

Uso de los Variadores de Frecuencia en el Control de Proceso de Plantas Desaladoras

Sánchez, Noemí, Dapuzo, Andrea, Sánchez, Juan María
Ecoagua
noemisanchez@ecoagua.com

RESUMEN

De un tiempo a esta parte el uso de variadores de frecuencia para el control de los procesos de plantas desaladoras de ósmosis inversa ha aumentado de manera importante, incluso para su uso en motores de media tensión.

En este artículo se pretende analizar las ventajas e inconvenientes técnicos y económicos de inversión y explotación del uso de variadores de frecuencia para el control de los procesos de una planta desaladora de ósmosis inversa de agua de mar, frente al control realizado mediante válvulas de control. Se establecerán las características y el diseño de una planta desaladora típica con una producción de 60.000 m³/día, 3 líneas y se determinará el régimen de funcionamiento de la misma a lo largo de un año en cuanto a las variaciones de temperatura del agua de mar y del ensuciamiento de las membranas de ósmosis. Finalmente se realizará una comparación cuantitativa del consumo de energía y su coste en euros para cada solución y una comparación cualitativa de ventajas e inconvenientes de ambas soluciones.

ABSTRACT

Using variable frequency drivers in order to control the reverse osmosis process of the desalination plants for a while now has increased significantly, even using variable frequency drivers in medium voltage motors.

The aim of this paper is to analyze both the advantages and disadvantages of using variable frequency drivers compared to control valves, from a perspective of both technical and economic aspects, in order to control the reverse osmosis process of a seawater desalination plant. The characteristics and design of a typical desalination plant will be established, the production of the plant will be 60.000 m³/day, 3 units. Likewise, one year of operating conditions of the desalination plant will be determined in terms of both the temperature variations of seawater and the fouling of reverse osmosis membranes. Finally both a quantitative comparison of energy consumption and costs in euros for each solution and a qualitative comparison of each solution will be made.

PALABRAS CLAVE: desalación, ósmosis inversa, agua de mar, variadores de frecuencia, válvulas de control

DATOS DE PARTIDA

Para la realización del estudio, de las diferentes soluciones de control del proceso de ósmosis inversa, se va a considerar una planta desaladora de agua de mar por ósmosis inversa (OI) para producción de agua potable de consumo humano.

Las características de la planta desaladora son las siguientes:

Producción	60.000 m ³ /día
Temperatura agua de mar.....	15-26 °C
Salinidad agua de mar	38.000 mg/L
Número líneas	3
Pasos OI.....	1
Conversión OI	43 %
Tipo de membranas OI.....	arrollamiento en espiral
Material membranas OI.....	poliamida aromática
Área activa membranas de OI.....	440 ft
Rechazo sales mínimo membranas OI	99,7 %
Flux del primer paso OI	14 lmh
Recuperación de energía	Sistemas Intercambio Presión (SIP)
Overflush en operación SIP.....	0 %
Rendimiento bomba alta presión.....	84 %
Rendimiento motor bomba alta presión.....	96,4 %
Rendimiento bomba recirculación	85,5 %
Rendimiento motor bomba recirculación	96 %

En la Tabla 1 se muestran las condiciones de funcionamiento de la planta desaladora consideradas, a lo largo de un año, en cuanto a temperatura del agua de mar captada, ensuciamiento de las membranas de ósmosis y pérdida de carga en los bastidores, además se muestran los días de producción de agua desalada al mes. Los valores de temperatura considerados, se han obtenido de datos reales de la costa de Almería, los valores de ensuciamiento y días de producción se han establecido suponiendo que se realizan dos limpiezas químicas de membranas, una en diciembre y otra en junio, por último los valores de la pérdida de carga en los bastidores han sido determinados, basados en valores de plantas desaladoras reales.

Tabla 1. Condiciones de funcionamiento de la planta desaladora

	Temperatura °C	Ensuciamiento (Fouling Factor)	Pérdida de carga rack (bar)	Días de producción
Enero	15	0,85	1,5	31
Febrero	15	0,80	2	29
Marzo	15	0,80	2	31
Abril	16	0,75	2,5	30
Mayo	18	0,75	2,5	31
Junio	22	0,85	1,5	27
Julio	24	0,85	1,5	31
Agosto	26	0,80	2	31

	Temperatura °C	Ensuciamiento (Fouling Factor)	Pérdida de carga rack (bar)	Días de producción
Septiembre	24	0,80	2	30
Octubre	22	0,75	2,5	31
Noviembre	19	0,75	2,5	30
Diciembre	16	0,85	1,5	28

CONTROL DEL PROCESO

Para el control del proceso se van a considerar cuatro soluciones distintas. En todas las soluciones la planta desaladora se va a operar con caudal de producción y factor de conversión constantes durante todo el año.

