

ACIPET

Fracturas progresivas por fatiga asociadas al modo PID de variadores de velocidad ESP

Autor(es): Oscar Carreño (Baker Hughes), Diego Mosquera (Baker Hughes), Camilo Gonzalez (Baker Hughes), Rodrigo Gualy (Ecopetrol), Juan David Castro Perdomo (Ecopetrol), Angélica Casas (Baker Hughes), Daniel Pinto (Baker Hughes), Tony Guerra (Latam Airlines).

Categoría: Marque con una "X"

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.
Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

Resumen

Esta ponencia desea mostrar el desarrollo de la investigación y análisis de falla realizada al equipo de fondo del pozo Arrayan-04 el cual tiene un sistema ESP y tuvo una falla en donde el eje de la bomba fue fracturado sin mostrar rastros de sólidos o scale, el mismo se encontraba trabajando en modo PID con una amplia ventana de frecuencia siguiendo una PIP objetivo, el cual tiene como fin la parametrización de las ventanas de operación del modo PID en pozos con altas producciones de gas.

Durante el proceso de investigación se revisó el tipo de metalurgia y el tipo de fractura del eje en cuestión pudiendo realizar una exclusión de problemas de manufactura. Se evidenció a través del reporte de análisis de falla, que está estuvo asociada a ruptura por fatiga debido a múltiples ciclos de esfuerzos combinados de torsión. Se revisó el modo de trabajo del equipo de fondo en donde se observa la configuración del variador en modo PID y se surgieron preguntas como ¿cuál es la amplitud máxima de la ventana en frecuencia de este modo?, ¿se tiene en cuenta el torque máximo del eje y las oscilaciones cíclicas transmitidas por la variación de frecuencia en este modo?, ¿cuál es la variación en porcentaje del torque permitida para este equipo instalado en el pozo?, y finalmente se puede hacer un seguimiento y monitoreo al torque del equipo de fondo en el VSD (variador de velocidad) de manera remota?. Con base a esto, el propósito es responder estas preguntas y proponer poner ventanas de operación y las consideraciones a tener en cuenta cuando se decida usar este tipo de modos de control en el VSD.

Introducción

Los métodos de control aplicados a la operación de los equipos ESP ofrecen múltiples beneficios, sobre todo en operaciones desafiantes, donde el equipo debe manejar alta producción de gas, crudos pesados o incluso alta producción de sólidos. Esto debido a que básicamente permiten que el equipo pueda manejar situaciones complejas sin tener que detenerse.

Ahora bien, son las mismas aplicaciones las que llevan a que se parametrize de una u otra manera el equipo para llegar a la operación deseada, pero en algunas ocasiones encontrar los parámetros adecuado puede ser complicado y las ventanas operativas de frecuencia o corriente son tan amplias que aceleran el deterioro del equipo ESP. En muchas ocasiones el setting se hace basado en la experiencia del operador o del campo.

Es de suma importancia que se tenga el hecho que algunas condiciones operativas pueden afectar en gran medida la confiabilidad del equipo y debido a eso, en este trabajo se mostrará desde la experiencia algunos casos de falla donde su causa raíz está relacionada a ciclos de fatiga por torsión u otras formas de estrés inducida por modos de control.

Las dificultades de trabajo en este modo actualmente se basan en:

Tabla de Contenido

Resumen	1
Introducción.....	1
Marco teórico.....	3
Overview de Casos	6
Caso 1: Pozo 1 – Colombia. Runlife: 108 días.....	6
Caso 2: Pozo 2 – Colombia. Runlife: 692 días.....	7
Caso 3: Pozo 3 – Colombia. Runlife: 715 días.....	8
Caso 4: Pozo 4 (Aplicación exitosa en Colombia)	9
Modelo de simulación computacional de fatiga	9
Discusión: Lineamientos para configurar un control PID	12
Conclusiones.....	13
Referencias	14
Nota sobre los autores	15

1. Falta de criterio para seleccionar adecuadamente el PID teniendo en cuenta el equipo instalado y las condiciones del pozo.
2. Falta de control y actualización de los parámetros a medida que evoluciona la aplicación. Es decir, no se actualiza periódicamente el setting.

Debido a lo expuesto anteriormente, y por último, se recomendarán ventanas de operación y algunos criterios para reconocer situaciones donde las condiciones de operación no sean favorables para el equipo ESP y se puedan corregir para prolongar su tiempo de corrida.

Marco teórico

En este trabajo se estará constantemente enfatizando dos temas, el primero, el modo control PID en variadores de velocidad de equipos ESP, y el segundo, fatiga en ejes por esfuerzos cíclicos.

En esta sección explicaremos los fundamentos teóricos de los dos temas principales: Control PID y fatiga como modo de falla.

Modo de Control PID. Para llegar a explicar los modos de control primero se encuentra pertinente entender qué es un ciclo de control. Cuando se habla de un ciclo de control se hace referencia a un ciclo de lazo cerrado donde constantemente el sistema se pregunta sobre su estado actual y se realimenta indagándose dónde quiere estar (Valor target); la diferencia entre el valor actual y el setting en controlador lo llamamos error (Ver ilustración 1). En el caso de los equipos electrosumergibles para regular variables de operación; para esta situación comúnmente se utiliza el modo PID haciendo enfoque en tres parámetros: la PIP, la corriente de operación y la frecuencia del sistema; también se puede seguir otro parámetro.

