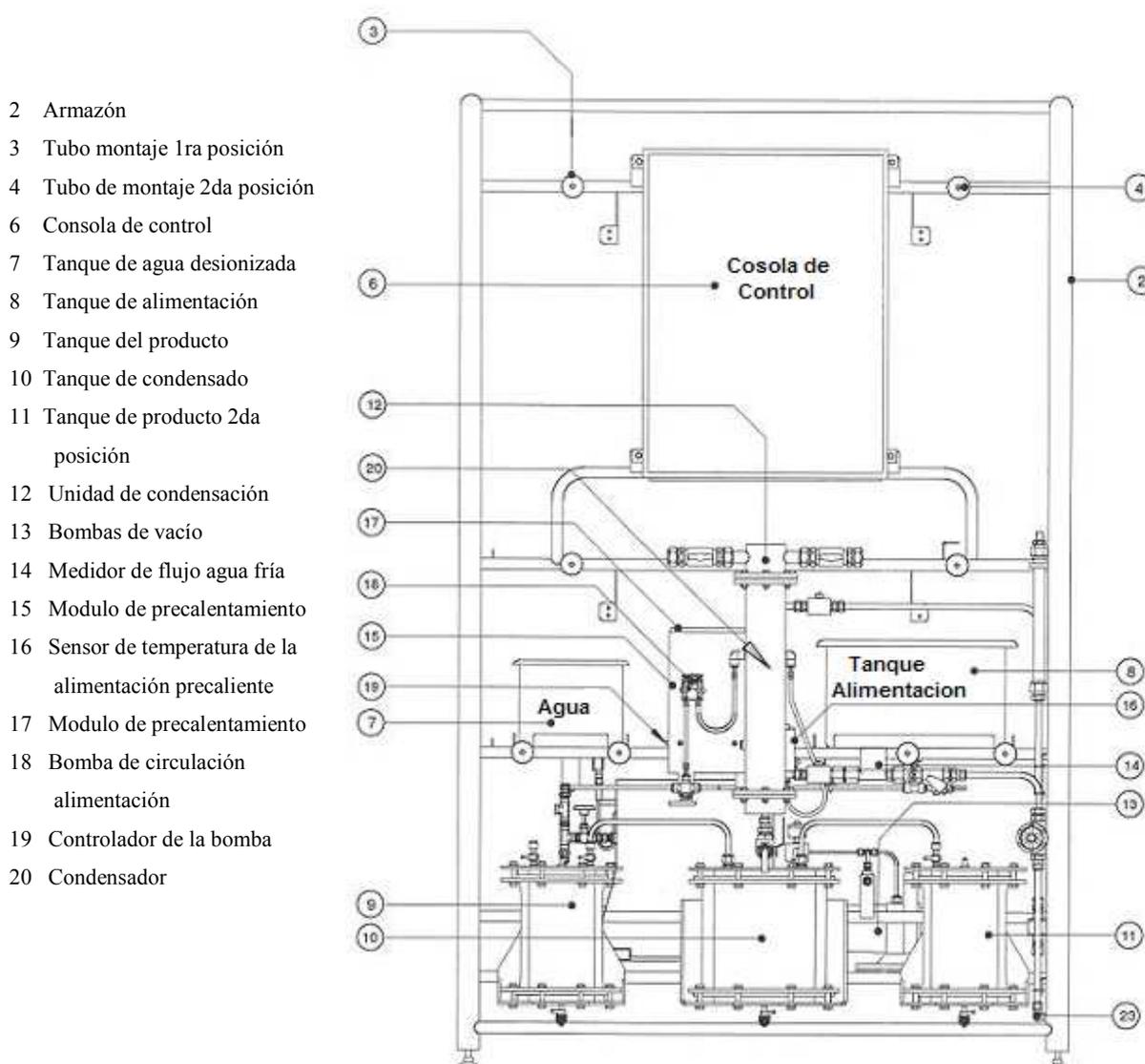


Figura 1.10 Componentes del Evaporador. (Del Manual de Operación Armfield)

b) Columna Evaporadora UOP23-11 First Effect

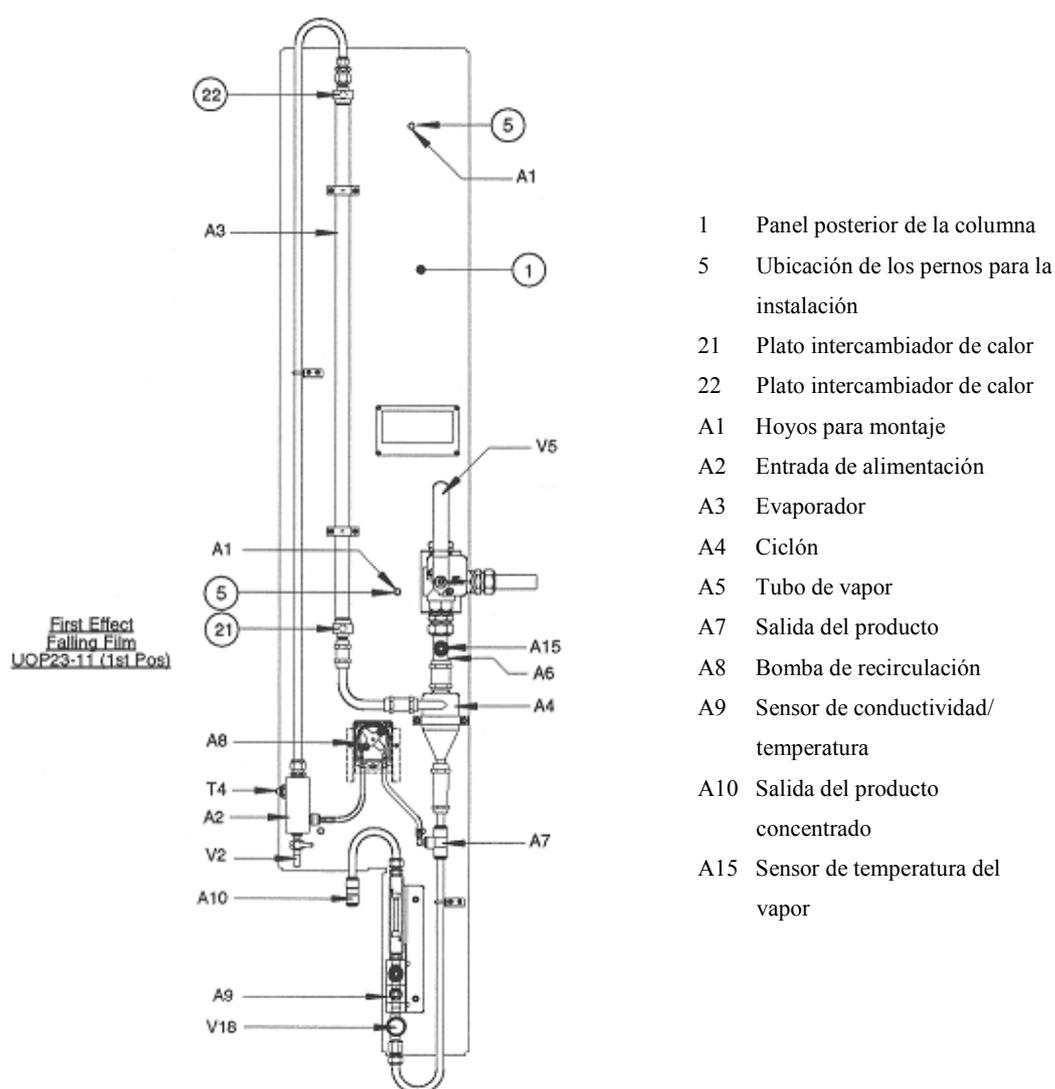


Figura 1.11 Columna Evaporadora UOP 23-11 First Effect. (Del Manual de Operación Armfield)

c) Válvulas

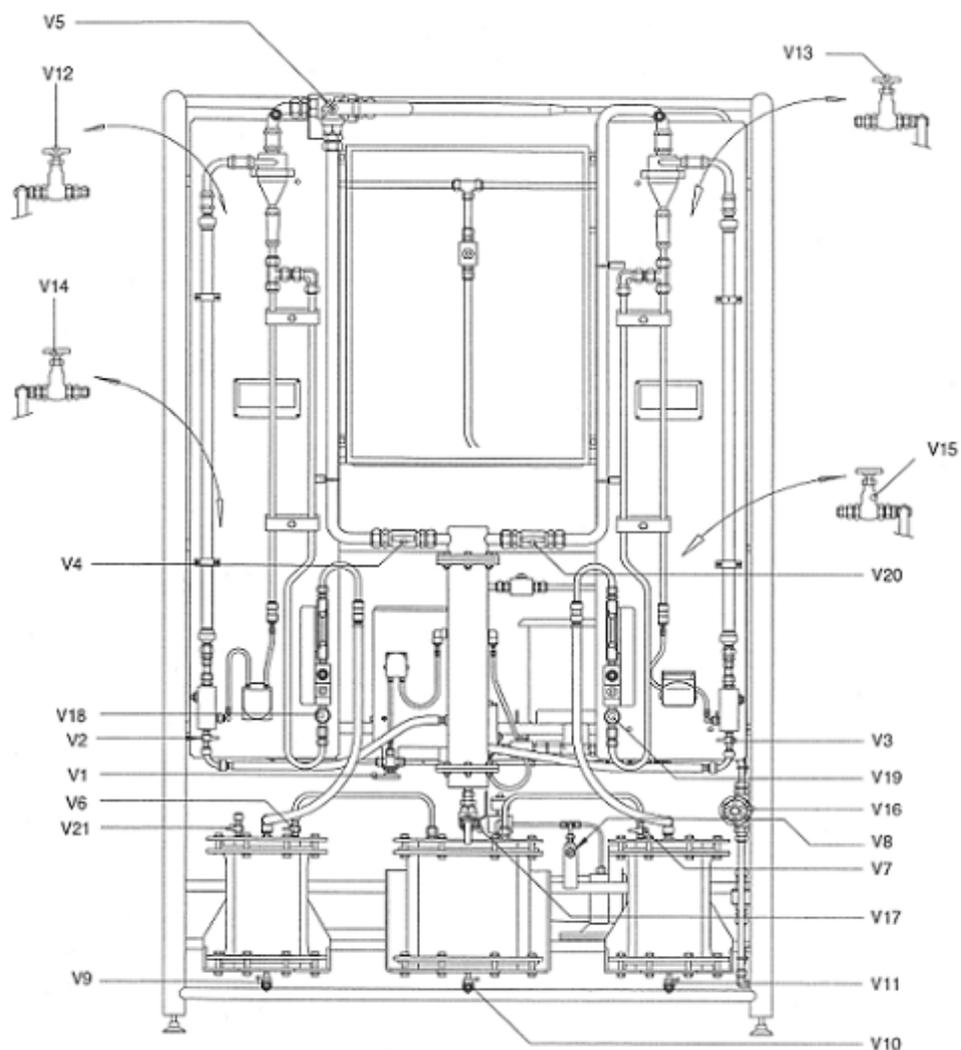


Figura 1.12 Diagrama de Válvulas. (Del Manual de Operación Armfield)

- V1 Válvula selectora para sulfato de cobre y agua desionizada
- V2 Válvula de entrada al evaporador 1ra posición
- V3 Válvula de entrada al evaporador 2da posición
- V4 Vapor del producto al condensador 1ra posición
- V5 Válvula selectora
- V6 Válvula de conexión entre el tanque de condensado y el producto, 1ra posición

- V7 Válvula de conexión entre el tanque de condensado y el producto, 2da posición
- V8 Válvula de control de vacío
- V9 Válvula de drenaje del tanque del producto, 1ra posición
- V10 Válvula de drenaje del tanque de condensado
- V11 Válvula de drenaje del tanque de producto, 2da posición
- V12 Válvula de salida del agua presurizada, 1ra posición
- V13 Válvula de salida del agua presurizada, 2da posición
- V14 Válvula de entrada del agua presurizada, 1ra posición
- V15 Válvula de entrada del agua presurizada, 2da posición
- V16 Válvula de control del agua fría
- V17 Válvula selectora condensado
- V18 Válvula para el control del flujo del producto, 1ra posición
- V19 Válvula para el control del flujo del producto, 2da posición
- V20 Válvula que dirige el vapor del producto al condensador, 2da posición
- V21 Válvula de drenaje

CAPÍTULO 2

PUESTA EN MARCHA DEL EVAPORADOR UOP20-X-PHW

2.1 Metodología de Trabajo

Para poner en marcha el Evaporador UOP20-X-PHW fue necesario realizar los siguientes pasos:

- Revisar las condiciones de operación del equipo
- Instalar y poner en marcha el equipo
- Encender el equipo
- Detectar y solucionar problemas
- Realizar la evaporación de la solución de sulfato de cobre diluido
- Apagar el equipo

2.1.1 Revisión de las condiciones de operación

Tras revisar la consola de control, se pudo determinar que el equipo está diseñado para trabajar con 210Voltios, 35 Amperios y frecuencia de 60Hz.

La red eléctrica del laboratorio de Química cumple con las condiciones requeridas.

2.1.2 Instalación y Puesta en Marcha

Luego de revisar el manual de operación y conocer la ubicación y nomenclatura de las válvulas, sensores y demás partes del evaporador, se procedió con la instalación del mismo.

