



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

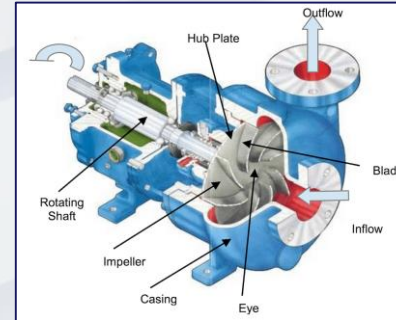
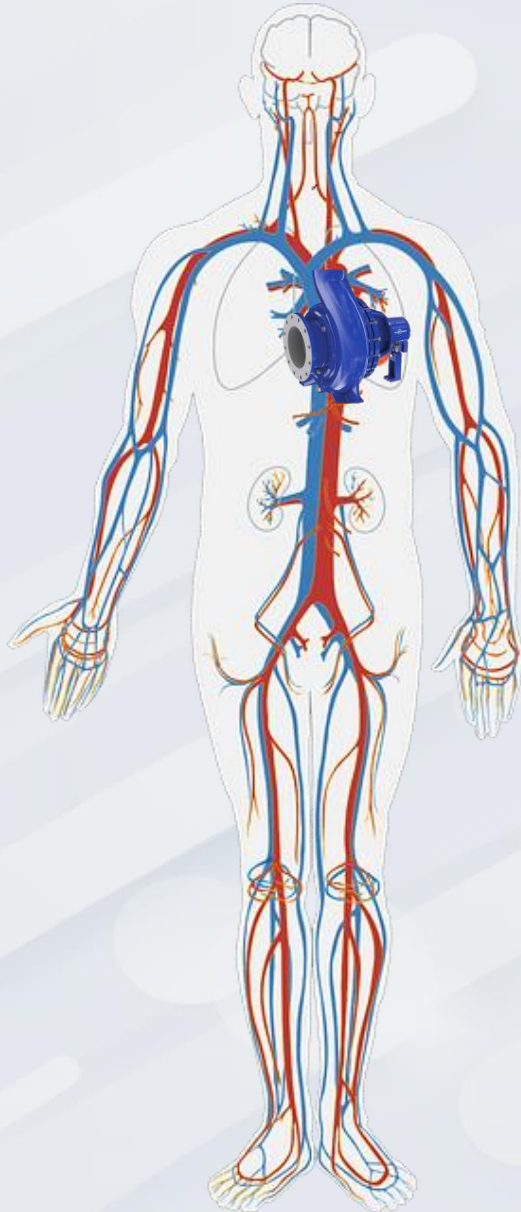
Giovanny Torres Alvarez

giovanny.torres@cenit-transporte.com

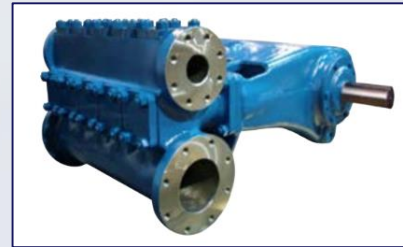
Carlos Andres Torres Mejia

carlos.torres@cenit-transporte.com

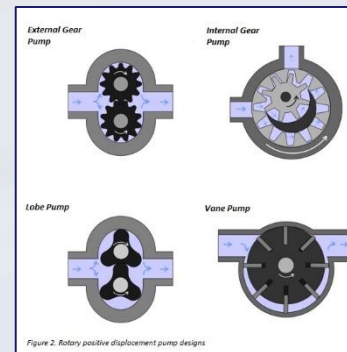




CENTRIFUGAS ←
Pump Centrifugal (PUCE)



RECIPROCANTES
Pump Reciprocating (PURE)



ROTATIVAS
Pump Rotatory (PURO)



Procesos inadecuados de Selección y Compra de PUCE generan diferentes riesgos residuales:

- A. **Responsabilidades** contractuales **fraccionadas**.
- B. Riesgos relacionados con **desaparición** del **intermediario** (Paquetizador) del **mercado**.
- C. Limitaciones en operación futura (caudal/cabeza) (**Sub dimensionamiento**).
- D. Sub dimensionamiento del **plan de sellado**.
- E. Selección de equipos **ineficientes**.
- F. **Sobrecostos** por ajustes de la ingeniería durante el proceso de fabricación de los equipos.
- G. **Sobredimensionamiento** de equipos.
- H. Incidentes de **Seguridad de Proceso**
- I. **Lucro Cesante**

