

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACEUTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LOS ALIMENTOS Y TECNOLOGIA QUIMICA

EVAPORADORES

Serie: monografías sobre Ingeniería en Alimentos

Publicación N° 15



Eduardo Segundo Castro Montero
Profesor Ingeniero Civil de Industrias Mención Química (PUC)
Magister en Ciencias de los Alimentos (UCh)

1997

Este libro está dedicado a un amor secreto
que podría surgir como la rosa al florecer

Agradecimiento

Agradezco a mis ayudantes Juan Peña, Alejandro Bustamante, Jordanno Araya, Edgardo Moreira e Ilse Veas.

Los evaporadores pueden ser :

- batch
- circulación natural
- película ascendente tubular
- película descendente tubular
- circulación forzada
- película barrida
- de placas equivalente al tubular



Batch

En la industria de alimentos es una bola (boule) con camisa de calefacción y agitador de paletas que barre la superficie caliente. Generalmente, el producto a concentrar tiene un tiempo de residencia largo, que puede afectar su operación. Para mejorar la eficiencia se utiliza en batería (2 a 3 unidades) conectado con un precalentador que es calentado con los vahos de cada bola.

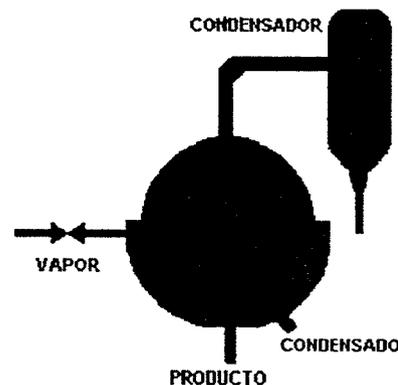


Fig. 1 Evaporador batch de cola.

El grupo que se va analizar a continuación es de los tubulares

Circulación natural

Se logra con un paquete corto de tubos que se puede calentar con una camisa que rodee el paquete de tubos o por un calentador externo.

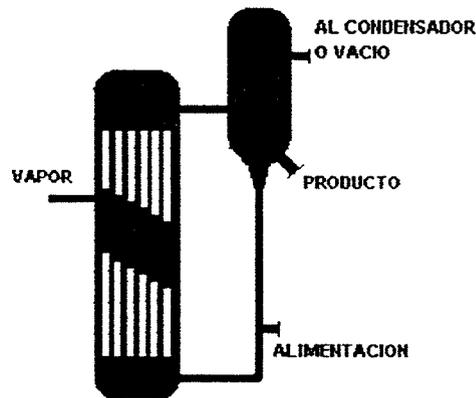


Fig. 2 Evaporador de circulación natural

Película ascendente tubular

El líquido que asciende por el interior de los tubos es calentado por el vapor que está en la carcasa que rodea el haz de tubos.

El líquido del interior de los tubos llega a la ebullición y se producen burbujas de vapor que arrastran el líquido hacia el separador. Este efecto acorta el tiempo de residencia y mejora fuertemente el coeficiente de transferencia de calor. Este necesita a los menos un ΔT de 25 °F para que actúe como fuerza directriz.

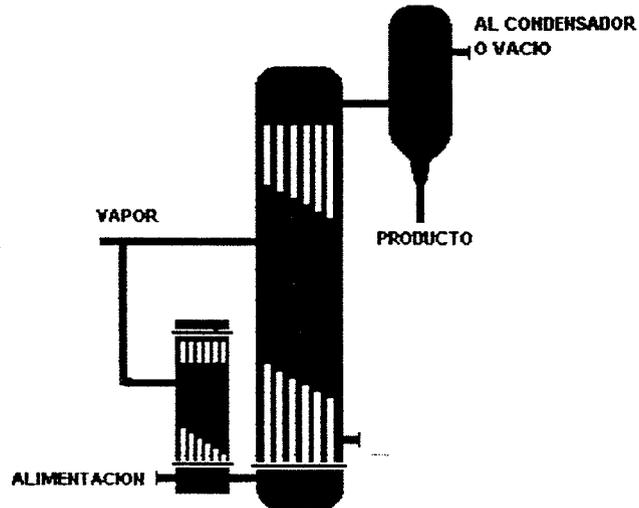


Fig. 3 Evaporador de película ascendente

Película descendente tubular

En este tipo de evaporador el problema más importante es la distribución pareja de la alimentación en los tubos.

El líquido baja impulsado por la gravedad, esto da una película más delgada en la pared del tubo, mejorando el tiempo de residencia y el coeficiente de transmisión de calor.

Este tipo no tiene limitaciones de ΔT mínimo.

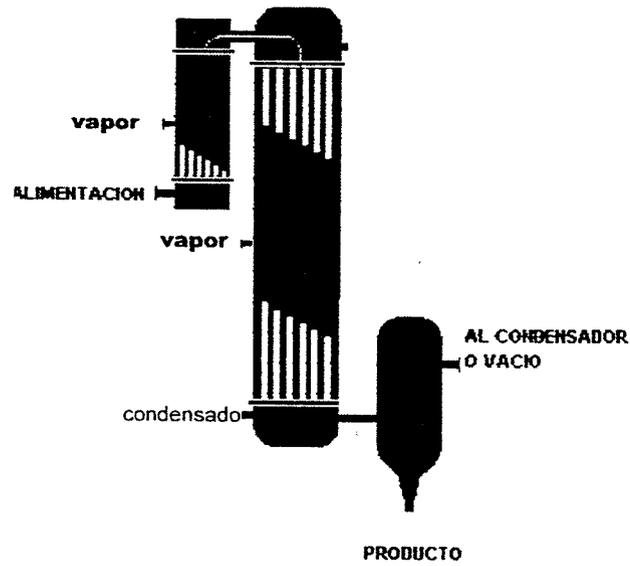


Fig. 4 Evaporador de película descendente

Película ascendente - descendente tubular

Este tipo de evaporador tiene la ventaja de la distribución de la alimentación en los tubos del de película ascendente con los requerimientos de más corta longitud que el de película descendente.

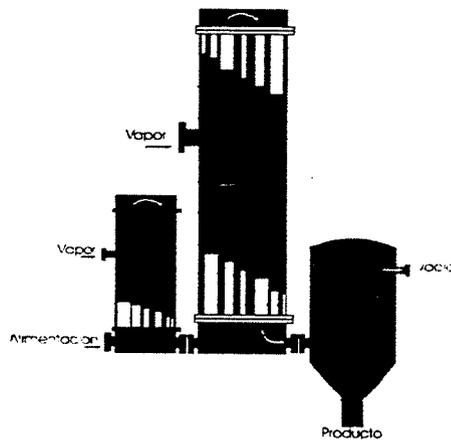


Fig. 5 Evaporador de película ascendente y descendente

Circulación forzada

Este tipo de evaporador es esencial para concentrar productos que puedan formar depósitos o cristales. El líquido circula a tan alta velocidad en la calandria de calefacción que la presión generada impide su ebullición hasta que no llegue al separador donde al bajar la presión se produce un flash.

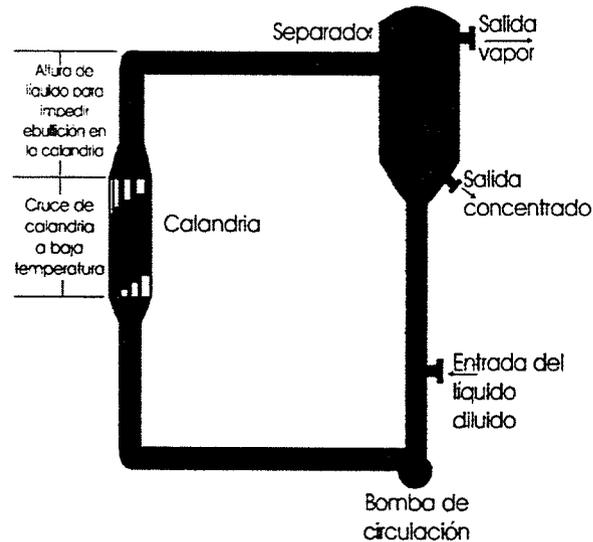


Fig. 6 Evaporador de circulación forzada

Película barrida

Este evaporador se presta para trabajar con fluidos altamente viscosos. La alimentación entra por la parte superior y es distribuida sobre la superficie caliente por las paletas del eje.

