



BUENAS PRÁCTICAS PARA LA SELECCIÓN Y COMPRA DE BOMBAS CENTRIFUGAS (PUCE) API 610 PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS LÍQUIDOS POR DUCTOS.

E.mail: giovanny.torres@cenit-transporte.com, carlos.torres@cenit-transporte.com

1. RESUMEN

Las bombas son el corazón de los sistemas de transporte de hidrocarburos líquidos por ductos, existen en tres tipos de tecnologías principalmente: Bombas centrífugas (PUCE¹), Bombas de Desplazamiento Positivo tipo Reciprocante (PURE²) o tipo Rotativa (PURO³). Cualquier desviación en el proceso de selección, compra y construcción de estos equipos puede generar grandes impactos en la confiabilidad del sistema durante todo el ciclo de vida de los activos (LCC⁴); generando altos costos de OPEX⁵ y/o lucro cesante por el impacto a la operación (menores nominaciones) del sistema de transporte.

El trabajo presentado en este documento resume las buenas prácticas técnicas y organizacionales que se implementaron, y los beneficios que se obtuvieron durante el proceso de renovación tecnológica de Unidades Paquete de Bombeo (UPB), compuestas por bomba, variador estático de velocidad y motor eléctrico con potencias entre 200HP y 3000 Hp durante los años 2020 a 2023.

Las buenas prácticas permitieron entre otros: i) seleccionar equipos con alta eficiencia energética, a costos competitivos y flexibilidad operativa, ii) mejorar los tiempos y costos en la evaluación de ofertas, iii) estandarizar la selección de tecnología de variadores de velocidad y iv) permitir la réplica de buenas prácticas en futuros procesos de compra sin que se impacte por la rotación de personal.

Es importante indicar que las prácticas expuestas en este documento están definidas para bombas tipo BB3 y VS6 utilizadas en el sector de transporte de hidrocarburos por ductos, sin embargo, la mayoría de las recomendaciones se pueden extender a otras aplicaciones que involucren el uso de PUCE tipo ANSI⁶ o HI⁷.

2. INTRODUCCIÓN

En la industria Oil & Gas se estima que el 90% de los equipos de bombeo son de tecnología centrífuga (PUCE), y en la industria en general se cree que al menos el 75% de las PUCE

presentan sobredimensionamiento por más del 20% (Efficient, 2016). Adicionalmente, se han evidenciado casos donde los motores eléctricos de las bombas se seleccionan para operar en el punto rated⁸ y en caso de requerirse un incremento de flujo, la unidad no tendría la capacidad de operar en puntos por encima de dicho valor.

De acuerdo con la literatura y la experiencia de los autores se han evidenciado los siguientes riesgos que se pueden derivar de una selección inadecuada de una UPB.

- Responsabilidades contractuales fraccionadas
- Riesgo de pérdida de información o garantía a futuro por desaparición del intermediario del mercado
- Limitaciones en operación futura por incremento de caudales o requerimientos de cabeza
- Subdimensionamiento del plan de sellado
- Selección de equipos ineficientes
- Sobrecostos por ajustes en parámetros de diseño o requerimientos operativos durante el proceso de fabricación de los equipos
- Sobredimensionamiento de equipos

La selección, compra y construcción de las PUCE es un proceso que incluye múltiples variables y requiere realizarse con criterios y pasos sistemáticos para una adecuada mitigación de riesgos, debido al impacto directo que estos equipos tienen en CAPEX⁹ y OPEX⁵ y donde una desviación no tolerable podría impactar la operación y desempeño del sistema de transporte por ducto.

3. ENFOQUE PROPUESTO

Con el fin de abordar los riesgos descritos se implementó el proceso descrito en la figura 1. En dicho proceso, se parte de las variables esenciales operativas (1) derivadas de los escenarios de negocios de la compañía. Posteriormente se selecciona el tipo de tecnología (2) a aplicar (PUCE /PURE/PURO), así como el sistema requerido para control y variación de velocidad de las bombas. En los casos donde se selecciona PUCE, se debe establecer la mejor configuración

¹ PUCE: Pump Centrifugal, Abreviación según ISO14224

² PURE: Pump Reciprocating, Abreviación según ISO14224

³ PURO: Pump Rotary, Abreviación según ISO14224

⁴ LCC: Life Cost Cycle (Costo de Ciclo de Vida)

⁵ OPEX: Operating Expenses (Gastos Operativos)

⁶ ANSI: American National Standards Institute

⁷ HI: Hydraulic Institute

⁸ Punto Rated: Punto nominal de selección de una PUCE (caudal, cabeza)

⁹ CAPEX: Capital Expenditure (Gastos de Capital)



de equipos (3) que aplica para el sistema, unidades en conexión serie o en paralelo, así como la cantidad objetivo de PUCE que se determine según flexibilidad, características operativas, tamaño y respaldo; siendo esto esencial para la preselección de equipos (4) de acuerdo con la disponibilidad de oferta del mercado (5). Con los pasos previos se logra consolidar información fundamental para Elaborar Términos de Referencia incluyendo aquellas pruebas funcionales que deben realizarse a los equipos críticos (6) con los cuales se define el proceso de selección, estableciendo mecanismos para la evaluación técnica de las ofertas (7). Es importante asegurar la ingeniería de fabricación de las bombas (8), así como asegurar la participación de personal idóneo en el atestiguamiento de las pruebas funcionales que se soliciten (9).

