

SELECCIÓN ADECUADA DEL VARIADOR DE VELOCIDAD CLAVE PARA MAXIMIZAR LA EFICIENCIA Y REDUCIR COSTOS EN EQUIPOS ROTODINÁMICOS DE LA INDUSTRIA DEL GAS Y PETROLEO

J.M. Voith SE & Co. KG | VTA
VALENTIN CHOCANO
Voithstraße 1
74564 Crailsheim, Germany
E.mail: Valentin.Chocano@Voith.com
Crailsheim. – Germany

Resumen:

Para obtener bajos gastos operativos (OPEX) e incrementar las utilidades operativas (EBIT), se deben usar equipos de alta eficiencia de mantenimiento, es decir, trabajar con tecnologías de bajos costes de mantenimiento, de larga vida útil y baja susceptibilidad a los daños (alto MTBF), de fácil reparación y mantenimiento en poco tiempo por personal medianamente cualificado (bajo MTTR), de corto tiempo de parada por mantenimiento o reparación, y de eficiencia media/alta, sobre todo en equipos de potencias mayores a 1 MW, que operan más de 5000 horas anuales y un tiempo de operación mayor a 15 años.

La efectividad del sistema (OEE), que es la suma de eficacia y eficiencia¹, garantiza las mayores utilidades operativas posibles. Un sistema eficiente pero ineficaz da bajas utilidades. La mejor eficiencia energética en turbomáquinas se alcanza con el control de flujo mediante variación de velocidad. Los variadores de velocidad hidrodinámicos VORECONS han demostrado ser sistemas efectivos en la industria del Gas y petróleo.

Efectividad del Sistema VORECON:

Para determinar la efectividad del sistema motriz VORECON analizaremos de forma separada la eficiencia del mantenimiento, la eficiencia energética y la eficacia del mantenimiento.

Una encuesta en terreno realizada entre el 2012 y 2013 en equipos VORECONS instalados en la industria del gas y petróleo, con el objetivo de determinar la efectividad de los sistemas de super imposición VORECON, proporcionó los siguientes resultados:

Tipo de variador de velocidad	VORECON
Unidades entregadas	1987 - 2010
Potencia nominal	600 kW a 31 200 kW
Velocidad de salida	de 495 rpm a 16 735 rpm
Unidades encuestadas	201
Horas de funcionamiento declaradas	8 065 000 h
Fallos notificados ²	19
Tiempo de inactividad notificado	1 743 h

Tabla 1; Reporte de fallas³

¹ Cultura de la efectividad 2.0; pag 17

² fallos basados en el alcance del suministro de Voith que causaron tiempos de inactividad inesperados

³ Presentación propia de propiedad del grupo Voith Turbo

Eficiencia de Mantenimiento:

Para esto analizaremos el indicador MTBF, el indicador MTTR, la confiabilidad y la disponibilidad del sistema VORECON utilizando los datos de la Tabla 1.

El MTBF⁴ es el tiempo medio entre dos fallos del mismo sistema o componente. Este indicador controla e influye altamente en la disponibilidad y confiabilidad de un equipo/máquina. Un sistema será más fiable si el tiempo entre fallos es mayor.

$$MTBF(t) = \frac{\text{Horas de operacion}}{\text{numero de fallas}} \quad \{1\}$$

Reemplazando los valores de la Tabla 1 en la ecuación { 1 } en el sistema VORECON obtenemos:

$$MTBF(t) = \frac{8065000}{19} = 424474 \text{ h} \approx 48 \text{ años}$$

Mas adelante veremos que el objetivo de una buena estrategia de mantenimiento es mantener el tiempo medio entre fallos (MTBF) lo más alto posible. Este indicador se aplica para los fallos en sistemas reparables. La confiabilidad es un indicador que se centra en garantizar que los equipos puedan desempeñar de forma constante la función designada, durante un periodo de tiempo determinado y en condiciones predeterminadas. Para su estimación usaremos las siguientes formulas:

$$\begin{aligned} \text{Confiabilidad en el tiempo} \\ = R(t) = e^{-\lambda * t} \end{aligned} \quad \{2\}$$

$$\begin{aligned} \text{Tasa de fallas del sistema} \\ = \lambda(t) = \frac{1}{MTBF} \end{aligned} \quad \{3\}$$