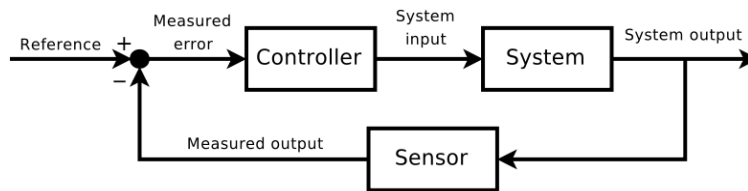


Ilustración 1. Esquema de un sistema de control en lazo cerrado (Instrumentation Forum, 2018)

¿Qué es un controlador PID?. El controlador PID es la implementación simple de la idea de retroalimentación (Aström & Hägglund, 2009).¹ En términos específicos, el PID es el acrónimo para Proporcional, Integral y Derivativo que son tres términos matemáticos. Estos tres componentes se relacionan con el fin de generar una señal de control que tienda a reducir o eliminar el error en estado estacionario (con la acción integral), además de lograr predecir acciones futuras (acción derivativa).

El término *Proporcional* hace referencia a una constante que multiplica; un número es proporcional a otro si se cumple:

$$y = nx \quad (1)$$

Claramente n puede tomar cualquier valor tanto positivo como negativo. Para plantear la ecuación más parecida a los estándares de la industria, la constante n se llamará ganancia K_p y la x indicará el error (ϵ), el cual intenta realizar correcciones teniendo en cuenta la diferencia entre el valor deseado y el valor actual. Por tanto, la acción proporcional estaría definida por:

$$y = K_p (\epsilon) \quad (2)$$

El término *Integral* significa la sumatoria de una función en un intervalo dado. En el caso del controlador integral se tendría la sumatoria del error a lo largo del tiempo pasado. Matemáticamente, la acción integral se expresa como

$$y = K_i \int \epsilon dt \quad (3)$$

Finalmente, la acción *Derivativa* hace referencia a la tasa de cambio del error durante un intervalo dado.

¹ Aström, K., & Hägglund, T. (2009). Control PID avanzado. España: PEARSON EDUCATION S.A.

$$y = Kd \frac{d(\varepsilon)}{dt} \quad (4)$$

La señal de control $u(t)$ estaría dado por la suma de estos tres términos:

$$u(t) = Kp(\varepsilon) + Ki \int \varepsilon dt + Kd \frac{d(\varepsilon)}{dt} \quad (5)$$

Esta ecuación también puede expresarse como

$$u(t) = K \left(\varepsilon + \frac{1}{Ti} \int \varepsilon dt + Td \frac{d(\varepsilon)}{dt} \right) \quad (6)$$

Siendo Ti el tiempo integral y Td el tiempo derivativo

Proporcional. Una característica central de esta acción es la respuesta precisa que brinda, nunca un poco antes o después, siempre lo hace de manera inmediata. Específicamente para este caso la salida del factor proporcional es el producto de la ganancia y el error medido (ε). Por tanto, cuanto mayor sea la ganancia proporcional o el error, mayor será la salida del factor proporcional. Establecer la ganancia proporcional demasiado alta hará que el controlador sobrepase el punto de ajuste deseado hasta el punto en que la salida del lazo se describe como oscilante.

La desventaja de un ciclo "solo proporcional" es que cuando el error se vuelve demasiado pequeño, la salida del ciclo se convertirá en despreciable. Por lo tanto, incluso cuando el ciclo proporcional alcanza un estado estable, seguirá generando un error.

Cuanto mayor sea la ganancia proporcional, menor será el error de estado estable, pero como se mencionó anteriormente, siempre existirá un error. A pesar de esto, cuanto mayor sea la ganancia proporcional, más propenso será el bucle de volverse inestable. Esto deja un error inevitable de estado estable que se conoce como offset.

Integral. La función principal de la acción integral es asegurarse que la salida del proceso coincide con el punto de salida en estado estacionario. Con un control proporcional, hay normalmente un error de control en estado estacionario. Con acción integral, un pequeño error positivo siempre conducirá a una señal de control creciente, y un error negativo dará una señal de control decreciente sin tener en cuenta lo pequeño que sea el error. Para entender esta acción es importante ejemplificar el factor integral como una canasta donde el ciclo almacena todo el error medido ($\int \varepsilon$). El error puede ser positivo o negativo, por lo que a veces el error llenará la canasta y a veces la vaciará.

Cuanto más corto sea el tiempo integral, más agresivo trabajará el integral para eliminar el error y mayor será el valor del disparo.

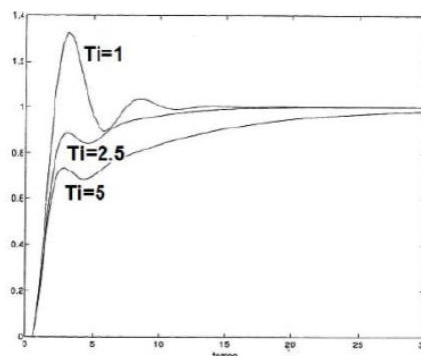


Ilustración 1. Efecto del tiempo Ti en el sobre-impulso generado en un control (Alpi, 2019)

Derivativo. El proporcional mira la instancia de error y la integral mira la acumulación de error, la derivada se preocupa por el error de ahora versus el error la última vez que se verificó. En otras palabras, la derivada observa la tasa de cambio del error ($\Delta\epsilon$). Cuanto más cambio tiene el error o mayor sea la ganancia de la derivada, mayor será el factor de la derivada. El efecto de la derivada es contrarrestar el sobre-impulso causado por los otros dos factores, P e I.

Cuando el error es grande, la P y la I empujarán la salida del controlador. Esta respuesta del controlador hará que el error cambie rápidamente, lo que a su vez hará trabajar la derivada para contrarrestar a P e I. Un buen factor D puede amortiguar valores altos de P e I.

Por último, la acción derivativa también puede dar mejores respuestas en casos donde la variable predominante es la de tiempo.