Para ello se dividió el proceso en circuitos de la siguiente forma:

- Circuito del Calentador eléctrico

Para armar el circuito del calentador eléctrico fue necesario crear una base de vidrio sobre dos tubos del bastidor metálico sobre el cual descansa el evaporador, de esta forma se minimizó el inconveniente de la longitud de su cable de poder y se solucionó el problema de su ubicación dentro del equipo.

Una vez fijo el calentador, se realizó las conexiones de agua necesarias para que éste opere con recirculación.

Para encender el calentador desde la Consola de Control se llenó de agua el sistema y se purgó el aire del mismo. A continuación, se encendió los switches C6 y C31, esto permitió que el calentador alcance los 80 °C, temperatura requerida para precalentar la solución a alimentar.

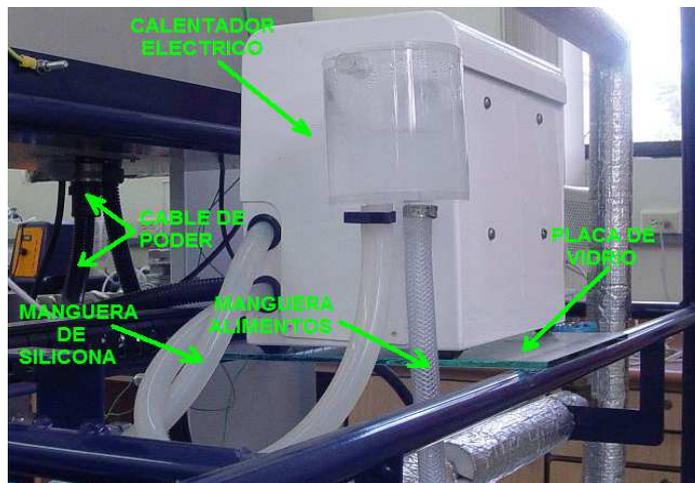


Figura 2.1 Calentador Eléctrico. (De Carla Valdivieso)

- Circuito del intercambiador de calor

Para armar el circuito del intercambiador de calor fue necesario realizar varias conexiones entre el intercambiador de placas y la entrada a la columna evaporadora, para ello se utilizó el diagrama que se muestra en la pagina 11 del manual de operación.

Previo al encendido del intercambiador, se llenó el tanque (7) con 10 litros de agua desionizada, la misma que será bombeada posteriormente al proceso con la finalidad de limpiar el equipo y permitir que se alcancen las condiciones de temperatura óptimas antes de alimentar la solución que se desea concentrar.

Una vez listas las conexiones de entrada y salida del intercambiador, se activaron los switches (C18), (C6) y (C31), los cuales permiten encender la bomba de la alimentación (P1), el calentador eléctrico y la bomba del calentador respectivamente. En este caso, el calentador eléctrico actúa como el medio calefactor ya que entrega agua a 80 °C, la cual pasa a través del intercambiador de placas donde se pone en contacto con la alimentación fría, en ese momento se produce la transferencia de calor debido al gradiente de temperatura y se obtiene el líquido a mayor temperatura. Luego de 15 minutos de operación, la temperatura que alcanzó el agua alimentada fue de 65 °C. A continuación en la Figura 2.2 se muestra el intercambiador de placas.

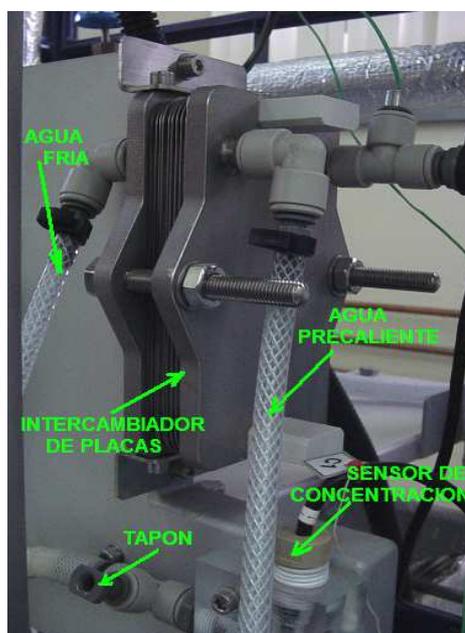


Figura 2.2 Intercambiador de placas. (De Carla Valdivieso)

- Circuito del condensador

Para condensar el vapor que se genera durante el proceso de evaporación, el condensador necesita trabajar con un flujo de agua fría mayor a 2.5 l/min. Por tanto, para armar este circuito fue necesario conectar la tubería de ingreso al condensador con la red de agua del laboratorio. Al mismo tiempo, se realizaron varias conexiones para acoplar la tubería de salida del condensador con la red de desfogue.

Una vez que se comprobó la circulación del agua por el condensador, se encendió la consola de control, lo cual activó el medidor de flujo. El caudal registrado fue de 3 l/min. La Figura 2.3 muestra el condensador.

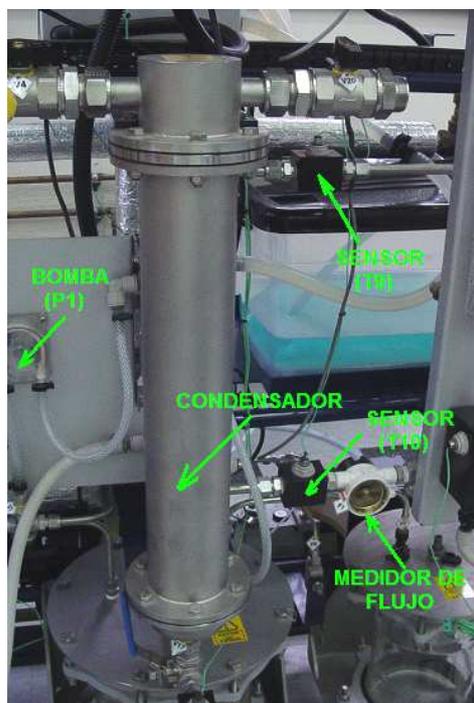


Figura 2.3 Condensador. (De Carla Valdivieso)

- Columna evaporadora

La columna evaporadora con que opera el sistema es la UOP23-11 de Película Descendente y un sólo efecto. Esto implica que el líquido a concentrar entra por la parte superior de la columna, desciende en forma de película por el interior del tubo, cuyas paredes están calientes debido a la acción del agua a presión que corre por la chaqueta, y finalmente sale a mayor concentración por el fondo de la columna. El vapor procedente del líquido es arrastrado junto con el líquido concentrado, para posteriormente ser separado en el ciclón. Siguiendo este principio se procedió al armado de la columna de la siguiente manera:

- 1) Se conectó la manguera que sale del intercambiador de placas, la cual lleva la alimentación precaliente, con la válvula de entrada al evaporador (V2). Una vez logrado esto, se conectó la manguera que sale de la base del ciclón, la cual lleva el producto concentrado, con la bomba de recirculación del mismo.
- 2) Se instaló la tubería de acero que conecta la válvula de vapor (V5) con la unidad de condensación (12).
- 3) Se conectó la manguera que proviene de la unión (A10) con la válvula (V21) de entrada al tanque de recolección del producto concentrado.
- 4) Se ubicó un recipiente de 20 litros de capacidad de acuerdo al espacio disponible. Este recipiente sirve para colocar la solución diluida de Sulfato de Cobre.
- 5) Se encendió la consola de control y se activó tanto la bomba de alimentación (P1) como la bomba de recirculación (P2).

Tras realizar el procedimiento descrito, se confirmó que el circuito funciona de forma correcta, un indicativo de ello fue el flujo constante del agua a través de toda la columna.

La Figura 2.4 muestra la columna evaporadora.



Figura 2.4 Columna Evaporadora UOP23-11. (De Carla Valdivieso)

- Sistema de agua presurizada

El vapor es el medio calefactor más utilizado por la industria en lo que se refiere a procesos de concentración por evaporación. Sin embargo, el evaporador UOP23-11 trabaja con agua presurizada ya que su uso es didáctico.

Una ventaja de trabajar con agua presurizada es que no es necesario contar con una unidad generadora de vapor, lo cual reduce costos, consumo de agua y contribuye con la estética del laboratorio.

Para armar este circuito se tomó en cuenta los detalles del diagrama que se encuentra en la página 31 del manual de operación. El proceso se describe a continuación:

- 1) Se conectó la tubería de alta temperatura y presión (23E), la cual sale de la bomba y lleva el agua al proceso, con la entrada a la camisa de calentamiento de la columna. De igual forma se conectó la tubería (23F), la misma que regresa el agua del proceso al reservorio interno, con la salida de la camisa de calentamiento (22). Esto permitió cerrar el circuito de entrada y salida del agua presurizada.
- 2) Se llenó con agua desionizada el tanque para agua presurizada caliente (FT-60), cuya entrada (23G) está ubicada de tal forma que sirve como indicador del nivel de agua.
- 3) Se encendió la consola de control y se activó el sistema de agua presurizada caliente con ayuda de los switches (C8) y (C31). Tras 15 minutos de operación, la temperatura que alcanzó el agua a alta presión fue 114.8 °C. Este valor se puede leer directamente en la consola de control en la ventana (C30). La Figura 2.5 muestra el sistema de agua caliente presurizado.

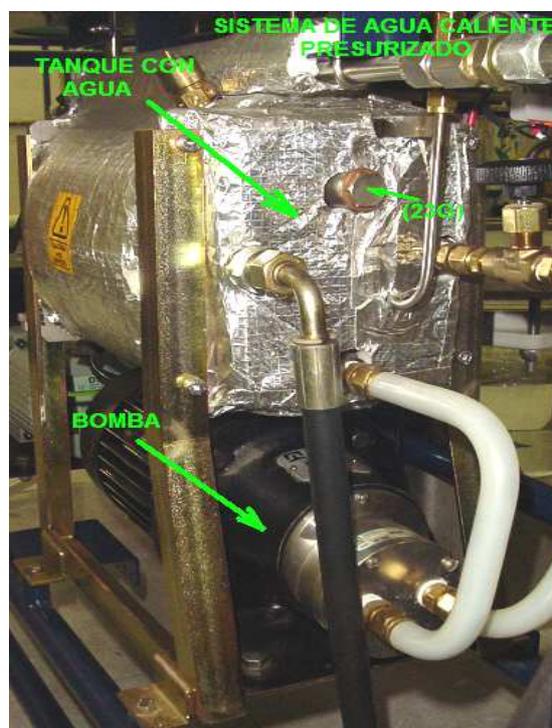


Figura 2.5 Sistema de Agua caliente presurizado. (De Carla Valdivieso)

- Circuito eléctrico

Para dotar de energía eléctrica al equipo fue necesario revisar que sus conexiones eléctricas sean las correctas. Durante este proceso, se encontró cables sueltos y puertos vacíos alrededor de la consola de control. Luego de analizar los procesos que se llevan a cabo durante la evaporación, se determinó que los puertos correspondientes a la bomba (P2), al controlador de temperatura (T11-PHW), al sensor (T4) y al sensor (C2) deben ser habilitados al igual que el cable de poder del calentador eléctrico.

Una vez listo el circuito eléctrico del equipo, se acopló un enchufe macho al cable de poder del evaporador, esto permitió el acceso a la red eléctrica del laboratorio.

- Instalaciones externas de Agua

Para realizar las conexiones de agua desde la red del laboratorio hasta las terminales del equipo fue necesario determinar el tipo y dimensión del material ha utilizar antes de proceder con la instalación.

Luego de revisar las terminales del equipo se resolvió trabajar con acoples, codos y uniones de acero inoxidable de ½ pulgada. Por otra parte, la manguera que se utilizó para las conexiones de agua caliente, en especial para el condensador, fue manguera para alimentos ya que ésta cumplía con las características de temperatura y presión requeridas.

Para verificar que la instalación realizada está correcta, se activó la válvula (V16), esto permitió el ingreso del agua al sistema. Tras revisar el recorrido de la misma, no se detectó la presencia de fugas ni desniveles que puedan interrumpir su paso; por tanto, el sistema de agua está trabajando adecuadamente.

2.1.3 Encendido del Equipo

Para encender el equipo de forma correcta se debe seguir los pasos que se recomienda en el manual de operación, los mismos que se detallan a continuación:

- 1) Ubicar la consola de control y revisar los siguientes puntos:
 - ✓ El breake (C3) debe estar encendido
 - ✓ Los breakers de los circuitos miniatura del (C4) al (C8) deben estar apagados.
 - ✓ El switch (C14) debe señalar Local Console.
 - ✓ El switch (C17), el cual controla el calentador eléctrico, debe estar apagado.
 - ✓ Los potenciómetros del (C18) al (C20) deben estar ubicados en Cero

- ✓ El switch (C31), el cual controla el sistema de agua presurizada, debe estar apagado.
- 2) Revisar que la conexión de entrada de agua (21) al equipo esté acoplada a la red de agua fría.
 - 3) Revisar que la conexión de salida de agua (22) del equipo este conectada a un drenaje.
 - 4) Revisar que la válvula (V16) esté abierta.
 - 5) Abrir la válvula principal que deja pasar el agua fría al equipo.
 - 6) Conectar el equipo a la red eléctrica.
 - 7) Encender los breakers (C4), (C5) y (C8) en orden. La consola de control se iluminará
 - 8) Encender la bomba del sistema de agua caliente presurizada con ayuda del switch (C31).
 - 9) Esperar 15 minutos. Esto permite que el agua presurizada alcance los 125 grados centígrados. Se puede observar la temperatura de la misma si se gira el switch (C10) a la posición (T11) y (T12).
 - 10) Encender la bomba (P1), para ello utilizar el switch (C18). Esto permite bombear la solución que se desea concentrar al evaporador. Al inicio del proceso es recomendable ubicar el switch (C18) al 30% (3.0 en el dial).
 - 11) Encender la bomba del calentador eléctrico (C16) con ayuda del switch (C17).
 - 12) Finalmente, proceder de acuerdo a las instrucciones que se especifican en cada ejercicio.