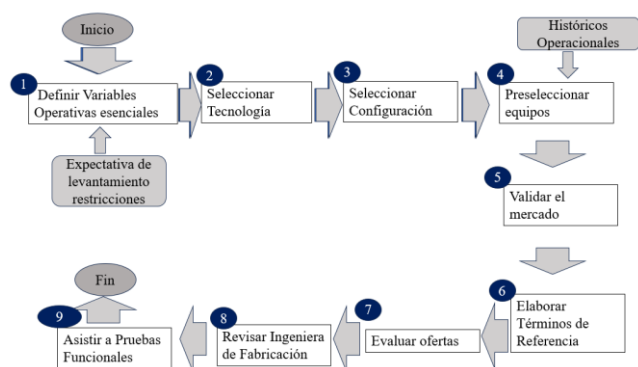


Figura 1. Pasos Desarrollados para el Proceso de Selección y Compra de PUCE API 610 tipo BB3 y VS6. Fuente: Elaboración propia

3.1 Paso 1 - Definir Variables Esenciales Operativas

La selección de las unidades de bombeo en el transporte de hidrocarburos por ductos está influenciada principalmente por cuatro 4 variables propias al sistema en donde operarán:

Presión de Descarga: Debe estimarse considerando expectativas específicas del sistema, tal como incrementar presiones de operación (ver paso 5 Figura 1), ya sea por proyectos de recuperación de integridad mecánica del ducto y/o activos o porque existan proyecciones de incremento de capacidad. Validar las premisas de presión es fundamental para evitar que a futuro la unidad quede sub dimensionada en potencia y/o rating de la carcasa, generando riesgo de pérdida de oportunidad de negocio o consumo elevado de DRA¹⁰ ante un escenario de incremento de caudal.

NPSH¹¹: Parámetro esencial para mitigar riesgo de cavitación y daño del equipo. Para equipos pequeños de bombeo API 610 (OH1, OH2, OH3) se recomienda aplicar las prácticas del ANSI/HI 9.6.1-2017, y para equipos grandes API 610 (BB1, BB3, VS6) aplicar cálculos de energía de succión y/o velocidad del fluido en el ojo del impulsor. Se deben considerar los valores de temperatura y presión de vapor del fluido más críticos del proceso. Dentro de los errores comunes que se cometen en su determinación se encuentran: i) no considerar la presión atmosférica específica al sitio de operación de la bomba, ii) subestimar valor de temperatura de operación y iii) para el caso de bombas VS6¹², no indicar para dónde se realizó el cálculo, ya sea en brida de succión del equipo o en el ojo del impulsor de primera etapa.

Caudal: Es importante definir dos tipos de caudales: el caudal objetivo que corresponde al caudal máximo que se espera obtener en el horizonte de tiempo del proyecto; y los caudales normales (iniciales) de operación. Esto con el fin de seleccionar una bomba con una adecuada área de operación entre el 70 y el 120% del caudal del BEP¹³ como zona preferida, de acuerdo con el estándar API 610. Ver más detalles en el paso 4, Preseleccionar Equipos.

Densidad: En el caso de transporte de fluidos por baches, es común el cambio de la densidad, por lo cual esta variable se debe tener presente para la definición y variación de la presión de descarga, caudal y potencia. En los casos donde se tenga expectativa de transportar fluidos con condiciones especiales como alta presión de vapor (por ejemplo, GLP¹⁴), deberá considerarse para la especificación de la carcasa y plan de sello.

Viscosidad: Su variación impacta de manera significativa la curva del sistema, la curva de la bomba, la presión de descarga, la eficiencia energética y la potencia requerida. Tener presente los cambios de la viscosidad en el horizonte de tiempo del proyecto son fundamentales para evitar sub dimensionar equipos en cabeza o sobredimensionarlos en caudal.

3.2 Paso 2 - Seleccionar Tecnología

Para seleccionar el tipo de tecnología de las bombas (PUCE, PURE, PURO) se suelen utilizar los siguientes criterios:

NPSH¹⁵: Este parámetro define el tipo de bomba a utilizar en función de los cálculos de caída de presión en la brida de succión de la bomba y la presión de vapor más alta del

¹⁰ DRA: Agente reductor de fricción. Químico utilizado en la reducción de requerimientos de potencia en un sistema de transporte por ductos.

¹¹ NPSH: Cabeza Positiva Neta de Succión.

¹² VS6: Bombas verticales suspendidas de acuerdo con clasificación API 610.

¹³ BEP: Best Efficiency Point, Punto de mejor eficiencia de una bomba para una velocidad de giro específica.