¿Qué hace un controlador PID? El funcionamiento de un controlador PID es un concepto que se explica de manera sencilla. El controlador PID mira el valor actual de un error (ϵ), la integral del error en un intervalo de tiempo ($\int\epsilon$) y la tasa de cambio del error ($\Delta\epsilon$).

Luego, determina la cantidad de corrección que se aplicará. El controlador continuará aplicando la corrección, hasta que se produzca un cambio.

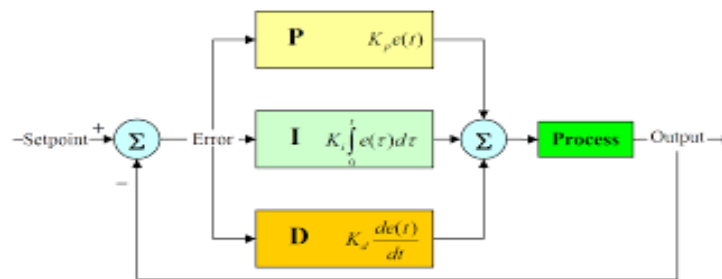


Ilustración 2. Esquema de un sistema de control PID (Gútiez, Iñigo, 2013)

Esto nos permite parametrizar un variador de velocidad y prácticamente olvidarnos del equipo de fondo.

Los controles PID más comunes en la operación de las aplicaciones ESP están determinados de la siguiente manera:

- Control por PIP: se define un set point o valor deseado de la presión a la entrada del intake (PIP) medida por el sensor de fondo, y tanto la frecuencia como la corriente se ajustan internamente para conseguir este objetivo. A estas dos últimas variables sólo se les permite moverse en un rango o banda determinada.
- Control por frecuencia: Se fija una frecuencia de operación como la variable que se desea mantener en el tiempo. La corriente y la PIP del sistema se ajustan en función de este valor dada la relación matemática que existe entre los tres parámetros.
- Control por Corriente: para este caso la variable objetivo es la corriente del equipo de fondo leída en el variador (carga del sistema). Nuevamente, los demás parámetros (frecuencia y PIP) se ajustarán hasta cumplir con este set point.

Aplicaciones PID en ESP. Se usan principalmente en pozos con variables de fondo inestables como PIP o corrientes, por alto manejo de gas. El modo de control PID encuentra ser muy útil para estabilizar las variables de producción y permitir la operación de pozos retadores.

Sin embargo, la aplicación de este modo de control somete al equipo ESP a esfuerzos y desgastes mecánicos adicionales que los modos de operación normales no generan, en mayor medida por la incorporación de cargas fluctuantes en la operación.

Fatiga. La resistencia a la fatiga se puede definir como el "fallo debido a cargas repetitivas, que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura" (Fuchs, 1980).

Normalmente se evidencian tres etapas:

Fase 1 (Inicio): Se inicia una o más grietas (muesca o fisura) en la superficie del material. Estas pueden aparecer en cualquier punto del material, pero en general ocurren alrededor de alguna fuente de concentración de tensión y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas.

Fase 2 (Propagación): La fisura se propaga por efecto de las cargas. Dichas cargas son principalmente generadas por el torque del motor en el caso de los equipos ESP, que se incrementan en condiciones de arranque, manejo de sólidos o crudos pesados.

Fase 3 (Ruptura): Cuando la sección transversal restante del material resulta demasiado pequeña, es decir cuando se produce el adelgazamiento de la sección transversal del material por separación de las partículas en el plano de la fisura, la sección neta de la pieza es incapaz de continuar resistiendo la carga desde un punto de vista estático produciéndose la rotura por fatiga.

Tipos de Esfuerzo.

- Flexión: Es el esfuerzo resultante de aplicar fuerzas perpendicularmente al eje principal del elemento que tienden a doblarlo. La flexión produce compresión en la parte cóncava del elemento y tracción en la opuesta, la convexa.
- Torsión: Las fuerzas que actúan sobre un objeto sometido a torsión tratan de retorcerlo, de girarlo en dos direcciones contrarias.
- Cortante: Es un esfuerzo que provocan fuerzas perpendiculares al eje longitudinal del elemento; aplicadas en sentidos contrarios sobre el mismo plano.

Overview de Casos

Caso 1: Pozo 1 – Colombia. Runlife: 108 días

Operación del equipo:

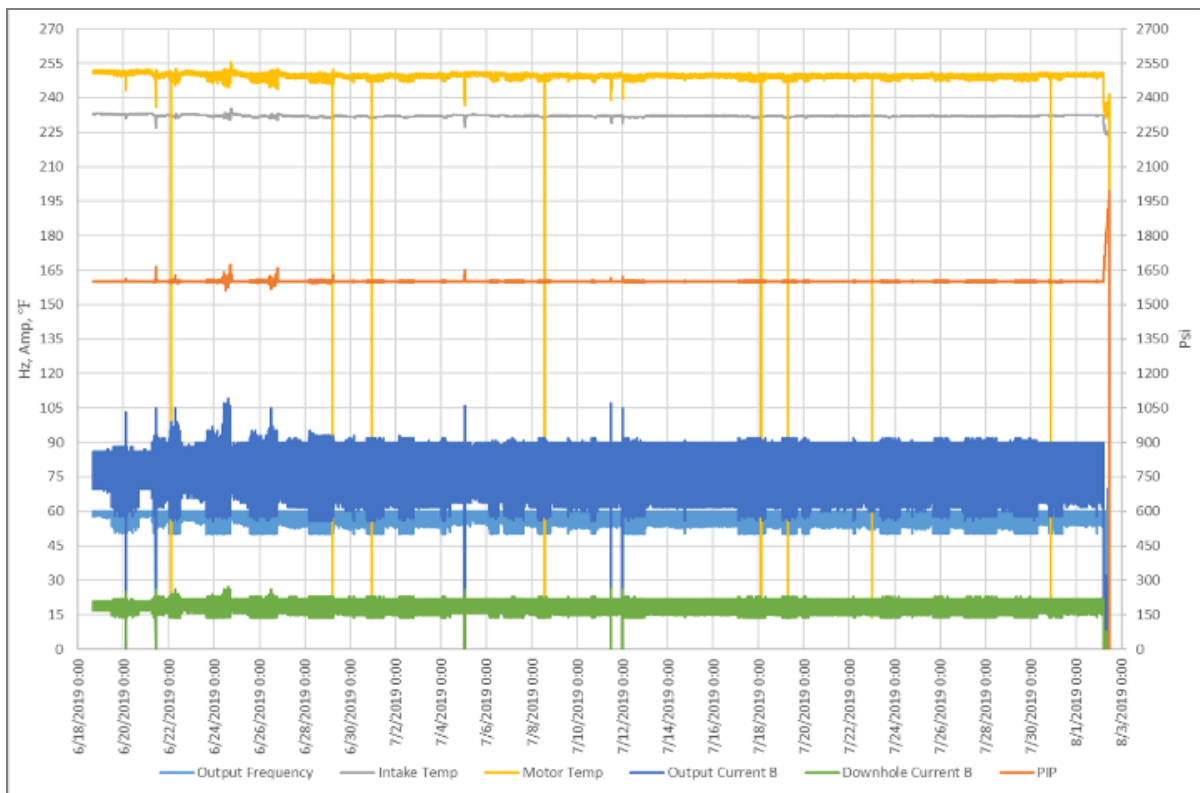


Ilustración 3. Data de VSD-Sensor Caso 1

Durante los últimos 45 días de operación se observaron las variables de temperatura y PIP con valores estables, pero con alta fluctuación de los valores de Frecuencia que oscilaba entre 50.5 y 60 Hz (ventana de 9.5 Hz) y de corrientes del VSD con oscilación entre 56 y 107 A (ventana de 51 A) y de corrientes del motor entre 14 y 27 A (ventana de 13 Amp), que traducidos a carga de motor son valores cercanos a un 25% de la carga del motor; lo anterior por estar trabajando configurado en modo de control PID para controlar la variable de PIP al variar la frecuencia. El día 02 de agosto a las 4:45 am se detuvo el equipo por alarma de baja carga (Underload) por falla mecánica en fondo.

Componente Fallado. Se encontró fractura del eje del separador de gas en la zona de acople en cabeza (estrías superiores, donde acopla con manejadora de gas); se evidenciaron múltiples planos de fractura, típico de fracturas progresivas por fatiga.



Ilustración 4. Vista lateral del eje roto en el caso 1.



Ilustración 5. Vista frontal del eje roto en el caso 1.

Causa raíz. Este tipo de falla normalmente está asociada a ruptura por fatiga debido a múltiples ciclos de esfuerzos combinados de torsión, que pudieron generar y/o propagar microgrietas que ocasionaron fracturas frágiles en distintos planos. No obstante, la única condición anormal evidenciada desde el punto de vista de la operación fue la ventana de 9.5 Hz cada 4 - 5 minutos implementada en el modo de control usado durante la corrida. Nótese que los intentos de arranque posteriores a la ruptura del eje evidenciada desgastaron la evidencia y no fue posible establecer el origen de las grietas ni analizar las superficies de fractura.

Los siguientes casos no incluyen fallas de ruptura de eje por fatiga, pero su causa raíz de falla está asociada a desgastes causados por el modo de control.

Caso 2: Pozo 2 – Colombia. Runlife: 692 días

Operación del equipo:

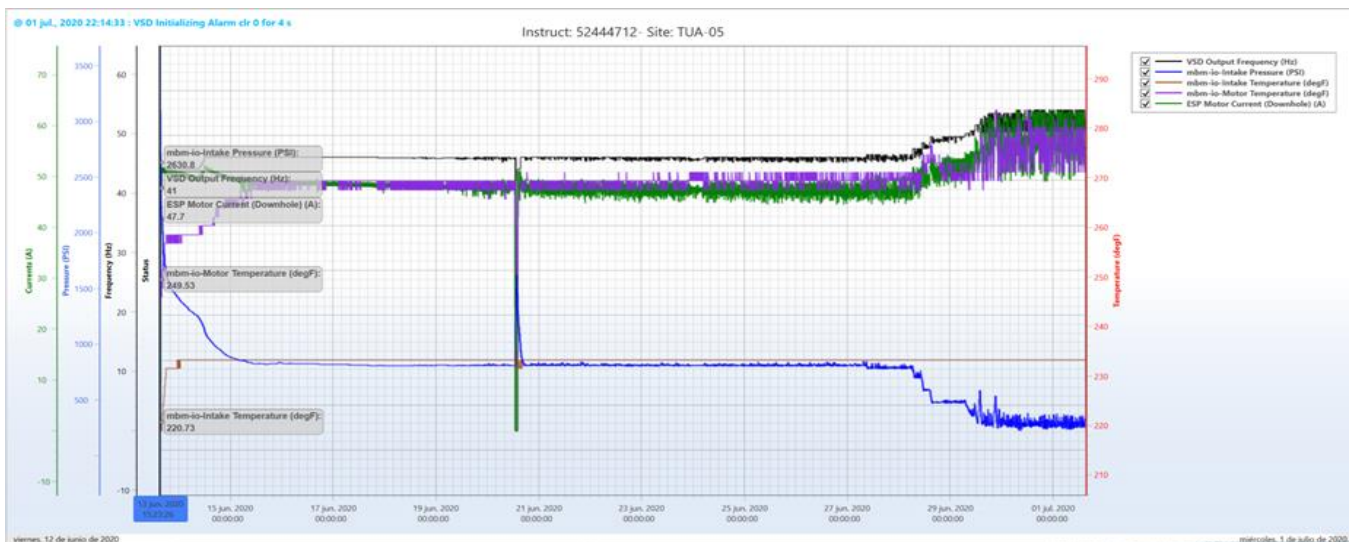


Ilustración 7. Data de Operación (VSD-Sensor) del caso 2.