A continuación, en la Figura 2.6, se muestra la ubicación de los breakers en la consola de control.

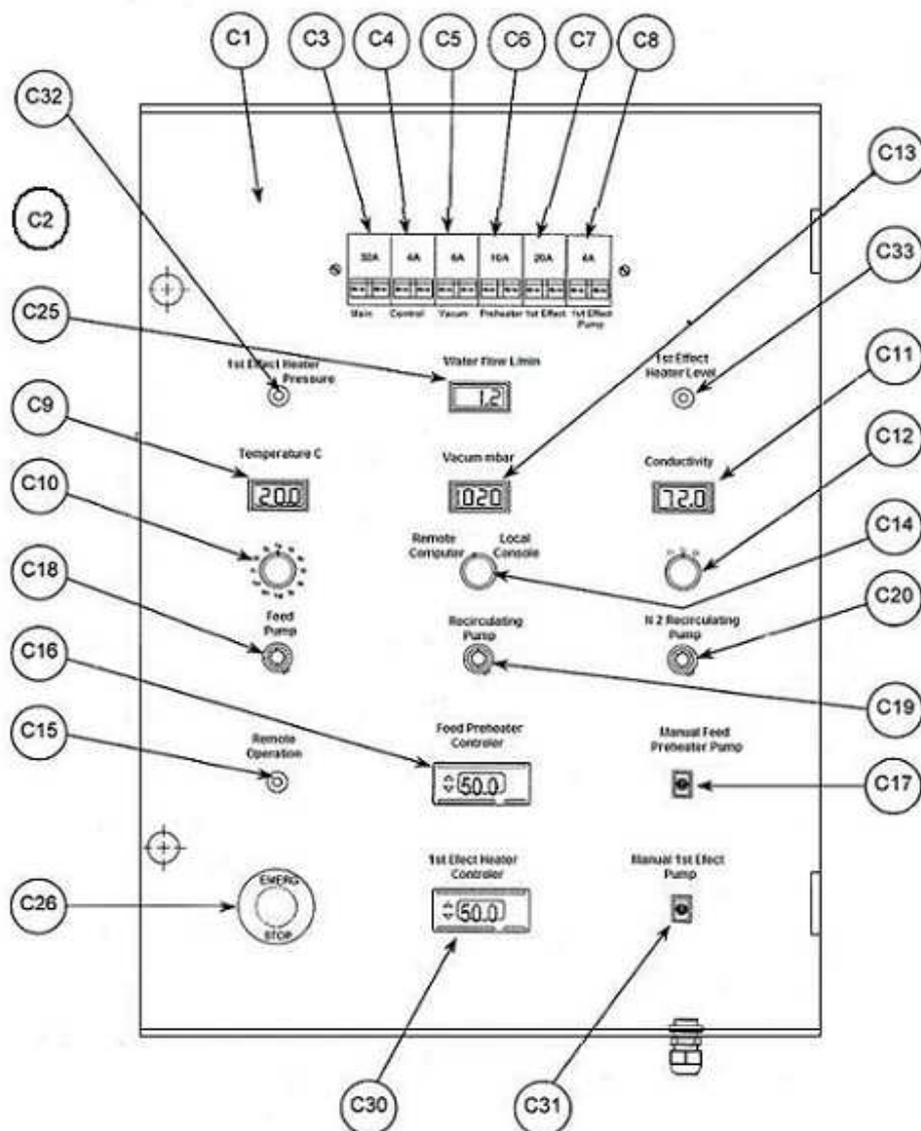


Figura 2.6 Consola de Control. (Del Manual de Operación Armfield)

C1 Consola de Control

C3 Mini switch, supe de electricidad al equipo

C4 Mini switch, activa la consola de control

C5 Mini switch, supe electricidad a la bomba de vacío

- C6 Mini switch, supe de electricidad al calentador eléctrico
- C7 Mini switch, supe de electricidad al sistema de agua presurizada
- C8 Mini switch, supe de electricidad a la bomba del sistema de agua presurizada
- C9 Dispositivo digital que muestra la temperatura del proceso
- C10 Switch que permite seleccionar en que punto se desea leer la temperatura
- C11 Dispositivo digital que muestra la conductividad de la solución alimentada
- C12 Switch que permite seleccionar en que punto se desea leer la conductividad de la solución
- C13 Dispositivo digital que muestra la presión del proceso en milibares
- C14 Switch que permite controlar el modo de operación del evaporador, de forma manual o remota.
- C15 Indica operación en modo remoto
- C16 Indica la temperatura que alcanza la solución alimentada antes de ingresar al evaporador
- C17 Activa la bomba del calentador eléctrico
- C18 Regula el flujo de la alimentación en ml/min que ingresa al proceso
- C19 Regula el flujo del reciclo en ml/min que ingresa nuevamente al proceso
- C25 Indica el flujo de agua fría en l/min que ingresa al condensador
- C26 Botón de emergencia
- C30 Indica la temperatura que alcanza el agua presurizada
- C31 Activa la bomba del sistema de agua presurizada
- C33 Indica el nivel de agua en el tanque de agua presurizada

2.1.4 Detección y solución de problemas

Durante la puesta en marcha se logró el funcionamiento del 75% del equipo. A continuación, se detallan los problemas que se detectaron:

- ***Bomba de recirculación (P2) inutilizada***

Para determinar dónde estaba ubicado el problema de la bomba, se revisó en primer lugar su motor. Para ello se cambió de lugar el plug de la bomba (P2) por el plug de la bomba (P1), la cual funcionaba correctamente. Este cambio se efectuó en la parte lateral derecha de la Consola de Control. Una vez realizada la modificación, la bomba (P2) empezó a trabajar sin ningún problema. Descartado un daño en el motor, se procedió a revisar los circuitos electrónicos en el interior de la Consola, con la particularidad de que los mismos no seguían un orden estandarizado; por tanto, ubicar el controlador de la bomba (P2) y revisar que todos sus cables estén conectados de forma correcta requirió de tiempo. Sin embargo, superado este inconveniente, se pudo detectar que el problema de la bomba (P2) residía en su controlador ya que la conexión de dos de sus circuitos era incorrecta.

- ***Bomba de vacío inutilizada***

Para determinar qué problema presentaba la bomba de vacío, se revisó en primer lugar su circuito ON/OFF. Luego de examinar este circuito, se encontró que su configuración era incorrecta ya que estaba dispuesta para trabajar con 240 Voltios. A continuación, se cambió esta configuración para que la bomba pueda trabajar con 210 Voltios. El circuito ON/OFF de la bomba de vacío se muestra en la Figura 2.7.

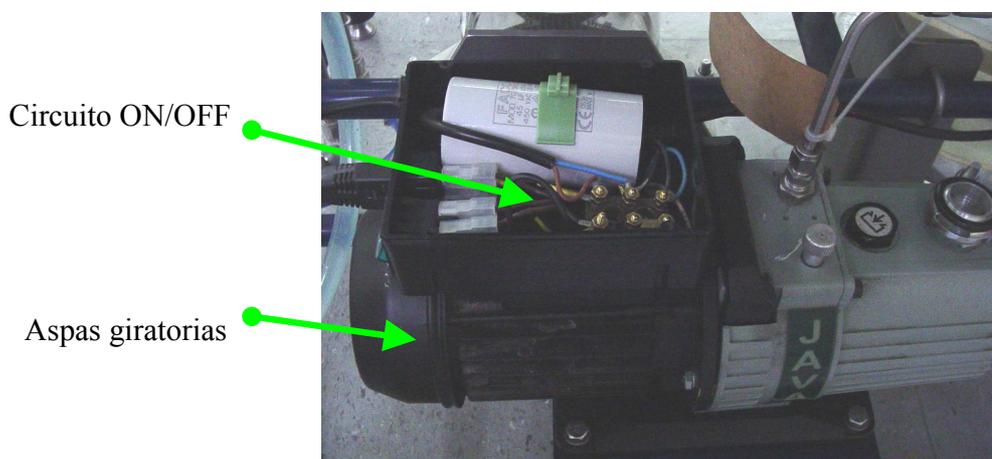


Figura 2.7 Bomba de Vacío. (De Carla Valdivieso)

Una vez realizada esta modificación, el motor de la bomba de vacío empezó a trabajar; sin embargo, emitía un sonido anormal. A continuación, se procedió a desarmar la bomba, esto permitió encontrar un daño a nivel de las aspas del motor. Se examinó si algún objeto extraño a la misma estaba impidiendo su movimiento, pero no fue posible encontrar nada fuera de lugar. Por esta razón, se procedió a forzar su giro, esta acción permitió recuperar su movimiento. Por tanto, el óxido generado en el interior de la bomba era el responsable de su inmovilidad.

Luego de armar y encender la bomba de forma manual, se pudo verificar su correcto funcionamiento; por tanto, se procedió a encenderla desde la Consola de Control. Para ello se activó el switch (C6), pero no se obtuvo ninguna señal de respuesta. Para solucionar este problema, se procedió a revisar los circuitos electrónicos en el interior de la Consola de Control. Tras seguir cuidadosamente el recorrido de los cables correspondientes a la bomba, se pudo determinar una falla en uno de sus relees. La figura 2.8 muestra el rele de la bomba de vacío.

Relee correspondiente a
la bomba de vacío



Figura 2.8 Relee de la bomba de vacío. (De Carla Valdivieso)

Resuelto este problema, se activó nuevamente el switch (C6) desde la Consola, esta vez la bomba de vacío se encendió, pero poco tiempo después todo el equipo se apagó repentinamente. A continuación, se decidió revisar la caja de breakers. Esto permitió observar que el breaker correspondiente al evaporador había saltado.

Para saber si el breaker de 35 Amperios asignado al equipo era el adecuado, se procedió a medir el amperaje total del equipo con ayuda de un multímetro. El valor que se registró fue de 32 Amperios; por tanto, el breaker de 35 A era suficiente.

Una vez activado el breaker, se encendió nuevamente el evaporador, pero un olor a quemado invadió el ambiente; por consiguiente, se apagó inmediatamente el equipo con ayuda del botón de emergencia (C26). Se revisó una vez más la caja de breakers, ello permitió arreglar el cortocircuito generado debido a los cables eléctricos mal instalados.

Finalmente, se procedió a encender la bomba de vacío desde la consola de control, esta vez la bomba trabajó normalmente. El vacío máximo que se registró fue de 200 mbar.

2.1.5 Apagado del Equipo

Para apagar el equipo de forma correcta se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Cambiar la posición de la válvula (V1) para dejar de alimentar la solución diluida de Sulfato de Cobre y ahora alimentar agua des-ionizada desde el tanque (7) al evaporador.
- 2) Bombear el agua des-ionizada hasta que el Sulfato de cobre haya dejado el proceso, esto se puede verificar cuando el medidor de conductividad (C2) marca cero.
- 3) Si la bomba de vacío está encendida, abrir lentamente la válvula (V8) para dejar que el aire entre al sistema. Cuando la válvula (V8) esté completamente abierta y la lectura de la presión se haya estabilizado, apagar la bomba. Para ello utilizar el breaker (C6) ubicado en la Consola de Control.
- 4) Apagar la bomba y el sistema de agua presurizada, para ello utilizar el switch (C31).
- 5) Apagar el calentador eléctrico, para ello utilizar el switch (C18).
- 6) Esperar hasta que la temperatura de la alimentación, la cual entra al módulo de evaporación, sea menor a 65 °C. Una vez logrado esto, apagar las bombas del proceso, para ello ubicar los controladores (C18), (C19) y (C20) en Cero.
- 7) Cerrar la válvula que provee el agua fría al equipo. Luego, cerrar la válvula (V16) para cortar el suministro de agua al condensador.
- 8) Apagar los switches de los circuitos miniatura que aún estén encendidos.
- 9) Retirar el Sulfato de Cobre concentrado y el agua evaporada de sus respectivos tanques, para ello utilizar las válvulas de drenaje (V9) y (V10).
- 10) Finalmente, desconectar el suministro de electricidad al equipo.

CAPÍTULO 3

APLICACIONES PRÁCTICAS DEL EVAPORADOR UOP20-X-PHW

3.1 Introducción

El evaporador UOP20-X-PHW es un equipo didáctico diseñado para operar en un laboratorio. Éste reúne la mayoría de características de un equipo industrial y por ello permite realizar varias prácticas complementarias al proceso de evaporación, entre ellas se pueden mencionar: balances de masa, balances de energía y la determinación de la eficiencia del proceso.