¹⁴ GLP: Gas Licuado del Petróleo



líquido a transportar medido a la condición de temperatura más alta. Como estrategia para bombas PUCE con bajos NSPH disponibles (menores a 20 ft) se pueden utilizar: 1. bombas verticales (VS) para ampliar la cabeza desde el nivel más bajo del tanque al ojo del primer impulsor, 2. utilizar motores de baja velocidad, por ejemplo, 1800RPM, 3. incrementar el diámetro del impulsor, 4. utilizar impulsores de doble succión o 5. utilizar inductores en el primer impulsor. En los casos donde no sea práctico implementar las soluciones propuestas se deberá optar por otro tipo de bombas como PURE/PURO.

Material Particulado: Una buena práctica de ingeniería es que las PUCE se especifiquen con holguras estándar de fabricante o según API 610 dependiendo del tamaño de partícula, concentración y dureza de los sólidos suspendidos presentes en la corriente de líquidos. En algunos casos esto implica que el tamaño de partícula sea inferior al 50% de las tolerancias que se tienen al interior la bomba.

Presencia de Aire o Vapor: Se adoptó el criterio de restringir el uso de PUCE en los casos donde se tenga el riesgo de operar el equipo con porcentajes de gas mayor al 2% en volumen disuelto en el líquido, esto debido a que se baja drásticamente el desempeño de la unidad hasta ser inestable y perder su llenado.

Viscosidad: Para altas viscosidades (igual o superior a 1000cSt @30°C), se recomienda utilizar PURE o PURO porque presentan mejor eficiencia que las PUCE (Pérez, 2015). Para viscosidades entre 250 cSt y 1000 cSt @30°C se recomienda hacer un estudio de LCC para la selección de la mejor tecnología. Es importante validar la viscosidad a la temperatura de bombeo para definir el consumo real de potencia y la corrección por viscosidad en la selección de la bomba.

Velocidad Específica (Ns): En los casos donde la Ns sea inferior a 500, se deberá optar por seleccionar bombas de desplazamiento positivo (PURE/PURO). Para mayor detalle ver (Pérez, 2015).

Los siguientes pasos aplican específicamente a los casos donde se seleccionan PUCE. Para selección y compra de bombas PURE/PURO se deberán hacer algunos ajustes a este proceso.

3.3 Paso 3 - Seleccionar Configuración

Existen dos configuraciones para la instalación de las PUCE: Serie o paralelo. La configuración que se seleccione define

las presiones máximas de succión, de descarga y caudal que manejarán los equipos.

A continuación, se indican varios criterios que normalmente se tienen en cuenta para seleccionar la configuración:

1. **Operación en estado transitorio por fuera de ventana de integridad (IOW¹⁶).** Durante la operación de un sistema de bombeo existen dos estados transitorios que deben revisarse: arranque y parada súbita del sistema, y arranque y parada de cada unidad. Como práctica recomendada, la configuración en serie se favorece para los ductos en terrenos plano-ondulados donde se tiene una cabeza dinámica mayor que la cabeza estática (Figura 2), mientras que para sistemas en terrenos montañosos se debe también evaluar la configuración en paralelo (Figura 3). No obstante, es recomendable evaluar en cada caso el LCC, flexibilidad operativa y riesgos residuales al aplicar estrategias de control y mitigación.

En las figuras 2 y 3, se presenta el comportamiento esperado de cada una de las configuraciones dependiendo de la topografía del ducto. La curva de desempeño de la bomba sigue el comportamiento de la curva del sistema, sus valores de cabeza y porcentaje de cambio de caudal son particulares y dependen de cada curva de sistema y de desempeño de la bomba. Los valores mostrados en las figuras 2 y 3 corresponden a un ejemplo.

- a. En terrenos **plano-ondulados**, si se aplica la configuración en paralelo se presentará el riesgo de operar en run-out (flujo en exceso) cuando se arranca una PUCE o cuando se apaga súbitamente una de varias PUCE operando, esto llevando a las PUCE restantes a quedar operando en run-out, en cuyo caso como protección de los equipos se activan alarmas de protección de los equipos generando paradas indeseadas del sistema. En caso de configuración en serie, con una sola unidad se pueden mantener las condiciones operacionales dentro de la ventana operativa de la bomba seleccionada.
- b. **Topografía montañosas:** En estos casos se debe evaluar ambas configuraciones, para el caso de configuración en serie es posible exponer a una PUCE a operar en flujo mínimo ante la demora de entrada de la segunda unidad o salida súbita de una de las PUCE. Para este caso la configuración en paralelo ofrece unas ventajas ante los eventos descritos, y la bomba quedará operando dentro de la ventana de operación permitida (IOW).

¹⁶ IOW: Integrity Operating Windows



En conclusión, ambas configuraciones deben evaluarse de acuerdo con la característica del sistema, vale resaltar que la PUCE en aplicaciones en serie es generalmente sencilla en su diseño mecánico, mientras que la configuración en paralelo demanda una PUCE con diseño más complejo debido al significativo incremento en etapas y por ende en longitud del rotor. Existen otras consideraciones específicas a confiabilidad, sensibilidad en pérdida de capacidad del sistema y preservación de calidad de los fluidos transportados, todos aspectos a considerar en la mejor configuración.