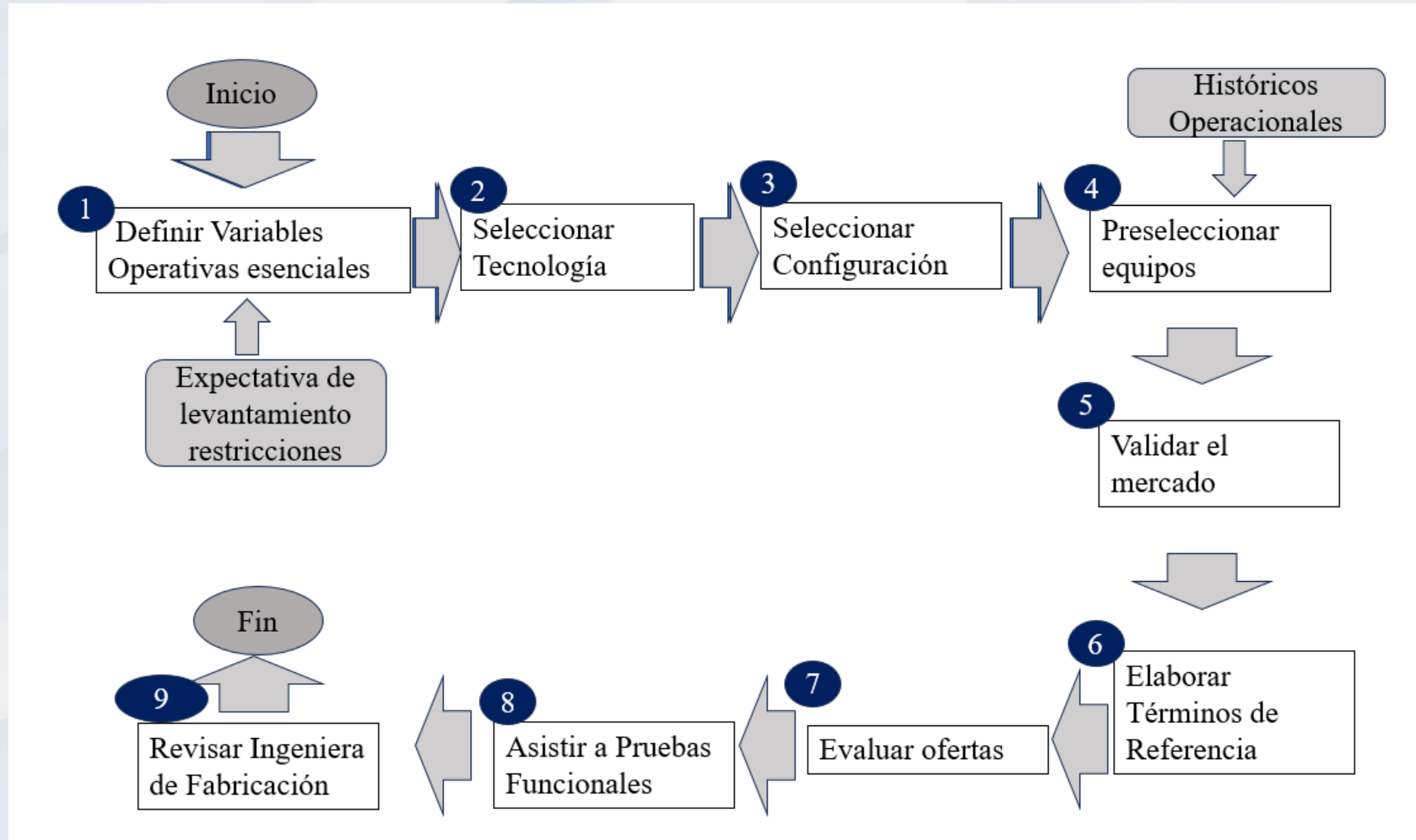




La selección adecuada de una bomba es un proceso que requiere un proceso de integración de diferentes interesados

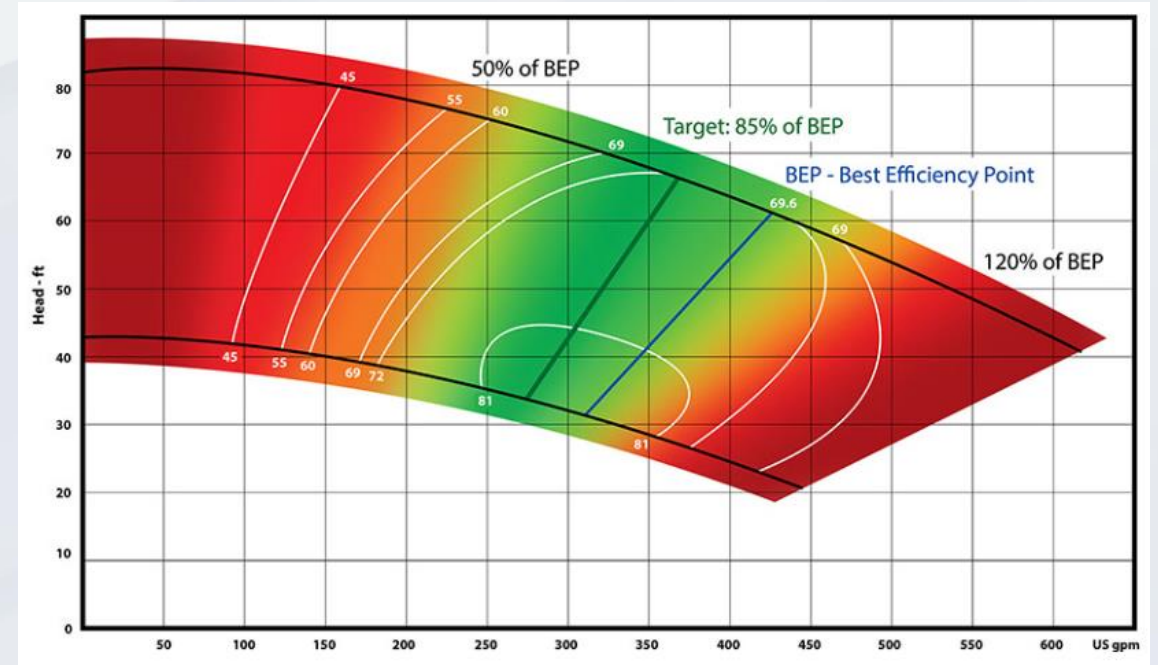
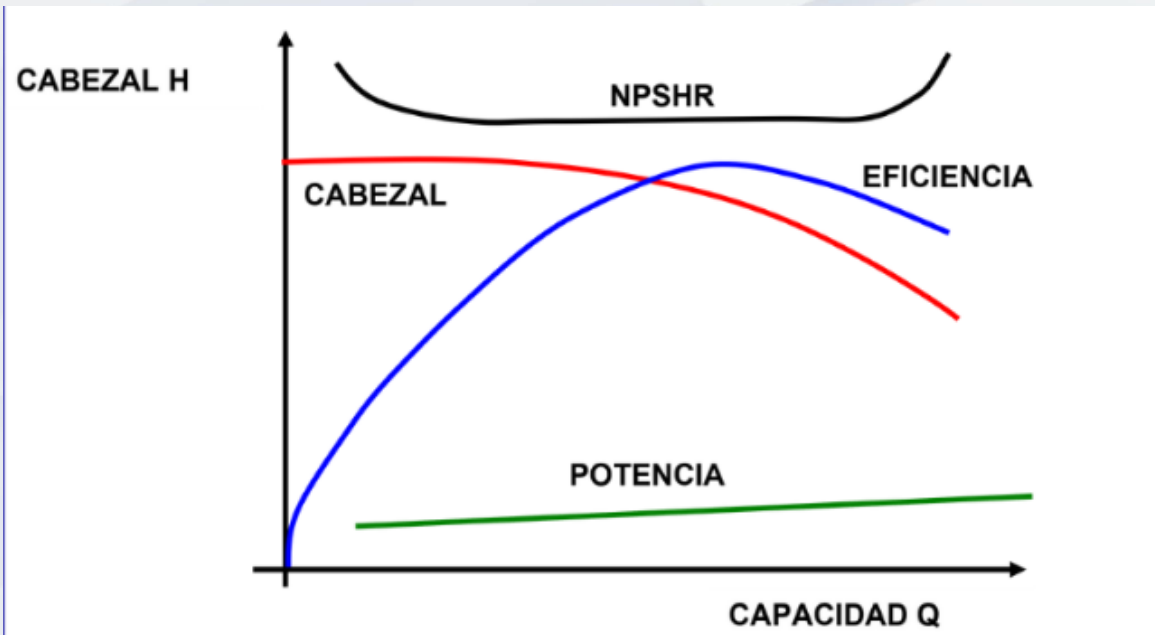


La selección, compra y fabricación de las PUCE es un proceso que incluye múltiples variables, requiere realizarse con criterios y pasos sistemáticos.