En la primera solución se instalará una válvula de control en la salida de permeado para el control de la producción y una válvula de control en la impulsión de la bomba de recirculación para el control del factor de conversión, ver Figura 1.

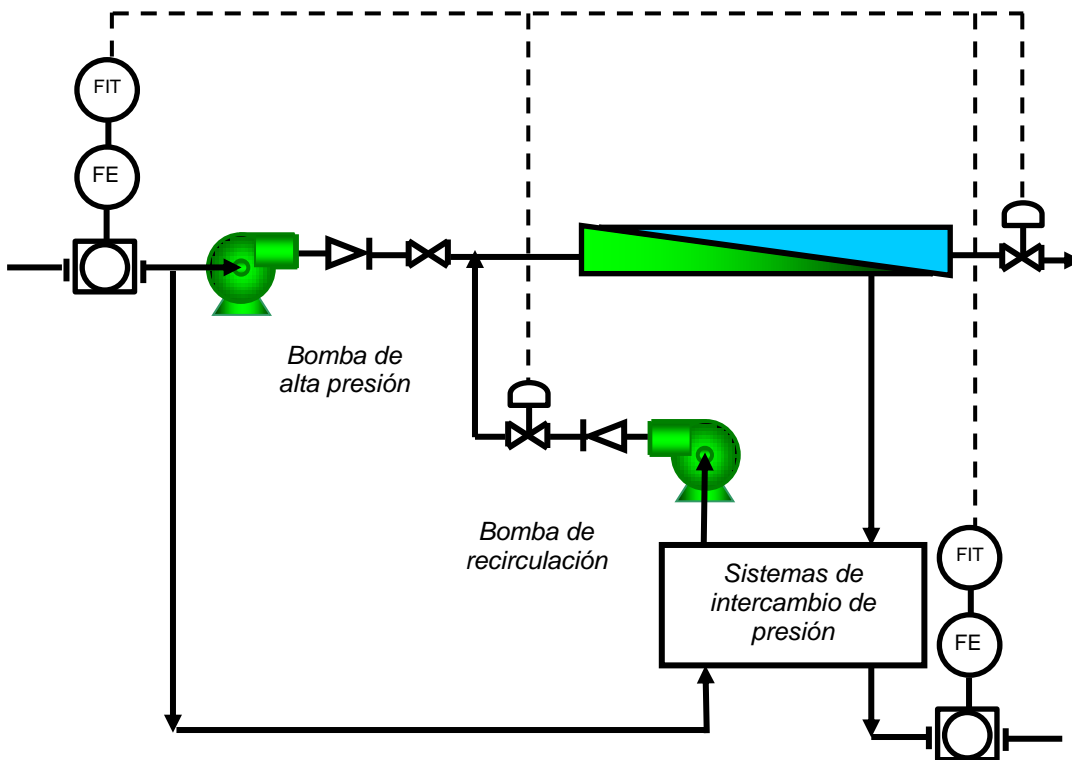


Figura 1. Control del proceso, primera solución

La válvula de control en la salida del permeado comparará su punto de consigna, caudal de producción (Q_p) constante $Q_p = 60.000 \text{ [m}^3\text{/día]} / 3 \text{ [líneas]} / 24 \text{ [h/día]} = 833,34 \text{ m}^3\text{/h}$, con la diferencia de caudal entre el caudalímetro que mide el caudal de entrada de agua de mar hacia la bomba de alta presión y hacia el SIP (Q_a) y el caudalímetro que mide el caudal de salida de salmuera del SIP (Q_s), abriéndose o cerrándose para mantener la producción constante.

La válvula de control en la impulsión de la bomba de recirculación comparará su punto de consigna, factor de conversión (FC) constante $FC = 43 \%$, con el valor calculado de la fórmula $(1 - Q_s/Q_a) \cdot 100$, abriéndose o cerrándose para mantener el factor de conversión constante.