El equipo operó en modo PIP, desde el día 28 de junio de 2020 se registraron incrementos de frecuencia hasta llegar a 54 Hz y llevar la PIP de 810 Psi @ 280 Psi, el equipo operó oscilando entre 50.5 Hz y 54 Hz, y manejó una corriente de motor entre 50 amperios @ 63 amperios. El 01 de Julio se evidenció ruptura del eje de la bomba productora inferior.

Componente Fallado. La bomba productora inferior presentó ruptura del eje a la altura del módulo de estabilización más cercano a la base. La zona aledaña a la fractura evidenció reducción de OD (maquinado) y recalentamiento severo. El buje de WC ubicado en el módulo #01, se encontró roto, agrietado y adherido al Spider-Bearing que lo soportaba.



Ilustración 8. Buje de WC roto en el caso 2.



Ilustración 9. Vista del eje roto en el caso 2.

Causa raíz. Se concluyó que la ruptura de eje en la bomba productora inferior fue consecuencia del recalentamiento excesivo y maquinado por el buje de WC en la zona aledaña a la estabilización más cercana a la base, lo que afectó sus propiedades mecánicas al punto de causar su ruptura cuando operaba con cargas normales. La ruptura de este buje de WC y la cuña aledaña a dicha zona, se produjo debido a afectaciones progresivas producidas por las fluctuaciones de las cargas, lo cual se observa típicamente en pozos con alto manejo de sólidos abrasivos, y acentuado por prolongados periodos de tiempo donde ocurre aceleración y desaceleración generada por los cambios de frecuencia evidenciados a lo largo de la operación de este equipo en el modo PID. En este caso las condiciones de los ciclos de operación evidenciados llevaron al inicio, propagación y ruptura del buje estabilizador de WC de una de las bombas.

Caso 3: Pozo 3 – Colombia. Runlife: 715 días

Operación del equipo:

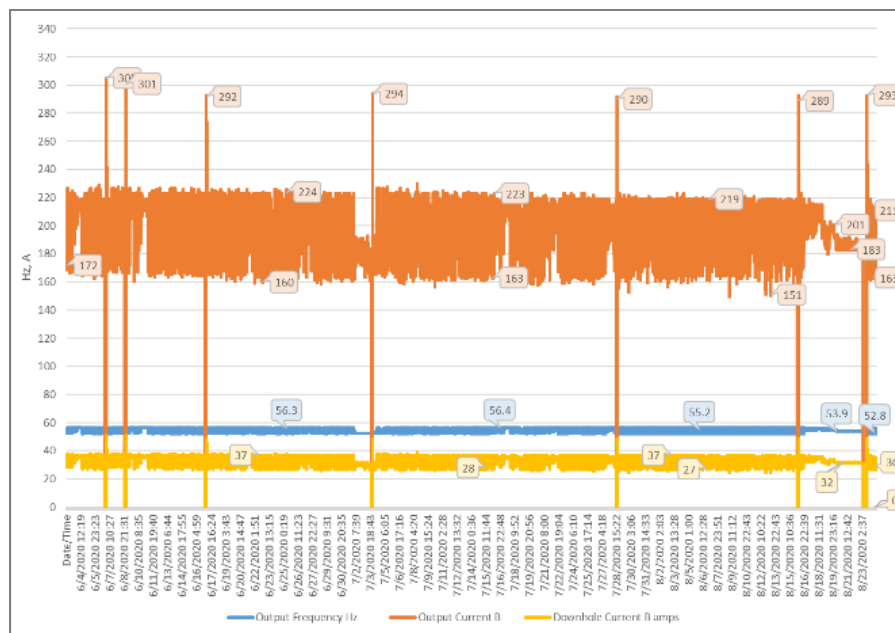


Ilustración 10. Data de VSD del caso 3

El equipo operó dentro de la zona de down-thrust, de acuerdo a las pruebas de producción de los 10 meses previos a la parada. Con el fin de mantener producción continua asegurando una PIP por encima de 800 psi, fue necesario implementar control PID en modo PIP pocos días luego del arranque del equipo ESP y así estabilizar la producción.

Componente Fallado. Este caso presentó falla en el conector Pot-head del equipo, se encontró sin aislamiento a tierra en dos de sus fases.

Causa raíz. El corto circuito encontrado fue causado principalmente por estrés eléctrico generado durante el control PID en modo PIP por altas fluctuaciones de corriente (entre 25 A y 36 A, aproximadamente el 33% de la carga habitual del motor) en periodos de tiempo prolongados (más de dos años); dicha operación fue necesaria debido al incremento acelerado de la PIP en fondo. Lo anterior con el fin de poder estabilizar la PIP a un valor donde se pudiera asegurar la producción continua, lo cual se logró, pero con efectos nocivos sobre la integridad de los componentes eléctricos del sistema.

Caso 4: Pozo 4 (Aplicación exitosa en Colombia)

Un claro ejemplo de un setting bien implementado evidencia ventanas de frecuencia con baja amplitud y variables de operación controladas que fluctúan alrededor de un valor medio con un error que se va reduciendo en el tiempo.

