

Representación y comparación entre las curvas de operación de un modelo de Planta Desaladora que utiliza como sistema de recuperación de energía SIP y Turbinas Pelton.

Por: Juan María Sánchez (ECOAGUA) y Ruth Sánchez Castillo (ECOAGUA)

1.- INTRODUCCIÓN

La aplicación cada vez más generalizada de la desalación para aumentar los recursos disponibles de agua de calidad, la necesidad de que el costo de este agua sea competitivo con otras fuentes y, en consecuencia, lo más bajo posible, han determinado en los últimos años la actuación de los fabricantes, empresas e ingenierías del sector, optimizando los equipos que se emplean habitualmente en Plantas desaladoras aumentando los rendimientos, disminuyendo pérdidas de carga, etc. y por el otro, concibiendo nuevas tecnologías y equipos que permitan mejorar la recuperación energética. Todo esto ha llevado a lo largo de los últimos años a una disminución del consumo específico de las Plantas Desaladoras.

Ahora la gran pregunta que nos hacemos es hasta donde es posible llegar en la disminución del consumo específico, en que punto nos encontramos en estos momentos y cuales son los siguientes pasos.

En este informe trata de dar una respuesta a las preguntas planteadas desde el punto de vista de proceso, realizando tres hipótesis diferentes: la primera hipótesis estudia un sistema ideal de proceso y membranas, la segunda hipótesis recoge una situación un poco más acorde con la realidad y la tercera una situación bastante aproximada a la realidad utilizando dos sistemas de recuperación de energía distintos las SIP y las turbinas Pelton.

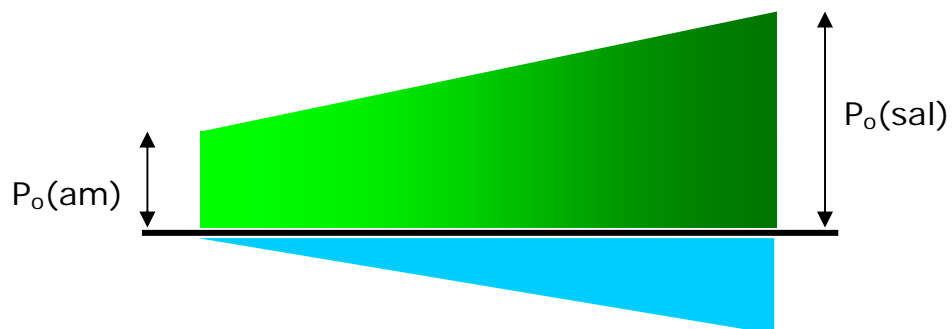
2.- HIPÓTESIS 1

Vamos a establecer unas hipótesis ideales del proceso y de las membranas:

HIPOTESIS 1:

1. La membrana es ideal de forma que:
 - a) No necesita presión transmembrana para dejar pasar el agua, la cual, solo alcanzando el valor de la presión osmótica, ya pasa al otro lado.
 - b) La membrana rechaza el 100% de las sales, de forma que el producto no contiene ninguna
 - c) La membrana no tiene perdidas de carga ni del lado del producto, ni del lado del agua de mar/salmuera.

2. La presión se da a la solución salina mediante nanomotores que le dan justo la presión osmótica que tiene en cada punto de la superficie de la membrana.
3. La energía restante en la salmuera es recuperada con el 100% de eficacia.
4. No existen ningunas otras pérdidas de carga y/o energía en el sistema.
5. Todo el proceso ocurre a la misma cota.



En esta situación equivale a aplicar al producto obtenido en cada punto de la membrana (dq), la presión correspondiente a la osmótica del agua salina que tiene encima.

Una expresión de la Presión Osmótica es la siguiente:

$$\Pi_o = a \times (T + b) \times \frac{S}{c - e \times S} \quad (1); \text{ donde:}$$

T = Temperatura del agua de mar ($^{\circ}\text{C}$)

S = Concentración en sales (ppm)

Π_o = presión osmótica (bares)

a,b,c y e son constantes

Si ahora hacemos un balance de sales diferencial, tendremos en un punto de la membrana:

Caudal de agua salina: $Q - q_i$

$$\text{Salinidad en ese punto: } S_i = \frac{Q \times S_0}{Q - q_i} \quad (2)$$

Siendo:

Q = caudal de agua salina introducida al principio

S_0 = salinidad inicial del agua introducida

q_i = caudal de producto obtenido hasta el punto i

En el punto siguiente $i+1$, tendremos el siguiente balance:

$$S_i + \Delta S = \frac{Q \times S_0}{Q - q_i - \Delta q} \quad (3), \text{ de ambas ecuaciones (2)+(3) sacamos:}$$

$$(S_i + \Delta S) \times (Q - q_i - \Delta q) = Q \times S_0 \quad \text{y} \quad S_i \times (Q - q_i) = Q \times S_0$$