Para realizar las prácticas propuestas se utilizó una solución de Sulfato de Cobre al 1%, como se recomienda en el manual de operación. La ventaja de trabajar con Sulfato de Cobre reside en su capacidad conductora de la electricidad. Además, es soluble en agua lo cual facilita su limpieza.

Adicionalmente, se procedió a concentrar jugo de naranja extraído por vía mecánica y una solución de glucosa al 4%, para ello se determinó las condiciones óptimas de operación.

Previo a la realización de las prácticas con CuSO_4 , jugo de naranja y glucosa, se realizó la calibración de los sensores (S1) y (S2), los mismos que miden la concentración tanto de la alimentación como del producto concentrado.

3.2 Calibración de los Sensores (S1) y (S2)

Para verificar si los sensores S1 y S2 están trabajando adecuadamente, se recomienda efectuar el siguiente procedimiento:

- 1) Prepara soluciones de sulfato de cobre al 1%, 5%, 10% y 15% en peso.

- 2) Retirar los sensores (S1) y (S2) de su ubicación inicial, de tal forma que estén disponibles para medir la concentración de las soluciones que se encuentran en los vasos de precipitación.
- 3) Encender la consola de control, para ello utilizar los switches (C3) y (C4). Esto permite activar únicamente los sensores de temperatura, presión y concentración.
- 4) Medir la conductividad en (mS) de las cinco soluciones con ayuda de los sensores S1 y S2.
- 5) Transformar el valor registrado de conductividad a porcentaje en peso, esto permite realizar comparaciones.

Luego de realizar este procedimiento se determinó que los sensores S1 y S2 no están operando correctamente, ya que los valores de concentración obtenidos no concuerdan con los valores de concentración de las soluciones estándar.

Para evaluar el margen de diferencia entre los valores registrados y los reales, se procedió a determinar el porcentaje de error de cada sensor, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%Error = \left| \frac{C_{conocida} - C_{medida}}{C_{conocida}} \right| \times 100 \quad [3.1]$$

donde

$C_{conocida}$ = concentración de la solución conocida

C_{medida} = concentración registrada por el sensor

La Tabla 3.1. muestra los valores de concentración registrados por los sensores y el grado de error que estos presentan.

Tabla 3-1 Valores de concentración registrados por los sensores S1 y S2

Sol. Conocidas % Peso	Temperatura °C	Conductividad		% Peso		% Error	
		Sensor 1	Sensor 2	S1	S2	S1	S2
1	20	4.9	3.80	1.08	0.74	8.1	26.0
5	20	15.4	9.60	5.93	2.94	18.7	41.2
10	21	26.7	13.90	13.03	4.93	30.3	50.7
15	21	36.4	17.30	20.66	6.83	37.7	54.4

Para confirmar la desviación que presentan los valores de concentración de las soluciones de CuSO_4 registrados por los sensores (S1) y (S2), se debe proceder de la siguiente manera:

- 1) Preparar soluciones de Cloruro de Potasio de concentraciones 0.1 y 1 Molar.
- 2) Buscar en bibliografía los valores de conductividad de las soluciones de KCl para la concentración desea.
- 3) Retira los sensores (S1) y (S2) de su ubicación inicial, de tal forma que estén disponibles para medir la concentración de las soluciones que se encuentran en los vasos de precipitación.
- 4) Encender la consola de control, para ello utilizar los switches (C3) y (C4). Esto activa únicamente los sensores de temperatura, presión y concentración.
- 5) Medir la conductividad en (mS) de las soluciones de KCl a temperatura ambiente.
- 6) Comparar los valores de conductividad registrados por los sensores (S1) y (S2) con los valores encontrados en bibliografía, estos valores se muestra en la Tabla 3.2.
- 7) Calcular el % de error para cada sensor y realizar los gráficos correspondientes. Estos gráficos se muestran en las Figuras 3.1 y 3.2.

- 8) Para ver de forma clara el error entre el valor de conductividad medido y el valor de bibliografía, realizar gráficos: Conductividad vs Concentración de KCl. (Ver Figuras 3.3 y 3.4)

Tabla 3-2 Valores de concentración de la sol de KCl registrados por los sensores S1 y S2

Sol KCl	% Peso	Bibliografía (mS)	S1 (mS)	S2 (mS)	%Error S1	%Error S2
0.1	0.74	12.89	12	10.2	6.9	20.9
1	7.46	111.9	80.3	61.2	28.2	45.3

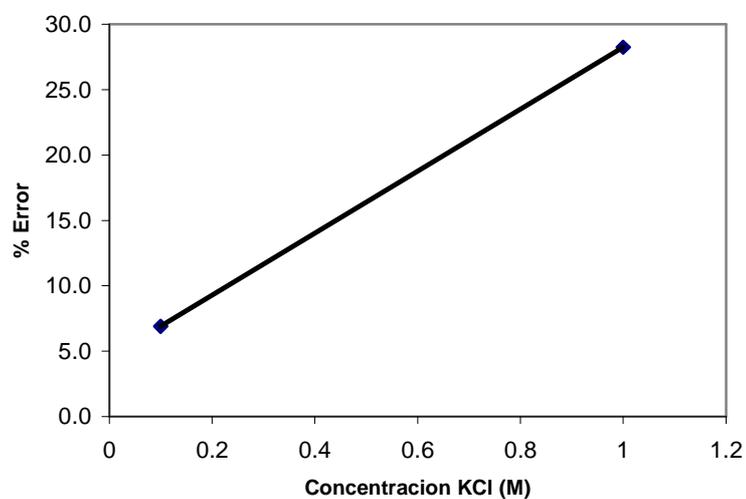


Figura 3.1 Error del Sensor 1 vs Concentración KCl

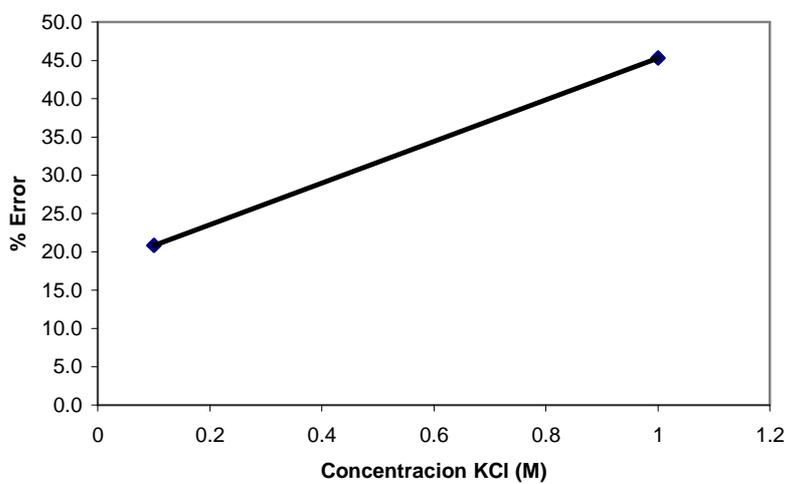


Figura 3.2 Error del Sensor 2 vs Concentración KCl

Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran de forma clara el error entre el valor de conductividad medido y el valor obtenido en bibliografía.

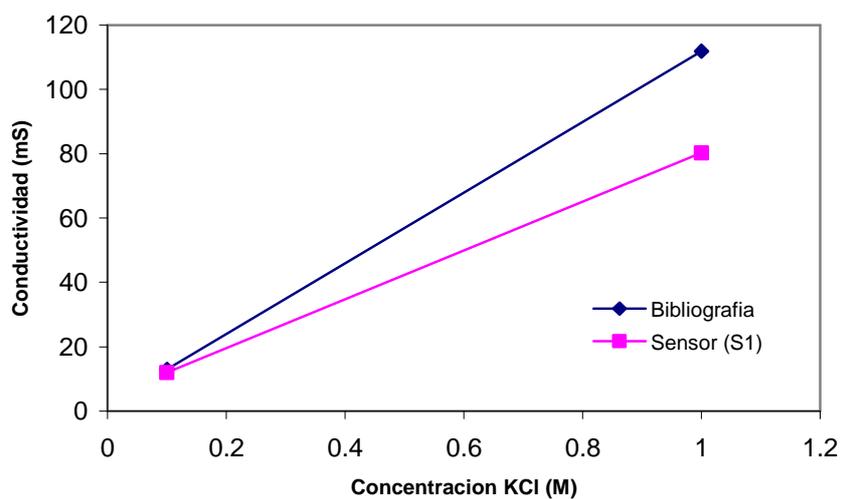


Figura 3.3 Desviación del sensor (S1) con relación a la bibliografía

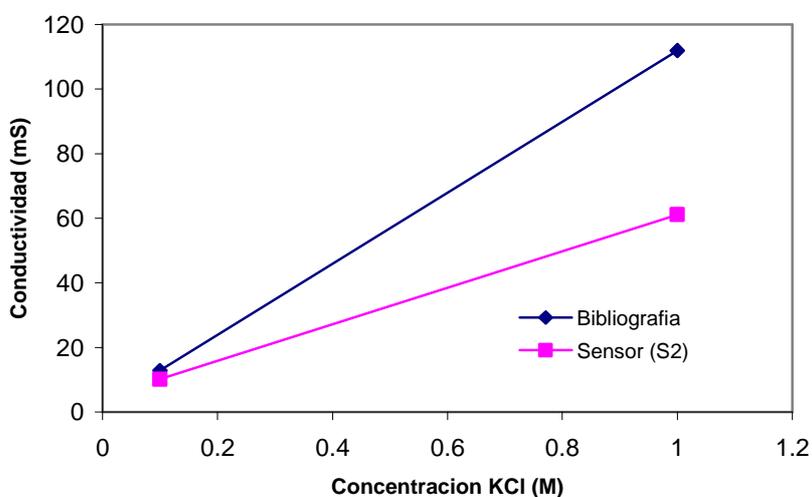


Figura 3.4 Desviación de (S2) con relación a la bibliografía

Una vez confirmada la existencia de un error en los sensores, se procedió a realizar su calibración, para ello se recomienda efectuar el siguiente procedimiento:

- 1) Desconectar el cable de conductividad correspondiente al sensor (C3) de la parte izquierda de la consola de control.
- 2) Conectar un voltímetro AC en el puerto que quedó libre y ajustar el potenciómetro VR2 hasta obtener una lectura de 50 mV en el voltímetro.
- 3) Desconectar el voltímetro y conectar nuevamente el cable del sensor (C3).
- 4) Preparar una solución de Cloruro de Potasio de concentración 0.1 Molar.
- 5) Retirar los sensores (S1) y (S2) de su ubicación inicial, de tal forma que estén disponibles para medir la conductividad de la solución de KCl que se encuentra en un vaso de precipitación.

- 6) Encender la consola de control, para ello utilizar los switches (C3) y (C4). Esto permite activar únicamente los sensores de presión y conductividad.
- 7) Utilizar el sensor (S1) para medir tanto la conductividad como la temperatura de la solución estándar de KCl. Luego ajustar el potenciómetro VR1D hasta obtener una lectura de 12.88 mS.
- 8) Repetir el procedimiento anterior para calibrar el sensor (S2), para este caso ajustar el potenciómetro VR1C.
- 9) Ubicar los sensores (S1) y (S2) en su lugar original.

En la Figura 3.5, se muestra la tarjeta electrónica donde están ubicados los potenciómetros que permiten calibrar los valores de conductividad.

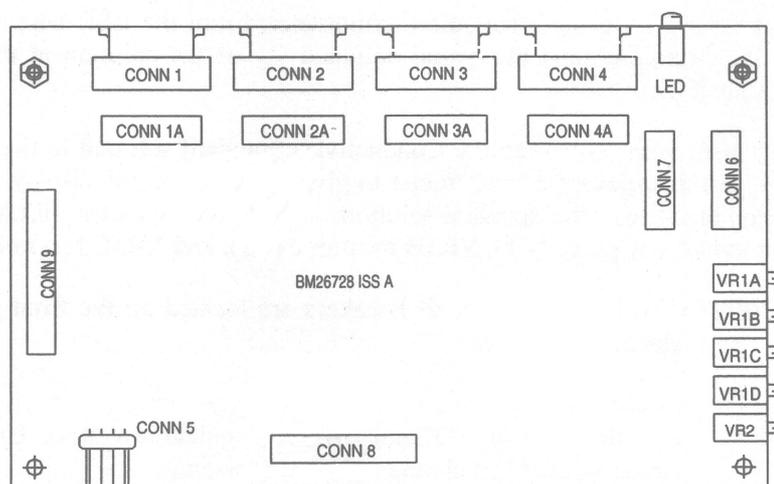


Figura 3.5 Ubicación de los Potenciómetros de conductividad. (Del Manual de Operación Armfield)

Luego de realizar la calibración se midió nuevamente la concentración de las soluciones de sulfato de cobre. La tabla 3.3 muestra los valores registrados.

Tabla 3-3 Valores de concentración registrados por los sensores S1 y S2 calibrados

Sol. Conocidas % Peso	Temperatura °C	Conductividad		% Peso		% Error	
		Sensor 1	Sensor 2	S1	S2	S1	S2
1	23	5.0	4.90	1.02	0.99	1.6	1.4
5	23	14.9	14.40	5.16	4.90	3.1	2.0
10	23	24.0	22.80	10.48	9.71	4.8	2.9
15	23	32.1	29.90	16.14	14.53	7.6	3.2

Una vez calculado el error, realizar curvas: % Error vs Concentración para cada sensor. Esto permite obtener ecuaciones que relacionan la variación del error con respecto a la concentración. A continuación, las Figuras 3.6 y 3.7 muestran las curvas realizadas con sus respectivas ecuaciones.