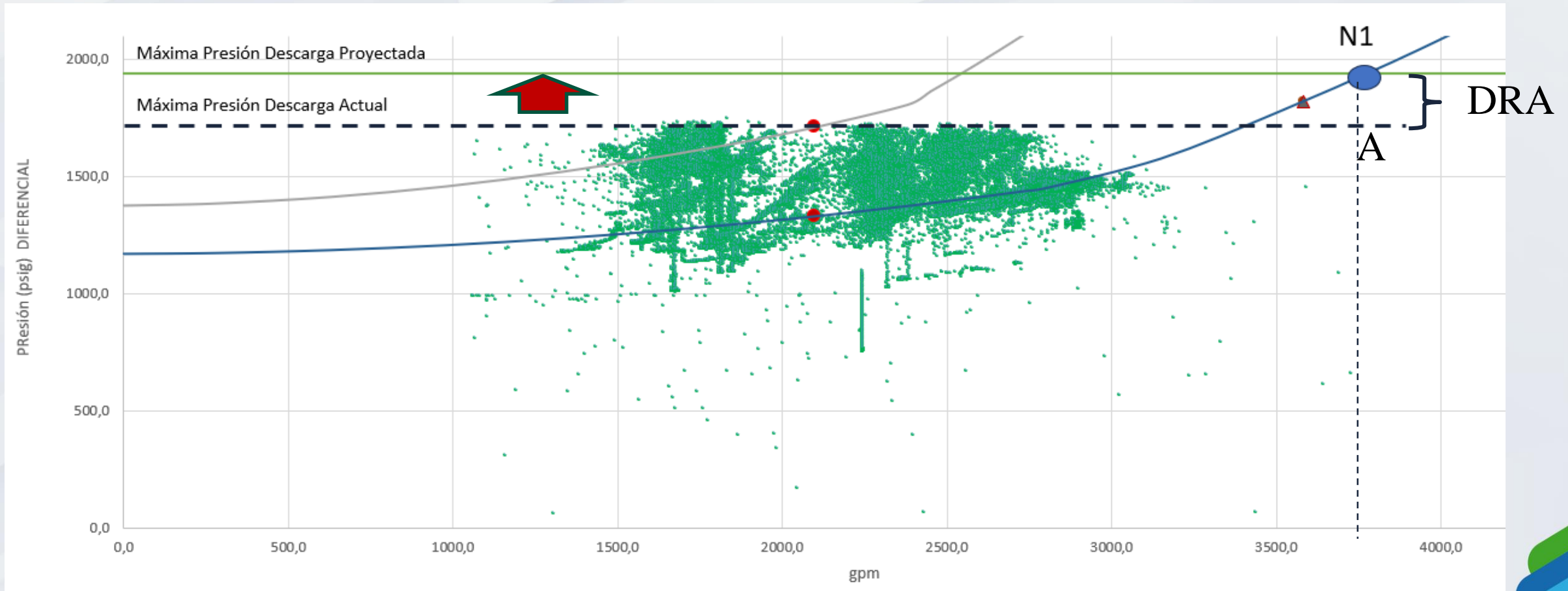
Curvas Típicas PUCE





Paso 1. Definir variables Operativas esenciales

a. **Presión de descarga:** Incluir expectativas de recuperación de presión (integridad) y/o aumento de capacidad del proceso. En caso de sub dimensionamiento se requerirá uso de DRA (Reductor Fricción).