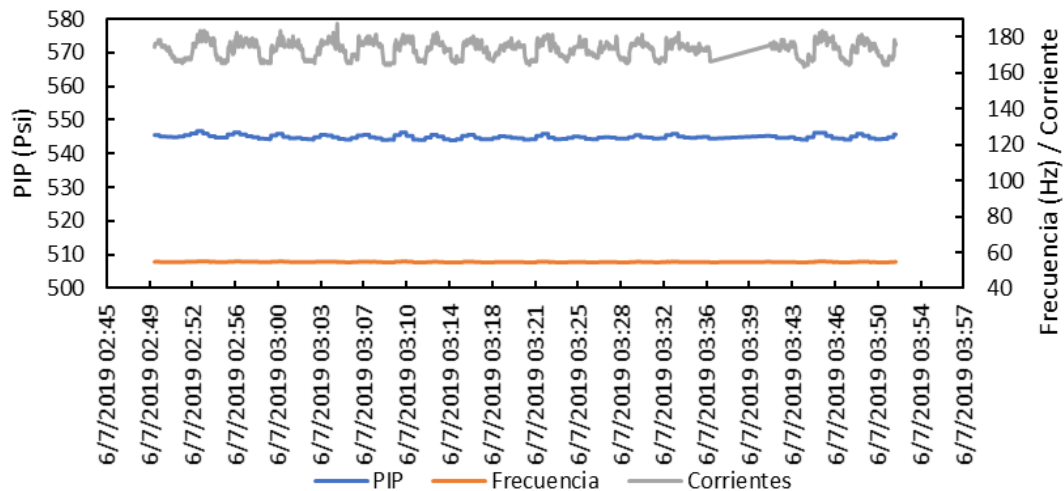


Ilustración 11. Variables de VSD-Sensor de un caso exitoso

Modelo de simulación computacional de fatiga

Se define el eje como uno de los elementos mecánicos más comunes. Su propósito es el de transmitir movimiento rotatorio y potencia. En general, el diseño del eje depende de los componentes asociados y contempla el material, geometría, esfuerzos y resistencia, deflexión y rigidez, además de frecuencia natural.

En vista de que los esfuerzos de flexión, torsión o axiales pueden presentarse en componentes medios como alternantes resulta clave considerar la posibilidad de una falla a fatiga ante alto número de ciclos.

El estudio de fatiga realizado por August Wöhler (1870) se caracterizaba por generar cargas de flexión rotativa a un eje. Dicho trabajo permitió establecer una relación entre la falla y el número de ciclos de carga, encontrándose también un valor límite carga por debajo del cual los ejes no presentaban falla.

Por consiguiente, el diagrama de esfuerzo vida se constituye como una herramienta práctica para la evaluación de este tipo de fallas.

El modo de falla por fatiga se distingue por ser un proceso de formación y propagación de microgrietas. Normalmente la nucleación de la grieta tiene lugar en puntos de alta concentración de tensiones, y su propagación es el resultado de la acción de cargas de tensión hasta la ruptura súbita por sobrecarga generalmente de apariencia frágil sin adelgazamiento.

En cuanto a la resistencia a la fatiga, esta se determina a partir de la prueba estándar en unas condiciones específicas que normalmente no corresponden con el escenario de operación, es por ello que se aplican los Factores de Marin que consideran corrección por acabado superficial, tamaño, carga, temperatura, confiabilidad y efectos varios (esfuerzos residuales, corrosión, recubrimientos, etc.) tal como se presenta en la ecuación 7.

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S'_e \quad (7)$$

donde S_e es el límite de resistencia a la fatiga en la ubicación, S'_e es el límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria y los valores K_a , K_b , K_c , K_d , K_e y K_f expresan los factores de modificación por condición superficial, tamaño, carga, temperatura, confiabilidad y por efectos varios, respectivamente.

Se obtuvo la curva de esfuerzo - vida, cuya vida infinita se alcanza a partir de 10^6 ciclos sobre la cual se determina la resistencia a la fatiga para el Caso 1 mencionado arriba. Hay que tener en cuenta que el eje fallará en su punto de menor diámetro y de máxima concentración de esfuerzos (cerca de las estrías).

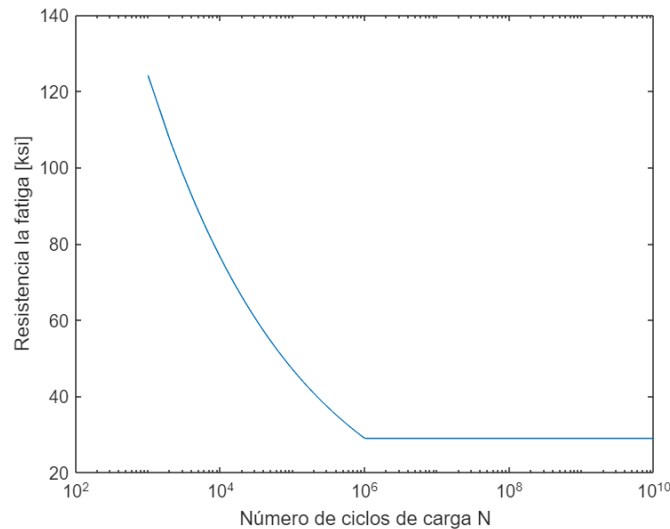


Ilustración 12. Curva de esfuerzo - vida del eje estudiado.

Partiendo de las observaciones experimentales se puede enunciar una de las teorías que describen la falla por fatiga en condiciones de carga fluctuante. El modelo usado fue Goodman debido a que este es más conservador en sus resultados. Con este modelo se determinan los esfuerzos medios y amplitud de la zona cuyos esfuerzos son seguros y garantizan la vida infinita de vida del eje por fatiga. El desarrollo del modelo tiene como punto de partida el cálculo de la resistencia a la fatiga del eje a torsión, a partir de la resistencia a fatiga a flexión rotativa y su respectiva corrección.