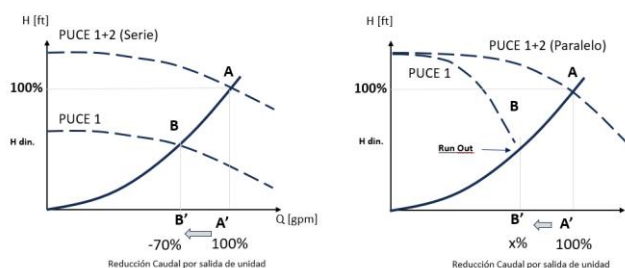


Figura 2. Ejemplo Sistema con topografía Plana ($H_{geo} \approx 0$). Fuente: Elaboración propia basado en (SULZER, 2012).

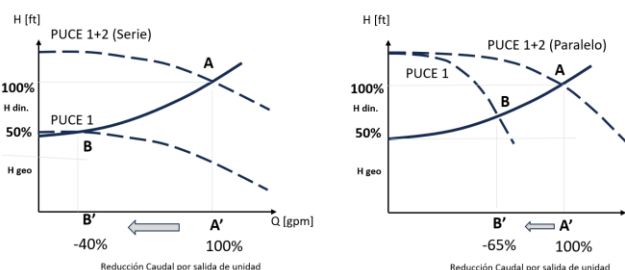


Figura 3. Ejemplo Sistema con topografía montañosa ($H_{geo} > H_{din.}$). Fuente: Elaboración propia basado en (SULZER, 2012).

- c. **Eficiencia del Conjunto:** Es una buena práctica validar en el mercado las dos opciones, paralelo y serie independiente de la topografía del terreno, revisando la eficiencia que genera cada una de las alternativas. Existen casos donde este criterio podría indicar lo contrario lo anteriormente descrito como preferente. Este criterio aporta significativamente en ahorros de OPEX y LCC.
- d. **Reutilizar Configuración Existente:** En los casos donde se hace reposición de equipos es común utilizar la configuración existente de tubería de succión y descarga. En este caso, es importante validar si el nivel

de inversión que se requiere (CAPEX) para cambiar de configuración de tubería es amortiguada por otro beneficio como mitigación de riesgos o ahorro en OPEX.

- e. **Mitigación de Contaminación de Productos:** Para los casos donde se requiera una mitigación de contaminación de producto, como en el caso de transporte de refinados donde un galón de B2 puede contaminar 400 galones de Jet, se recomienda la configuración en serie.

De acuerdo con la experiencia de los autores se debe preferir el criterio de eficiencia del conjunto dado que este criterio es el que más genera beneficio, porque permite cubrir todos los costos por cambio de infraestructura. En los casos donde la configuración en paralelo sea la mejor alternativa, se deben identificar procedimientos de flushing o barridos de línea¹⁷ como medidas de mitigación de riesgos y/o incluir estrategias de control para mitigar los riesgos expuestos en la operación en estado transitorio. No obstante, en los casos donde se tengan altas variaciones en la confiabilidad de suministro eléctrico y esto no sea subsanable, se podría preferir el criterio de operación en estado transitorio, esto para prevenir pérdida de ingresos por salida constante del sistema de bombeo por disparo de las unidades en Run-Out y daño prematuro de los equipos. En todos los casos se deberá evaluar los costos adicionales dentro del modelo de Eficiencia de Conjunto para permitir una evaluación completa de la configuración a seleccionar.

3.4 Paso 4 - Preseleccionar Equipos

Para preseleccionar los equipos se realizan corridas hidráulicas para los escenarios de operación actuales y proyectados, definiéndose mínimo 4 puntos: a) Rated (nominal) define la cabeza máxima a la que puede operar la bomba, b) normal 1, corresponde al valor de la moda de presión y caudal esperado, c) normal 2, punto a menor presión, define la velocidad mínima a la que debe operar la bomba y d) normal 3, representa el caudal mínimo esperado. En la figura 4 se representa de manera esquemática los 4 puntos. Al especificar de esta forma las PUCE, genera el beneficio de mostrar al fabricante el área de operación de la bomba para que se descarten zonas de vibración o resonancia, así como para mostrar la velocidad y caudal mínimo a la cual operará el equipo de manera frecuente, esto es relevante principalmente en ductos donde se transporta diferentes productos por baches.

¹⁷ El barrido de línea es un procedimiento operativo que se utiliza para desplazar un producto remanente por el producto que se va a bombear para evitar contaminaciones.

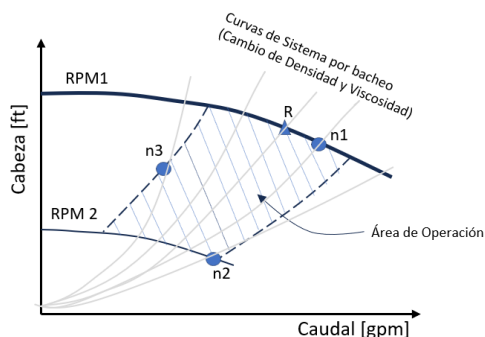


Figura 4. Puntos requeridos en la preselección. Fuente: elaboración propia.