Por la parte inferior del evaporador sale el fluido caliente al separador donde se separan los vahos del concentrado.

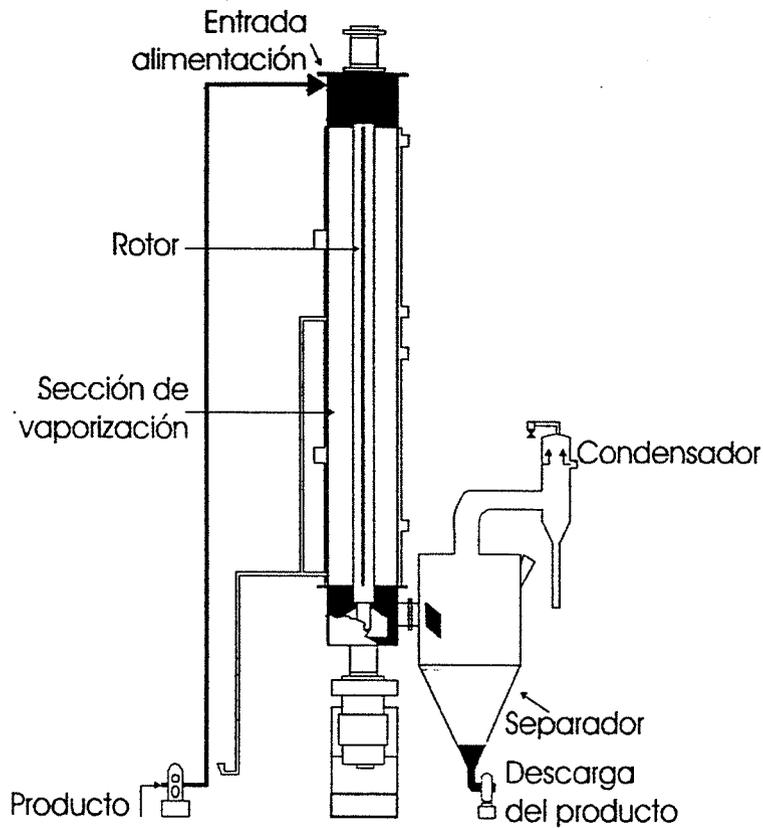


Fig. 7 Evaporador de superficie barrida

EVAPORADOR DE PLACAS

Estos evaporadores son de cuatro tipos de película ascendente - descendente, película descendente, Paravap (APV) y Paraflash (APV).

Película ascendente - descendente de placas

El evaporador está formado por placas que están dentro de un marco compacto.

Películas delgadas de líquido suben en la placa ascendente y bajan en la descendente a medida que viajan por las placas éste es vaporizado al estar en contacto con la placa de vapor y es descargado junto con su vaho al separador vapor - líquido. El producto es extraído y los vahos van al condensador, o al efecto siguiente.

El producto está en contacto por un tiempo muy corto con el vapor.

La firma APV tiene sistemas disponibles hasta velocidades de evaporación de 35.000 lb/h (15.909 kg/h).

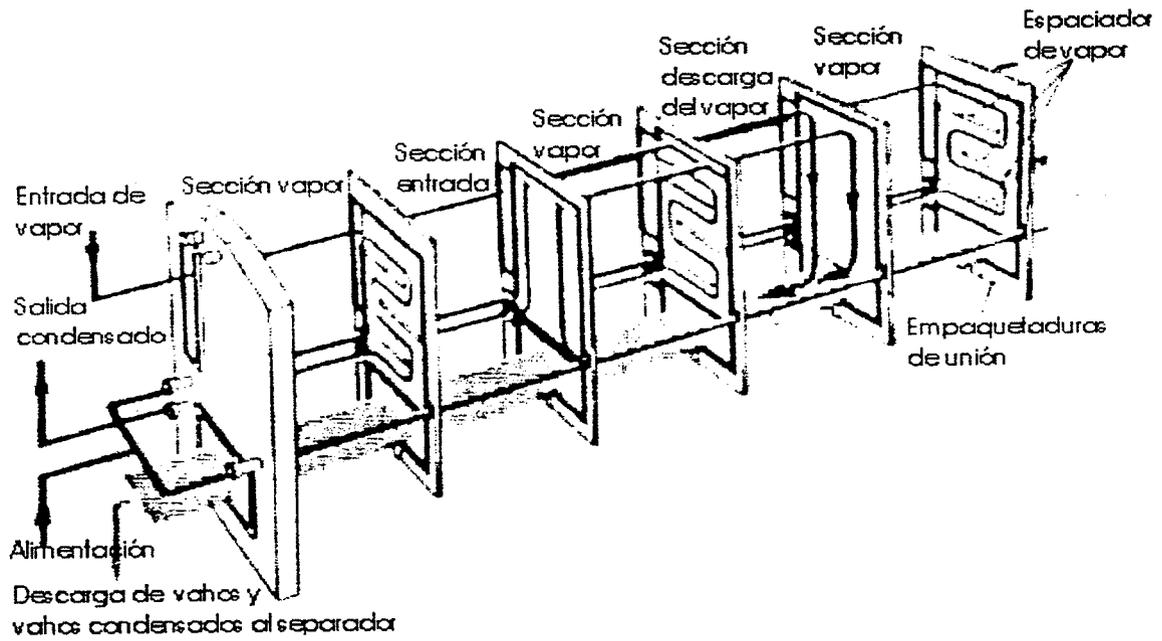


Fig. 8 Evaporador de película ascendente y descendente de placas

Película descendente de placa

Este tipo puede llegar a eliminar agua en caudales de 55.000 lb/h (25.000 kg/h) a 60.000 lb/h (27.273 kg/h) y como los tiempos de residencia son muy cortos se logra mejor calidad en el producto concentrado.

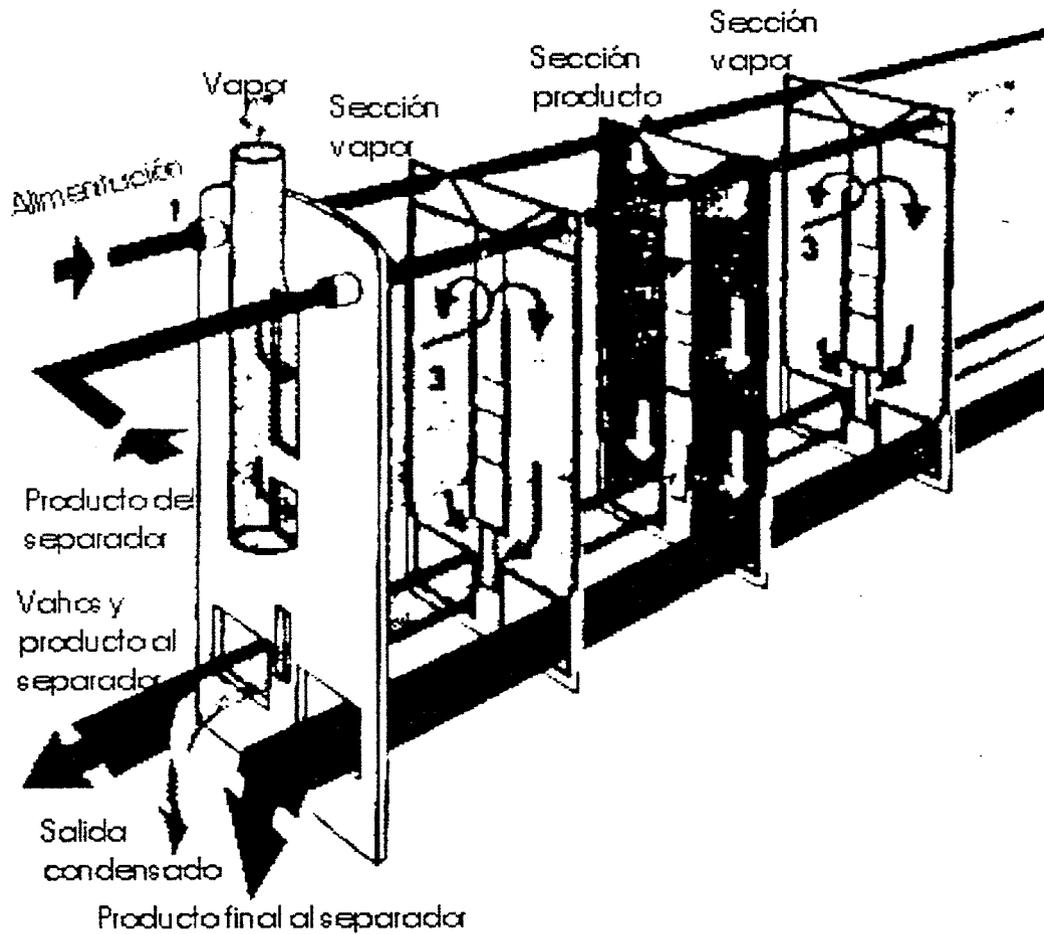


Fig. 9 Evaporador de película descendente de placa

Evaporador Paravap (APV)