A partir de la formula podemos estimar la tasa de fallas de un sistema VORECON

$$\begin{aligned} \text{Tasa de fallas del sistema} = \lambda(t) &= \frac{1}{MTBF} \\ &= \frac{1}{424474} \\ &= 0,000002355 \text{ fallas/hora} \end{aligned}$$

La tasa de fallas se ve influenciada por el diseño y la calidad de los equipos. Un equipo/sistema de alta calidad tendrá una alta longevidad y confiabilidad y por ende una tasa de fallas muy bajas. Los sistemas VORECON son de alta longevidad, con vida útiles que superan los 30 años. La longevidad se basa en su diseño robusto, especialmente diseñado para la industria del gas y petróleo, de fácil inspección, operación y mantenimiento y su proceso de manufactura garantiza una alta calidad.

Si una planta quiere estimar la confiabilidad del Sistema VORECON en un periodo de 360 horas de operación podrá reemplazar los valores de Lambda en la ecuación de confiabilidad obteniendo:

$$\text{Confiabilidad} = R(t) = e^{-\frac{1}{MTBF} * t} \quad \{4\}$$

Reemplazando los valores de la Tabla 1 en la ecuación { 4 } en el sistema VORECON obtenemos:

$$\begin{aligned} \text{Confiabilidad} = R(t) &= e^{-\frac{1}{424474} * 360} \\ &= 99,92\% \end{aligned}$$

La Probabilidad de que el equipo VORECON funcione sin falla alguna por el periodo estimado de 360 horas es de 99,92%.

La facilidad de mantenimiento(mantenibilidad) es alta cuando el tiempo promedio de reparación (MTTR) es bajo. Esto significa que la máquina, después de una falla, necesita poco tiempo para volver a su estado normal de producción. Mejorar el MTTR implica mejorar la mantenibilidad y la disponibilidad de los equipos. El MTTR mide que

⁴ Reliability; design f mechanical system; Seongwoo Woo; 2017; pag.45

tan eficiente es la respuesta del equipo de mantenimiento. El MTTR pone a la luz los tiempos muertos, sin producción, sin ganancias.

Un maquina/sistema de mantenimiento simple, esta predestinado a tener bajos valores de MTTR y en consecuencia altos valores de disponibilidad y ganancias.

El tiempo promedio de reparación de un equipo se define bajo la siguiente formula:

$$\begin{aligned} MTTR &= \frac{\text{tiempo total de mantenimiento}}{\text{numero de reparaciones}} \quad \{5\} \\ &= \frac{\text{Tiempo inactivo}}{\text{numero de fallas}} \end{aligned}$$

Para estimar el MTTR promedio del sistema VO-RECON procedemos a remplazar los valores de la Tabla 1 en la ecuación { 5 } y obtenemos:

$$\begin{aligned} MTTR &= \frac{\text{Tiempo inactivo}}{\text{numero de fallas}} = \frac{1743 \text{ horas}}{19} \\ &= 91,74 \text{ h} \approx 4 \text{ dias} \end{aligned}$$

La disponibilidad es la probabilidad de que un equipo o un sistema esté en funcionamiento. Se define como el cociente entre las horas disponible y las horas de operation o planificadas

$$\begin{aligned} \text{Disponibilidad (\%)} &= \frac{T3}{T1} \\ &= \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \{6\} \end{aligned}$$

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{T1 - T2}{T1} \quad \{7\}$$

T1: Horas de operación

T2: Horas de inactividad

T3: Horas disponibles

Para analizar la disponibilidad del sistema VORECON utilizaremos los valores estadísticos de la Tabla 1 en la ecuación { 7 } . Reemplazando los valores se determina lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Disponibilidad (\%)} &= \frac{8065000 - 1743}{8065000} \\ &= 99,98\% \end{aligned}$$

El tiempo de operación o funcionamiento se refiere al tiempo total que el equipo debería haber estado en producción, excluyendo cualquier tiempo de inactividad planificado, como el mantenimiento programado. El tiempo de inactividad incluye también cualquier parada no planificada o avería del equipo que provoque una pérdida de tiempo de producción. Cuanto mayor sean las horas de funcionamiento y producción y menor el tiempo de inactividad, mayor será la disponibilidad del equipo y en consecuencia mayor será la producción. Una alta disponibilidad refleja la eficacia del mantenimiento. Los cortos tiempo de inactividad indican la simplicidad del mantenimiento. Con ello deducimos que los equipos VO-RECON son diseñados para un mantenimiento eficaz.