Con la primera solución de control de proceso, tanto la curva de la bomba de alta presión (caudal-presión) como la curva de la bomba de recirculación, no varían. Se diseñan las bombas para el máximo *Total Dynamic Head* (TDH) requerido y operan siempre en la curva de funcionamiento de la bomba. Cuando se requiere menos presión a la entrada de membranas para lograr la producción (a menor temperatura del agua de mar o con membranas más limpias), las válvulas de control crean la pérdida de presión necesaria para que la curva del sistema corte a la curva de la bomba en el punto de funcionamiento requerido.

En la segunda solución se instalará una válvula de control en la salida de permeado para el control de la producción y un variador de frecuencia en la bomba de recirculación para el control del factor de conversión, ver Figura 2.

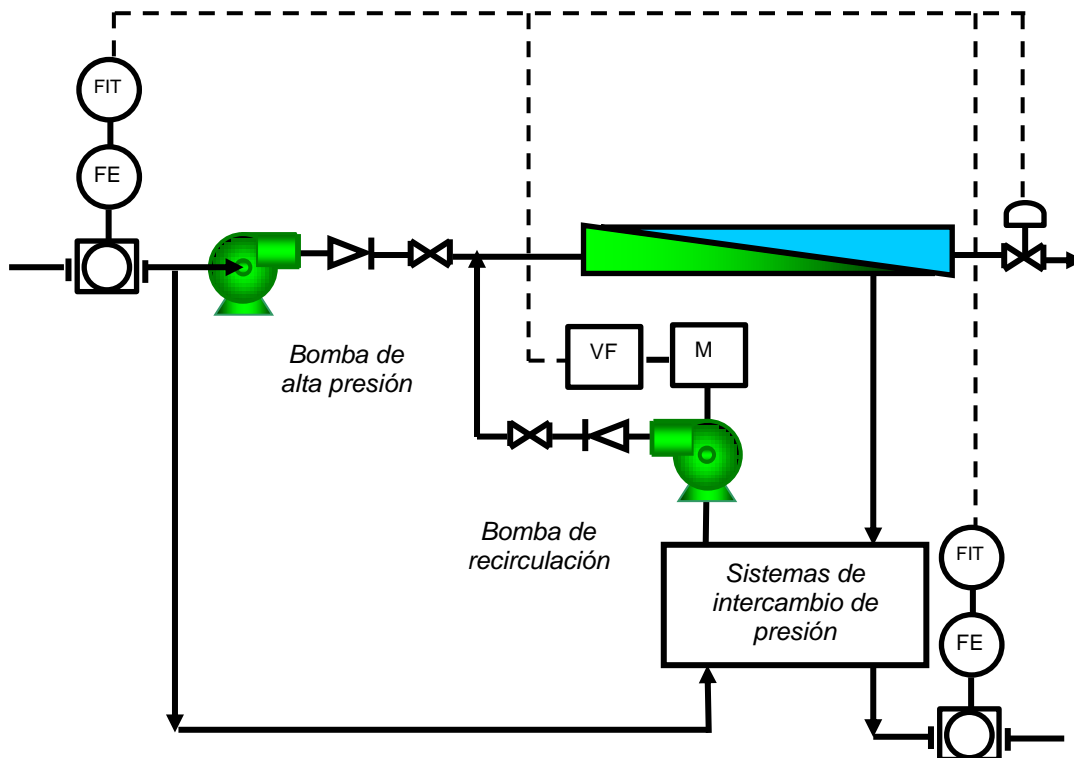


Figura 2. Control del proceso, segunda solución

En la segunda solución la válvula de control actúa de la misma forma que en la solución 1.

El variador de frecuencia de la bomba de recirculación, en la segunda solución, actúa, cuando cambia la curva del sistema (caudal-presión), variando la curva de la bomba para mantener el punto de consigna, $43 \% = (1 - Q_s/Q_a) \cdot 100$. Así varían tanto la curva del sistema (al cambiar la temperatura del agua de mar y el

ensuciamiento de membranas) como la curva de la bomba, mediante el variador de frecuencia, cortándose en el punto de funcionamiento requerido.

En la tercera solución se instalará un variador de frecuencia en la bomba de alta presión para el control de la producción y una válvula de control en la impulsión de la bomba de recirculación para el control del factor de conversión, ver figura 3.