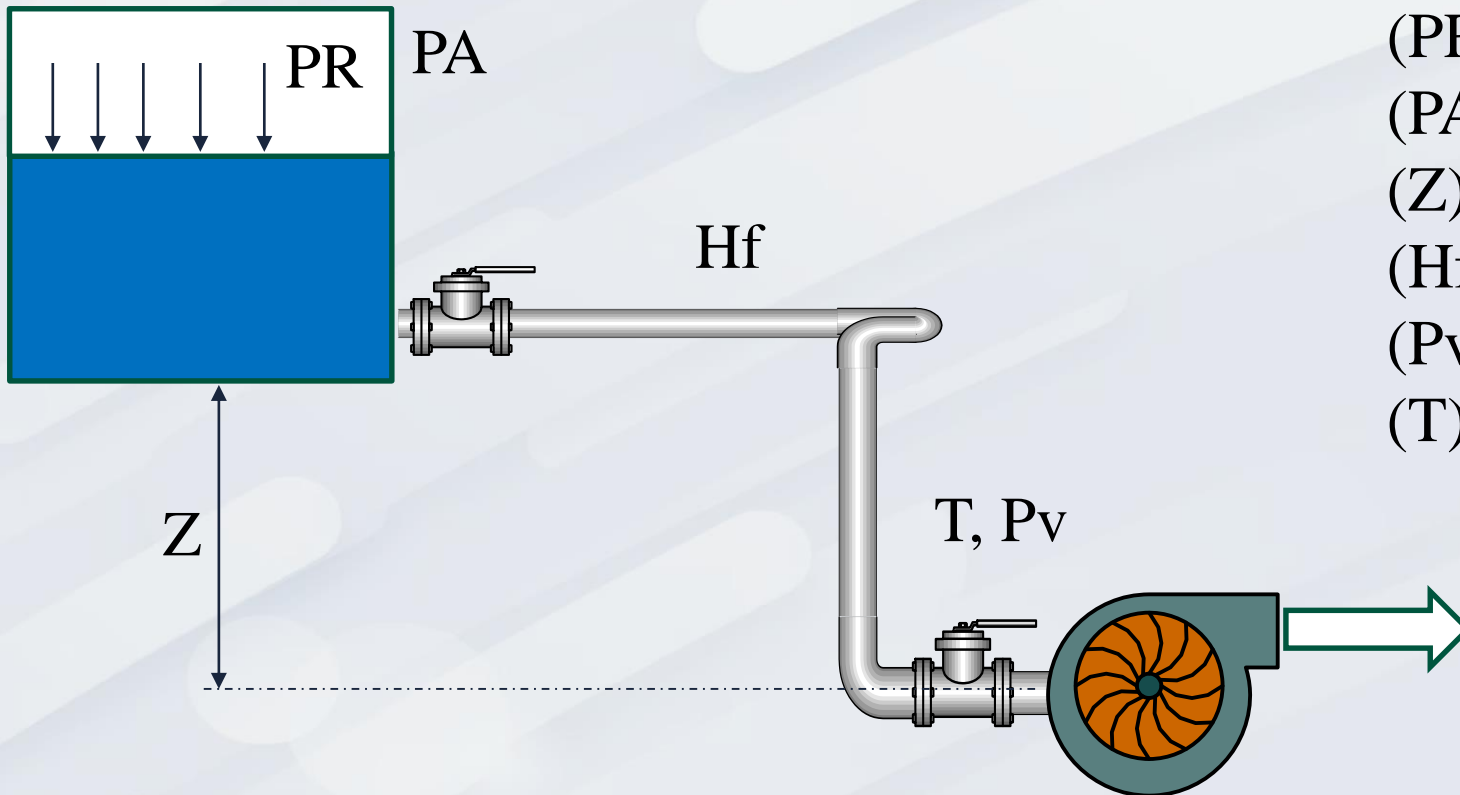


Paso 1. Definir variables Operativas esenciales

b. NPSH: Cabeza Positiva Neta de Succión

El NPSH depende de:

- (PR) Presión Recipiente
- (PA) Presión Atmosférica
- (Z) Diferencia altura nivel liquido-brida
- (Hf) Caída Presión en la tubería
- (Pv) Presión Vapor Líquido
- (T) Temperatura Líquido



NPSH: Presión en exceso del líquido en pies absolutos por encima de la presión de vapor en la brida de succión de la bomba



Paso 1. Definir variables Operativas esenciales

b. NPSH: Se recomienda usar criterio de ENERGIA de SUCCIÓN

$$N_{ss} = \left(n \times \sqrt{Q / (10r^2)} \right) / (NPSHr)^{0.75}$$



$$\text{Suction Energy} = D_{eye} \times n \times N_{ss} \times \text{Sp.Gr.}$$



High suction energy 160×10^6

Very high suction energy 240×10^6



Suction Energy Level	Margin
Low	1,1 - 1,3
High	1,3 - 2,0
Very high	2,0 - 2,5



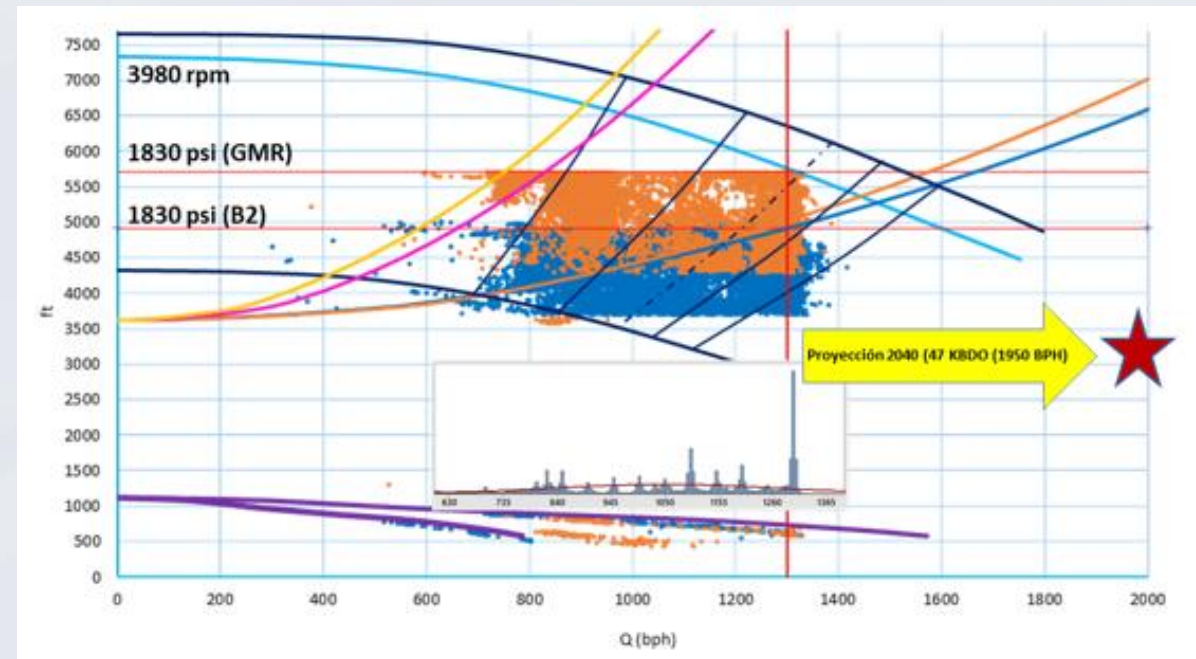
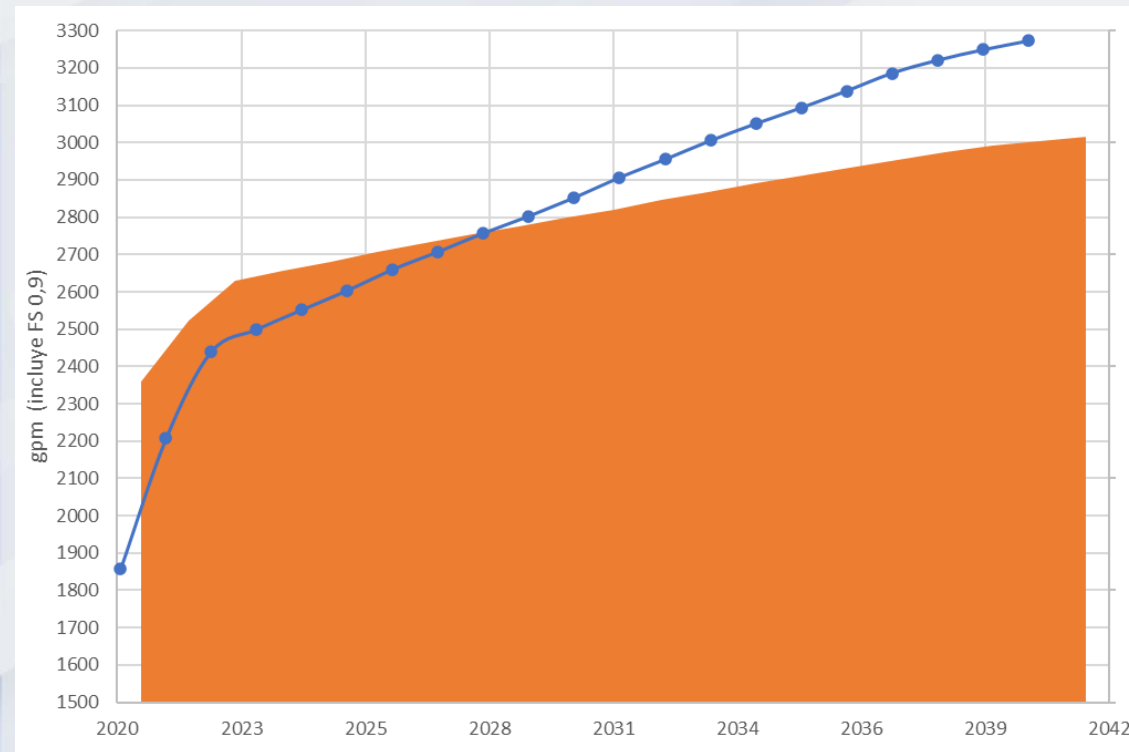
$$\text{Margen} = NPSHR / NPSHA$$