La eficiencia del mantenimiento se refiere a la utilización de los recursos para alcanzar los objetivos del mantenimiento del sistema. En un sistema VO-RECON, la eficiencia de mantenimiento puede medirse por la cantidad de recursos utilizados para el mantenimiento, como los costes de mano de obra, los tiempos de inactividad, los costes de material, los costes de energía, los costes de transporte, los costes de los equipos de mantenimiento, etc. Si la cantidad de recursos utilizados en el mantenimiento y los costos son bajos, la eficiencia del mantenimiento del equipo o sistema será alta. Si a eso se suma que el tiempo de inactividad por mantenimiento es bajo y en consecuencia la disponibilidad es alta, entonces se concluye que el equipo será de mantenimiento eficiente, eficaz y efectivo.

Los sistemas VORECON son sistemas mecánicos de mantenimiento simple. El mantenimiento o detección de fallas no requiere de personal altamente calificado, los trabajos de inspección son anuales y muy simples. Los trabajos de mantenimiento mayor (overhaul) son cada 8 años, la cantidad de repuestos y sus costos son bajos y moderados en comparación con los equipos eléctricos. No es necesario tener muchos componentes en stock, por lo que los costes de almacenamiento son bajos. El fabricante del VORECON garantiza una disponibilidad de repuestos mayor a 30 años, lo que indica que son equipos de muy baja obsolescencia.

La obsolescencia de los equipos o los repuestos influye negativamente en la eficiencia de mantenimiento de los equipos. Para evitar altos tiempos de inactividad por obsolescencia y no disponibilidad de repuestos, los operadores optan por llenar los almacenes con repuestos para así garantizar la disponibilidad de los equipos. Esto implica costes en repuestos, costes de almacenamiento, costes adicionales de inspección, costes de mantenimiento de los repuestos, costes de energía, costes de personal, etc. Equipos electrónicos son muy sensibles a la obsolescencia y por ende de baja eficiencia de mantenimiento.

Un buen ejemplo del mantenimiento efectivo del sistema VORECON se ve en la Figura 1. Los costes de mantenimiento y reparación de los sistemas mecánicos (VORECON) son menores en comparación con los sistemas electrónicos (VFD). El bajo grado de obsolescencia permite operar el equipo por más de 3 décadas haciendo un mantenimiento mayor cada 8 años. El alto grado de obsolescencia de los equipos electrónicos (VFD) podrían ocasionar la adquisición e integración de un equipo completo a partir de los 8 años.

Comparison of maintenance and repair costs

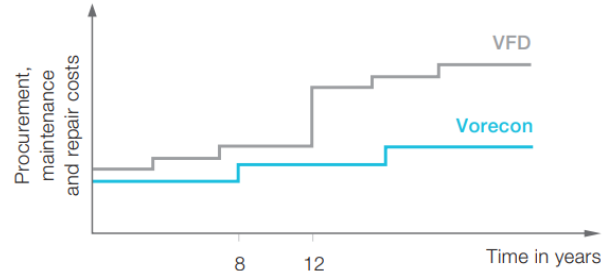


Figura 1: Costes de mantenimiento⁵

El sistema VORECON no es sensible a la obsolescencia, necesita pocos recursos para el mantenimiento, los costes de mantenimiento son bajos y tienen una alta disponibilidad de mantenimiento. Por todo ello se concluye que el sistema VORECON es de mantenimiento eficiente, eficaz y efectivo.