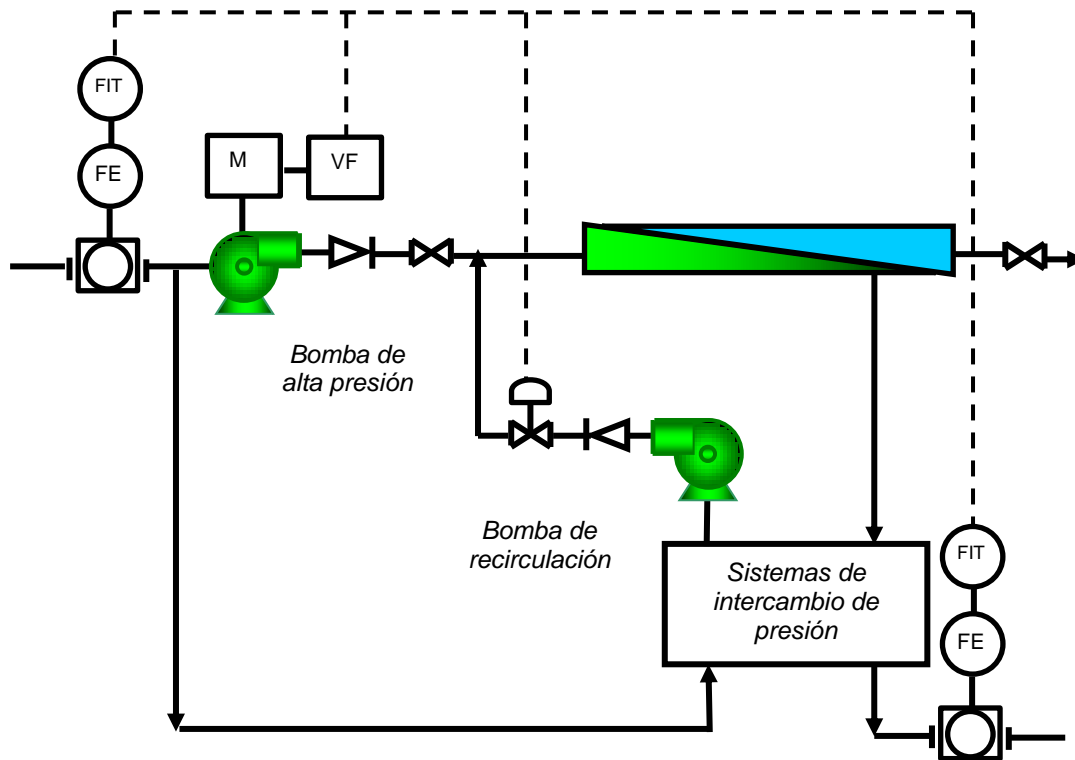


Figura 3. Control del proceso, tercera solución

En la tercera solución la válvula de control actúa como en la primera solución y el variador en la bomba de alta presión actúa variando la curva de la bomba para cortar a la curva del sistema en el punto de funcionamiento requerido.

En la cuarta solución se instalará un variador de frecuencia en la bomba de alta presión para el control de la producción y un variador de frecuencia en la bomba de recirculación para el control del factor de conversión, ver Figura 4.