Es para productos muy viscosos o con características de comportamiento no-newtoniano. Este tipo de evaporador reemplaza al de superficie barrida.

Se ha encontrado que si se deja evaporar un fluido dentro de la placa, esto crea una velocidad altísima de vapor, lo que crea una pulverización del líquido dentro

de la corriente de vapor, creando partículas de líquido rodeados de vapor lo que mejora fuertemente la evaporación.

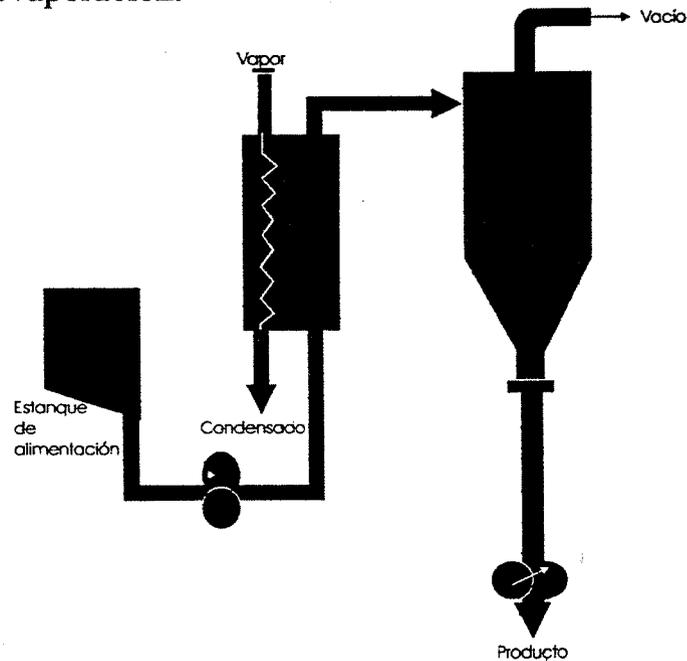


Fig. 10 Evaporador Paravap

Evaporador Paraflash (APV)

En este evaporador no se produce la ebullición en las placas ya que pasa a alta velocidad y con la presión adecuada para que no hierva hasta alcanzar el separador.

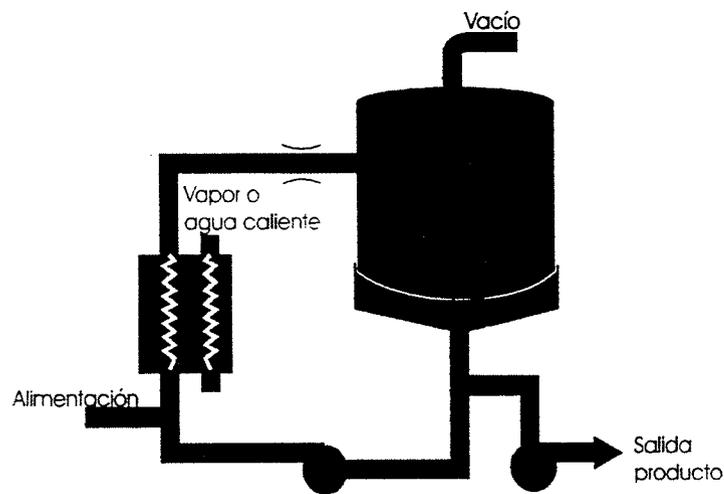


Fig. 11 Evaporador Paraflash

SELECCIÓN DE EVAPORADORES

Al seleccionar evaporadores deben tener en cuenta los siguientes factores:

1. Más alto coeficiente de transferencia de calor, ya que mientras más alto se menos será el área de transmisión de calor y por ende menor será la inversión.

Los evaporadores de más alto coeficiente de transmisión de calor son los de película descendente. Pero, este tipo de evaporador tiene la tendencia a formar depósitos en la superficie de transmisión de calor que en el caso de la industria de alimentos puede crear serios problemas sanitarios y de calidad.

2. Capacidad de evaporación. Hasta la capacidad de evaporar 60.000 lb/h (27.273 kg/h) de agua es necesario estudiar la posibilidad de utilizar tubular y de placas. Desde el punto de vista de costo de compra, los valores son muy cercanos, pero en la instalación los costos del de placa son menores que los tubulares. Además, los evaporadores de placa ocupan menos espacio que los tubulares.

Cuando la capacidad de evaporación del agua es sobre 60.000 lb/h (27.273 kg/h) hay que considerar solamente los evaporadores tubulares.

3. Material de construcción de los evaporadores.

De acuerdo al producto se debe elegir el material de construcción. APV presenta la siguiente tabla como guía.



Tabla 1. Guía de materiales de construcción de evaporadores

Producto	Materiales de construcción
Mayoría de los productos de la industria láctea	acero inoxidable 304/316
Mayoría de los productos de la industria de alimentos	acero inoxidable 304/316
Mayoría de los jugos de frutas	acero inoxidable 304/316
Mayoría de los productos farmacéuticos	acero inoxidable 304/316
Sales como NaCl y otras	Monel y titanio
Acido sulfúrico < 50%	FFPR / grafito RLCS / grafito
Acido sulfúrico < 72%	Recubrimiento de plomo tantalio o de plomo
Acido clorhídrico	FFPR / grafito / RLCS
Soda cáustica <40%	acero al carbono sin tensiones residuales
Soda cáustica (con NaCl)	Monel / níquel / NILCS
Nitrato de amonio	acero inoxidable 304/304L
Sulfato de amonio	Acero inoxidable 316

Nota : FFPR Fibra con resina fenólica
 RLCS Acero al carbono recubierto de goma
 NILCS Acero al carbono recubierto con níquel
 304L Acero inoxidable que tiene 0,03% de C (el 304 tiene 0,08% C) y que puede soldarse sin que precipiten carburos

4. No hay que olvidar que puede usarse más de un evaporador para concentrar un producto.

La unidad principal de la batería de evaporadores elimina la mayor parte del agua o solvente hasta el punto donde el fluido puede empezar a tener problemas tales como aumento fuerte de la viscosidad o saturación de líquido para que empiece a cristalizar.

5. Si es necesario utilizar evaporadores para cristalizar un producto; no hay que olvidar que la cristalización se debe realizar en uno de circulación forzada y tubular. Pero si el problema no es que cristalice sino el de formación de depósitos en la superficie de intercambio de calor, según APV el sistema Paraflash es más eficiente en que la velocidad de circulación es menor y va a requerir menos potencia. En la tabla siguiente APV compara los equipos tubulares y de placa.

Tabla 2. Comparación de evaporadores tubulares y de placa.