Como se ve en la figura 5, especificar dos puntos {R, n1} disminuye la incertidumbre entre las curvas presentadas por los oferentes, dado que si se especifica un solo punto hay una gran cantidad de curvas que podrían cumplir dicho parámetro.

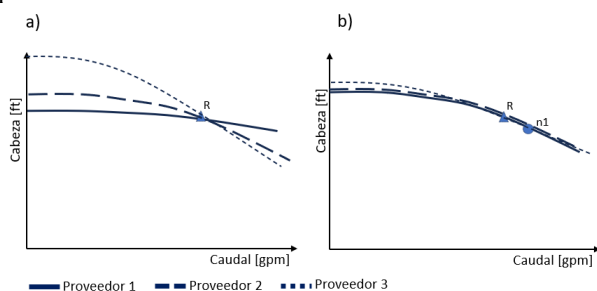


Figura 5. Diferencia entre curvas de desempeño de fabricantes ofertadas, A) Especificando un solo punto, B) Especificando dos puntos. Fuente: Elaboración propia

Se recomienda realizar simulaciones hidráulicas más detalladas con una de las bombas preseleccionadas; y lo descrito en la figura 4 garantizará que todas las PUCE ofertadas tengan comportamiento similar. Se podrán validar variaciones en RPM, potencia, presión succión y descarga, y flujo. Al igual que simular condiciones transitorias como arranques y paradas. En la figura 6 se presenta un ejemplo de los análisis operacionales realizados durante la preselección.

Por regla general para un caudal dado, un equipo es más eficiente que dos o más equipos, basta con ver los esquemas de eficiencias de PUCE en función del caudal y la velocidad específica. Por lo tanto, se debe preferir instalar un solo equipo que cumpla con los requerimientos de servicio, excepto en los siguientes casos:

- En los casos donde se tenga una alta incertidumbre entre los caudales mínimos y máximos que manejará el

sistema, se recomienda analizar la viabilidad de instalar dos o más unidades en serie o en paralelo, la alternativa que resulte más eficiente (LCC). Esto asegura contar con flexibilidad operativa en el sistema.

- En los servicios críticos que requieran tener equipo de “repuesto”, donde la pérdida de ingreso compense instalar y mantener un equipo similar.

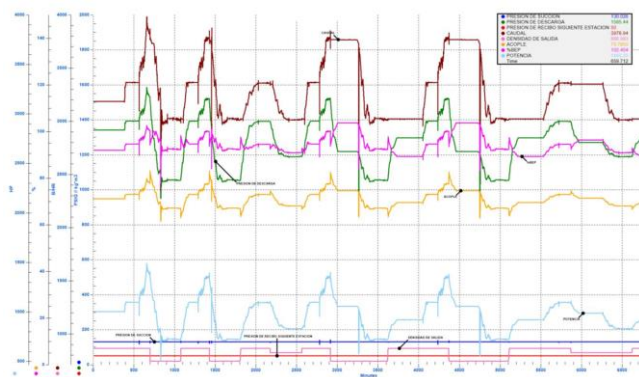


Figura 6. Ejemplo de simulación hidráulica para validación de bomba preseleccionada. Elaboración propia en programa SPS.¹⁸

Tecnología de Variación de Velocidad: Existen dos mecanismos de control para variar la presión de descarga de una PUCE: a. Mediante restricción de flujo (estrangulación), b. Modificando la velocidad de la bomba. En todos los casos es recomendable hacer un análisis económico para determinar la mejora alternativa a implementar. Para variación de velocidad se cuenta con dos tipos de tecnologías: i) variador mecánico (hidrodinámico) y ii) variador de frecuencia.

Variadores Mecánicos: en general se recomiendan donde el espacio es una variable fundamental o donde la variación de velocidad requerida está en el rango entre el 85% y 100%.

Variadores Electrónicos de Frecuencia o VFD: se recomiendan en los sistemas donde hay una variación entre el 50% y el 100% del acople del motor. Una buena práctica es especificar enfriamiento del VFD por tiro forzado para no depender de la confiabilidad del sistema de aire acondicionado. También se utiliza en sistemas donde se requiere un arranque suave de los motores eléctricos.

3.5 Paso 5 - Validar el Mercado

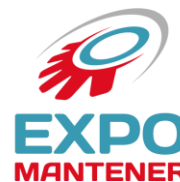
Este paso corresponde a dos validaciones, como son:

¹⁸ SPS: Synergi Pipeline Simulator. Software de simulación hidráulica para transporte de fluidos por oleoductos.



XXVI CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

24 AL 26 DE ABRIL DE 2024. Bogotá - Colombia



Vendor List: Es importante contar con un listado de proveedores validado previamente con diferentes criterios como: experiencia en el mercado, confiabilidad de la marca y equipo, política de servicio al cliente, facilidad de acceso a información técnica, portafolio de servicios en campo, certificaciones de calidad (ISO 9001, etc.), entre otros. Los criterios deben ser definidos por cada empresa para la precalificación de sus proveedores de acuerdo con su experiencia y/o características del sector.