- A. PUCE
- B. Requiere Bomba Especial (Vertical, doble succión, inductor PURE/PURO).
- C. Cambios Diseño Tubería Succión.
- D. Enfriamiento Producto.

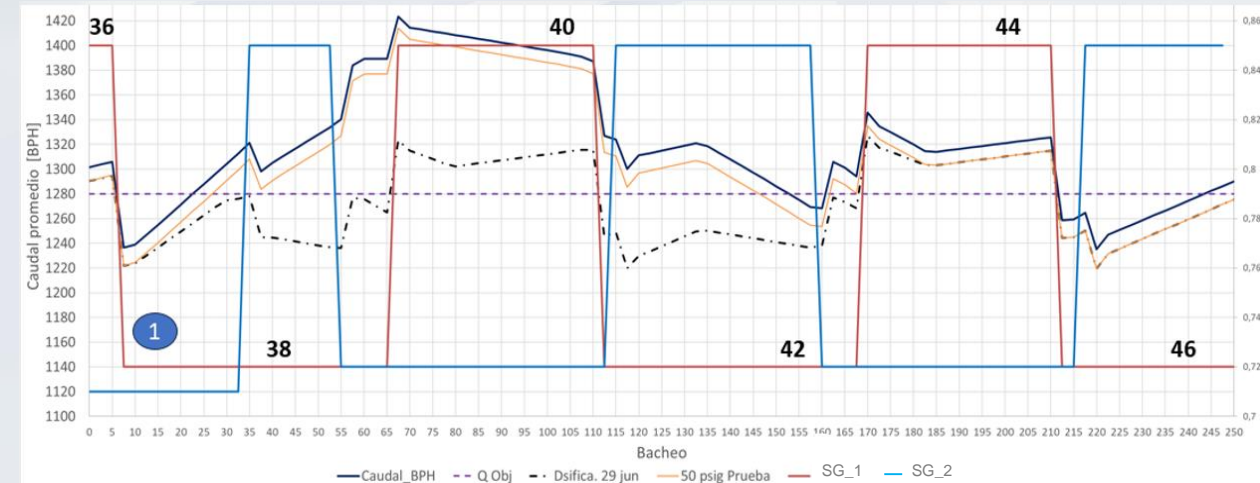
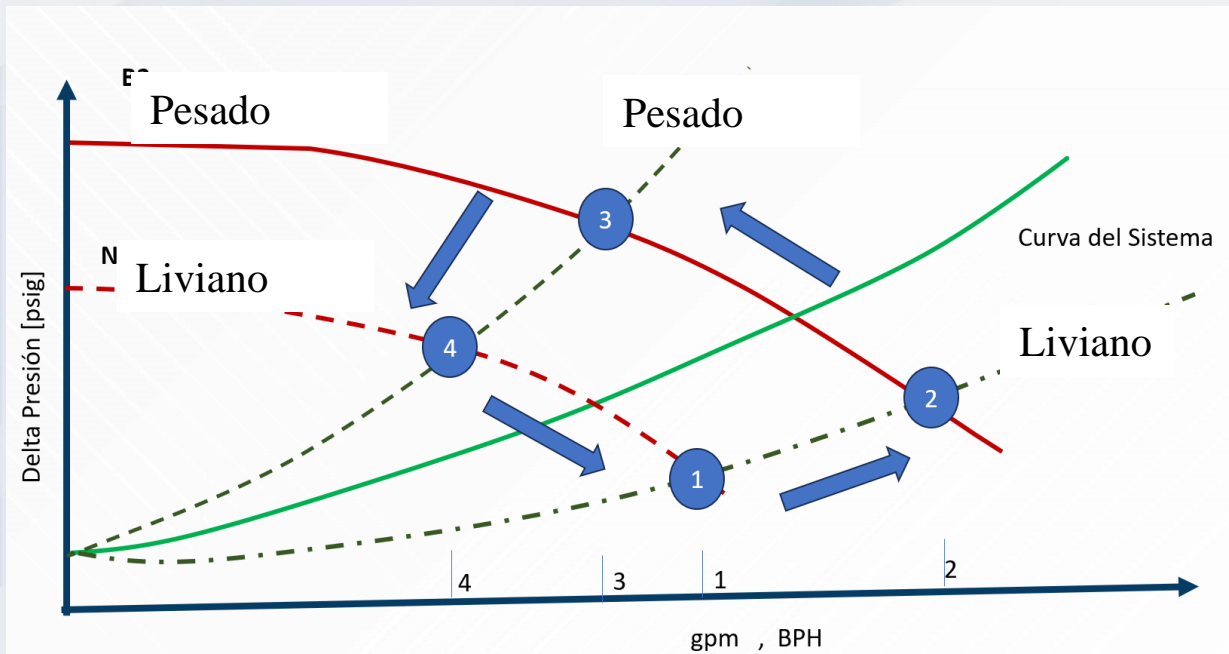
Paso 1. Definir variables Operativas esenciales

c. Caudales: Se debe definir con la mejor precisión posible el caudal máximo (Objetivo) que se espera obtener en el horizonte de tiempo del proyecto.