Propiedades de la solución:	gravedad específica	1,35
	calor específico	0,62
	conductividad térmica	0,26 Btu
	viscosidad	100 cP

	Unidad tubular	Unidad de placas
Carga de calor Btu/h	5×10^6	5×10^6
Equipo	Tubo 1¼" O.D., 16SWG de 25'	Placa APV R10
Superficie total pie ²	2.620	2.622
T° de entrada del fluido °F	160	160
T° de salida del fluido °F	161,08	170
T° de servicio °F	190	190
Caudal GPM	10.975	1.610
Δ P total psi	16,9	10,8
BHP consumido	107,7	10,1

Si se debe utilizar evaporador tubular debido a que los cristales son muy grandes para el espacio entre las placas, la velocidad del fluido de diseño en los tubos es de 6 a 8 pie/s o mayor para minimizar los depósitos en los tubos.

Para decidir si la calandria es de uno o tres pasos, hay que tener en cuenta que

el ΔP es mayor en tres pasos que en uno.

En la tabla siguiente se muestra la comparación de la calandria de uno y tres pasos en diferentes arreglos.

Tabla 3. Comparación de utilizar calandria de uno y tres pasos en evaporador de circulación forzada de triple efecto.

Alimentación: jarabe de maíz se concentró de 6,14% a 51% caudal 102.000 lb/h (46.364 kg/h).

	1 ^{er} efecto		2 ^o efecto		3 ^{er} efecto	
	1 paso	3 pasos	1 paso	3 pasos	1 paso	3 pasos
Caudal de circulación [GPM]	12.275	6.190	12.275	6.190	14.500	4.800
Area de transferencia de calor [pie ²]	4.434	5.541	4.434	5.541	4.434	4.656
BHP consumido	50	91	66	113	156	192

	1 paso	3 pasos
Inversión	US\$ 491.280	US\$ 540.000
BHP consumido	272	396

Se concluye que la calandria de un paso es más económica que la de tres pasos.

- La estimación del coeficiente de transmisión de calor a partir de las propiedades físicas del líquido a concentrar es más factible en unidades de circulación forzada que en los de película. En estos últimos el coeficiente es determinado por experiencia.

Recompresión mecánica del vapor MVR

Existen instalaciones de este tipo en muchas industrias de alimentos como las siguientes:

- Imperial Sugar Company

Tienen dos unidades en arreglo de dos etapas APV de película descendente de 68" de diámetro.

La alimentación es azúcar líquido de 293.000 lb/h (133.182 kg/h) con 65% de sólidos. La concentración final de los evaporadores es 77,6% de sólidos.

La alimentación es precalentada con los vahos del evaporador, que está compuesto de un exceso de vapor de escape y vapor de la caldera, el sistema opera comprimiendo el vapor con un compresor centrífugo de una etapa con vanos deslizables en la entrada que permiten ajustarlo a la capacidad de operación. El compresor es movido por electricidad para reducir los costos de operación.

- Fideicomiso del Limón

La planta APV opera con jugo de limón mexicano a 12.162 lb/h (15.528 kg/h) con una concentración de 8 °B.

La planta consta de una batería APV de doble efecto con tres etapas de evaporador de película descendente.

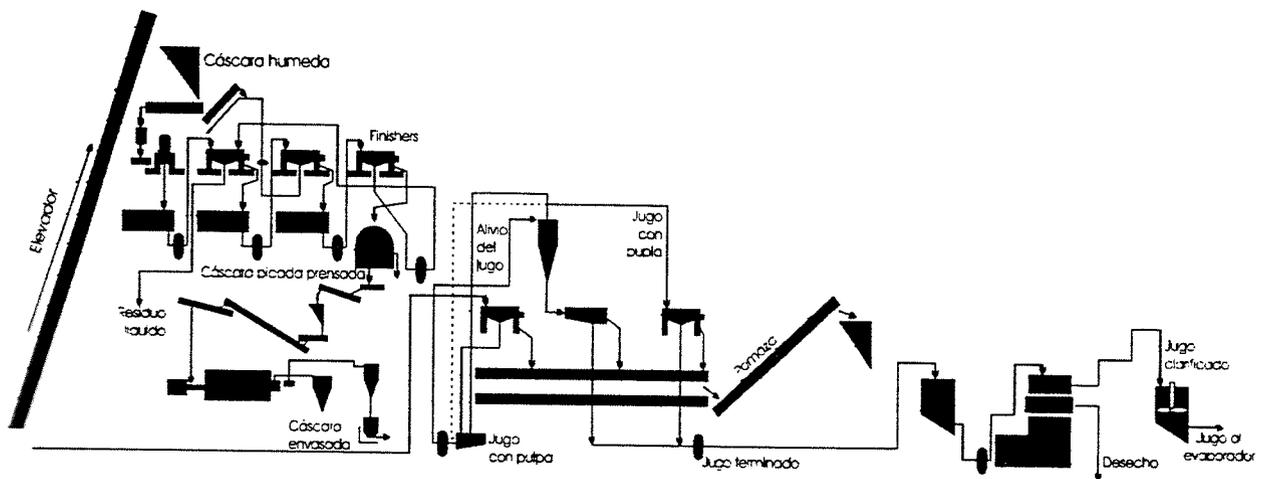
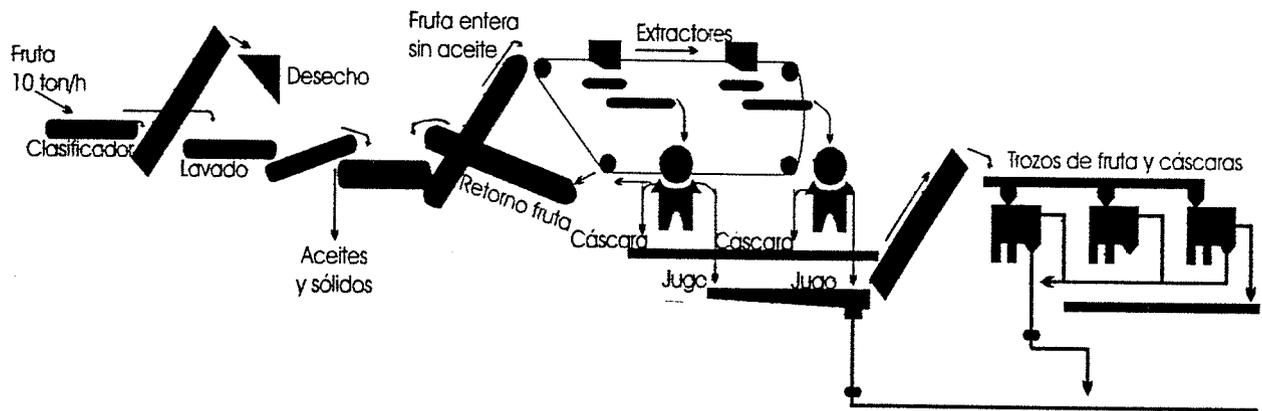
Combina efecto con unidades de intercambiadores de placa divididos en dos secciones a medida que el jugo baja es calentado por vapor de la placa de vapor.

Una vez que es descargado al separador, éste es bombeado al lado derecho de la placa de producto donde se completa la concentración.

El concentrado final es extraído mientras el vaho para al efecto siguiente del evaporador.

El sistema evapora 10.000 lb/h (4.545 kg/h) de agua produciendo 2.162 lb/h (983 kg/h) de jugo de limón concentrado de 45 °B.

Se logra una mejor eficiencia térmica utilizando un sistema Paraflow (APV) regenerativo de intercambiador de placas. El concentrado a 120 °F se enfría a 85 °F calentando el jugo de entrada que está a 70 °F, éste se sigue precalentando con agua caliente hasta 190 °F. El concentrado se sigue enfriando con intercambiadores de placa HX Paraflow (APV) en los que circula glicol.



