

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Revisión bibliográfica

Se buscó información de actualidad en libros, artículos e internet para sustentar la investigación sobre técnicas de desalinización, características físicas y químicas del fluido a tratar, recuperación de calor, etc.

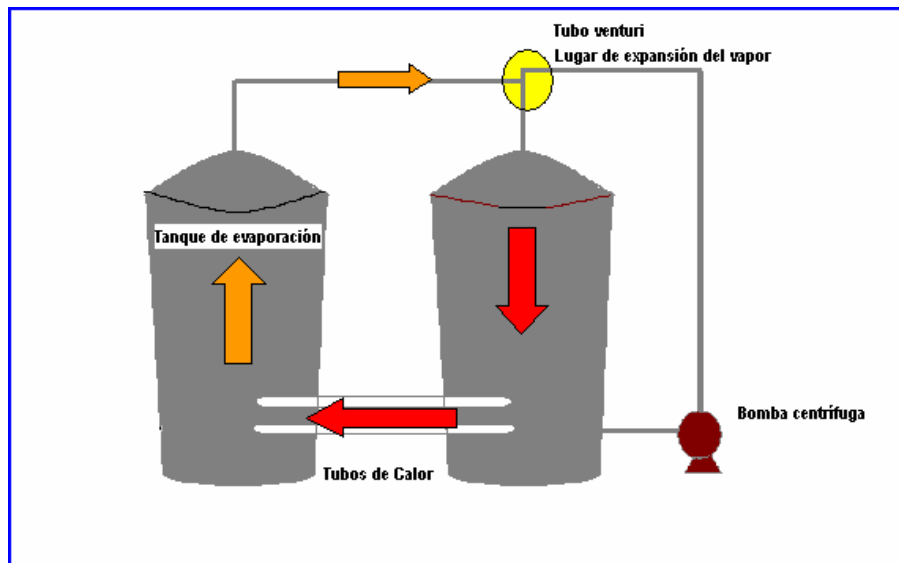
#### 3.2 Diseño del equipo desalinizador por destilación a baja presión con recuperación de energía a través de un tubo de calor.

Después de la revisión bibliográfica, se concluyó que la tecnología menos compleja en su funcionamiento y más económica para implementar, operar y mejorar un modelo a escala es la destilación a baja presión.

Una de las formas más innovadoras para recuperar energía es a través de los tubos de calor.

El equipo de evaporación a baja presión con tubos de calor acoplados es una innovación a la tecnología existente mencionada en la revisión bibliográfica. La aportación fundamental de este trabajo es el acoplamiento de 5 tubos de calor que se colocaron entre los dos tanques (el de agua fresca y el de agua salada) y la utilización de un tubo Venturi para lograr la caída de presión, todo esto con la finalidad de ahorrar energía.

El vapor que se obtenga del agua salada, tendrá una temperatura baja debido a la presión que se maneja, es por esto que cuando éste pase a través del tubo Venturi para llegar al tanque de agua fresca, que se encontrará a la presión atmosférica de Puebla (598 mmHg), sufrirá una expansión, y por lo tanto un incremento en la temperatura, energía que se hará recircular al tanque de evaporación a través de los tubos de calor, para mantener dicho tanque a la temperatura de saturación en la presión baja. De esta manera la energía que se dispersaría al ambiente es aprovechada logrando que el equipo funcione suministrando energía únicamente al encender las resistencias eléctricas e inicializar el proceso y para la bomba centrífuga que hará el vacío.



**Figura 12: Diagrama de flujo de energía en el dispositivo de EBP con tubos de calor acoplados**

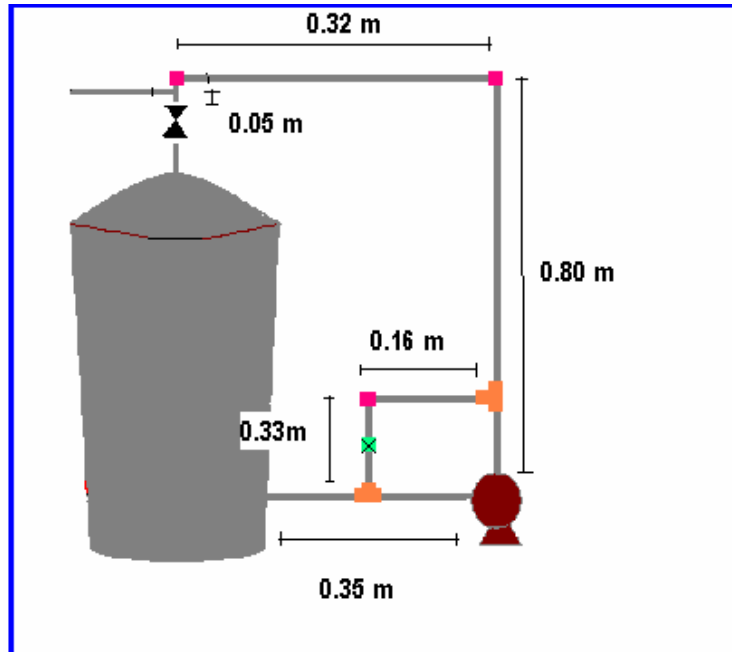
Las dimensiones del equipo se determinaron para lograr un dispositivo apto para colocarse en la planta piloto de la Universidad con fines académicos.