Paso 1. Definir variables Operativas esenciales

d. Densidad: La presión de descarga, caudal y potencia varían con la densidad.



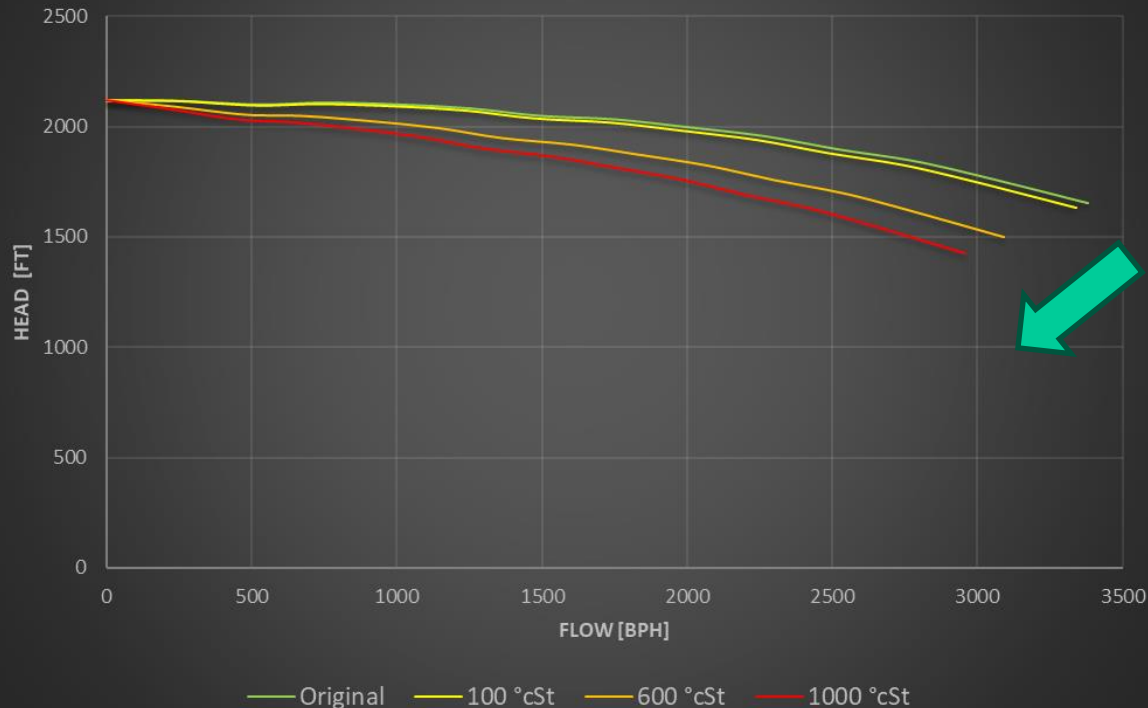
Variación de Caudal, potencia y presión por cambio de Densidad en Bombas de velocidad Fija

Ejemplo de Variación en el tiempo del caudal por cambio de densidad en un poliducto manteniendo RPM fijas

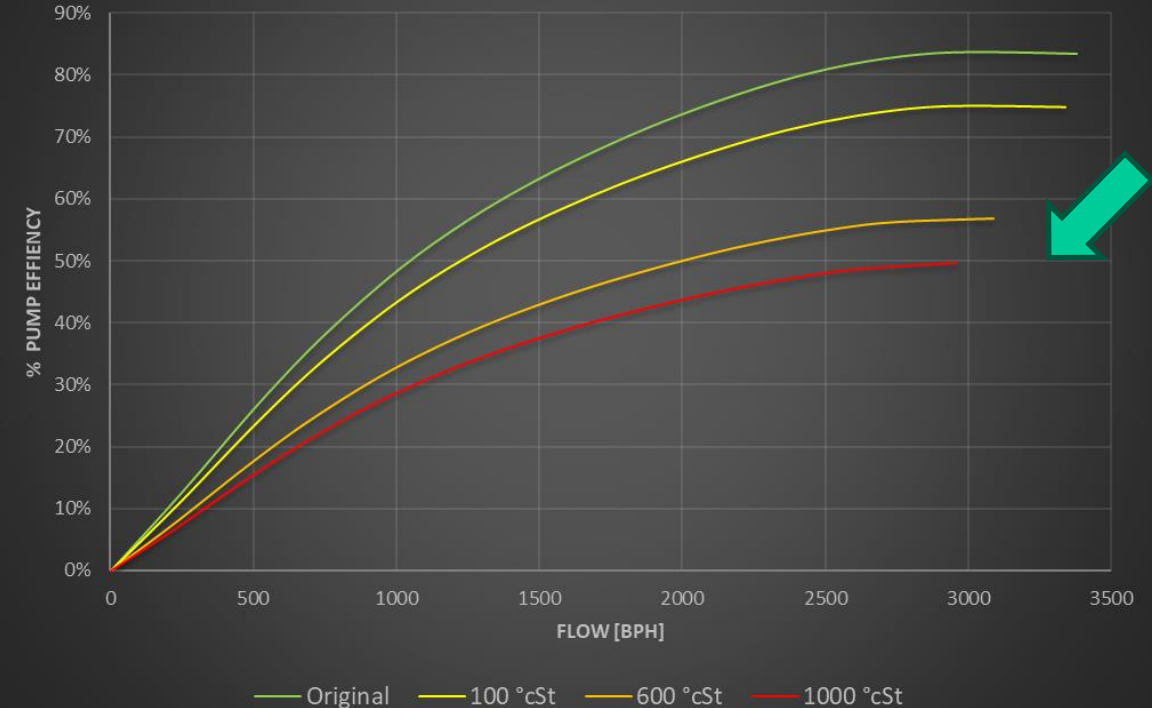
Paso 1. Definir variables Operativas esenciales

e. **Viscosidad:** Tener presente la variación de la viscosidad en el horizonte de tiempo del proyecto es fundamental para evitar sub dimensionar equipos o seleccionar una tecnología inadecuada.