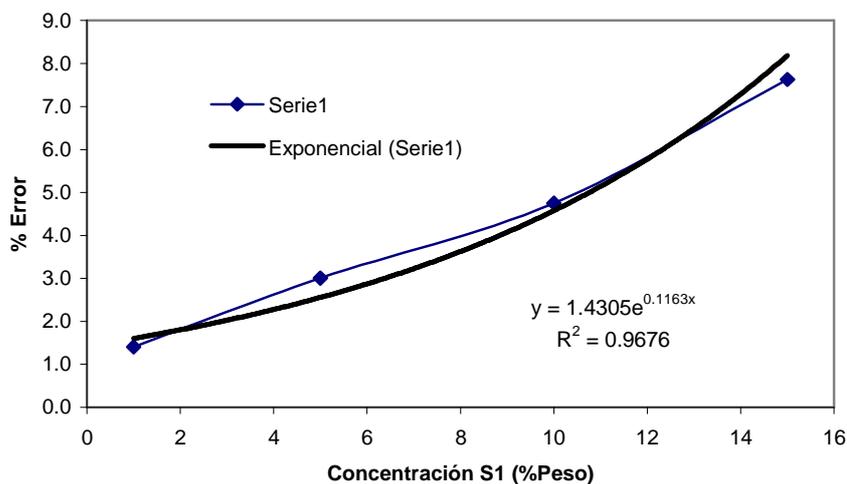


Figura 3.6 Error del Sensor (S1) vs Concentración

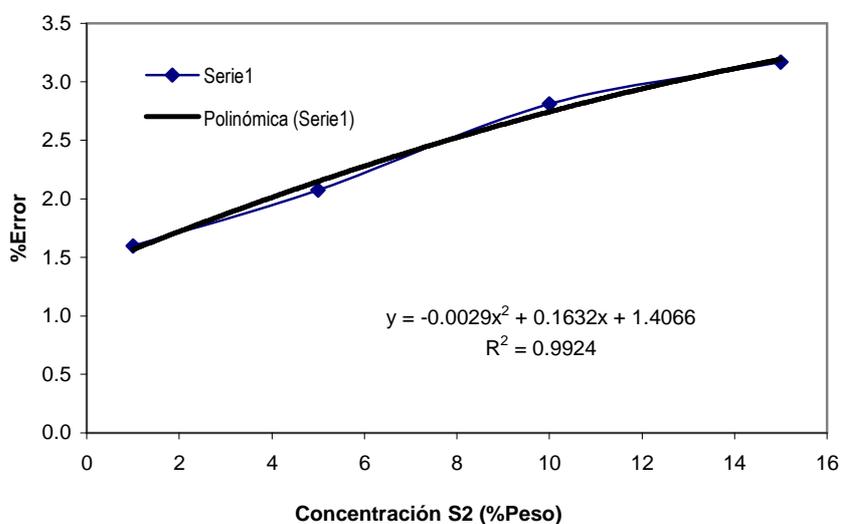


Figura 3.7 Error del Sensor (S2) vs Concentración

3.3 Aplicaciones con Sulfato de Cobre

3.3.1 Práctica A

Los objetivos de esta práctica son medir la concentración final de la solución de sulfato de cobre y realizar el balance de masa entorno a la columna. Para ello se deben realizar los siguientes pasos:

- 1) Llenar el tanque de la alimentación (8) con 20 litros de solución de sulfato de cobre al 1%
- 2) Llenar el tanque (7) con 10 litros de agua desionizada
- 3) Encender el equipo de acuerdo al procedimiento descrito en la página 37
- 4) Esperar 15 minutos hasta que el proceso alcance el estado estacionario

- 5) Cambiar la posición de la válvula (V1) para permitir el paso de la solución de sulfato de cobre
- 6) Esperar aproximadamente 30 minutos hasta alcanzar el estado estacionario
- 7) Conectar el equipo a la computadora y utilizar el software para realizar las mediciones respectivas

Los cálculos correspondientes a esta práctica se detallan en la sección de Anexos.

3.3.2 Práctica B

El objetivo de esta práctica es realizar el balance de energía entorno a la columna, cuya operación es de simple efecto.

Para encender el equipo se debe proceder de acuerdo a los pasos descritos en la Práctica A.

Al momento de conectar el equipo al software asegurarse de escoger la Práctica B.

Los cálculos correspondientes a esta práctica se detallan en la sección de Anexos.

3.3.3 Práctica C

El objetivo de esta práctica es determinar la economía de un evaporador de simple efecto.

Para encender el equipo se debe proceder de acuerdo a los pasos descritos en la Práctica A.

Al momento de conectar el equipo al software asegurarse de escoger la Práctica C.

Los cálculos correspondientes a esta práctica se detallan en la sección de Anexos.

3.4 Aplicaciones con Jugo de Naranja

Los zumos de frutas y otros alimentos líquidos se concentran para disminuir su volumen y su masa, lo cual reduce los costos de envasado, almacenamiento y transporte. Además, la concentración de zumos da como resultado productos con menor actividad acuosa y mayor vida útil (15).

Entre la variedad de jugos que existen en el mercado, el predominante en consumo y en comercio es el jugo de naranja concentrado y congelado (15).

Por jugo de fruta concentrado se entiende el líquido sin fermentar que se extrae de forma directa de la parte comestible de la fruta en buen estado, el cual posteriormente pasa por un proceso físico de eliminación de agua, para elevar el nivel de grados Brix al menos en un 50% más que el valor Brix establecido para el jugo de la misma fruta. En el caso del jugo concentrado de naranja este valor debe alcanzar los 65 grados Brix (4).

La concentración de materiales sensibles al calor, tales como el jugo de naranja, requieren temperaturas de operación bajas, tiempos de residencia cortos y velocidades de circulación altas, de este forma se conservan las propiedades nutricionales y sensoriales del jugo y se disminuye su tendencia a la adhesión en la superficie de calentamiento debido a su grado de viscosidad (7). Las características de operación mencionadas, se consiguen utilizando evaporadores de película descendente, de un solo paso y que operen a vacío.

Dado a que el evaporador UOP20-X-PHW de película descendente reúne todas estas características, se lo utilizará para a evaporar jugo de naranja cuyo contenido de sólidos solubles inicial es del 9.6%, el mismo que ha sido extraído por vía mecánica.

Una vez obtenido el concentrado de naranja, se procederá a determinar el contenido de vitamina C presente en el mismo. Este análisis permitirá observar el efecto que tiene el tratamiento térmico sobre la disponibilidad de vitamina C.

A continuación, en la Figura 3.8 se ilustra el diagrama de flujo de producción del concentrado de naranja.

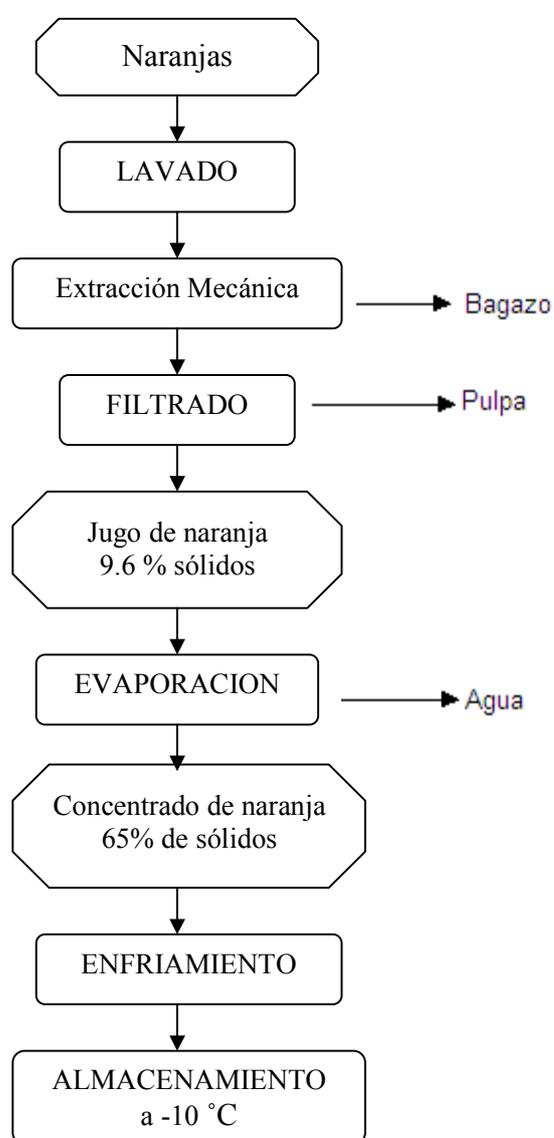


Figura 3.8 Diagrama de flujo de producción de concentrado de Naranja

3.4.1 Materiales y Equipos

- 10 litros de jugo de naranja
- 10 litros de agua des-ionizada
- Papel filtro
- Embudo
- Vaso de precipitación de 4000ml
- Vaso de precipitación de 100 ml
- Refractómetro
- Evaporador UOP20-X-PHW de película descendente

3.4.2 Metodología

Para evaporar jugo de naranja se debe seguir los siguientes pasos:

- 1) Determinar el porcentaje inicial de sólidos solubles presentes en el jugo de naranja con ayuda de un refractómetro.
- 2) Definir las condiciones de operación: flujo de alimentación y presión de trabajo.
- 3) Llenar el tanque de alimentación (8) con 10 litros de jugo de naranja previamente filtrado
- 4) Llenar el tanque (7) con 10 litros de agua des-ionizada
- 8) Encender el equipo de acuerdo al procedimiento descrito en la página 37.
- 9) Esperar 15 minutos hasta que el proceso alcance el estado estacionario
- 10) Cambiar la posición de la válvula (V1) para permitir el paso del jugo de naranja

- 11) Encender la bomba de vacío y ajustar la presión de trabajo, para ello utiliza la válvula (V8).
- 12) Esperar aproximadamente 35 minutos hasta alcanzar el estado estacionario.
- 13) Apagar la bomba de vacío, el calentador eléctrico, la bomba de alimentación y el sistema de agua presurizada.
- 14) Esperar unos minutos hasta que la presión se restablezca. 760 mbar.
- 15) Cerrar la válvula (V2) para evitar que el líquido se derrame al momento de desconectar la manguera (A10). Luego, tomar la muestra.
- 16) Enfriar la muestra a 20 °C y medir el porcentaje de sólidos finales, para ello utilizar el refractómetro.
- 17) Abrir la válvula (V2)
- 18) Encender la bomba de vacío, el calentador eléctrico, la bomba de alimentación y el sistema de agua presurizada.
- 19) Cambiar la posición de la válvula (V1) para permitir el paso de agua des-ionizada.
- 20) Bombear agua por 10 minutos para limpiar completamente el equipo.
- 21) Apagar el equipo de acuerdo a las indicaciones de la pagina 44.
- 22) Finalmente, retirar el producto concentrado y el agua evaporada de sus respectivos tanques, a través de las válvulas de drenaje (V9) y (V10).

3.4.3 Optimización del Proceso

Para lograr una mayor concentración durante la evaporación del jugo de naranja, se procedió a modificar las condiciones de operación, las variables del proceso son: velocidad de alimentación, velocidad de reflujo y presión de vacío.

La presión de trabajo se obtuvo a través del cálculo la elevación del punto de ebullición del jugo de naranja, para ello se utilizó la ecuación [1.11]:

$$\Delta T_e = \frac{T_e^2 R x}{\lambda} \quad [1.11]$$

donde

ΔT_e = incremento de la T de ebullición del jugo de naranja en ° K

T_e = temperatura de ebullición del agua pura

R = 8.314 J/K mol

x = fracción de soluto en el jugo de naranja concentrado

λ = calor latente del agua pura

A continuación, se calculó la nueva temperatura de ebullición del agua pura. La ecuación que se utilizó es la [1.12]:

$$T_{e \text{ Solucion}} = \Delta T_e + T_e' \quad [1.12]$$

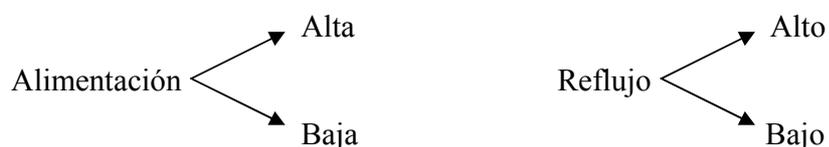
donde

$T_{e \text{ Solucion}}$ = temperatura de ebullición de la solución, en este caso es el jugo de naranja

T_e' = temperatura de ebullición del agua pura dentro del jugo de naranja

La presión de trabajo se determinó con ayuda de las tablas de vapor, para ello se usó como dato el valor de T_e' que se calculó en el paso anterior.

Con una variable controlada en el proceso, se procedió a modificar la velocidad de alimentación y el reflujo. Las opciones que se consideró fueron las siguientes:



La tabla 3.4 muestra las variaciones realizadas.