El tamaño de los tanques se selecciona en base a la cantidad de agua que se desee desalinizar. Los tanques tienen forma cilíndrica con una capacidad de 60 l cada uno contando con 0.3 m de diámetro y 0.85 m de alto. Este volumen es apropiado para una escala de banco.

Las tapas tienen forma cóncava para que el vapor logre pasar fácilmente hacia la tubería y están sujetas a los tanques con una serie de tornillos, tuercas y un empaque plástico entre ambas terminales para lograr una mayor hermeticidad y así disminuir las pérdidas de vapor y, por supuesto, conservar la presión baja que habrá en el tanque de evaporación.

### 3.2.1 Flujo de fluidos

El primer paso de los cálculos matemáticos será el flujo de fluidos, en la zona de recirculación por bombeo, para ello se requiere de conocer las medidas, accesorios, ecuaciones matemáticas y las variables mínimas necesarias para obtener los resultados.



**Figura 13. Esquema del flujo de fluidos a analizar; medidas y accesorios.**

#### 3.2.1.1 Bomba

Para este dispositivo se necesita una bomba centrífuga que logre manejar el flujo másico que requiere el tubo Venturi para su óptima operación en la generación de vacío. Para este cálculo se utilizó la ecuación de Bernoulli:

$$\Delta H = \frac{\dot{m}}{\eta} \left( \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2gc} + \frac{g(Z_2 - Z_1)}{gc} + h_{L(total)} \right)$$

Ecuación 1

donde:

$\Delta H$  = potencia (Watt)

$m$  = flujo másico (kg/s)

$\eta$  = eficiencia

$P_2, P_1$  = Presión de succión y descarga, respectivamente (Pa)

$\rho$  = densidad (kg / m<sup>3</sup>)

$v_2, v_1$  = Velocidad de succión y descarga, respectivamente (m/s)

$g_c$  = factor de conversión dimensional (1 kg\*m/s<sup>2</sup>\*N)

$Z_2, Z_1$  = altura final e inicial del fluido, respectivamente (m)

$h_L$  = pérdidas por fricción (J/kg)

La universidad contaba con una bomba centrífuga de 0.25 hp, y mediante cálculos se determinará si ésta es apta para el proceso.



**Figura 14 . Bomba centrífuga de 0.25 hp**

### 3.2.1.2 Tubería

Como antes se mencionó, para lograr realizar vacío con un tubo Venturi se tiene que hacer pasar un flujo de agua a través de él. La velocidad de dicho flujo, determina la magnitud de la caída de presión, mientras menor pueda ser la presión en el tanque de evaporación el proceso será más eficiente, es por esto que se necesita lograr que un flujo turbulento pase a través de dicho tubo, para asegurar la máxima caída de presión. Un número de Reynolds mayor a 4000 [23] nos da estas condiciones, así que en base a la ecuación:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Ecuación 2

donde:

$Re$  = número de Reynolds (adimensional)

$\rho$  = densidad del líquido (kg / m<sup>3</sup>)

$V$  = velocidad (m / s)

$D$  = diámetro de la tubería (m)

$\mu$  = viscosidad del líquido (kg / m\*s)

Debido a que la viscosidad del agua es menor a 1, mientras más pequeño sea el numerador de la expresión mayor será el número de Reynolds, debido a ello se requiere de una tubería con un diámetro pequeño para lograr un flujo turbulento. Por esto se eligió tubería de media pulgada, cédula 40.