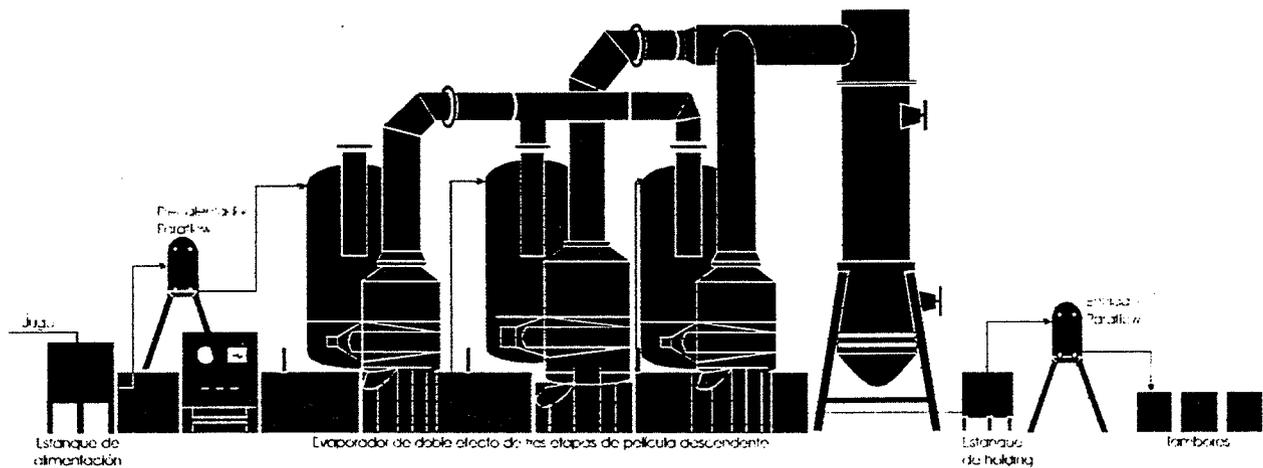


Fig.12 Proceso de la empresa Fideicomiso de Limón.

- Pectina de México

La unidad de evaporación es del tipo de película descendente y es de cuatro efectos con recompresión de vapor por eyectores de vapor.

La alimentación de la solución de pectina es de 48.000 lb/h (21.818 kg/h) eliminando 36.000 lb/h (16.364 kg/h) de la solución primitiva.

La eficiencia térmica es máxima al utilizar los vahos, el del primer efecto y la descarga del vapor del termocompresor para precalentar la alimentación por medio de un intercambiador de placas Paraflow (APV).

Después de haber sido concentrado en una proporción de 4 a 1, el líquido de salida de la batería de evaporadores se enfría en una unidad Paraflow (APV).

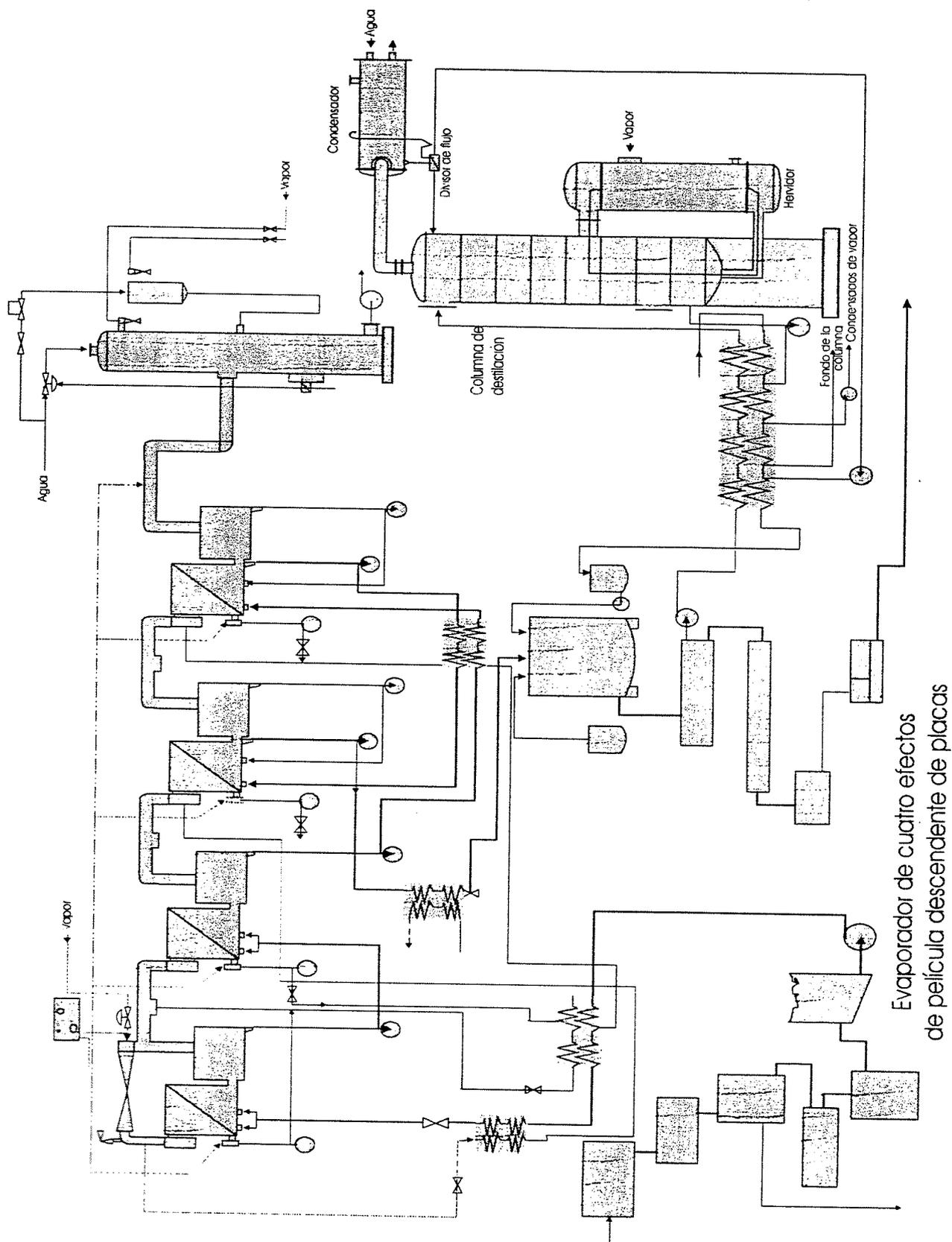


Fig. 13 Proceso de la planta Pectina de México

- Knudsen Corporation

En esta empresa se concentra la crema y el suero en una batería de evaporadores de película descendente de 5 etapas y posee un compresor centrífugo de 600 HP; el suero con un caudal de 52.325 lb/h (23.784 kg/h) se concentra de 8,5 a 45% de sólidos totales. En crema pasa de 9% a 37% sólidos.

- Associated Milk Producers

La planta procesa crema y suero en una batería de evaporadores de seis etapas triple efecto con recompresión del vapor con eyectores y con un finisher que entrega producto con 50% de sólidos.

Como puede verse en el diagrama del proceso, la utilización eficiente de la energía es primordial.