Tabla 3-4 Variaciones en la velocidad de Alimentación y Reflujo

	Alimentación (ml/min)	Reciclo (ml/min)	Presión (mbar)	Concentración Final % Peso
AA-RA	135	67	267	33
AA-RB	135	0	267	20
AB-RA	62	67	267	50
AB-RB	62	0	267	30

Los valores de concentración final obtenidos experimentalmente en cada variación, permitieron determinar un rango de condiciones en el cual se obtienen mejores resultados. La tabla 3.5 muestra las condiciones óptimas de operación.

Tabla 3-5 Condiciones óptimas de operación

	Alimentación (ml/min)	Reciclo (ml/min)	Presión (mbar)	Concentración Final % Peso
AM-RA	111	67	267	67
AM-RM	111	45	267	35

3.4.4 Determinación de Vitamina C por el método de Tillmans

El ácido L-ascorbico o vitamina C, es una vitamina hidrosoluble que está presente en frutas y vegetales tales como los cítricos y las verduras frescas. Por ser hidrosoluble no se almacena por mucho tiempo en el cuerpo, por ello es necesaria su administración diaria. La ingesta diaria recomendada está entre 50 y 60 mg.

Los grupos endiol del ácido ascórbico poseen un elevado potencial redox, lo cual le permite intervenir en reacciones de oxido-reducción e hidroxilacion de hormonas y aminoácidos, al igual que en absorción del hierro.

El ácido ascórbico es esencial para mantener la integridad del organismo, en especial para la reparación de los tejidos y la formación de colágeno. Dado que el hombre no puede sintetizar el ácido ascórbico, la carencia del mismo ocasiona una enfermedad denominada escorbuto.

De todas la vitaminas, la C es la más inestable y lábil, por lo que su contenido final en los alimentos se usa como un índice de retención de nutrimentos, esto significa que si ésta resiste al procesamiento y almacenamiento, todos los demás nutrimentos se varan poco afectados (2).

Fundamento

El ácido L- ascórbico (AA) se extrae del correspondiente material a investigar con una solución de ácido oxálico, transformándose a continuación con 2,6- diclorofenolindofenol (DI) en ácido dehidroascorbico (ADA), esta reacción se puede observar en la Figura 3.9.

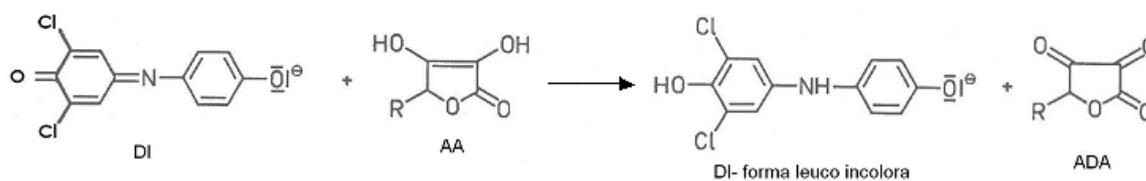


Figura 3.9 Oxidación del Ac. Ascórbico en ácido dehidroascorbico (ADA).

Materiales

- Agitador magnético
- Balanza analítica
- Balón aforado de 50 ml
- Bureta de 25ml
- Matraz Erlenmeyer de 250ml
- Pipeta
- Probeta de 100 ml
- Pizeta
- Soporte universal
- Vasos de precipitación de 50ml
- Vasos de precipitación de 100ml
- Vasos de precipitación de 500ml
- Varilla de agitación

Reactivos

- 2,6- diclorofenolindofenol, sal sodica dihidratada
- Ácido L- ascórbico $C_6H_8O_6$

- Ácido oxálico, $C_2H_2O_4$
- Solución de Carrez I
- Solución de Carrez II

Procedimiento

a) Preparación de la solución de DI al 0.2%

Pesar 100 mg de DI en un vaso de precipitación de 100ml y mezclar con 30 ml de agua destilada aproximadamente. Calentar esta solución a 50 °C revolviendo constantemente. Una vez fría la solución, pasar a un matraz aforado de 50ml, lavar el vaso de precipitación y aforar. Filtrar el residuo que quede sin disolver. Finalmente, guardar la solución de DI en un lugar oscuro.

b) Preparación de la Solución de Ac. Oxálico al 1%

Pesar 3 g de Ac. Oxálico en un vaso de precipitación de 500ml y mezclar con 297 ml de agua destilada. Así, se obtiene 300 ml de sol de Ac. Oxálico al 1%.

c) Preparación de la Solución patrón de Ac. L- Ascórbico

Pesar 10 mg de Ac. L-ascórbico en un vaso de precipitación de 50ml y mezclar con 20 ml de la solución de Ac. Oxálico al 1%. Pasar la solución a un balón aforado de 50 ml, lavar el vaso de precipitación con la sol. de Ac. Oxálico y aforar. Así, se obtiene 50 ml de sol de Ac. L-ascórbico que contiene 50 mg Ac. Ascórbico en 250 ml de sol.

d) *Titulación de la solución de DI*

Pipetear 10 ml de la solución patrón de Ac. L-Ascórbico y colocar en un Erlenmeyer de 250 ml, añadir 50 ml de la solución de Ac. oxálico al 1% y valorar con la solución de DI hasta obtener un color rosa claro, el cual debe permanecer por 15 segundos. La titulación debe realizarse por duplicado. Anotar el volumen de DI gastado.

e) *Titulación de la muestra de jugo inicial*

Pesar 10 g de la muestra de jugo inicial en un vaso de precipitación de 100ml, añadir 50 ml de la solución de Ac. Oxálico al 1%, 2 ml de la solución de Carrez I y Carrez II. Esto permite precipitar las proteínas y clarificar la muestra. A continuación, filtrar en un erlenmeyer de 250 ml y valorar con la solución de DI hasta obtener un color rosa claro, el cual debe permanecer por 15 segundos. La titulación debe realizarse por duplicado. Anotar el volumen de DI gastado

f) *Titulación de la muestra de jugo concentrado*

Pesar 1 g de la muestra de jugo concentrado en un vaso de precipitación de 100ml, añadir 50 ml de la solución de Ac. Oxálico al 1%, 2 ml de la solución de Carrez I y Carrez II. A continuación realizar el procedimiento que se describe en el literal anterior.

g) *Cálculos*

El contenido de vitamina C en la muestra expresado en mg/100ml se calcula a partir del gasto de solución de DI, considerando la valoración de esta. *Ver anexo 2C.*

3.5 Aplicaciones con Glucosa

La solución de glucosa que se va a concentrar proviene de la hidrólisis enzimática del almidón del banano verde, el cual es conocido como rechazo. Esta solución de glucosa tiene una concentración del 4% en peso y es el resultado de un trabajo de investigación realizado por estudiantes de Ingeniería en Alimentos.

3.5.1 Materiales y Equipos

- 10 litros de glucosa al 4%
- 10 litros de agua des-ionizada
- 2 Vasos de precipitación de 4000ml
- 1 Vaso de precipitación de 100 ml
- Balanza analítica
- Refractómetro
- Evaporador UOP20-X-PHW de película descendente

3.5.2 Metodología

Para evaporar la solución de glucosa se debe seguir los siguientes pasos:

- 1) Determinar el porcentaje inicial de sólidos solubles presentes en la solución de glucosa con ayuda de un refractómetro.
- 2) Llenar el tanque de alimentación (8) con 10 litros de la solución de glucosa al 4%.
- 3) Llenar el tanque (7) con 10 litros de agua des-ionizada
- 4) Definir las condiciones de operación: flujo de alimentación = 111ml/min y reciclo = 67 ml/min.

- 5) Encender el equipo de acuerdo al procedimiento descrito en la página 37
- 6) Esperar 15 minutos hasta que el proceso alcance el estado estacionario
- 7) Cambiar la posición de la válvula (V1) para permitir el paso de la solución de glucosa al 4%.
- 8) Encender la bomba de vacío y ajustar la presión de trabajo a 267 mbar, para ello utiliza la válvula (V8).
- 9) Esperar aproximadamente 35 minutos hasta alcanzar el estado estacionario.
- 10) Apagar la bomba de vacío, el calentador eléctrico, la bomba de alimentación y el sistema de agua presurizada.
- 11) Esperar unos minutos hasta que la presión se restablezca y alcance 760 mbar.
- 12) Cerrar la válvula (V2) para evitar que el líquido se derrame al momento de desconectar la manguera (A10). Luego, tomar la muestra.
- 13) Enfriar la muestra a 20 °C y medir el porcentaje de sólidos solubles finales, para ello utilizar el refractómetro.
- 14) Abrir la válvula (V2)
- 15) Encender la bomba de vacío, el calentador eléctrico, la bomba de alimentación y el sistema de agua presurizada.
- 16) Cambiar la posición de la válvula (V1) para permitir el paso de agua des-ionizada.
- 17) Bombear agua por 20 minutos para limpiar completamente el equipo.
- 18) Apagar el equipo de acuerdo a las indicaciones de la pagina 44.
- 19) Finalmente, retirar el producto concentrado y el agua evaporada de sus respectivos tanques, a través de las válvulas de drenaje (V9) y (V10).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Calibración de los Sensores (S1) y (S2)

Los valores de error que registran los sensores (S1) y (S2) luego de su calibración, se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4-1 % Error registrado por (S1) y (S2)

Sol. CuSO ₄ % Peso	% Error	
	Sensor (S1)	Sensor (S2)
1	1.4	1.6
5	3.0	2.1
10	4.8	2.8
15	7.6	3.2

Los resultados obtenidos indican un incremento en el porcentaje de error con respecto a la concentración. Para el sensor (S1), este incremento es mayor que el que presenta el sensor (S2). Este comportamiento se puede observar en las figuras 3.6 y 3.7. Mientras el sensor (S1) presenta un error de tendencia exponencial, el sensor (S2) presenta un error de tendencia polinómica de segundo orden.

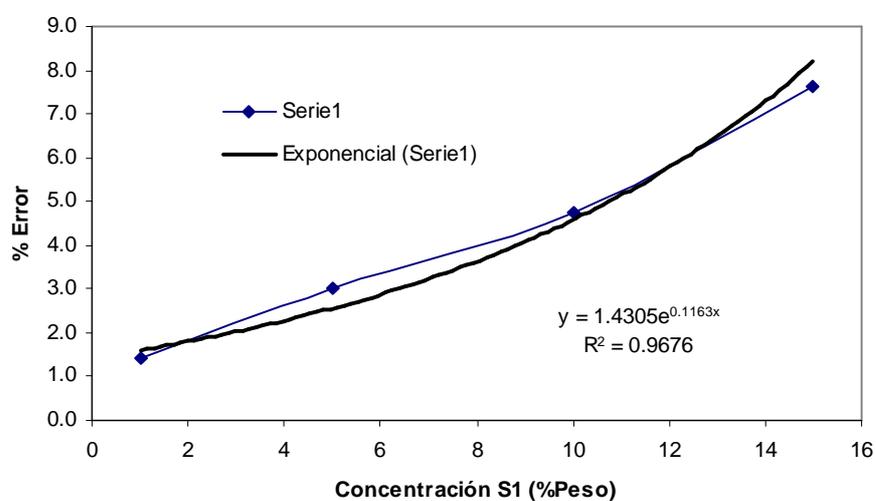


Figura 3.6 Error del Sensor (S1) vs Concentración

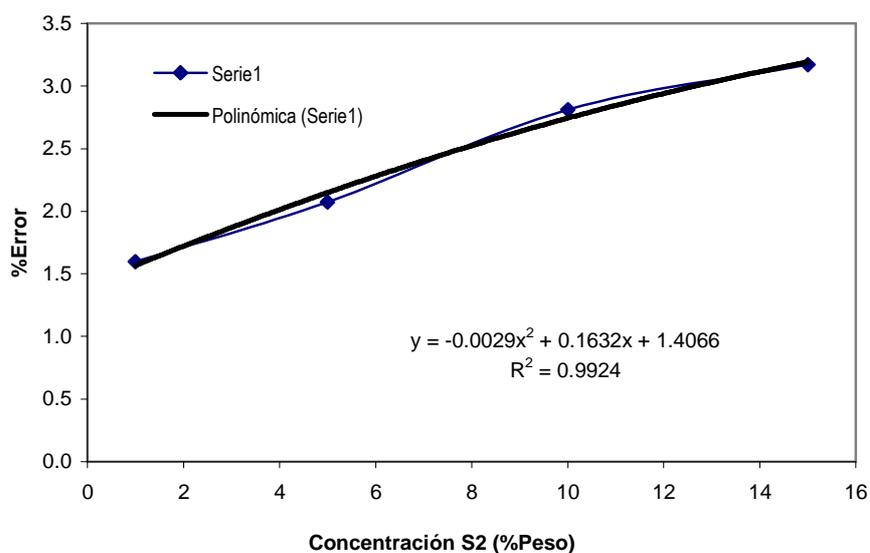


Figura 3.7 Error del Sensor (S2) vs Concentración

Las ecuaciones obtenidas permiten corregir los valores registrados experimentalmente en amplio rango de concentraciones.