Efecto de la viscosidad en el desempeño de la bomba

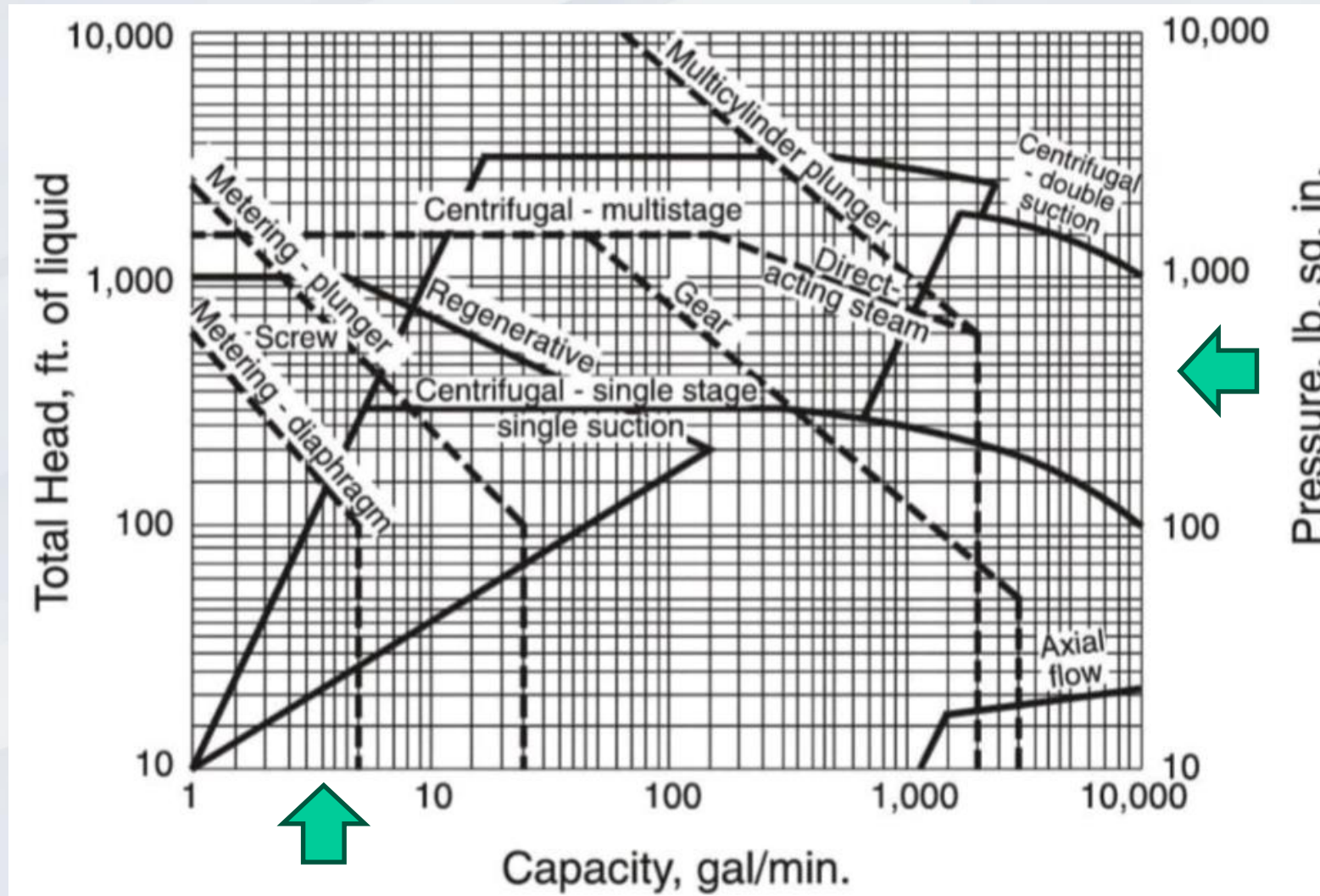


Efecto de la viscosidad en la eficiencia de la bomba



Paso 2. Seleccionar Tecnología

Las PUCE tienen un amplio rango de aplicación en la industria



Paso 2. Seleccionar Tecnología

b. NPSHR: Se recomienda usar criterio de ENERGIA de SUCCIÓN

$$N_{ss} = \left(n \times \sqrt{Q / (10r^2)} \right) / (NPSHr)^{0.75}$$



$$\text{Suction Energy} = D_{eye} \times n \times N_{ss} \times \text{Sp.Gr.}$$



High suction energy 160×10^6

Very high suction energy 240×10^6



SUCTION ENERGY LEVEL	
Suction Energy Level	Margin
Low	1.1-1.3
High	1.3-2.0
Very high	2.0-2.5



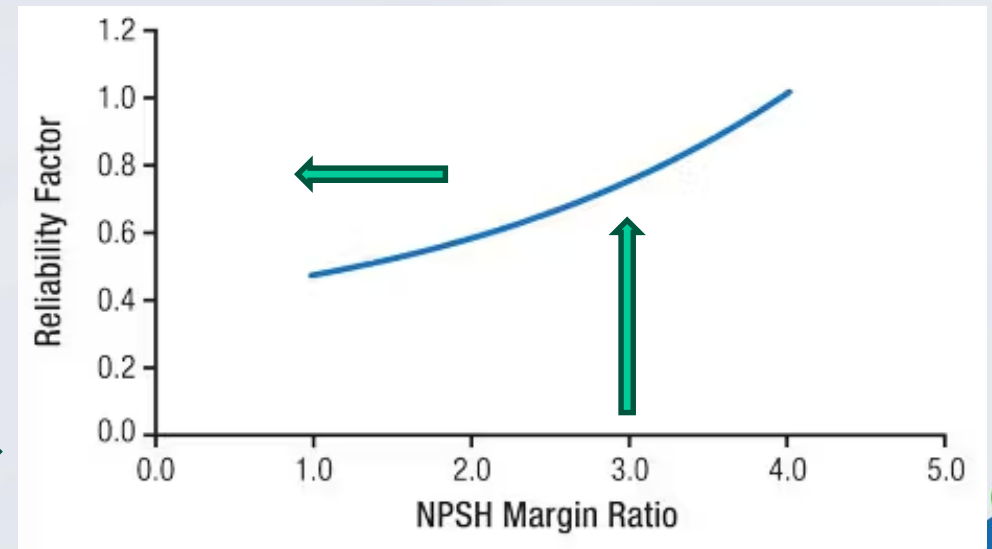
Margen $NPSHA/NPSHR$



Errores comunes:



- i) No tener en cuenta la presión atmosférica
- ii) Subestimar temperatura de operación.