Eficiencia Energética:

La consolidada gama de incrementadores planetarios mecánicos de velocidad variable VORECON, basada en la tecnología de convertidor de par hidrodinámico y el principio de la super imposición, ofrece el menor coste total de propiedad (TCO). Ideal para el funcionamiento de bombas y compresores centrífugas y otras aplicaciones en el rango de potencia de hasta 50 MW o 20.000 rpm. En el sistema VORECON, una gran parte de la potencia de entrada P_E fluye directamente del eje de entrada al de salida. El convertidor de par hidrodinámico desvía una pequeña una pequeña parte de la potencia de entrada. Esta potencia desviada P_U también se transfiere al eje de salida del incrementador planetario superpuesto. Gracias al principio de división de potencia, el sistema VORECON alcanza un alto grado de eficiencia de aproximadamente 95% que es 2% de eficiencia más que los variadores de velocidad electrónicos.

⁵ Efficient control of pumps and compressors, Vorecon variable speed planetary gear [Brochure]/ Voith Group / 2024 / Pag 13

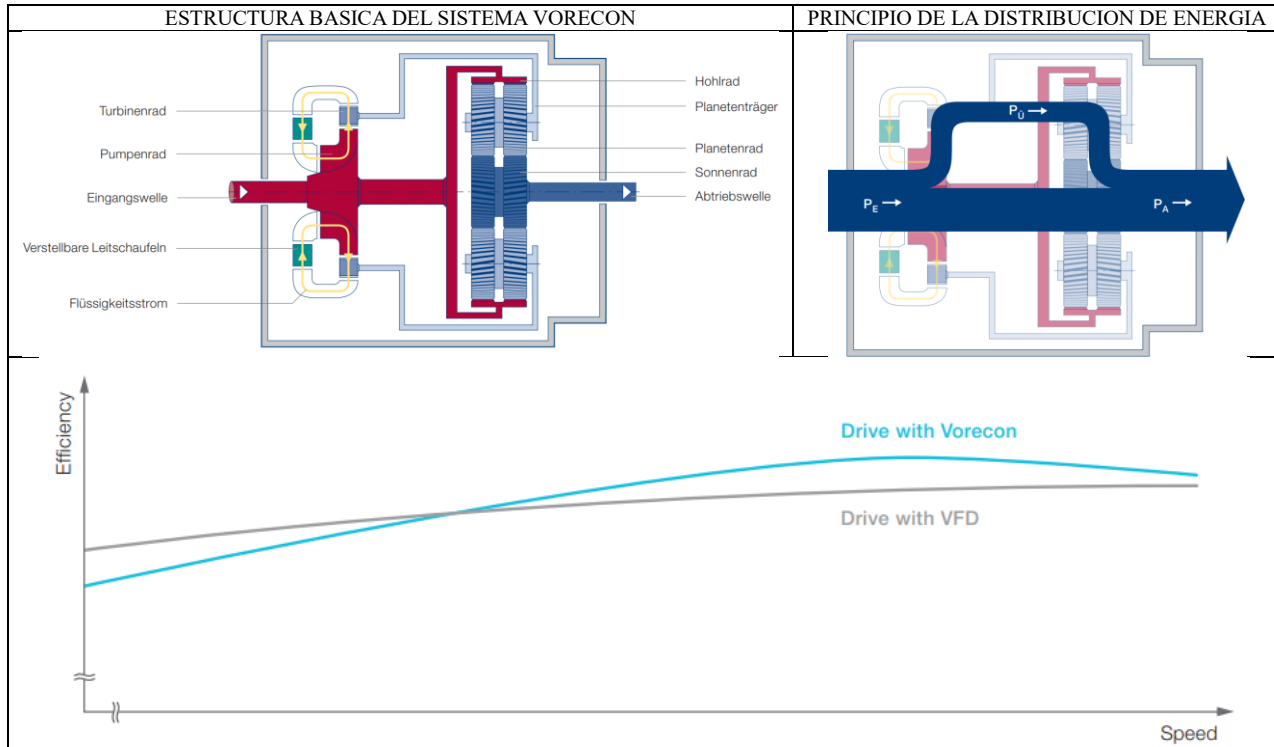


Tabla 2: Principio de super imposición de energía y eficiencia energética⁶

En la Tabla 3:Reporte de costes operativos energéticos se demuestra las ventajas energéticas del sistema VORECON en comparación con una turbina a vapor en una estación de compresión de gas con regulación de velocidad. El usuario reporta una regulación de velocidad entre el 90 y el 100% y también las horas de operación anuales. Para los puntos de operación mencionadas se estiman los costes operacionales de la turbina a vapor, haciendo un total de aproximadamente 9 millones de euros anuales.