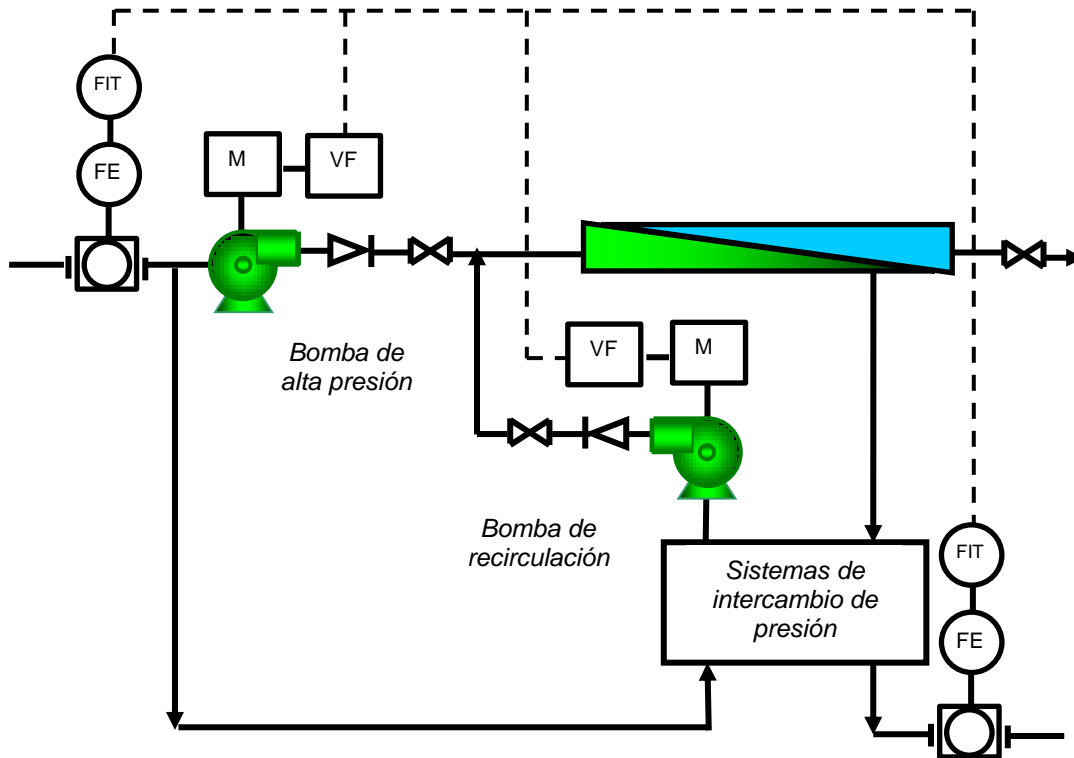


Figura 4. Control del proceso, cuarta solución

En la cuarta solución los variadores de frecuencia cambian las curvas de las bombas para que corten a las del sistema en el punto de funcionamiento requerido.

CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA

Las distintas soluciones para el control del proceso de ósmosis inversa, descritas en el apartado anterior, darán lugar a distintos diseños y consumos de energía de la bomba de alta presión y de la bomba de recirculación.

Las bombas se diseñarán en todas las soluciones para el mayor TDH requerido en función del ensuciamiento de membranas y temperatura de agua de mar. Para los controles con variador de frecuencia el motor requerido por las bombas puede ser mayor que el de las válvulas de control, al tener que calcularse la potencia requerida teniendo en cuenta las pérdidas en el variador de frecuencia. En el caso que estamos analizando, los motores necesarios para todas soluciones son los mismos, un motor de 2000 kW para las bombas de alta presión y un motor de 250 kW para las de recirculación. Consideraremos una tensión de alimentación en media de 6 kV y una tensión de baja de 400 V.

En cuanto al consumo de energía, en los controles con válvula de control, se perderá energía en la válvula de control en todas las condiciones de ensuciamiento de membranas y temperatura del agua de mar, excepto en el caso más desfavorable, que es el punto de diseño que determina el tamaño de la bomba. Como la curva de la bomba no varía, se debe variar la curva del sistema para cortar a la de la bomba, en el punto de funcionamiento requerido.

En los controles con variador de frecuencia para el cálculo del consumo de energía habrá que tener en cuenta la pérdida de energía debida al rendimiento del variador de frecuencia, pero no será necesario crear pérdidas de carga adicionales en el sistema, pues con el variador de frecuencia se cambia la curva de la bomba para cortar a la del sistema en el punto de funcionamiento requerido.

El cálculo de la potencia consumida, para los controles con válvula de control se realiza mediante la fórmula: Potencia consumida [kW] = caudal de la bomba (Qb) [m³/h] x TDH de la bomba [m] x densidad del agua de mar (D) [kg/L] x 0,002725 / rendimiento de la bomba (η_b) / rendimiento del motor (η_m). En este caso el caudal es el requerido y el TDH es el correspondiente según la curva de la bomba de diseño, siendo este TDH superior al requerido para todos los casos, excepto para el más desfavorable. Como se ha comentado el TDH requerido se obtiene creando una pérdida de carga con las válvulas de control.

El cálculo de la potencia consumida, para los controles con variador de frecuencia se realiza mediante la fórmula: Potencia consumida [kW] = caudal de la bomba (Qb) [m³/h] x TDH de la bomba [m] x densidad del agua de mar (D) [kg/L] x 0,002725 / rendimiento de la bomba (η_b) / rendimiento del motor (η_m) / rendimiento del variador (η_v). En este caso caudal y TDH son los requeridos para cada punto de funcionamiento.