Las pérdidas por fricción de la tubería se obtendrán por medio de:

$$h_L = 2f_f \frac{L_{eq} v^2}{D g_c}$$

Ecuación 3

donde:

$f_f$  = factor de fricción (adimensional)

$L_{eq}$  = longitud equivalente de tramos y accesorios (m)

$D$  = diámetro (m)

$v$  = velocidad (m/s)

$g_c$  = factor de conversión dimensional (1 kg\*m/s<sup>2</sup>\*N)

### 3.2.1.3 Tubo de Venturi

Una vez determinado el diámetro de la tubería, se coloca un tubo Venturi tipo Hershel comercial, se despeja el  $\Delta P$ , función de  $m$  (flujo másico kg/s), para obtener la caída de presión teórica con la siguiente ecuación de diseño:

$$m = q_1 \rho = CA_2 \sqrt{\frac{[2gc(p_1 - p_2) + 2g\rho(Z_1 - Z_2)]\rho}{1 - \beta^4}}$$

Ecuación 4

$A_2$ = área transversal de la garganta

$C$ = coeficiente de descarga adimensional

$g_c$ = constante dimensional

$p_1, p_2$ = presión en las tomas de presión estática corriente arriba y corriente abajo, respectivamente

$q_1$ = gasto volumétrico de descarga medido a la presión y a la temperatura corriente arriba

$m$ = gasto masa de descarga

$\beta$  = razón del diámetro de la garganta al diámetro de la tubería, adimensional

$\rho$ = densidad a la temperatura y presión corriente arriba.

$g$ = aceleración local debida a la gravedad

$Z_1, Z_2$ = alturas verticales, por encima de un plano de referencia arbitrario que corresponde a las ubicaciones de línea central para la toma de lecturas de presión  $p_1$  y  $p_2$ , respectivamente. [24]



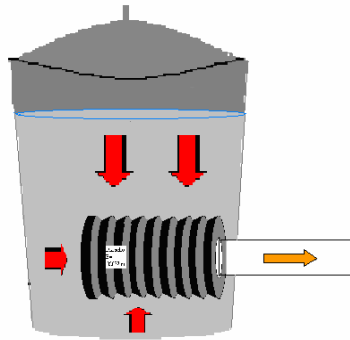
**Figura 15 . Fotografía de tubo Venturi tipo Hershel**

El  $\Delta P$  que obtengamos como resultado entre la densidad, nos dará como resultado las pérdidas por fricción a consecuencia del paso del fluido a través del tubo,  $h_{L\text{Venturi}}$  (J/kg).

### 3.2.2 Flujo de calor

Este apartado es de suma importancia debido a que la recuperación de energía es la innovación de este proceso.

La energía que se produzca con la expansión del vapor cuando pase de 17 kPa a presión atmosférica, nos generará una elevación en la temperatura hasta 93°C en el tanque de recuperación, innecesaria en esta etapa del proceso, es por esto que la energía se pasará al tanque que lo requiere.



**Figura 16. Ilustración del flujo de calor que se  
Calculará en el trabajo.**

En los cálculos de flujo de calor, se utilizarán algunas suposiciones debido a la falta de datos experimentales. La más importante consiste en asumir una eficiencia del 100% en la transferencia de calor de los tubos de un tanque a otro.

Se calculará  $q$  por medio de la ecuación:

$$q = hA\Delta T$$

Ecuación 5

donde:

$q$ = flujo de calor (Watt)

$h$ = coeficiente convectivo (Watt/m<sup>2</sup>K)

$A$ = área de superficie de contacto (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = diferencia de temperaturas (K)

Primero se probará si el valor de  $h$  obtenido experimentalmente cumple con las condiciones de la forma y el material de nuestras aletas. Si esta prueba resulta negativa, entonces se utilizarán correlaciones matemáticas para encontrar el valor.

$$Nu_f = C Re_{df}^n Pr^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación 6

Donde:

$Nu_f$  = número de Nusselt en la capa límite (adimensional)

C, n = constantes dependientes del número de Reynolds<sub>df</sub> (adimensionales)

$Re_{df}$  = número de Reynolds en la capa límite (adimensional)

Pr = número de Prandlt (adimensional)

Una vez calculado  $Nu_f$  utilizando la siguiente expresión se calcula h:

$$h = \frac{k}{d} Nu_d$$

Ecuación 7

Donde:

h= coeficiente convectivo (Watt/m<sup>2</sup>K)

k = conductividad térmica del material, en este caso acero inoxidable (Watt/m°C)

d = diámetro de la tubería (m)

$Nu_f$  = número de Nusselt en la capa límite (adimensional)

Obteniendo h, podemos ahora se resuelve la ecuación no. 5 para obtener el flujo de calor para conocer la recuperación de energía que se logrará.