4.2 Aplicaciones con Sulfato de Cobre

A través del balance de masa y energía realizados durante la evaporación de Sulfato de Cobre fue posible determinar el flujo de producto concentrado, el flujo de agua evaporada por minuto y la cantidad de calor entregada por el agua presurizada al sistema, así como también la eficiencia de la evaporación. La tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 4-2 Valores obtenidos del Balance de Masa y Energía para el CuSO_4

C1 (%)	Balance de Masa			Balance de Energía		Eficiencia n (%)
	C2(%)	L (ml/min)	V(ml/min)	Q(KJ/s)	S(l/min)	
1	8.47	8.36	74.64	2.93	6	99.8

donde

$C1$ = concentración inicial de la solución de CuSO_4

$C2$ = concentración final de la solución de CuSO_4

L = Flujo de producto concentrado por minuto

V = Flujo de agua evaporada por minuto

Q = Calor que entrega el medio calefactor al sistema

S = Flujo de agua presurizada requerida

n = Eficiencia de la evaporación

Los valores de concentración obtenidos muestran que la solución diluida de CuSO_4 alcanzó una concentración final del 8.47%, proceso que se llevó a cabo con una eficiencia del 99.8%.

La economía del proceso generalmente se basa en una relación masa-masa, es decir los Kg de agua evaporada por cada Kg de vapor utilizado. Esta relación se cumple siempre y cuando se trabaje con vapor como medio calefactor. Sin embargo, en sistemas donde el agua a alta presión es el medio calefactor, como es el caso, la relación que se utiliza es energía-energía, es decir los KJ/s obtenidos por cada KJ/s entregado.

Debido a que el equipo en mención permite precalentar la solución alimentada, todo el calor que entrega el agua presurizada es utilizado para evaporar el agua; por esa razón, el proceso tiene una eficiencia muy cercana al 100 %.

4.3 Aplicaciones con Jugo de Naranja

4.3.1 Optimización del proceso

Las variables del proceso son: presión de vacío, velocidad de alimentación y velocidad de reflujo.

La variable presión se optimizó a través del cálculo de la elevación del punto de ebullición del jugo de naranja, con ello se determinó la temperatura de ebullición del agua pura en el jugo y con ayuda de las tablas de vapor se obtuvo la presión de trabajo. La tabla 4.3 muestra los valores correspondientes.

Tabla 4-3 Presión óptima para la evaporación del jugo de naranja

Conc. Final % Peso	ΔT_{eb} °C	T eb °C	Presion	
			mbar	mmHg
67	13.6	66.4	267.4	200.5

Luego de realizar variaciones tanto a la velocidad de alimentación como al reflujo, se pudo obtener un rango de condiciones en el cual se logra una mayor concentración del jugo. La tabla 4.4 muestra los valores registrados.

Tabla 4-4 Flujos de Alimentación y Reciclo óptimos para la evaporación del jugo de naranja

	Alimentación (ml/min)	Reciclo (ml/min)	Presión (mbar)	Concentración Final % Peso
AB-RA	62	67	267	50
AM-RA	111	67	267	67
AM-RM	111	45	267	35

Los valores obtenidos muestran que al trabajar con una alimentación baja (AB) y un reciclo alto (RA) se obtiene una concentración final del 50 %, mientras que si se mantiene el reciclo alto y se incrementa el flujo de alimentación, se logra una concentración mayor e igual al 67%. Por el contrario, si se mantiene el flujo de alimentación medio (AM) y se disminuye el flujo de reciclo, se obtiene una concentración del 35%.

Para tomar una decisión acertada se tomó en cuenta la naturaleza de la solución a concentrar, como se trata de jugo de naranja, el cual necesita tiempos de residencia cortos para evitar pérdidas a nivel nutricional, se decidió trabajar con la segunda opción, es decir con un flujo de alimentación medio igual a 111 ml/min y un reflujo alto igual a 67 ml/ min. Esta opción permite alcanzar una concentración adecuada para un néctar, a la vez que mantiene un flujo rápido dentro de la columna, lo cual es favorable para el proceso ya que existe un incremento en la viscosidad del jugo a medida que avanza el proceso de evaporación.

4.3.2 Evaporación del jugo de naranja

Los resultados obtenidos en la determinación de sólidos solubles y vitamina C tanto en el jugo inicial como en el concentrado de naranja, se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4-5 % Sólidos solubles y mg de Vitamina C presentes en el jugo de naranja

Muestra	Concentracion		Vitamina C	
	IR	% Sólidos solubles	mg/100 g jugo	mg / g sólido seco
Jugo natural	1.347	9.60	34.76	2.90
Jugo concentrado	1.458	67.0	193.8	2.59

Por una parte, el análisis realizado al jugo concentrado muestra un incremento en el porcentaje de sólidos solubles del 57.4% en relación a los presentes en el jugo inicial. De acuerdo la Norma COVENIN 2264-85, el porcentaje de sólidos solubles necesario para que un concentrado pueda llamarse como tal es del 62%; por tanto, el concentrado que se obtuvo luego del proceso de evaporación cumple con lo establecido ya que alcanzó un 67% de sólidos solubles.

Por otra parte, los valores de vitamina C obtenidos experimentalmente por el método de Tillmans, expresados en mg de Vit. C por cada 100g de jugo, sugieren a simple vista que el concentrado de naranja contiene más vitamina C que el jugo inicial. Sin embargo, si se analiza estos resultados se puede ver que el contenido de vit. C es relativo ya que en ambos casos el porcentaje de sólidos totales es diferente. Además, la vitamina C al ser muy termolábil, es afectada por el tratamiento térmico y por tanto, su contenido no puede aumentar en el jugo concentrado.

Para comparar el contenido de vitamina C presente en el jugo de naranja antes y después del tratamiento térmico, se transformó los mg de Vit.C por 100 g de jugo a mg de Vitamina C por

gramo de sólido seco. Estos nuevos valores permitieron determinar una pérdida del 10.6% de vitamina C durante el proceso. Además, la cantidad remanente de vitamina C en el concentrado da una idea sobre la estabilidad de los demás nutrientes ya que si la vitamina menos estable se perdió en apenas un 10.6%, los demás nutrientes se verán poco afectados.

4.4 Evaporación de la solución de Glucosa

La evaporación de la solución de glucosa se realizó bajo las condiciones que se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4-6 Condiciones óptimas de evaporación

	Alimentación (ml/min)	Reciclo (ml/min)	Presión (mbar)
AM-RA	111	67	267

Estas condiciones de operación son iguales a las que se utilizó para concentrar el jugo de naranja ya que las dos soluciones tienen características similares: son no conductoras de la electricidad y contienen un alto porcentaje de azúcares.

La temperatura de ebullición de la solución de glucosa y la concentración final alcanzada, se muestran en la tabla 4.7.

Tabla 4-7 Concentración final de la Sol. de Glucosa

Conc. Inicial % Sólidos	Conc. Final % Sólidos	Teb sol °C
4	75	68.6

De acuerdo a la concentración final alcanza por la solución de glucosa se puede concluir que el proceso de evaporación se ha llevando a cabo de forma efectiva ya que se ha eliminado el

73.9 % del agua de la solución inicial, con lo cual se ha logrado un jarabe de glucosa con un contenido de sólidos del 75% y apariencia completamente cristalina.

Un factor importante dentro del proceso de evaporación es la temperatura de ebullición, para este caso fue relativamente baja e igual a 68.6 °C, la cual se logró al trabajar con vacío.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Superados los inconvenientes se logró poner en marcha el Evaporador de Película Descendente UOPXW, el mismo que actualmente se encuentra operando al 100%.
- Los sensores de conductividad (S1) y (S2), los cuales permiten medir la concentración de las soluciones inicial y final, presentan un error de medición cuya tendencia es exponencial y polinómica de segundo orden respectivamente.
- La solución de Sulfato de Cobre al 1% en peso, la cual se sometió al proceso de evaporación, alcanzó una concentración final del 8.47%. Este proceso se llevó a cabo con una eficiencia del 99.8%.
- La concentración del jugo de naranja, extraído mecánicamente de naranjas frescas, se llevó a cabo en el Evaporador de película descendente, el cual permitió eliminar el 63% de agua del jugo inicial, con lo cual se logró obtener un concentrado de naranja sin sabor a cocido ni alteración en su color, cuyo contenido de sólidos solubles es del 67%, el cual cumple con las especificaciones de la Norma COVENIN 2264-85 para concentrados de fruta.
- Las variables de operación: velocidad de alimentación, reflujo y presión de vacío inciden directamente en el proceso de evaporación. Las condiciones bajo las cuales se logró obtener una mayor concentración tanto en el jugo de naranja como en la solución

de glucosa son: velocidad de alimentación 111ml/min, reflujo 67 ml/min y presión de vacío de 267 mbar.

- El porcentaje de vitamina C presente en el jugo de naranja después del tratamiento térmico es del 89.4%. Esto implica que se perdió un 10.6% de su contenido inicial; por tanto, los demás nutrientes al ser menos termolábiles se verán poco afectados durante el proceso.
- De acuerdo al balance de masa realizado, el proceso de evaporación del jugo de naranja tiene un rendimiento del 16%, es decir que se obtiene 800 g de concentrado por cada 5000g de jugo inicial evaporado.
- La economía de la evaporación es del 99.8 % gracias al sistema de precalentamiento con que cuenta el evaporador.
- Durante la evaporación de la solución de glucosa se eliminó el 73.9% del agua de la solución inicial, esto permitió obtener un jarabe de glucosa con un contenido de sólidos del 75% y apariencia completamente cristalina.
- Las características obtenidas tanto en el concentrado de naranja como en el jarabe de glucosa permiten concluir que el evaporador de película descendente es una buena opción al momento de evaporar soluciones orgánicas termolábiles, solubles en agua y no conductoras de la electricidad debido a los tiempos de residencia costos y al vacío utilizado.

5.2 Recomendaciones

- Revisar que las conexiones de agua y electricidad estén habilitadas antes de encender el equipo, en especial que el tanque del sistema de agua presurizada cumpla con el nivel de agua requerido ya que de lo contrario el equipo no se encenderá.
- Ampliar el uso del evaporador de película descendente, para ello se puede utilizar productos solubles en agua como el biol y la leche de soya.
- A medida de las posibilidades, poner en funcionamiento el segundo efecto con que cuenta el evaporador.

Bibliografía:

- 1) Armfield. Falling Film Evaporator Pressurised Hot Water Teaching Manual. 2000.
- 2) Badui, Salvador. “Agua”. Química de los Alimentos. 3ª ed. Mexico: Pearson Education. 1993. Págs.:15-41.
- 3) Buss-SMS-Canzler. “Tecnología de Evaporación”. Mayo 2006. 20 Jun.2009.
<[http](http://www.sms-vt.com)>//www.sms-vt.com.
- 4) Codex Stan 247-2005. Norma general del Codex para jugos y néctares de frutas
- 5) Felder, Richard M y Rousseu Ronald W. Principios Elementales de los Procesos Químicos. 3ª ed, Editorial Limusa Wiley, 2006.
- 6) Fellows, Meter. Tecnología de procesado de los Alimentos. Zaragoza: Acribia, S.A.1994.Págs: 253-270.
- 7) Geankoplis, Christie J. “Evaporación”.Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias.3ª ed. México: Continental, S.A. 1998. Págs: 545-578
- 8) Mafart, Pierre. “La eliminación de agua”.Ingeniería industrial alimentaria.Vol.1.Zaragoza: Acribia, S.A. 1994. Págs: 195-233.
- 9) Mc Cabe, Warren, Julian Smith y Peter Harriot. “Evaporación”. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 6ª ed. México: McGraw-Hill. 2003. Págs: 511-544.
- 10) Mera, Luis. Termodinámica Básica. Ecuador.
- 11) Ocon, Joaquin. “Evaporacion”. Problemas de Ingeniería Química. España. Págs: 161-215.
- 12) Rahman, Shafiur y Perera Conrad. “Secado y conservación de alimentos”. New Zealand: 189-191.

- 13) Royo, Oscar. “Minimización de residuos líquidos en industria química mediante evaporación al vacío”. Junio 2009. 7 Agosto.2009.
<<http://blog.condorchem.com/minimizacion-de-residuos-liquidos-en-industria-quimica-mediante-evaporacion-al-vacio/#respond#respond>>
- 14) Vaclavick, Vickie. “Agua”. Fundamentos de ciencia de los alimentos. Zaragoza: Acribia, S.A. 1998. Págs.: 17-27
- 15) Vitali, Alfredo A. y M.A. Rao. “Concentración y conservación de zumos de frutas”.Brazil: 239-241.

ANEXO 1 A

PRÁCTICA A

CÁLCULOS

a) Determinación de la Concentración

Para determinar la concentración final de la solución de sulfato de cobre evaporado se puede proceder de dos maneras:

- La primera forma es anotar directamente el valor de conductividad en mS que muestra el recuadro (C11) de la consola de control. Para transformar este valor a porcentaje en peso se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$C = \left[\frac{\gamma * T^{-0.44113}}{1.24064} \right]^{(1/0.67231)} \quad [1A-1]$$

donde

γ = conductividad en mS

T = temperatura en C

Los datos de conductividad y temperatura obtenidos durante la práctica son: $\gamma = 29.14$ mS y

$T = 51.3$ °C respectivamente. Al aplicar la Eq. [1A-1] se obtiene:

$$C_2 = \left[\frac{29.14 * 51.3^{-0.44113}}{1.24064} \right]^{(1/0.67231)}$$

$C_2 = 8.26$ %

- La segunda forma es más sencilla ya que permite obtener directamente la concentración final en porcentaje en peso. Para ello se debe conectar el equipo al software y en la ventana *Conductivity Display* activar la segunda opción, la cual muestra el resultado en % en peso, tal como se observa en la Figura 1A-1.