La potencia consumida por cada bomba se multiplicará por 3, 3 líneas de producción, por 24 horas y por los días de funcionamiento de la planta al mes de la Tabla 1. Se sumará la potencia consumida de todos los meses y se obtendrá la potencia consumida en kwh/año.

Los caudales y presiones de los puntos de funcionamiento y de las curvas del sistema se determinarán mediante programas comerciales proporcionados por fabricantes, de primera línea, de membranas de ósmosis inversa, parámetros de funcionamiento de sistemas de intercambio de presión reales y cálculo de pérdidas de carga en bastidores, tuberías y accesorios.

Los rendimientos de las bombas y los motores se obtendrán de equipos comerciales de fabricantes de primera línea.

RESULTADOS

Con la metodología descrita en los apartados anteriores, se ha calculado la energía consumida en kWh/año para la bomba de alta presión y para la bomba de recirculación en función de realizar el control mediante válvula de control o mediante variador de frecuencia. Además se ha realizado el cálculo de la energía consumida en función del rendimiento del variador de frecuencia.

En la Figura 5 se muestra la energía consumida por las tres bombas de alta presión anualmente. En rojo se muestra la energía consumida con la solución de válvulas de

control y en azul la energía consumida con la solución de variador de frecuencia en función del rendimiento del variador.

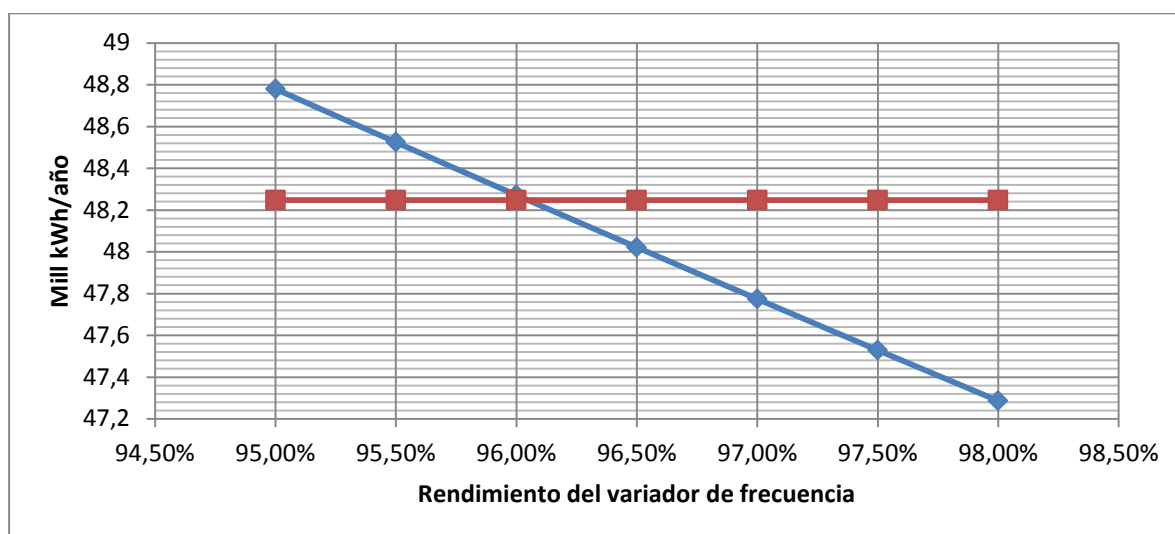


Figura 5. Energía consumida por las bombas de alta presión

En la Tabla 2 se muestra la diferencia entre la potencia consumida con la solución de válvulas de control y con la solución de variador de frecuencia para las bombas de alta presión, en función del rendimiento del variador. Además se ha calculado el ahorro o el coste anual en euros, suponiendo un precio de la energía eléctrica de 0,038608 euros/kwh, con la instalación del variador de frecuencia.

Tabla 2. Ahorro/coste anual con variadores de frecuencia en la bomba de alta presión

Rendimiento del variador (%)	Aumento/disminución de potencia consumida con la instalación de variadores (kWh/año)	Ahorro/coste con la instalación de variadores (euros/año)
95,0%	531.877,38	20.534,72
95,5%	276.486,14	10.674,58
96,0%	23.755,23	917,14
96,5%	-226.356,71	-8.739,18
97,0%	-473.890,18	-18.295,95
97,5%	-718.884,84	-27.754,71
98,0%	-961.379,56	-37.116,94

En la Figura 6 se muestra la energía consumida por las tres bombas de recirculación anualmente. En rojo se muestra la energía consumida con la solución de válvulas de control y en azul la energía consumida con la solución de variador de frecuencia en función del rendimiento del variador.