Los costes de operación del sistema VORECON se calculan en función de la eficiencia energética del tren motriz y ascienden a 2,5 millones de euros al año. La sustitución de la turbina de vapor por un

sistema VORECON en la estación de compresión supondría un ahorro energético de 6,5 millones de euros al año.

El usuario también reporta los costes de mantenimiento anual y los consumos de agua. En conjunto el usuario tiene gastos operacionales de 10,3 Millones de euros usando la turbina a vapor en la unidad de compresión. Análogamente, el sistema motriz eléctrico VORECON tendrá un coste operacional total de 2,5 Millones de euros anual. En conclusión, el usuario ahorra 7,8 Millones de euros por año reemplazando el sistema motriz.

⁶ Efficient control of pumps and compressors, Vorecon variable speed planetary gear [Brochure]/ Voith Group / 2024 / Pag 11

Compressor system			Steam Turbine		VORECON system	
load pattern			Steam costs	25 €/ton	Electricity costs:	0,1 €/kW
Power	Speed	Operating hours	Steam consumption	Operating costs	System efficiency	Operating costs
[kw]	[rpm]	[h/year]	[kg/h]	€	[%]	€
2.680	3.240	510	46.300	590.325	93,7	145.860
2.851	3.200	1.445	44.141	1.594.594	94,1	437.980
2.810	3.150	3.145	42.143	3.313.493	94,0	939.726
2.737	3.100	2.805	41.616	2.918.322	94,0	816.536
2.719	3.051	425	40.501	430.323	94,1	122.825
2.769	2.999	170	39.624	168.402	94,1	50.014
				9.015.459	2.512.940	

Tabla 3: Reporte de costes operativos energéticos⁷

	Steam Turbine	Electric Motor
Energy Costs	9.015.459	2.512.940
Maintenance	414.504	5.077
Water cost	932.634	20.307
TOTAL	10.362.597	2.538.323
TOTAL SAVINGS		7.824.273

Tabla 4: Balance total de costes⁸

Efectividad del sistema VORECON:

Un sistema efectivo es un sistema eficaz y también eficiente. La eficacia se define haciendo las cosas correctas y la eficiencia se define haciendo bien las cosas. Para que un sistema sea efectivo se tienen que hacer bien las cosas correctas. La variación de velocidad en unidades de compresión centrífugas es el método más eficaz para el ahorro de energía. Adicionalmente para obtener altas utilidades la eficiencia de mantenimiento y la eficiencia energética tienen que ser altas. Alta eficiencia energética pero baja eficiencia de mantenimiento es contradictoria a la definición de eficiencia que es hacer bien las cosas.

La eficiencia de mantenimiento, la eficiencia energética y la eficacia del sistema VORECON están demostrados en los ejemplos anteriores. Por lo cual se concluye que el sistema VORECON es un sistema de alta efectividad en sistemas de compresión en la industria del gas y petróleo.

Criterios básicos para la correcta selección de unidades motrices de turbomaquinaria:

Los errores comunes en la selección de turbomáquinas son el sobredimensionamiento e infradimensionamiento de las unidades motrices o de la turbomáquina. Estos errores, que a veces pasan desapercibidos,

⁷ Representación propia de propiedad del Grupo Voith

⁸ Representación propia de propiedad del Grupo Voith

dos por años, ocasionan gastos operacionales innecesarios. Una maquina diseñada para trabajar al 100% de carga pero que opera con 110% de carga por tiempos muy prolongados, es una maquina infradimensionada. El operar sobre el límite de diseño ocasionará fallas, será el origen de paradas de producción no planeadas por mantenimiento y reparación.