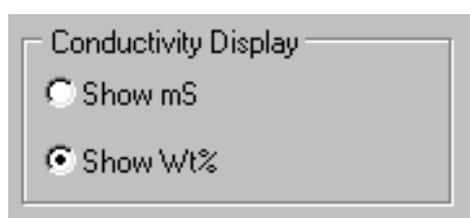


Figura 1 A-1. Conductivity Display

Con ayuda del software se puede observar en tiempo real el valor de la concentración final de la solución de sulfato de cobre. La Figura 1A-2. muestra de forma clara la concentración C2 alcanzada a una T2.

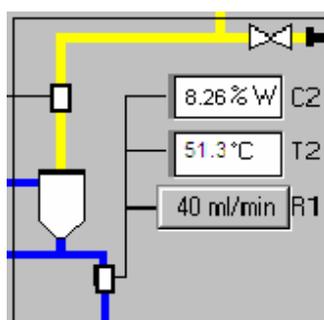


Figura 1A-2. Pantalla que muestra la concentración C2 a una T2

Nota:

Para corregir el valor registrado por el Sensor 2, utilizar la ecuación de segundo orden que se muestra en el Gráfico 3.7. En este caso el error es del 2.556%; por consiguiente, el valor real

de (C2) es de 8.47%. Para confirmar este valor, se procedió a medir el índice de refracción de esta solución, el valor registrado fue de 8.6% de sólidos totales.

b) Balance de Masa

Para realizar el balance de masa se ha utilizado las Ecuaciones expuestas en el Capítulo 1.

Datos:

$$F = 83 \text{ ml / min } CuSO_4$$

$$\delta = 1 \text{ g / ml}$$

$$X_F = 0.00918$$

$$X_L = 0.0847$$

Balance con respecto al $CuSO_4$:

$$F * X_F = L * X_L \quad [1.3]$$

$$83 * 0.00918 = L * 0.0847$$

$$L = 8.996 \text{ g de } CuSO_4 \text{ concentrado por minuto}$$

$$\delta_{CuSO_4 \text{ al } 8\%} = 1.0764 \text{ g / ml}$$

$$L = 8.36 \text{ ml / min}$$

Balance global

$$F = L + V \quad [1.2]$$

$$V = 83 - 8.36$$

$$V = 74.64 \text{ g de agua evaporada por minuto}$$

$$V = 74.64 \text{ ml / min}$$

ANEXO 1B

PRÁCTICA B

CÁLCULOS

Balace de Energía

Para realizar el balance de energía se ha procedido a calcular la entalpía de las corrientes por separado, como se indica a continuación:

a) Entalpía del Producto

Para calcular la entalpía del producto H_L se ha utilizado las tablas de vapor, esto es posible ya que los valores de presión y temperatura son conocidos.

Presión (psi)	Temperatura (°C)	Entalpia (Btu/lb)
10.87	75.7	136.21

$$h_L = \frac{136.21 \text{ Btu}}{\text{lb}} * \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ Kg}} * \frac{1.053 \text{ KJ}}{1 \text{ Btu}} = 315.54 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$L = \frac{8.36 \text{ ml}}{\text{min}} * \frac{1.0764 \text{ g}}{\text{ml}} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1.5 \times 10^{-4} \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$H_L = h_L * L$$

$$H_L = \frac{315.54 \text{ KJ}}{\text{Kg}} * \frac{1.5 \times 10^{-4} \text{ Kg}}{\text{s}}$$

$$H_L = \frac{0.0473 \text{ KJ}}{\text{s}}$$

b) Entalpía de la Alimentación

Presión (psi)	Temperatura (°C)	Entalpia (Btu/lb)
10.87	73.6	132.5

$$h_F = \frac{132.5 \text{ Btu}}{\text{lb}} * \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ Kg}} * \frac{1.053 \text{ KJ}}{1 \text{ Btu}} = 306.95 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$F = \frac{83 \text{ ml}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ g}}{\text{ml}} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1.38 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$H_F = h_F * F$$

$$H_F = \frac{306.95 \text{ KJ}}{\text{Kg}} * \frac{1.38 \times 10^{-3} \text{ Kg}}{\text{s}}$$

$$H_F = \frac{0.42 \text{ KJ}}{\text{s}}$$

c) Entalpía de Agua evaporada

Presión (psi)	Temperatura (°C)	Entalpia de Evaporación (Btu/lb)
10.87	90.5	1145.1

$$h_V = \frac{1145.1 \text{ Btu}}{\text{lb}} * \frac{2.2 \text{ lb}}{1 \text{ Kg}} * \frac{1.053 \text{ KJ}}{1 \text{ Btu}} = 2652.74 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$V = \frac{74.64 \text{ ml}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ g}}{\text{ml}} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1.244 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$H_V = h_V * V$$

$$H_V = \frac{2652.74.KJ}{Kg} * \frac{1.244x10^{-3} Kg}{s}$$

$$H_V = \frac{3.3 KJ}{s}$$

d) Entalpía del Agua presurizada

Presión (psi)	Temperatura (°C)	Entalpía de Evaporación (Btu/lb)
25	T12 = 114.8	206.96
25	T11 = 107.9	194.51

$$h_{12} = \frac{206.96Btu}{lb} * \frac{2.2 lb}{1 Kg} * \frac{1.053KJ}{1 Btu} = 479.44 \frac{KJ}{Kg}$$

$$h_{11} = \frac{194.51Btu}{lb} * \frac{2.2 lb}{1 Kg} * \frac{1.053KJ}{1 Btu} = 450.6 \frac{KJ}{Kg}$$

Para calcular la cantidad de calor Q que entrega el medio calefactor (agua presurizada) al sistema (líquido), se utiliza el principio que describe la Eq. [1.5]

$$\underbrace{Q \text{ alimentación} + Q \text{ entregado al sistema}}_{Q \text{ entra}} = \underbrace{Q \text{ concentrado} + Q \text{ vapor de agua}}_{Q \text{ sale}} \quad [1.5]$$

Por tanto:

$$Q_{\text{entregado al sistema}} = H_P + H_V - H_F$$

$$Q_{\text{entregado al sistema}} = 0.0473 + 3.3 - 0.42$$

$$Q_{\text{entregado al sistema}} = 2.93 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}$$

Si se aplica la Eq. [1.8] se tiene:

$$Q_{\text{entregado al sistema}} = Q_S = S * (h_{12} - h_{11})$$

En este caso S es la cantidad de agua presurizada y no de vapor.

$$S = \frac{Q_{\text{entregado al sistema}}}{(h_{12} - h_{11})}$$

$$S = \frac{2.93 \text{ KJ} / \text{s}}{(479.44 - 450.6) \text{ KJ} / \text{Kg}}$$

$$S = 0.10 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$S = 6 \frac{\text{l}}{\text{min}} \text{ de agua presurizada}$$

ANEXO 1C

PRÁCTICA C

CÁLCULOS

Economía de la Evaporación

La economía de la evaporación (η_o) para un evaporador de simple efecto que utiliza agua presurizada como medio calefactor, es una relación entre energía y esta dada por la expresión:

$$\eta_o = \frac{H_V}{S * (h_{12} - h_{11}) + H_F} \quad [1.12]$$

Al aplicar la Eq. [1.12] se tiene:

$$\eta_o = \frac{3.3 \frac{KJ}{s}}{(0.10 * (479.44 - 450.60) + 0.42) \frac{KJ}{s}} \times 100$$

$$\eta_o = 99.8 \%$$

ANEXO 2A

**DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE TRABAJO PARA LA EVAPORACIÓN DE
JUGO DE NARANJA**

CÁLCULOS

La presión de trabajo se obtuvo a través del cálculo de la elevación del punto de ebullición del jugo de naranja, para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta T_e = \frac{T_e^2 R x}{\lambda} \quad [3.4]$$

donde

ΔT_e = incremento de la T de ebullición en K

T_e = temperatura de ebullición del agua pura

R = 8.314 J/K mol

x = fracción final de soluto

λ = calor latente del agua pura

$$\Delta T_e = \frac{(364.8)^2 \text{ }^\circ\text{K} * 8.314 \text{ J/}^\circ\text{Kmol} * 0.5}{4.08 \times 10^4 \text{ J/mol}}$$

$$\Delta T_e = 13.6 \text{ }^\circ\text{K}$$

A continuación, se calculó la nueva temperatura de ebullición del agua pura. La ecuación que se utilizó es la siguiente:

$$T_{e\text{ Solucion}} = \Delta T_e + T_e' \quad [3.5]$$

donde

$$T_{e\text{ Solucion}} = \text{temperatura del jugo de naranja} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_e' = \text{temperatura de ebullición del agua pura dentro de la solución}$$

$$T_e' = T_{e\text{ Solucion}} - \Delta T_e$$

$$T_e' = 353 - 13.6$$

$$T_e' = 339.4 \text{ } ^\circ\text{K} = 66.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

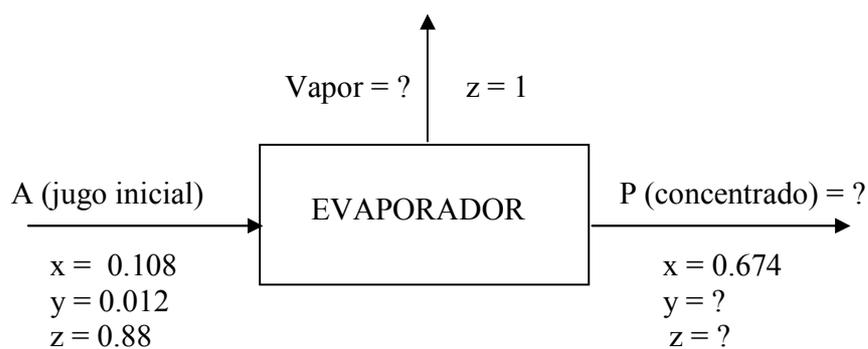
Para obtener la presión de trabajo se ha utilizado como dato $T_e' = 66.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ y con ayuda de las tablas de vapor, se ha determinado que para esta temperatura la presión que corresponde es de 267.4 mbar.

ANEXO 2B

BALANCE DE MASA DEL JUGO DE NARANJA EVAPORADO

Datos:

5 Kg de jugo inicial



donde:

x = fracción de sólidos solubles

y = fracción de sólidos insolubles

z = fracción de agua

1) Balance Total:

$$A = V + P$$

$$5 = V + P$$

2) Balance de sólidos insolubles

$$0.012 * 5 = y * P$$

3) Balance de Agua

$$0.88 * 5 = V + (1 - 0.674 - y) * P$$

4) Solución:

$$P = 0.8012 \text{ Kg de concentrado}$$

$$V = 4.2 \text{ Kg de agua evaporada}$$

$$y = 0.075$$

$$z = 0.251$$

5) Sólidos Totales en el jugo inicial:

$$\frac{12 \text{ g Sólidos Totales}}{100 \text{ g de jugo inicial}}$$

6) Sólidos Totales en el jugo concentrado:

$$\text{Sólidos Totales} = \text{Sólidos solubles} + \text{Sólidos insolubles}$$

$$\frac{74.9 \text{ g Sólidos Totales}}{100 \text{ g de jugo concentrado}}$$

ANEXO 2C

DETERMINACIÓN DE VITAMINA C EN EL JUGO DE NARANJA

CÁLCULOS

Para determinar la cantidad de vitamina C presente en el jugo de naranja inicial y en el jugo de naranja concentrado se utilizó el método de Tillmans .

a) Titulación del DI

Según la preparación de la solución patrón de Ácido Ascórbico se tiene:

$$\begin{array}{ll} 50.5 \text{ ml sol. Ac. Ascorbico} & 10\text{mg Ac. Ascorbico} \\ 10 \text{ ml sol. Ac. Ascorbico} & ? \end{array}$$

En los 10 ml de solución de Ac. Ascórbico se tiene 1.98 mg de Ac. Ascórbico. Ahora, el volumen de DI gastado en la titulación de los 10 ml de solución de Ac. Ascórbico son 2.3 ml.

Por tanto, el factor se determina de la siguiente forma;

$$\begin{array}{ll} 2.3 \text{ ml de DI} & 1.98 \text{ mg Ac. Ascorbico} \\ 1 \text{ ml de DI} & ? \end{array}$$

$$\boxed{1 \text{ ml de DI} = 0.861 \text{ mg de Vitamina C}}$$

b) Jugo de naranja inicial

Volumen de DI gastado = 4 ml → 3.44 mg Vit. C en 10g de jugo inicial

$$\frac{34,44 \text{ mg Vit. C}}{100\text{g de jugo inicial}} * \frac{100\text{g de jugo inicial}}{12\text{g de solidos}} = \frac{2.9 \text{ mg Vit. C}}{\text{g de solidos}}$$

e) Jugo de naranja concentrado

Volumen de DI gastado = 5.1 ml → 4.4 mg Vit. C en 2.27g de jugo concentrado

$$\frac{193.83 \text{ mg Vit. C}}{100 \text{ g de jugo concentrado}} * \frac{100 \text{ g de jugo concentrado}}{74.9 \text{ g de solidos}} = \frac{2.59 \text{ mg Vit. C}}{\text{g de solidos}}$$