EVAPORADOR DE 3 EFECTOS
6 ETAPAS DE PLACAS DE PELICULA DESCENDENTE CON TERMOCOMPRESION

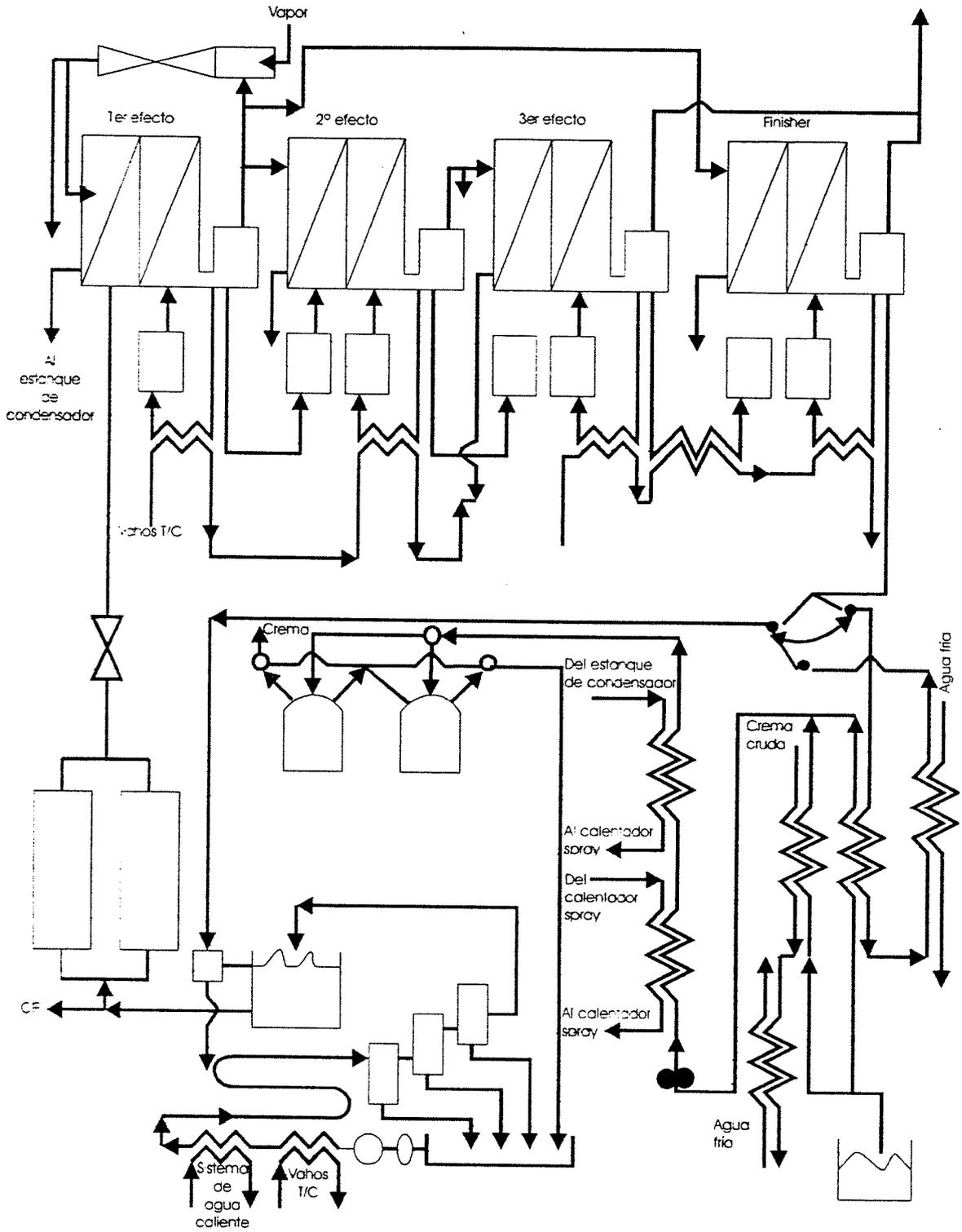


Fig. 14 Proceso de la planta de Associated Milk Producers, Inc.

Consumo de energía en los sistemas de evaporación

Debido a los costos crecientes de energía, ya que, la energía fósil debería ser cada vez más escasa en el futuro; se debe pensar en bajar el consumo de energía en los sistemas de evaporación con algunos de las medidas siguientes:

- 1) Mayor número de efectos en el evaporador.
- 2) Utilizar termocompresión por vapor o compresión mecánica del vapor.
- 3) Asegurarse que la alimentación del evaporador ha sido precalentada hasta su punto de ebullición.
- 4) Utilizar todos los calores del sistema de evaporación.
- 5) Aislar el equipo de modo de minimizar las pérdidas de calor.

Un termocompresor agrega generalmente uno o más efectos a bajos aumentos de inversión porque el área de intercambio en los efectos entre la succión y la descarga del termocompresor debe aumentar, este aumento de área es mínimo debido a que el coeficiente de transmisión de calor es muy eficiente. Hay que cuidar que el ΔT en el termocompresor sea bajo para asegurarse una razón alta de calor de vahos a vapor.

Al usar termocompresión por vapor es necesario que no se tenga elevación alta del punto de ebullición en los efectos considerados. Este efecto provocaría una pérdida del ΔT disponible para transmisión de calor.

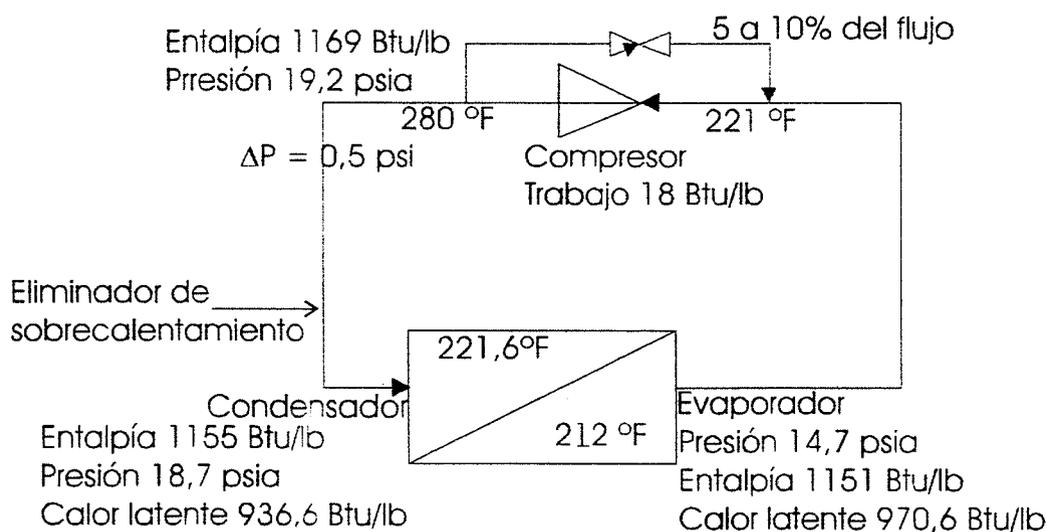
También hay que considerar que los termocompresores son algo inflexibles y no operan bien al salir de las condiciones de diseño.

Tampoco deben utilizarse cuando el producto puede depositarse en los tubos, ya que la presión del termocompresor se eleva sobre la de diseño y la cantidad de vahos disminuye afectando la capacidad del evaporador.

El precalentamiento de la alimentación hace reducir los costos de energía y en este caso los intercambiadores de placa son los más útiles ya que utilizan mejor los ΔT pequeños.

La otra forma de bajar los consumos de energía es con la utilización de la recompresión mecánica del vapor (MVR, Mechanical Vapor recompresión). El compresor que realiza esta etapa del proceso es movido por electricidad.

El sistema de recompresión mecánica del vapor se muestra en la figura siguiente:



La figura presenta un evaporador con un líquido que hierve a 212 °F (presión atmosférica). Todo el vaho producido pasa por el compresor donde se produce un aumento de presión que es limitado, en el ejemplo es de 4,5 psi (presión a la salida del compresor 19,2 psia y presión de entrada 14,7 psia)

También se supone una pérdida de presión por roce y otros de 0,5 psi luego la presión disponible de los vahos es $19,2 - 0,5 = 18,7$ psia, que es la presión disponible para el evaporador donde el calor latente de 963,6 Btu/lb permitiendo evaporar más agua del líquido.

A presión atmosférica la entalpía del vaho es 1151 Btu/lb y a la salida del compresor es 1169 Btu/lb de modo que la energía que habría que suplementar con el compresor sería 18 Btu/lb ($1169 - 1151 = 18$) para que el vaho pasara de 14,7 psia a 19,2 psia.

La economía teórica del vapor sería $970/18 = 54$ efectos. A esto habría que agregar la eficiencia del sistema del compresor que está entre 65 y 72 % y también hay que considerar la eficiencia del by-pass que está entre 5 y 10% lo que lleva la economía a 32 - 35 efectos y por esto es que en la bibliografía se encuentra la frase que un sistema MVR equivale a 32 - 35 efectos de evaporador y al considerar el costo del vapor y de la electricidad para mover el compresor, la cifra de la economía equivale a 19 efectos.

También el sistema MVR deja condensado a más temperatura que es ideal para precalentar la alimentación. Si la razón de concentración es 10 a 1 se logra una corriente de condensado que es el 90% de la alimentación.