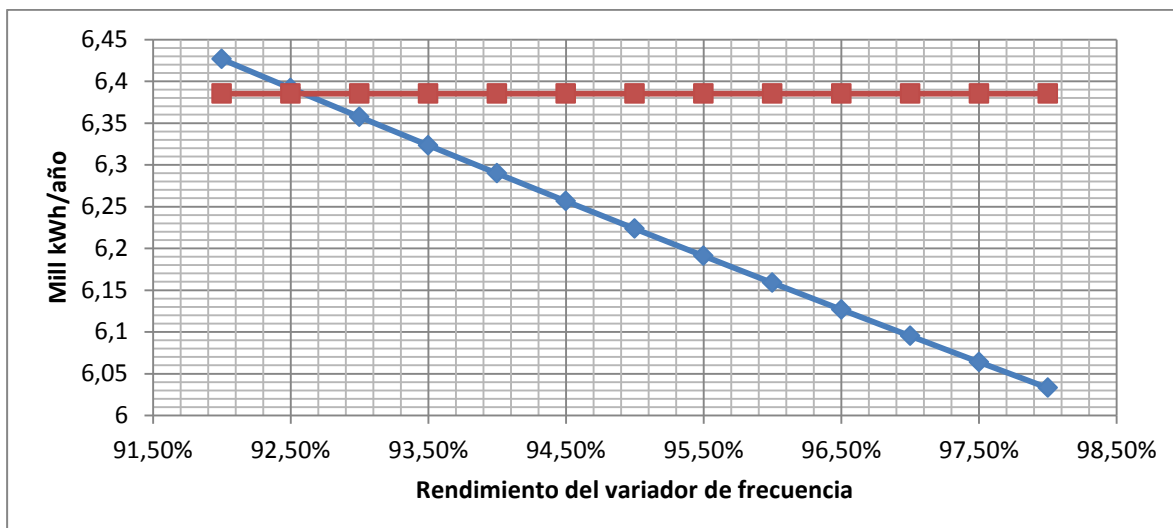


Figura 6. Energía consumida por las bombas de recirculación

En la Tabla 3 se muestra la diferencia entre la potencia consumida con la solución de válvulas de control y con la solución de variador de frecuencia para las bombas de recirculación, en función del rendimiento del variador. Además se ha calculado el ahorro o el coste anual en euros, suponiendo un precio de la energía eléctrica de 0,038608 euros/kwh, con la instalación del variador de frecuencia.

Tabla 3. Ahorro/coste anual con variadores de frecuencia en la bomba de recirculación

Rendimiento del variador (%)	Aumento/disminución de potencia consumida con la instalación de variadores (kWh/año)	Ahorro/coste con la instalación de variadores (euros/año)
92,0%	41.256,32	1.592,82
92,5%	6.518,71	251,67
93,0%	-27.845,38	-1.075,05
93,5%	-61.841,93	-2.387,59
94,0%	-95.476,82	-3.686,17
94,5%	-128.755,79	-4.971,00
95,0%	-161.684,45	-6.242,31
95,5%	-194.268,30	-7.500,31
96,0%	-226.512,75	-8.745,20
96,5%	-258.423,05	-9.977,20
97,0%	-290.004,38	-11.196,49
97,5%	-321.261,80	-12.403,28
98,0 %	-352.200,27	-13.597,75