Una maquina diseñada para trabajar al 100% de carga pero que opera con 50% de carga por tiempos muy prolongados, es una maquina sobredimensionada. El operar debajo el límite de diseño acortara los intervalos de mantenimiento, incrementará los gastos de mantenimiento y será una fuente de grandes pérdidas energéticas innecesarias por operar en niveles de baja eficiencia. El sobredimensionamiento de los motores eléctricos es muy común en el diseño de turbomáquinas, estos motores trabajan en rango bajos de eficiencia⁹.

$$P_{Motor}(kW) = F_s * (Potencia_{compresor} + Perdidas_{VORECON} + \Delta_{Tolerancias}) \quad \{8\}$$

El factor de Servicio F_s de la fórmula 8 es muchas veces el factor de sobredimensionamiento o subdimensionamiento. En compresores y bombas centrifugas un factor de servicio de 1,1 es más que suficiente para un buen desempeño.

Otro error muy común es pensar que al variar la velocidad del motor eléctrico la eficiencia permanece constante. La eficiencia del motor eléctrico varia con el cambio de la velocidad. Y esto tiene un impacto negativo no solo en el consumo de energía sino también en los intervalos de mantenimiento de los motores. En el sistema VORECON, el motor eléctrico opera a velocidad constante, es decir con la mejor eficiencia energética y de mantenimiento.

De la misma manera el operador se olvida que operando el compresor o la bomba centrifuga a bajas

rpm la eficiencia del sistema no permanece constante, sino que decrece enormemente. En turbomáquinas las pérdidas de energía por variación de velocidad debajo del 50% no tienen un impacto económico fuerte debido a que la potencia disminuye en un 87%¹⁰, pero el impacto negativo se ve en la disminución de la eficiencia de mantenimiento, descrita en los capítulos anteriores.

Para diseñar correctamente un sistema de bombeo, se tiene que definir bien los valores de operación real. Punto de operación excepcionales deben solucionarse con un equipo auxiliar para no impactar negativamente en la producción (efectividad del sistema) por un caso que sucede de vez en cuando. No tiene mucho sentido adquirir un motor de alta eficiencia y hacerlo operar en regímenes de baja eficiencia (bajas velocidades). Tampoco tiene sentido seleccionar una bomba al 100% de carga, con una eficiencia del 76% y operar la bomba al 50% de carga con una eficiencia del 45%. En este caso más tendría sentido tener dos bombas en paralelo, donde si se requiere carga al 100% se operan las dos bombas con una eficiencia del 76%.

Bibliografía

- [1] Control concepts for centrifugal compressor applications [paper]/Rainer Kurz / Mayo 2025
- [2] Energy Efficiency: Benefits of variable speed control in pumps, fans and compressors [Paper]/ Jacques Schonek / Mayo 2008
- [3] Increasing efficiency of the conventional auxiliary systems of power plants [Paper]/ Thomas Schmager
- [4] Efficient control of pumps and compressors, Vorecon variable speed planetary gear [Brochure]/ Voith Group / 2024

⁹ Assessing the energy/ efficiency of pups and pumps units; Bernd Soffel; 2015, Pag 20

¹⁰ Pumping manual international; Afinity laws, Brian Nesbitt, pag 192

[5] Cultura de la efectividad 2.0 [Book] / Colección acción / Julio 2017

[6] Pumping manual internacional / Brian Nesbitt, 2006

[7] Assessing the energy/ efficiency of pups and pumps units /Bernd Soffel /2015

[8] Reliability / design of mechanical system / Seongwoo Woo / 2017

Hoja de Vida del Autor

El autor es graduado de la Universidad Nacional de San Agustín/Arequipa/Perú, donde estudió ingeniería mecánica con especialización en Diseño de máquinas. También tiene un Maestría (MBA) en Management & Finance de la HWU Nürtingen/Alemania con especialización en estrategia corporativa. El autor cuenta con una amplia experiencia profesional en los campos de la automatización, el diseño de sistemas motrices eléctricos, sistemas motrices para maquinaria minera en sistemas de trituración y transporte de material, sistemas motrices de alta potencia para compresores y bombas centrífugas en la industria del petróleo y el gas. El autor, que actualmente dirige el departamento de Retrofit & Project Management de la División de Servicios del Grupo Voith-Turbo en Alemania, ha presentado ponencias sobre Electrificación y retroadaptación de turbomaquinaria en diversos congresos de la industria del petróleo y el gas en todo el mundo.