Línea de Goodman: define esfuerzo - amplitud de la siguiente manera:

$$\sigma_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right) \quad (8)$$

Siendo σ_m el esfuerzo medio y S_{ut} la resistencia última a la tensión, y cuyo factor de seguridad se determina como:

$$nf = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (9)$$

Es clave indicar que como buena práctica se determina un esfuerzo de amplitud máximo del 30% respecto del esfuerzo de resistencia a la fatiga, considerando siempre que entre menor sea su valor mayor será el valor admisible de torque nominal.

Tabla 1. Torques permisibles y factores de seguridad de acuerdo con la carga del eje.

Carga del eje %	Torque m [lb.in]	Torque a [lb.in]	Torque max [lb.in]	Torque min [lb.in]	nf
10	294.1268	320.9283	615.0551	-26.8015	2.8594
20	588.2537	320.9283	909.182	267.3254	2.5035
30	882.3805	320.9283	1203.3	561.4522	2.2263
40	1176.5	320.9283	1497.4	855.579	2.0044
50	1470.6	320.9283	1791.6	1149.7	1.8228
60	1764.8	320.9283	2085.7	1443.8	1.6713
70	2058.9	320.9283	2379.8	1738	1.543
80	2353	320.9283	2673.9	2032.1	1.4331
90	2647.1	320.9283	2968.1	2326.2	1.3378
100	2941.3	320.9283	3262.2	2620.3	1.2543

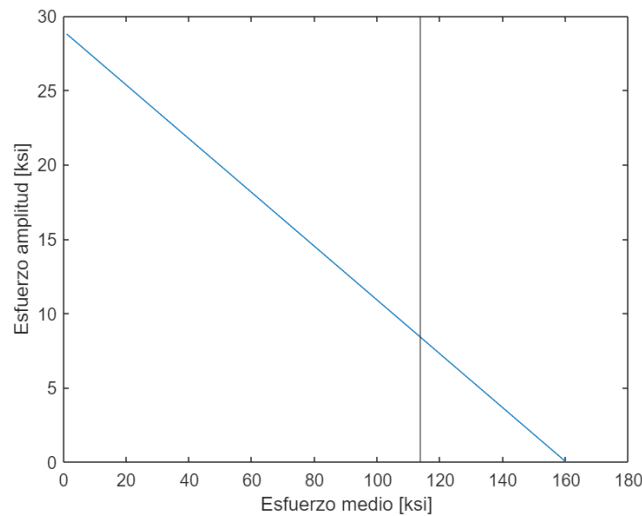


Ilustración 13. Diagrama de Goodman del eje cargado al 100%.

Al realizar el análisis en este Caso 1 de estudio se identificó que ante situaciones de factores de arranques sucesivos se pueden obtener esfuerzos que superan el esfuerzo máximo del eje de la bomba y por consiguiente degradan la vida del mismo y favorecen la falla a fatiga.

Utilizando un osciloscopio, es posible determinar un análisis de transientes con el fin de determinar los picos máximos de carga instantáneos que se observan en la señal de potencia y que no son registrados por los controladores debido a su corta duración. Comparando el valor pico de los transientes frente al valor estabilizado se puede definir un factor de esfuerzo.

Tabla 2. Sensibilidad del factor de esfuerzo.

Factor de arranque	Esfuerzo [ksi]
1	21.7912
2	43.5823
3	65.3735
4	87.1643
5	108.9558
5.1	111.1349
5.15	112.224
5.2	113.314
5.25	114.4036

La meta en el proceso de parametrización es minimizar el factor de esfuerzo tanto como sea posible validando que los valores máximos no superen los valores permisibles establecidos por el análisis de Goodman.

Discusión: Lineamientos para configurar un control PID

Después de diversos análisis y parametrizaciones a diferentes equipos en control PID, validando cumplir con el mínimo valor de factor de esfuerzo y reduciendo las cargas del diagrama Goodman, se logra conseguir unos lineamientos mínimos a tener en cuenta durante la parametrización del controlador PID.

1. Se debe reducir al máximo la ventana operativa de operación tanto límites bajos como altos en frecuencia. Una ventana operativa de 5 hz en motores de inducción cumple la regla; sin embargo, cambios de frecuencia de máximo 3 hz son los óptimos en términos de las cargas fluctuantes.
2. En ocasiones la frecuencia mínima de operación seleccionada para la ventana operativa no es suficiente para producir fluido en superficie; especialmente en aquellos pozos profundos y/o de baja productividad. En estos casos, hay presente picos de carga en cada ciclo. Seleccionando una frecuencia mínima de operación que garantiza flujo en superficie se logra disminuir en una proporción importante los transientes de carga en cada ciclo.
3. La frecuencia máxima de operación debe ser igualmente seleccionada con cuidado. Menores frecuencias representan mayor estabilidad en la respuesta y por consiguiente mejores resultados.
4. La carga del eje de la bomba juega un papel importante. No es lo mismo establecer una ventana operativa a baja carga que a máxima carga debido a los picos de los esfuerzos fluctuantes. Se requiere mayor atención en aquellas aplicaciones donde la carga del eje es mayor.
5. Las parametrizaciones deben actualizarse con periodicidad con el fin de ajustarse a las nuevas condiciones del pozo, de levantamiento y carga del equipo.
6. Se debe minimizar el tiempo de respuesta en velocidad para disminuir el estrés mecánico y eléctrico. Ajustando adecuadamente los tiempos de respuesta y ganancias se reducen los picos.
7. Se debe considerar la cantidad de paradas y re-arranques automáticos configurados en los controladores. Así mismo los protocolos de troubleshooting a la hora de diagnosticar los pozos.