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El estudio realizado pone de manifiesto que en la planta desaladora propuesta, para que se produzca una disminución de la energía consumida por las bombas de alta presión con la instalación de variadores de frecuencia en las mismas frente a la instalación de válvulas de control, el rendimiento de los variadores debe ser superior

al 96 %. Además, si se instalan variadores con rendimiento de 97%, el ahorro anual por consumo de energía será de 18.295,95 euros y con variadores de 98% de rendimiento el ahorro anual será de 37.116,94 euros/año (considerando 0,038608 euros/kwh). Un variador de media tensión de 6 kV, 2000 kW, 50 Hz, tiene un precio aproximado de inversión de 247.000 euros (precio de septiembre 2012), el rendimiento de este variador está en torno al 98% y una válvula de control instalada en el permeado tiene un precio aproximado de 3.000 euros (precio de septiembre 2012), por lo que la tasa de retorno de instalación de los variadores de frecuencia en las bombas de alta será de $(247.000 \text{ [euros/unidad]} \times 3 \text{ [unidades]} - 3.000 \text{ [euros/unidad]} \times 3 \text{ [unidades]}) / 37.116,94 \text{ [euros/año]} = 19,7$ años, teniendo en cuenta que la vida útil de un variador de frecuencia está en torno a los 15 años, en este caso parece recomendable el control mediante válvula de control, correspondiente a las soluciones de control primera y segunda descritas en el apartado Control de proceso.

En cuanto a las bombas de recirculación en la planta desaladora propuesta, para que se produzca una disminución de la energía consumida por las bombas de recirculación con la instalación de variadores de frecuencia en las mismas frente a la instalación de válvulas de control, el rendimiento de los variadores debe ser superior al 92,5 %. Además, si se instalan variadores con rendimiento de 96%, el ahorro anual por consumo de energía será de 8.745,20 euros y con variadores de 98% de rendimiento el ahorro anual será de 13.597,75 euros/año (considerando 0,038608 euros/kwh). Un variador de baja tensión de 400 V, 250 kW, 50 Hz, tiene un precio aproximado de inversión de 16.800 euros (precio de septiembre 2012), el rendimiento de este variador está en torno al 98%, para evitar que introduzca armónicos en el Sistema Eléctrico la pérdida de rendimiento puede subir hasta el 96%. Una válvula de control instalada en la impulsión de la bomba de recirculación tiene un precio aproximado de 9.500 euros (precio de septiembre 2012), por lo que la tasa de retorno de instalación de los variadores de frecuencia en las bombas de recirculación será de $(16.800 \text{ [euros/unidad]} \times 3 \text{ [unidades]} - 9.500 \text{ [euros/unidad]} \times 3 \text{ [unidades]}) / 8.745,2 \text{ [euros/año]} = 2,5$ años. En este caso parece recomendable el control mediante variador de velocidad, correspondiente a las soluciones de control cuarta y segunda descritas en el apartado control de proceso.

En el caso analizado, la solución de control más recomendable es la segunda de las descritas en el apartado control de proceso, en la que la producción se controla mediante la válvula de control en el permeado y el factor de conversión con el variador de velocidad en la bomba de recirculación.

Otros condicionantes que pueden determinar la instalación o no de variadores de frecuencia son:

- Los variadores de frecuencia producen armónicos en el sistema eléctrico, que deben ser analizados y cuantificados y que en ocasiones requieren la instalación de soluciones para disminuir los armónicos que disminuyen el rendimiento del variador instalado, sobre todo en los variadores de baja tensión.
- Los variadores de frecuencia de motores de media tensión son equipos complejos que requieren un mantenimiento con mano de obra especializada,

repuestos específicos y pueden tener un coste de instalación y mantenimiento elevado.

- Las pérdidas de los variadores de frecuencia son energía calorífica que pasa al ambiente y que, dependiendo de donde estén instalados, puede requerir ventilación forzada o incluso climatización. En el ejemplo que se ha analizado, para los variadores de los motores de las bombas de alta presión la energía calorífica al ambiente será: $2000 \text{ [kW]} * 3 \text{ [unidades]} * 2\% \text{ de pérdidas} * 24 \text{ [horas/día]} * 360 \text{ [días/año]} = 1.036.800,00 \text{ kWh/año}$ de energía calorífica al ambiente.

CONCLUSIONES

En vista de los resultados obtenidos, debemos asegurarnos de que los variadores de frecuencia tienen el rendimiento adecuado para ser una solución interesante frente a las válvulas de control.

Existen varias soluciones en cuanto al control del proceso de ósmosis inversa en una planta desaladora, en este artículo se han puesto de manifiesto cuatro de ellas. Es recomendable realizar un cálculo exhaustivo del consumo de energía con la instalación de válvulas de control o variadores de frecuencia para el control del proceso, pues en función del rendimiento del variador, del coste del variador, del coste de la energía eléctrica y de los distintos regímenes de funcionamiento previstos, puede resultar interesante una u otra solución.