Igualando y agrupando, tendremos:

$$\Delta S \times (Q - q_i - \Delta q) = S \times \Delta q;$$

$$\frac{dS}{dq} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta q} = \frac{S}{Q - q - \Delta q} = \frac{S}{Q - q}$$

Según las hipótesis de partida que hemos establecido, la energía necesaria para el proceso de osmosis será:

$$dE = K \times \Pi_o(S, T) \times dq; \text{ donde:}$$

K = constante dependiente de las unidades

Y el resto de variables ya ha sido definido anteriormente. Sustituyendo:

$$dE = K \times a \times (T + b) \times \frac{\frac{Q \times S_0}{Q - q}}{c - e \times \frac{Q \times S_0}{Q - q}} \times dq; \text{ si integramos entre valores de } 0 < q < 1,$$

tendremos:

$$E = \int_0^1 Ka(T + b) \frac{Q \times S_0}{c(Q - q) - eQS_0} dq = \left[Ka(T + b)QS_0 \times \frac{-1}{c} \ln(c(Q - q) - eQS_0) \right]_0^1$$

$$E = \frac{Ka(T + b)QS_0}{c} \times \ln \frac{cQ - eQS_0}{c(Q - 1) - eQS_0} = \frac{Ka(T + b)QS_0}{c} \times \ln \frac{c - eS_0}{c \left(1 - \frac{1}{Q}\right) - eS_0};$$

Pero, por otra parte, el caudal inicial Q necesario para producir 1 m^3 de agua es: $1/FC$, de donde tendremos:

$$E = \frac{Ka(T + b)S_0}{c \times FC} \times \ln \frac{c - eS_0}{c(1 - FC) - eS_0} \quad (Kwh / m^3)$$

Esta es la ecuación que nos da la energía específica necesaria en función de la temperatura del agua de alimentación, la salinidad inicial del agua de alimentación y el factor de conversión. Si hacemos los cálculos para $T = 18^{\circ}\text{C}$ y $S = 40500$ ppm. y factor de conversión entre 25% al 60%, tendremos la siguiente Tabla:

FACTOR CONVERSIÓN	CONSUMO ESPEC (Kwh/m3)
25%	0,9421
30%	0,9750
35%	1,0113
40%	1,0516
45%	1,0967
50%	1,1477
55%	1,2062
60%	1,2742

Los valores de la Tabla anterior coinciden con la energía desprendida en cada caso por la disolución de las sales en el agua, es por tanto la energía que sería necesario aportar si el proceso fuese reversible.

3.- HIPÓTESIS 2

Es igual a la anterior solo que introducimos una situación un poco más acorde con la realidad y es que la presión a dar al producto es la correspondiente a la presión osmótica de la salmuera final, ya que los nano-motores no parece que hoy por hoy se puedan utilizar. El resto de condiciones son exactamente las mismas.

La ecuación es:

$W = K \times \Pi_s \times q$ y el consumo específico será:

$$E = \frac{W}{q} = K \times \Pi_s = K \times a \times (T + b) \times \frac{S_s}{c - e \times S_s}; \text{ pero: } S_s = \frac{S_0}{1 - FC} \text{ y sustituyendo}$$

quedará:

$$E = Ka(T + b) \times \frac{S_0}{c(1 - FC) - eS_0};$$

si hacemos los cálculos para valores iguales a los anteriores, obtendremos la Tabla siguiente:

FACTOR CONVERSIÓN	CONSUMO ESPEC (Kwh/m3)
25%	1,0990
30%	1,1819
35%	1,2783
40%	1,3918
45%	1,5275
50%	1,6924
55%	1,8973
60%	2,1586

4.- HIPÓTESIS 3

Si finalmente se establece una hipótesis un poco más cerca de la realidad, con los siguientes criterios:

1. La planta está situada en la cota 5 sobre el nivel del mar
2. El rendimiento del bombeo de agua de mar es de 0,86 x 0,95
3. El bombeo de agua de mar tiene 20 m.c.a. de pérdidas en filtraciones.
4. El bombeo de alta presión tiene un rendimiento de 0,88 x 0,97
5. Las membranas siguen siendo ideales, tal y como las hemos dejado en la Hipótesis 1, salvo que el agua de alimentación tiene una pérdida de carga en el tubo de presión de 2 bares.
6. El rendimiento en la recuperación de la energía es del 97%.
7. El producto obtenido se queda en la cota 5 de la planta y no existen pérdidas de carga de otro tipo que las mencionadas.