Número de Oferentes: Para asegurar precios competitivos y una mayor probabilidad de encontrar bombas más eficientes, se recomienda contar con mínimo 3 oferentes previamente preseleccionados a través de un Vendor List.

3.6 Paso 6 - Elaborar Términos de Referencia (TR)

Para la evaluación de las ofertas se recomienda conformar un equipo interdisciplinario, dependiendo de las dimensiones y complejidad de las unidades paquete a comprar. Esto puede incluir participación de las especialidades de controles/instrumentos, electricidad, tubería, mecánica, equipos rotativos y procesos. Este equipo define las bases de diseño generales para la toma de decisión y especifica las condiciones particulares de cada elemento a evaluar. Es importante indicar que cada selección de bomba es un caso particular y único, por lo cual se le debe dar dicho tratamiento iniciando por supuesto desde unas bases de diseño ya establecidas para estandarizar criterios.

Dentro de los términos de referencias se recomienda dar prioridad a los siguientes aspectos:

Velocidad Específica de Succión (Nss): Se adoptó el criterio (Hallam, April 1982.) en cuanto a especificar equipos con una Nss igual o inferior a 11.000. Esto con el fin de comprar equipos más confiables, con tiempo medio entre reparaciones más amplios. En casos especiales (bombas VS6 con velocidad de giro igual o menor a 1800 rpm) se aceptan Nss mayores, dado que se requiere obtener baja NPSHr en el impulsor de primera etapa.

Diámetro del Impulsor: Es buena práctica dejar una contingencia en diámetro del impulsor de la bomba, por esto se recomienda seleccionar impulsores hasta 95% del diámetro máximo.

Velocidad Mínima: La velocidad mínima es relevante en los procesos de arranque de las unidades o para ampliar la ventana operativa de las unidades. No obstante, operar a bajas RPM puede derivar en problemas de lubricación en los cojinetes. Por lo anterior, es importante especificar la

velocidad mínima y/o solicitar al proveedor que aclare dicho valor dentro de su oferta.

Zonas de Resonancia: Se debe solicitar al proveedor que declare las zonas prohibidas de operación (rango en RPMs) en las cuales no se podría operar de manera continua las unidades. Estas zonas se deberán validar frente a las áreas de operativas deseadas durante los ciclos de funcionamiento de los equipos.

Eficiencia: Parámetro esencial para la evaluación económica de ofertas y para asegurar que se compre un equipo alineado con la política de reducción de costos operativos (LCC) y de huella de carbono.

Head Rise: Se debe validar que la pendiente de la curva sea la adecuada para el control del proceso. Curvas muy planas de desempeño de la bomba pueden generar grandes variaciones de caudal ante pequeños cambios en la curva del sistema, generando alta variabilidad en el control de la unidad o una potencial operación inestable.

Sistema de Sellado del Eje: El plan de sellos es el componente más crítico de una PUCE (ver figura 7), por lo cual es esencial dar un adecuado dimensionamiento en la presión que soportará durante todas las condiciones operacionales. Una buena práctica es realizar simulaciones de transitorios hidráulicos, por ejemplo, mediante modelos en SPS, con el fin de identificar picos de presión por encima de la presión máxima esperada en condición estable, ver punto 2 en figura 8. Asumiendo un margen de seguridad se puede definir una presión adecuada para la selección del plan de sellado.

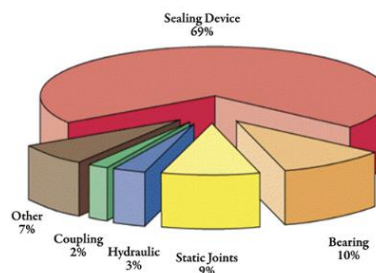


Figura 7. Falla de componentes en bombas. Fuente: (Committee, 2013)

Como estrategia se seleccionaron sistemas de sellado API 682 tipo 2CW-CS con planes de soporte API 11/75 (BBx) y API 13/76 (VSx). Con estas configuraciones de sellado se logra una doble capa de protección húmedo-seco, con lo cual se optimiza la disponibilidad del activo y se previene la emisión de líquidos peligrosos y/o compuestos orgánicos volátiles (VOC) al medio ambiente.

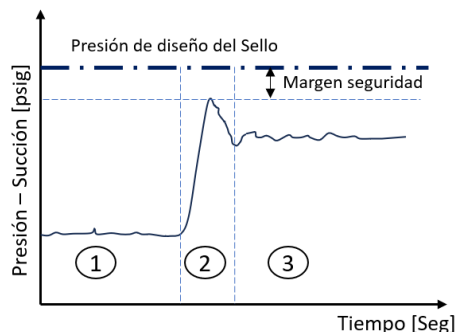


Figura 8. Simulación de transitorio hidráulico en el recibo de una bomba.
1) presión normal, 2) sobrepresión en estado transitorio y 3) sobrepresión en estado estable. Fuente: Elaboración Propia.