La razón de compresión del compresor es la que determina la diferencia de temperatura para el evaporador según se puede ver en la tabla siguiente :

Tabla 4. ΔT (°F) saturado a varias razones de compresión de los compresores

Razón de compresión	ΔT saturado a temperatura de ebullición		
	130 °F	170 °F	212 °F
1,2	6,9	8,0	9,3
1,4	12,9	15,0	17,5
1,6	18,2	21,2	24,7
1,8	23,0	26,8	31,2
2,0	27,3	31,9	37,2

Por ejemplo si un evaporador está operando a 212 °F y presión atmosférica con una razón de compresión de 1,4, la presión en la descarga del compresor es $(1,4 \times 14,7) \text{psia} = 20,58 \text{psia}$, a esta presión el vapor condensa a 229,5 °F luego el ΔT es $(229,5 - 212)^\circ\text{F} = 17,5 \text{ }^\circ\text{F}$ antes de considerar la pérdidas.

El desarrollo de los compresores centrífugos para vapor han permitido que las razones de compresión suban a 2,0 lo que permite alcanzar ΔT bastante altos.

Si en un evaporador de película el ΔT disminuye es posible suplir este ΔT con un ventilador.

Esto produce una razón de compresión de 1,2 a 1, lo que da un ΔT de 7 u 8 °F antes de las pérdidas para la evaporación. El sistema con ventilador sólo se utiliza en un efecto de evaporador de película sin punto de ebullición significativo.

La utilización de ventiladores requiere menos energía que los compresores centrífugos y el vapor de alimentación al ventilador no es sobrecalentado.

También se han utilizado sopladores en unidades MVR hasta 15.000 lb/h (6818 kg/h) de capacidad.

Para estimar la potencia necesaria para los compresores se reproducen los siguientes datos proporcionados por APV.

T° de ebullición 130 °F			T° de ebullición 170 °F			T° de ebullición 212 °F		
CR	ΔT	HP	CR	ΔT	HP	CR	ΔT	HP
1,3	10,00	9,39	1,3	11,65	10,01	1,3	13,53	10,67
1,4	12,91	12,18	1,4	15,03	12,99	1,4	17,47	13,85
1,6	18,21	17,38	1,6	21,23	18,54	1,6	24,69	19,76
1,8	22,98	22,15	1,8	26,81	23,63	1,8	31,20	25,18
2,0	27,31	26,57	2,0	31,89	28,34	2,0	37,46	30,20
2,2	31,30	30,69	2,2	36,57	32,74	2,2	41,31	34,88

Nota : CR razón de compresión

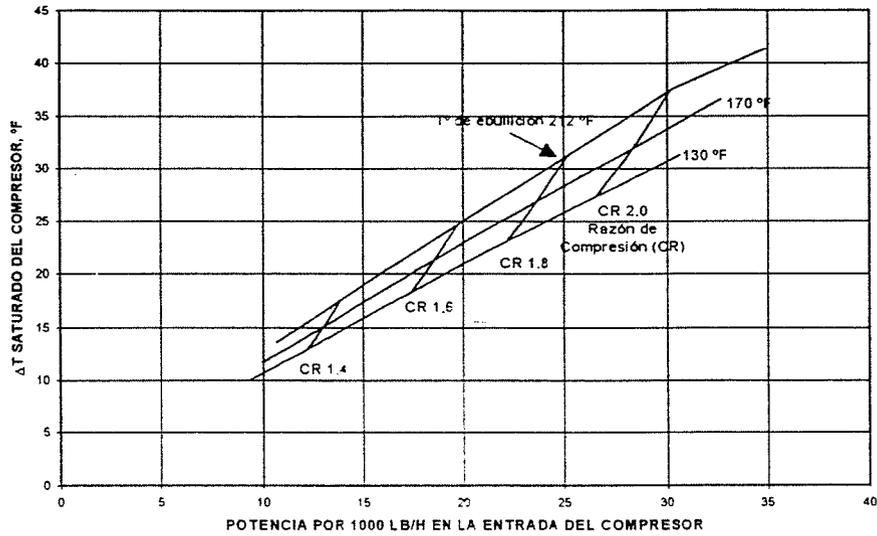


Fig. 15 Potencia versus ΔT para compresores centrífugos

T° de ebullición 130 °F			T° de ebullición 170 °F			T° de ebullición 212 °F		
CR	ΔT	HP	CR	ΔT	HP	CR	ΔT	HP
1,1	3,59	2,99	1,1	4,17	3,19	1,1	4,85	3,41
1,2	6,91	5,79	1,2	8,04	6,18	1,2	9,34	6,60
1,3	10,00	8,43	1,3	11,65	9,00	1,3	13,53	9,60

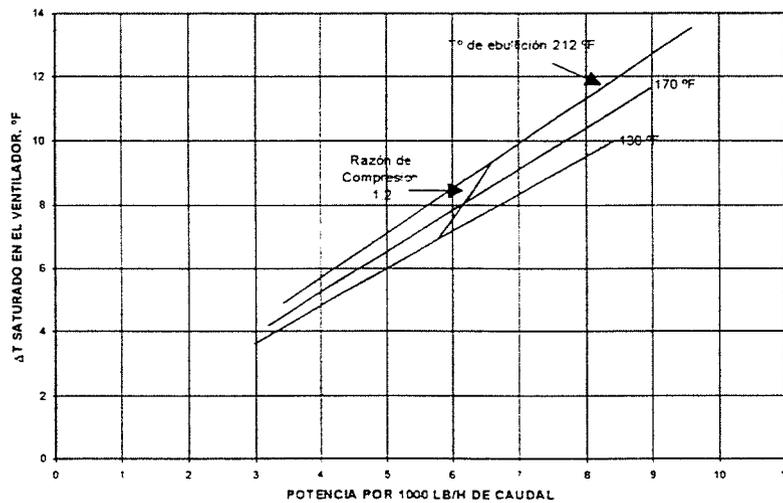


Fig. 16 Potencia versus ΔT para ventiladores

Nota : El vapor se supone sobrecalentado por vapor de caldera

En el caso de un evaporador MVR que a partir de vahos a 212 °F y 14,7 psia (entalpía 1150,5 Btu/lb) produce vahos a 220 °F, 17,2 psia (entalpía 1153,4 Btu/lb) sólo requeriría agregar $(1153,4 - 1150,5) \text{ Btu/lb} = 2,9 \text{ Btu/lb}$.

Durante la compresión la entropía se mantiene constante (caso ideal) o aumenta (real), con las eficiencias de este tipo de proceso, la temperatura llega a 243 °F (entalpía 1164,6 Btu/lb). La energía entregada por el compresor es $(1164,6 - 1150,5) \text{ Btu/lb} = 14,1 \text{ Btu/lb}$.

Pero se requiere que el vaho esté a 220 °F esto se logra introduciendo condensado a 220 °F que extrae $(1164,6 - 1153,4) \text{ Btu/lb}$, esta energía calienta el condensado vaporizando parte de él, lo que es llamado vapor de exceso (excess vapor) que en este caso es $(112/965,2) \text{ lb} = 0,0116 \text{ lb}$ por cada libra de vapor que sale del compresor. Este se utiliza o va al condensador del sistema.