El proceso para parametrizar el pozo para llegar a un óptimo modo PID se concluye en los siguientes pasos:

- a. Verificar frecuencia operativa Máxima antes de bloqueo por gas / en condiciones operativas normales.
- b. Verificar frecuencia operativa Mínima antes de bloqueo por gas.
- c. Parametrizar temperatura en fondo de trabajo del pozo en producción.
- d. Verificar el punto mínimo de operación de PIP (psi) del pozo al cual se desea llegar.
- e. Realizar el seguimiento tras parametrizar una ventana máxima de ± 2.5 Hz en la máxima frecuencia antes de bloqueo por gas.

Conclusiones

1. Dentro del caso de estudio se concluye que una ventana operativa mayor a 5 Hz puede llegar a disminuir el runlife del pozo y/o llegar a ser destructiva por los cambios de momentos de torsión en el eje en intervalos cortos. Asimismo, la ventana operativa está definida por la carga del equipo. A mayor carga, se debe reducir la amplitud de la ventana de frecuencia.
2. Someter el equipo ESP a arranques fuertes tras paradas aportan ciclos de esfuerzos a torsión que acortan la vida del eje de los componentes. Al estar operando de este modo, el torque máximo de trabajo puede reducirse hasta 5 veces respecto al valor nominal del torque para el material del eje en condiciones de no fatiga.
3. Un análisis y diagnóstico completo que garantiza el runlife de un equipo se consigue a través de un equipo interdisciplinario que trabaja desde diferentes frentes combinando herramientas, conocimiento y diferentes perspectivas con el fin de complementar las limitantes de las herramientas actuales como los softwares utilizados en la industria para el análisis y dimensionamiento de equipos electrosumergible que no incluyen herramientas de análisis de fatiga y de cargas fluctuantes.

Referencias

- Alpi, L. (2 de December de 2019). *Control PID: rompiendo la barrera del tiempo*. Obtenido de https://www.novusautomation.com/site/default.asp?Idioma=34&TroncoID=053663&SecaoID=0&SubsecaoID=0&Template=../artigosnoticias/user_exibir.asp&ID=638091
- Aström, K., & Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. España: PEARSON EDUCATION S.A
- Baker Hughes. (2019). *Reporte de Análisis de Falla Caso-01*. Neiva: Confidencial.
- Baker Hughes. (2020). *Reporte de Análisis de Falla Caso-02*. Neiva: Confidencial.
- Baker Hughes. (2020). *Reporte de Análisis de Falla Caso-03*. Neiva: Confidencial.
- Congreso Mexicano del Petroleo. (2021). *Normas Editoriales*. Obtenido de <https://congresomexicanodelpetroleo.com/NormasEditoriales.html>
- Gútiez, Iñigo. (2013). *PROGRAMACIÓN SIEMENS.com*. Obtenido de <https://programacionsiemens.com/pid-en-step7/>
- Instrumentation Forum. (May de 2018). *Instrumentation Forum*. Obtenido de Open-loop and closed-loop (feedback) control: <https://instrumentationforum.com/t/open-loop-and-closed-loop-feedback-control/4059>
- Xunta de Galicia. (s.f.). *Cizalla, Corte o Cortadura*. Obtenido de https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/45_cizalla_corte_o_cortadura.html
- Xunta de Galicia. (s.f.). *Flexión*. Obtenido de https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/43_flexin.html
- Xunta de Galicia. (s.f.). *Torsión*. Obtenido de https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/44_torsin.html
- YASKAWA. (2008). *Introduction to PID Control*. Yaskawa Electric America,.

Nota sobre los autores

Diego Mosquera Chávarro: Diego es ingeniero mecánico y eléctrico de la Universidad de los Andes, Colombia. Se ha desempeñado durante sus más de 12 años de trayectoria en Baker Hughes como ingeniero de Confiabilidad, para la línea de ALS.

Oscar Carreño: Oscar es un ingeniero electrónico y especialista en telecomunicaciones. Se ha desempeñado durante sus más de 12 años de trayectoria en Baker Hughes como ingeniero de aplicaciones y ventas, así como coordinador de cuenta para Ecopetrol en la zona de Huila, Putumayo y campo Rubiales dentro y Gran Tierra Energy para la línea de ALS.

Camilo Gonzalez Artunduaga: Camilo es ingeniero mecánico y Magister en Ingeniería mecánica de la Universidad de los Andes, Colombia. Se ha desempeñado durante sus más de 12 años de trayectoria en Baker Hughes como ingeniero de aplicaciones, ingeniero de ventas, líder de Confiabilidad y de Ingeniería para la línea de sistemas de levantamiento Artificial (ALS).

Rodrigo Andres Gualy: El autor se ha desempeñado como ingeniero de Producción en Ecopetrol S.A, es ingeniero de Petróleos, especialista en Ingeniería Ambiental y Magister en Ingeniería de Petróleos de la Universidad Surcolombiana. Su especialidad ha sido los sistemas de levantamiento Artificial.

Juan David Castro Perdomo: El autor se ha desempeñado como ingeniero de Petróleos en Stork Company y actualmente como ingeniero de Producción en Ecopetrol S.A, es ingeniero de Petróleos y especialista en alta Gerencia de la Universidad Surcolombiana.

Angélica Casas: Angélica es ingeniera mecánica de la Universidad Nacional de Colombia. Se ha desempeñado durante su primer año de trayectoria en Baker Hughes como Ingeniera Jr pasante apoyando los procesos de ingeniería de aplicaciones y ventas para la línea de ALS para la cuenta de Sierracol Energy.

Tony Guerra Sepúlveda: Este autor se desempeñó como Ingeniero de Confiabilidad para ALS cuando trabajaba en Baker Hughes. Es Ingeniero Industrial e Ingeniero Mecánico de la Universidad de los Andes, actualmente es candidato a MSc en Ingeniería de Petróleos de la misma universidad. Actualmente se encuentra laborando en Santiago de Chile para Latam Airlines.