3.7 Paso 7 – Evaluación de Ofertas

Para la evaluación técnica de las ofertas se desarrollaron matrices de características garantizadas de los equipos (ver figura 9), las cuales reúnen los variables descritas en las Hojas de datos de los equipos, MR¹⁹ de compra y Especificaciones Técnicas, incluyendo el Sistema de Control. Las matrices son diligenciadas por los oferentes y deben ser entregadas como parte del proceso de compra. Esta es una herramienta para validar las desviaciones de cada oferta respecto a los requisitos solicitados, agilizando el proceso de evaluación y haciendo visibles las desviaciones que cada oferente presenta respecto a lo especificado.

Validación Teórica de Eficiencia Ofertada: Es buena práctica validar si las eficiencias de las PUCE que ofrecen los proveedores son alcanzables, para esto se debe calcular la Ns y con el caudal del BEP estimar la eficiencia del equipo. Para ello se puede usar la gráfica presentada en la figura 10 (Pérez, 2015). Se recomienda seleccionar PUCE con Ns entre 1000 y 3000, rango donde se espera que el equipo tenga la eficiencia más alta posible para un caudal rated requerido.

**SDE: Según Diseño fabricante							
DATOS CENIT				DATOS OFERENTE			
ITEM	PARAMETRO	UND	DATO SOLICITADO	DATO OFERTADO	CUMPLE	CARPETA	DESVIACIONES/ OBSERVACIONES
1	Equipo						
1.1	Fabricante bomba	Dato	CEP				
1.2	Tipo bomba	Dato	CEP				
1.3	Etapas	#	CEP				
1.4	Modelo	Dato	CEP				
1.6	Tiempo de entrega (semanas)	Sem	CEP				
1.7	Número curva de desempeño	#	CEP				
2	Condiciones de operación						
2.1	Servicio intermitente o continuo	Dato	Intermitente				
2.2	Numero de arranques	#	5				
2.3	Operación en Serie o paralelo	Dato	PARALELO				
2.4	Flujo Normal (GPM)	GPM	805				
2.5	Flujo Rated (gpm)	GPM	1358				
2.6	Flujo en BEP a velocidad rated (gpm)	GPM	CEP				
2.7	Flujo en BEP a velocidad normal (gpm)	GPM	CEP				
2.8	Ns a velocidad RATED	#	CEP				
2.9	Nss a velocidad RATED	#	CEP				
2.10	%BEP-RATED	%	80-110				
2.11	%BEP-NORMAL	%	70-120				
2.12	Presión de succión-max (PSIG)	PSIG	461				
2.13	Presión de succión-rated (PSIG)	PSIG	388				
2.14	Presión de descarga (PSIG)	PSIG	2100				
2.15	Presión diferencial RATED (PSIG)	PSIG	1712				
2.16	Presión diferencial Normal	PSI	1358				

Figura 9. Matriz de características garantizadas.

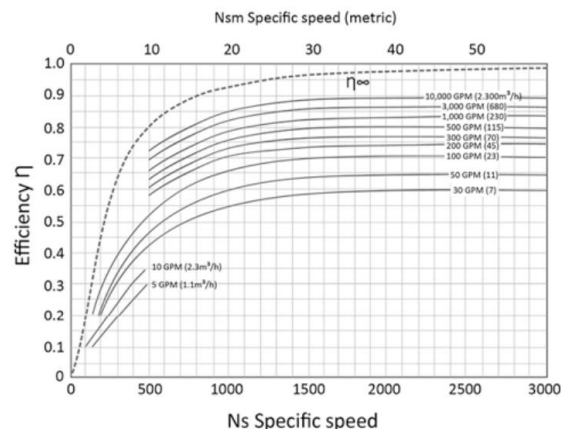


Figura 10. Variación de la eficiencia con la velocidad específica y el caudal.
Fuente: (Pérez, 2015).

No es buena práctica comprar una PUCE solo por el precio inicial. Se recomienda aplicar la metodología de LCC usando como criterio de menor VPN²⁰ teniendo en cuenta en el horizonte de tiempo del proyecto donde se contemplen: costo de repuestos, consumo de energía (impactado por la eficiencia del equipo) y costo inicial de compra e instalación, en aquellos casos cuando se identifican esquemas especiales de protección y/o control.

3.1 Paso 8. Revisar Ingeniería de Fabricación

Es importante que el mismo equipo multidisciplinario que elaboró los TR valide el cumplimiento de las especificaciones técnicas y de la oferta técnica. Se recomienda registrar y gestionar, a través de un control de cambios (MoC), cualquier desviación durante la fabricación que impacte los TR como lección aprendida. Es importante acordar con el Proveedor que la aceptación de los documentos de Ingeniería no exime al proveedor de suministrar los equipos de acuerdo con lo solicitado en las ETs, esto con el fin de evitar reprocesos o situaciones que puedan generar sobre costos para alguna de las partes.

3.2 Paso 9 - Asistir Pruebas Funcionales

Las pruebas funcionales implican un costo adicional al valor de los equipos, por lo cual, se deben optimizar la realización de las pruebas en función del riesgo que se desea mitigar. Se recomienda realizar pruebas de desempeño a bombas con potencia superior a 500 HP. Para el caso de las bombas Booster (VS6 o BB1) se recomienda realizar pruebas de

¹⁹ MR: Material Requisition.