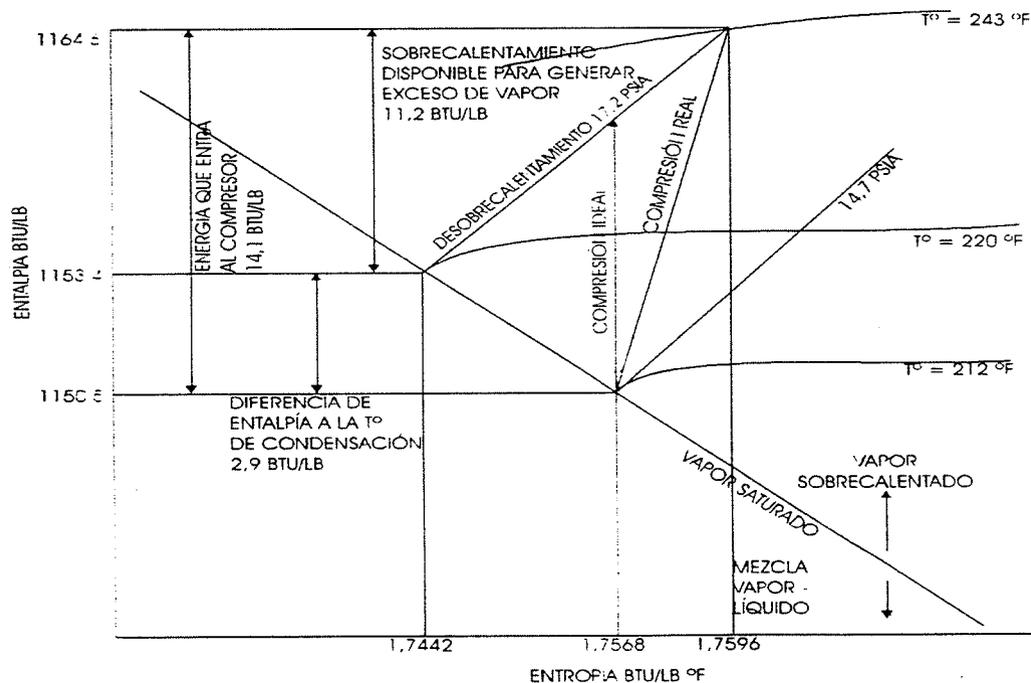


Fig. 17 Diagrama entalpía - entropía

La utilización eficiente de la energía se puede visualizar en el esquema de la figura siguiente:

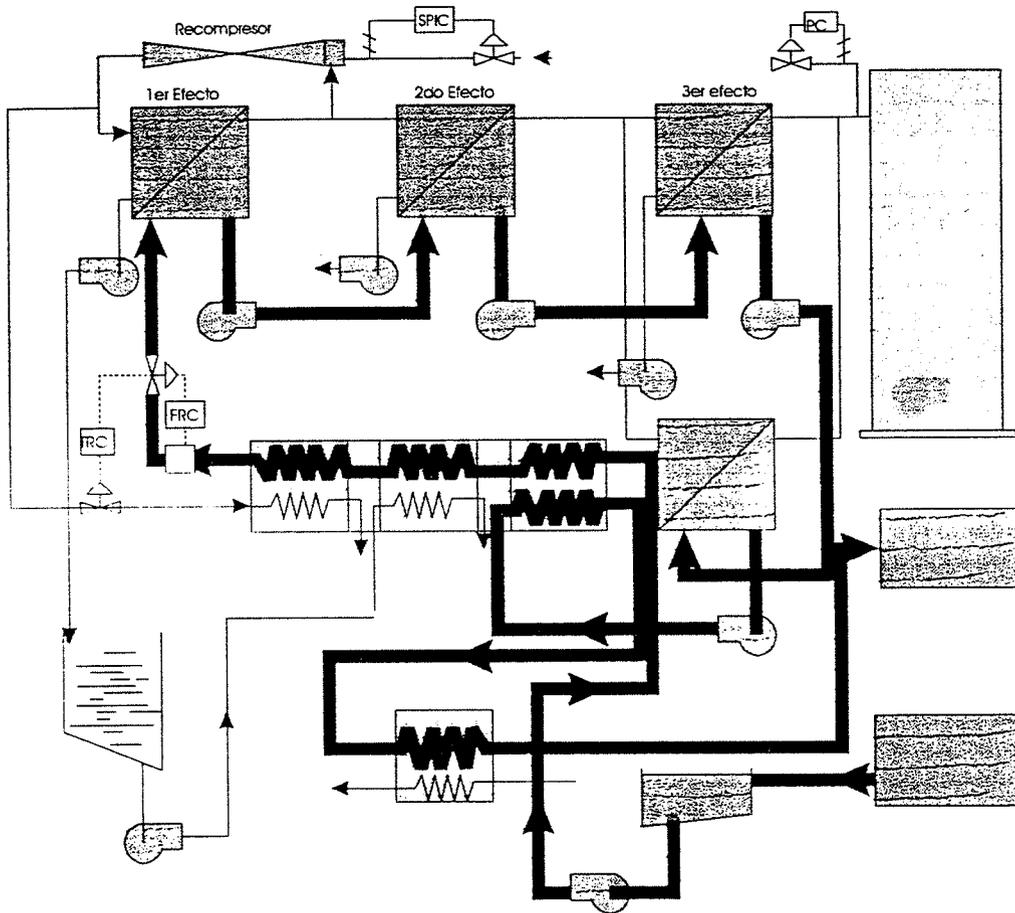


Fig. 18 Evaporador de 3 efectos con recompresión por eyectores de vapor

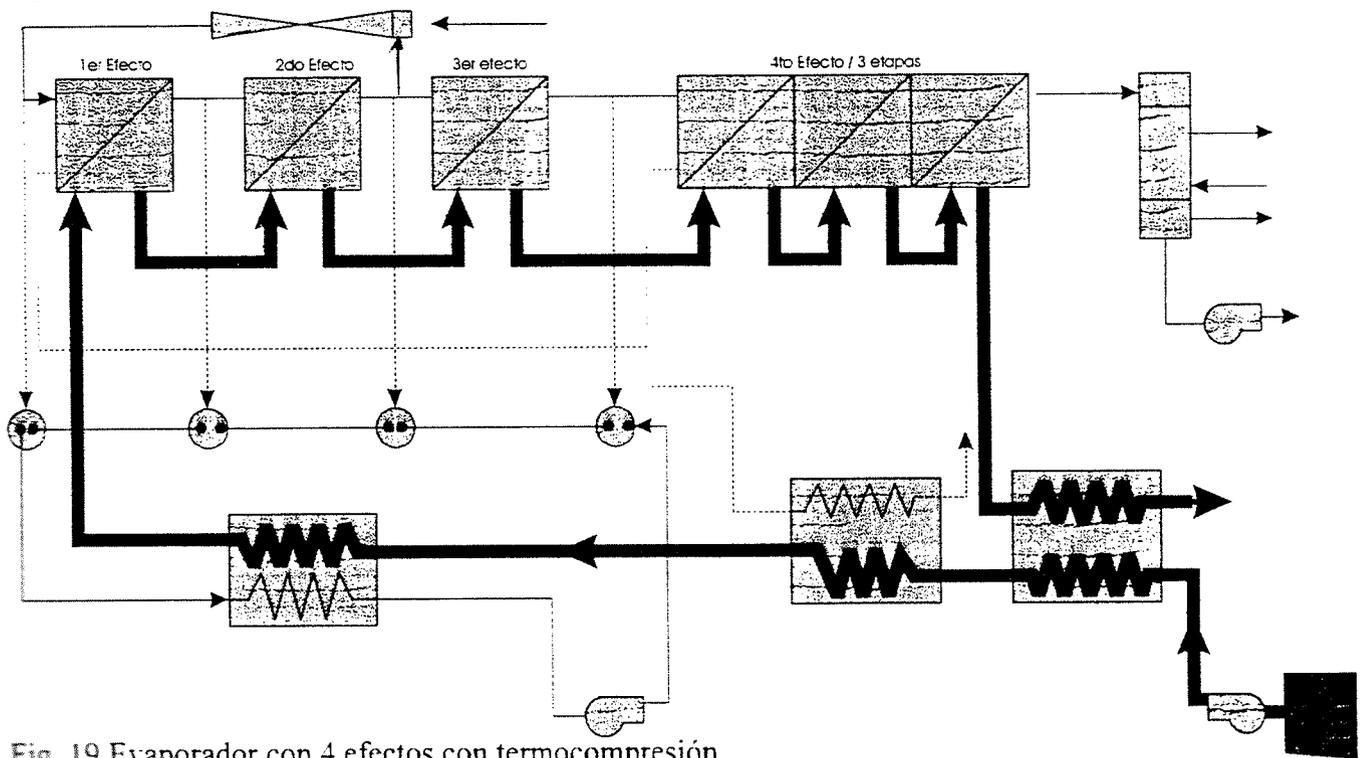


Fig. 19 Evaporador con 4 efectos con termocompresión

REFERENCIAS

- APV. APV Evaporator handbook. 3rd Ed. APV Crepaco Inc. Chicago. USA.
- APV. Concept to concentrate a selection of evaporator case histories. APV Crepaco Inc. Chicago. USA.