Una vez obtenido el flujo de calor, se determina cuanto vapor de agua se obtendrá por medio de la ecuación:

$$m = \frac{q}{\lambda}$$

Ecuación 8



donde:

$m$ = flujo másico (kg/s)

$q$ = flujo de calor (Watt)

$\lambda$ = calor de vaporización del agua a 60°C y 17 kPa (2 300 000 J/kg)

Esto, ya cuando las resistencias eléctricas se encuentren apagadas, y bajo el supuesto de que el tubo funcione adiabáticamente.

### 3.2.2.1 Eficiencia de las aletas

Para hacer más eficiente la transferencia de energía del tubo de calor se decidió acoplarle unas aletas de tipo radial:



**Figura 17. Forma y dimensiones del aletado  
De los tubos de calor**

Con estos elementos podremos transferir más calor que teniendo tan sólo una superficie plana. Es por esto que se calculará su eficiencia para obtener un dato más real de los flujos de energía. Esto se logrará por medio de la fórmula:

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL)}{mL}$$

Ecuación 9

donde:

$\eta_f$  = eficiencia de la aleta

$$mL = \sqrt{\frac{hP}{kA}}L$$

Ecuación 10

$h$  = coeficiente convectivo ( $W/m^2K$ )

$P$  = perímetro de la aleta (m)

$k$  = factor de conductividad térmica ( $W/mK$ )

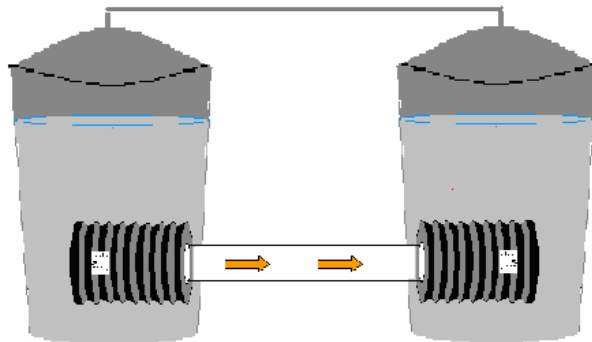
$A$  = área de la aleta ( $m^2$ )

$L$  = longitud de la aleta (m)

Obteniendo la eficiencia, ésta se multiplica por el calor ideal, para poder obtener el calor real transmitido por las aletas.

### 3.2.2.2 Transferencia de calor de un tanque a otro.

En el inciso anterior se evaluó la transferencia de calor del agua del tanque a través de las aletas al tubo. También es necesario conocer el flujo de vapor de la mezcla binaria (etanol-agua 16% v/v) en el interior del tubo, para conocer si esta es capaz de transferir el calor de un tanque al otro.



**Figura 18. Transferencia de calor de un tanque a otro**

Por medio del simulador Aspen Plus, se obtendrá el valor de  $\Delta H_{vap}$  de la mezcla binaria, de esta manera mediante la fórmula:

$$G = \frac{q}{\Delta H_{vap}}$$

Ecuación 11

Se podrá determinar la producción de vapor que será el responsable de transferir el calor al otro extremo.

Después de la fase de condensación el líquido regresará por capilaridad al tanque caliente, esta parte no se calculará debido a la complejidad de las expresiones matemáticas y a la falta de datos experimentales. Por lo tanto en este trabajo únicamente se evaluará la posibilidad de que el vapor alcance el otro extremo del tubo, transfiera calor y condense.

### **3.3 Construcción del equipo desalinizador por destilación a baja presión con recuperación de energía a través de un tubo de calor.**

El diseño antes mencionado fue construido casi en su totalidad en acero inoxidable, por la estabilidad y seguridad que nos brinda el material, ya que el fin de este dispositivo es obtener un producto para consumo humano. Las válvulas que se encuentran en el tubo de calor y en la superficie de la tapa que cubre el tanque de agua fresca fueron elegidas en cobre, pero éstas nunca entran en contacto con el agua. El tubo Venturi fue seleccionado en un material plástico resistente por razones comerciales así como algunas válvulas de bola que están hechas de policloruro de vinilo. Esto no traerá consecuencias graves en la operación debido a la baja temperatura de operación y a que los polímeros, por naturaleza, no son sensibles a la incrustación ni reaccionan formando compuestos tóxicos.



**Figura 19. Evaporador a baja presión con recuperación de energía a través de tubos de calor construido en la UDLA-P**

### 3.3.1 Resistencias eléctricas

Una vez que se colocaron las conexiones y accesorios en el equipo, se debe instalar el medio de calentamiento, que en este caso son resistencias eléctricas. Previo a la instalación, se realizaron pruebas de transmisión de voltaje en el agua, por razones de seguridad, así como mediciones para obtener la potencia de éstas.