Con estas hipótesis la energía específica para el proceso de Osmosis Inversa será:

Consumo de energía en bombeo de agua de mar:

$$E_{am} = \frac{K \times (5 + 10)}{10,2 \times 0,86 \times 0,95 \times FC}$$

Consumo de energía en bombeo de alta presión:

$$E_{ap} = \frac{K \times \Pi_s}{0,88 \times 0,97 \times FC}$$

La recuperación de energía de la salmuera valdrá:

$$ER_s = K \times \left(\frac{1}{FC} - 1 \right) \times (\Pi_s - 2) \times 0,97$$

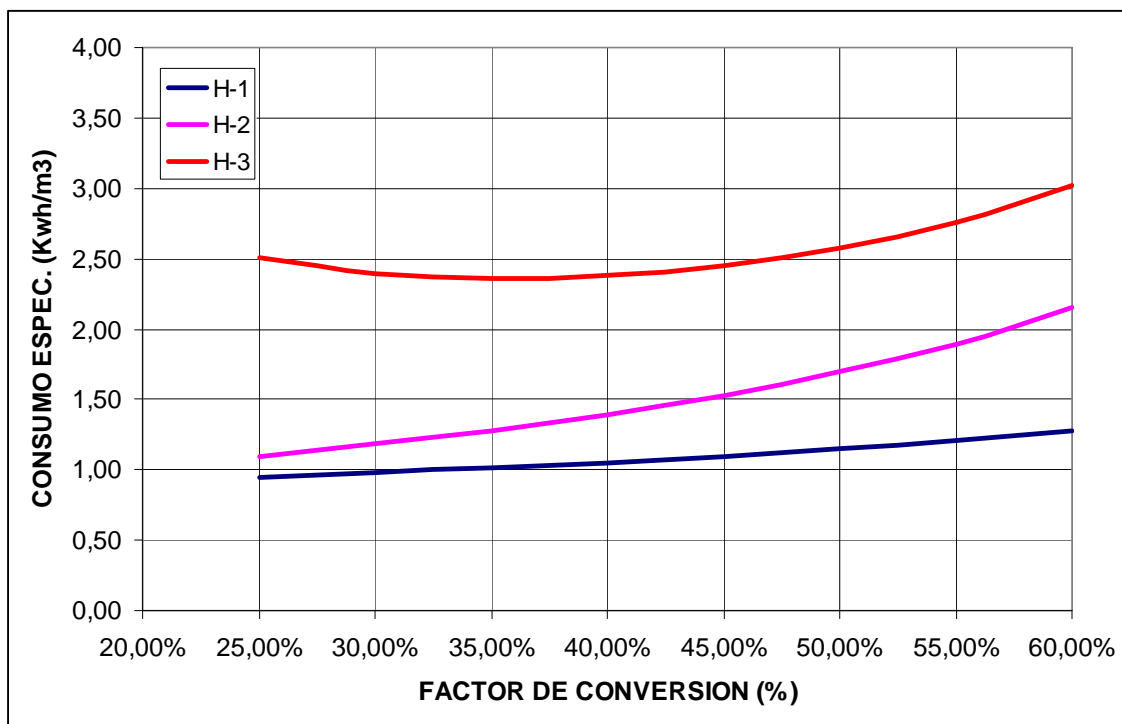
La energía específica será:

$$E = E_{am} + E_{ap} - ER_s = K \left[\left(\frac{5 + 10}{10,2 \times 0,86 \times 0,95} \right) + \left(\frac{\Pi_s}{0,88 \times 0,97} \right) \right] \times \frac{1}{FC} - K \left(\frac{1}{FC} - 1 \right) \times (\Pi_s - 2) \times 0,97$$

Si hacemos la Tabla correspondiente tendremos:

FACTOR CONVERSIÓN	CONSUMO ESPEC (Kwh/m3)
25%	2,5111
30%	2,3973
35%	2,3599
40%	2,3805
45%	2,4524
50%	2,5764
55%	2,7603
60%	3,0204

Si todos los valores hasta ahora calculados los representamos en una gráfica tenemos:



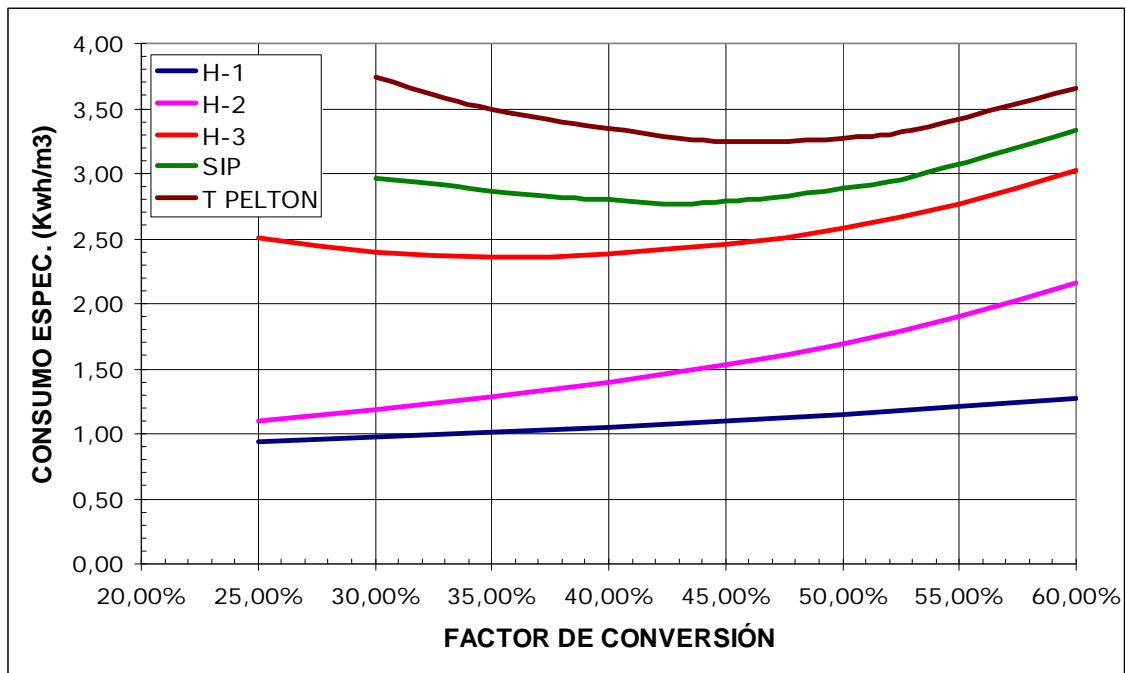
Si ahora se hacen los cálculos para una planta real de las siguientes características:

Producción:	100.000 m ³ /día
Factor de Conversión:	desde 30% al 60%
Temperatura agua de mar:	18°C
Concentración agua mar:	40.500 ppm
Cota de a planta:	5
Sistema de recuperación	a) Sistemas de Intercambio de Presión (SIP) b) Turbinas Pelton
Rendimiento bombeos:	Según tamaño del equipo

Obtenemos los siguientes resultados:

CONSUMO ESPECIFICO DE ENERGÍA (Kwh/m³)		
FACTOR DE CONVERSIÓN	S.I.P.	TURBINAS PELTON
30%	2,9669	3,7448
35%	2,8657	3,4959
40%	2,7998	3,3429
45%	2,7902	3,2524
50%	2,8927	3,2753
53%	2,9694	3,3281
60%	3,3284	3,6578

Si se representan estos valores en conjunto con los anteriormente obtenidos tendremos el siguiente gráfico:



5.- OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

En primer lugar es conveniente hacer nota que los consumos aquí indicados, en todas las hipótesis de cálculo son exclusivamente de “proceso”, entendiendo por tal al consumo debido al bombeo de agua de mar más el bombeo de alta presión y a la recuperación de energía. No se contemplan los consumos de pretratamiento, ni de bombeo al externo, ni los consumos de los auxiliares y de servicios generales. En todas las hipótesis se ha utilizado un agua de mar de concentración salinidad 40.500 ppm y 18°C de temperatura.

La Hipótesis 1 (H-1), es el consumo teórico de energía si el proceso fuese reversible, es decir es igual a la energía que se desprendería si se mezcla un metro cúbico de agua pura con las sales correspondientes a cada concentración, según el factor de conversión aplicado. No hace falta señalar que es inalcanzable debido a que el proceso de disolución de sales no es reversible, es un proceso politrópico y no isentrópico.

La Hipótesis 2 (H-2) es algo mas “realista”, ya que se obtiene aplicando una presión como lo hacemos en realidad en las plantas, que consiste en aplicar desde el principio la presión correspondiente a la presión osmótica de la salmuera final, en función del

factor de conversión utilizado. No obstante se parte de una “Membrana ideal”, y de que no hay pérdidas de carga en el sistema, no hay que elevar el agua de mar de cota, etc. En resumen es también un consumo inalcanzable ahora y en el futuro.