²⁰ VPN: Valor Presente Neto.



NPSH cuando se tenga alta incertidumbre en los cálculos de NPSH disponible o cuando se tengan antecedentes de cavitación en las bombas existentes a reemplazar (caso reposición). Otras pruebas tales como el Mechanical Run Test y el String Test (Complete Unit Test) se recomiendan para comprobar la idoneidad del conjunto de bombeo en los diferentes puntos operativos mencionados en el numeral 3.3., así como para reducir riesgos de sintonización y control de las PUCE. En todo caso dependiendo del número total de UPBs, las pruebas mayores opcionales deberán ser solicitadas considerando un criterio de muestreo.

4 RESULTADOS

La implementación del proceso de selección propuesto dió como resultado los siguientes beneficios para la compañía:

1. Compra de equipos con el menor costo de ciclo de vida de acuerdo con la tecnología disponible en el mercado.
2. Ahorros en consumo de energía a través de equipos de alta eficiencia (menor huella de carbono).
3. Equipos suministrados con cumplimiento de más del 95% de los criterios acordados en los TR.
4. Generación de alertas tempranas para la corrección de diseños y/o configuraciones de equipos.
5. Ahorros en costo y tiempos de evaluación de Ofertas en valores cercanos al 25%.
6. Estandarización del proceso de procura de PUCE al interior de la empresa.
7. Apalancamiento de política de estandarización de repuestos
8. Adquisición de planes de sellado robustos, acorde con las presiones máximas esperadas en la operación, lo cual incrementa el Tiempo Medio Entre Fallas.
9. Se incrementó la cantidad y calidad de preguntas técnicas relevantes durante el proceso de las ofertas a partir de la profundidad técnica de los TR.
10. En la tabla 1, se presentan algunos resultados de procesos de compra, donde se destaca: i) al menos dos oferentes presentaron valores de eficiencias similares, ii) se presentaron eficiencias altas de acuerdo con lo solicitado y iii) se presentaron valores de Nss menores a 11.000.

Proceso Compra	Cant_Bo mbas	Potencia Motor [HP]	Flujo Rated [gpm]	Eficiencia en Punto Rated			Nss (<11.000)		
				Oferta 1	Oferta 2	Oferta 3	Oferta 1	Oferta 2	Oferta 3
A	12	3000	2100	84,8%	80,4%	84,3%	9470	10547	7840
B	2	2000/2500	1400	80,0%	80,5%	77,0%	9090	7000	8125

Tabla 1. Valores Ofertados

5 CONCLUSIONES

1. Comprar una PUCE con un fabricante reconocido no es suficiente condición, se deben implementar procesos de compra de equipos de manera estructurada, estableciendo controles administrativos y técnicos que permitan generar beneficios económicos a corto y largo plazo para el sistema y negocio, reflejados principalmente en ahorro de OPEX y menor LCC.
2. En los casos donde se especifiquen requerimientos especiales como Overspeed (Sobrevelocidad), rangos de RPM libres de vibración, velocidad mínima, entre otros, se deberá hacer un seguimiento detallado en su cumplimiento durante el proceso de fabricación y prueba de los equipos para asegurar su adecuada implementación.

6 REFERENCIAS

- [1] Committee, T. F. (30 de 12 de 2013). *pumpsandsystems*. Obtenido de pumpsandsystems: <https://www.pumpsandsystems.com/how-extend-mechanical-seal-life>
- [2] Efficient, A. e. (2016). *Applying energy Efficient*. Obtenido de <https://www.ee-metal.com/es/techniques/avoid-oversizing-when-selecting-pumps-and-replace-oversized-pumps/>
- [3] Hallam, J. L. (April 1982.). Centrifugal Pumps: Which Suction Specific Speeds are Acceptable? *Hydrocarbon Processing*.
- [4] Pérez, R. X. (2015). *How to Select the Right Centrifugal Pump*. Bloomington: authorHouse, ISBC: 978-1-5049-2266-1.
- [5] SULZER. (2012). *Centrifugal Pump Handbook*. Elsevier, ISBN 978-1-8561-7346-9.

Giovanny Torres Alvarez, Ingeniero Experto de Operaciones en CENIT S.A.S. Cuenta con 18 años de experiencia en Transporte de Hidrocarburos por ductos en Ecopetrol S.A. y CENIT S.A.S, en las siguientes áreas: integridad de equipo estático, operaciones, mantenimiento, Equipo rotativo e ingeniería. Es Ingeniero Mecánico (UIS,2005), Máster en Ingeniería (Andes ,2011), Especialista en Gerencia de Proyectos (EL Bosque, 2020), y MBA (Westfield, 2023).

Carlos Andres Torres Mejia: Ingeniero de Confiabilidad e Integridad de Equipo Rotativo en CENIT S.A.S. Cuenta con 16 años de experiencia en Sistemas de Bombeo en las siguientes áreas: Ingeniería, Diseño, Selección, Operación, Mantenimiento, Análisis y Resolución de Fallas. Es Ingeniero Mecánico (Universidad Nacional, 2009), Especialista en Turbomáquinas (EAFIT, 2018).