La potencia fue medida colocando la resistencia eléctrica dentro de un volumen conocido de agua, ésta se enciende al mismo tiempo que se echa a andar un cronómetro. De esta manera se toma la temperatura cada cierto tiempo, y finalmente se calcula la potencia con ayuda de la ecuación:

$$w = \frac{q}{t} = mC_p\Delta T$$

Ecuación 12

donde:

w = potencia (Watt)

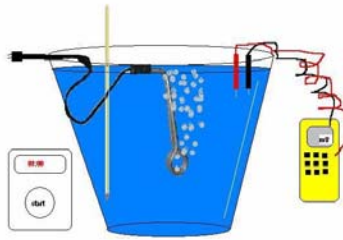
q = calor (joule)

t = tiempo (s)

m = masa (kg)

Cp = capacidad calorífica (J/kg K)

T = temperatura (K)



**Figura 20: Ilustración de experimento para medición de potencia de las resistencias eléctricas**

Las resistencias se introdujeron a través de un orificio del tanque y fueron selladas con un tapón monohoradado para matraz y silicón.

### 3.3.2 Medidor de nivel

Por medio de mangueras tramadas, para que resistan la baja presión, se realizó un aforo en cada tanque para poder observar el nivel de agua dentro de ellos, antes y durante la operación del equipo. Esto se llevó a cabo vertiendo un volumen de agua conocido y colocando una marca en la manguera que nos indique el  $\Delta h$  de dicho volumen. Esta operación se repite litro por litro hasta llegar al volumen total del tanque.

### **3.3.3 Medición de la caída de presión generada en la garganta del tubo Venturi con respecto a la atmosférica.**

Para realizar esta medición, se ocupó un manómetro de mercurio que se conectó, mediante una manguera de látex y grasa de silicón para evitar fugas, directamente a la garganta del tubo Venturi. Hecho esto, se encendió la bomba para hacer pasar el flujo a través de él, se esperó a que la presión de vacío se mantuviera estable para tomar el dato que se comparará posteriormente con el resultado teórico.



***Figura 21. Medición con el manómetro de mercurio***

### **3.3.4 Empaque de tubos de calor**

Una vez puestos los tubos en el equipo, se procedió a poner el empaque capilar dentro de los dos tubos que se utilizarán. Las rebabas son de acero inoxidable, y se dejó un espacio en el centro de ellos para dejar pasar el vapor.



**Figura 22. Proceso de empacamiento de tubo de calor**



**Figura 23. Interior de tubos de calor empacados con rebabas de acero inoxidable**

### **3.3.5 Determinación de presión de operación interna de los tubos de calor**

Por medio del simulador Aspen Plus, se determinará la presión de operación interna de los tubos, tomando como punto de partida la temperatura del tanque de agua caliente que se encontrará a 93°C. Se deberá encontrar el punto de rocío de la mezcla binaria que se encontrará dentro de los tubos, en este caso etanol-agua 16% v/v, a 75°C, tomando en cuenta el gradiente de temperaturas que debe existir para que el calor fluya en la dirección que se desea.

Esta simulación es necesaria para asegurar que toda la mezcla se encuentre en fase vapor en la zona de evaporación.

Una vez conocida la presión, aproximadamente el 15% del volumen de los tubos [25] será llenado con dicha mezcla binaria, para luego ponerlos a la presión determinada.

Para asegurar un desplazamiento del vapor del extremo del reservorio caliente del tubo al frío, debe de haber una diferencia de presión, por lo general este valor es pequeño, a menos que se tengan grandes velocidades o diámetros muy pequeños. Ésta se calculará mediante la fórmula:

$$\Delta P_v = \frac{64}{\text{Re}_{D_{h,v}}} \frac{L_{eff}}{D_{h,v}} \left( \frac{1}{2} \rho_v V_v^2 \right)$$

Ecuación 13

donde:

Re = número de Reynolds (adimensional)

$L_{eff}$  = longitud del tubo, desde el reservorio caliente al frío. (m)

D = diámetro del hueco para flujo del vapor ( $m^2$ )

$\rho$  = densidad ( $kg/m^3$ )

V = velocidad del flujo del vapor (m/s)

### 3.4 Análisis económico

Se realizarán cálculos sencillos, para tener una idea de la factibilidad económica del proyecto. Estos valores sólo serán válidos para este proyecto en particular, tal cual se trabajó. Los resultados únicamente aportarán una idea general de las ventajas financieras que puede aportar esta tecnología en comparación con otra.