La Hipótesis 3 (H-3) es aún más realista, en ella se ha situado la planta en la cota 5 sobre el nivel del agua de mar, que aunque es bajo es realista. Se ha considerado un rendimiento en el bombeo del agua de mar de 86% en la bomba y 95% en el motor. Se ha considerado unas pérdidas de carga en el pretratamiento de 20 m.c.a. Se ha considerado un rendimiento en el bombeo de alta presión de 88% en la bomba y 97% en el motor. Se ha considerado un rendimiento en la recuperación de energía global total del 97% y finalmente aunque las membranas se siguen considerando “ideales” se ha considerado una pérdida de carga en el tubo de presión para el agua de mar/salmuera de 2 bares. En resumen la curva roja del gráfico puede considerarse como la última frontera en el consumo específico mínimo que podremos alcanzar en determinadas circunstancias y con equipos y membranas mejores, pero no se podrá reducir más dicho consumo por mucho que se intente. Hay que hacer notar que si la concentración salina del agua de mar es inferior a los 40.500 ppm utilizados en cálculo, dicha curva desciende, no así con el aumento de la temperatura sobre los 18°C considerados, ya que las membranas supuestas son ideales, en este sentido no están afectadas por la temperatura del agua de mar, que en caso, de ser mayor, supondría también un mayor consumo energético debido a que la presión osmótica del agua de mar y sus concentrados sube con la temperatura.

Las curvas con recuperación por Sistemas de Intercambio de Presión (S.I.P.) y por Turbinas Pelton (T.Pelton) son para plantas reales situadas en la cota 5 sobre el nivel del mar, con bombas y motores reales, con perdidas de carga en pretratamiento reales, con recuperadores reales del mercado, etc. Es decir se trata del consumo específico de una planta real optimizada que sería alcanzable con los equipos y membranas disponibles en el mercado hoy.

Como conclusiones podemos ver cual es el ahorro de energía utilizando S.I.P. frente a las Turbinas Pelton, como podemos ver depende del Factor de conversión de la planta, para un FC = 30% la diferencia es de 0,778 kwh/m³, en tanto que para un FC = 50%, la diferencia es de 0,383 Kwh/m³. Así se explican los valores diferentes que podemos encontrar en la literatura sobre lo que supone de ahorro energético la utilización de un sistema u otro. Por otra parte nos permite ver cual es el ahorro

máximo que podemos esperara en un futuro, como diferencia entre la curva S.I.P. y la curva roja de “Frontera”, este valor es así mismo variable con la conversión, para el caso de FC = 30% lo más que se podrá reducir es 0,57 Kwh/m³, mientras que para un FC = 50% este ahorro previsto será de 0,316 Kwh/m³. En cualquier caso menores que los producidos por la aparición de los S.I.P. frente a las Turbinas Pelton.

Otro aspecto a hacer notar es que tanto para la Hipótesis 3 como para la S.I.P. y la Turbina Pelton existe un Factor de Conversión óptimo de mínimo consumo energético. En el caso de las Turbinas Pelton este punto está entre el 45% y el 50% de Factor de conversión, teniendo en cuenta que en sin bomba booster en salmuera este es el rango de máximo Factor de conversión, es cierta la tendencia de que la planta óptima era la de mayor Factor de Conversión posible. Con la aparición de los Sistemas de Intercambio de Presión, este óptimo se desplaza a valores entre el 40 y el 45% de Factor de Conversión y para el caso “Frontera” este óptimo se situará entre el 35 y el 40%, es decir cuanto mayor es el rendimiento global del proceso, más bajo se sitúa el Factor de Conversión óptimo, extrapolando las curvas de H-1 y H-2, el valor óptimo es para Factor de Conversión cero.

Por último indicar que debe mejorarse para acercarnos al valor “Frontera”. Por una parte deberán aumentar los rendimientos de las bombas, motores y sistemas de intercambio de presión. Deberá reducirse al máximo las pérdidas de carga en el sistema, la cota de planta deberá ser lo más baja técnicamente posible y finalmente las membranas deberán acercarse lo más posible a la “Membrana ideal” cuyas condiciones son las indicadas al principio:

- a) No necesita presión transmembrana para dejar pasar el agua, la cual, solo alcanzando el valor de la presión osmótica, ya pasa al otro lado.
- b) La membrana rechaza el 100% de las sales, de forma que el producto no contiene ninguna
- c) La membrana no tiene perdidas de carga ni del lado del producto, ni del lado del agua de mar/salmuera.