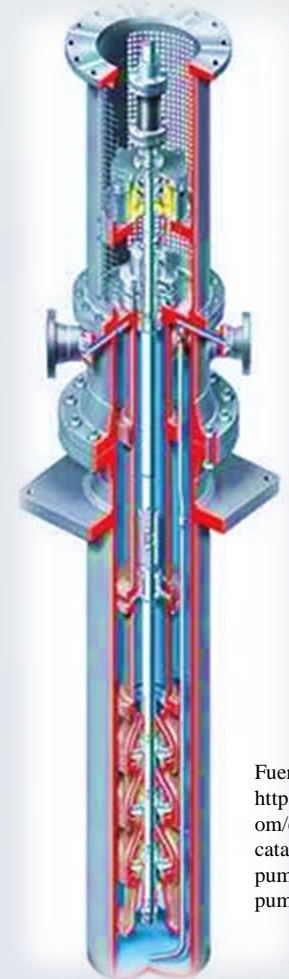


Paso 2. Seleccionar Tecnología

- a) **NPSH***: 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, a 1800 RPM.
 - 3) **Incrementar** el **diámetro** del impulsor
 - 4) Utilizar impulsores de **doble succión**
 - 5) Utilizar **inductores** en el primer impulsor.

En los casos donde no sea práctico implementar las soluciones propuestas se deberá optar por bombas tipo PURE/PURO.

*NPSH: Cabeza Positiva Neta de Succión.

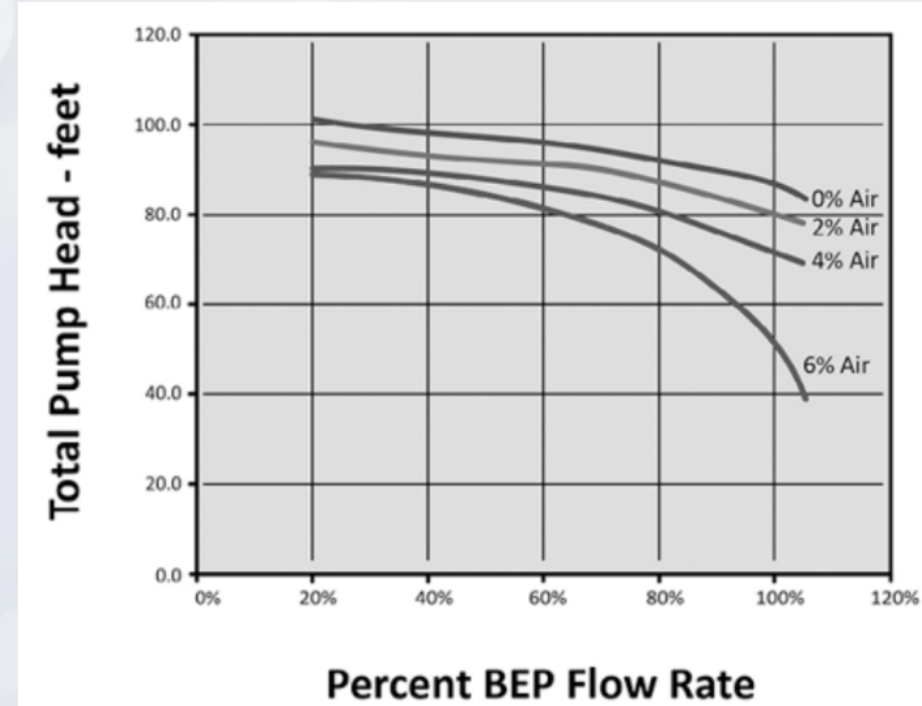


Fuente:
<https://www.flowserve.com/es/products/products-catalog/pumps/vertical-pumps/double-case-pumps-wuc/>

Paso 2. Seleccionar Tecnología

b) Material particulado: Especificar equipos con **holguras estándar de fabricante o según norma (API 610)** dependiendo de: tamaño 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.

c) 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.



Paso 2. Seleccionar Tecnología

e) Viscosidad:

$v < 250^{\circ} \text{Cst}$



PUCE

$250 < v \leq 1000^{\circ} \text{Cst}$

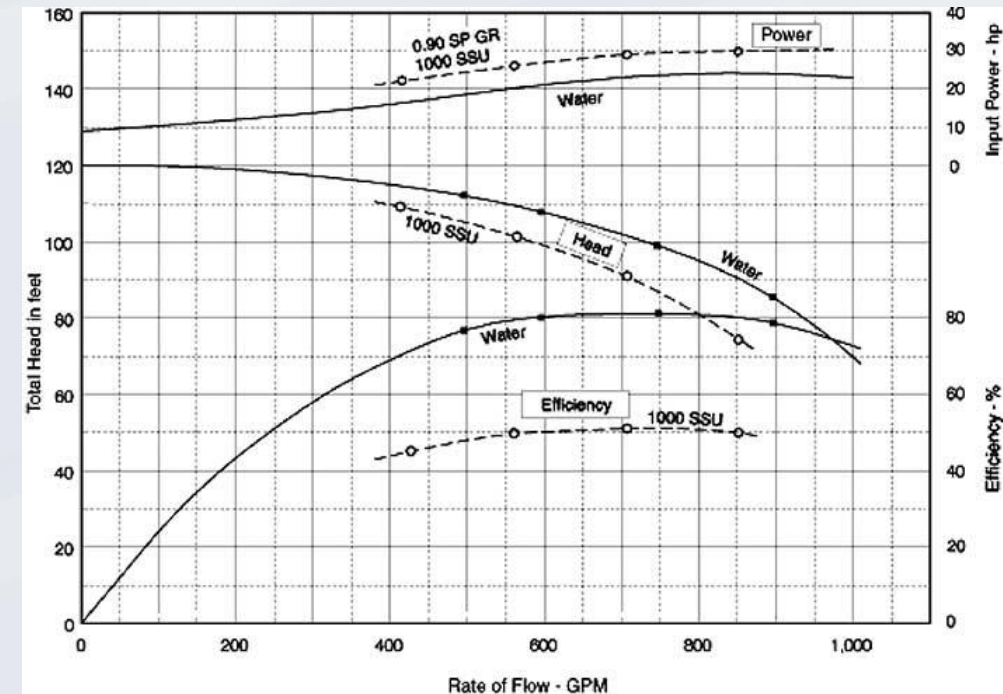


LCC*

$> 1000^{\circ} \text{cSt}$



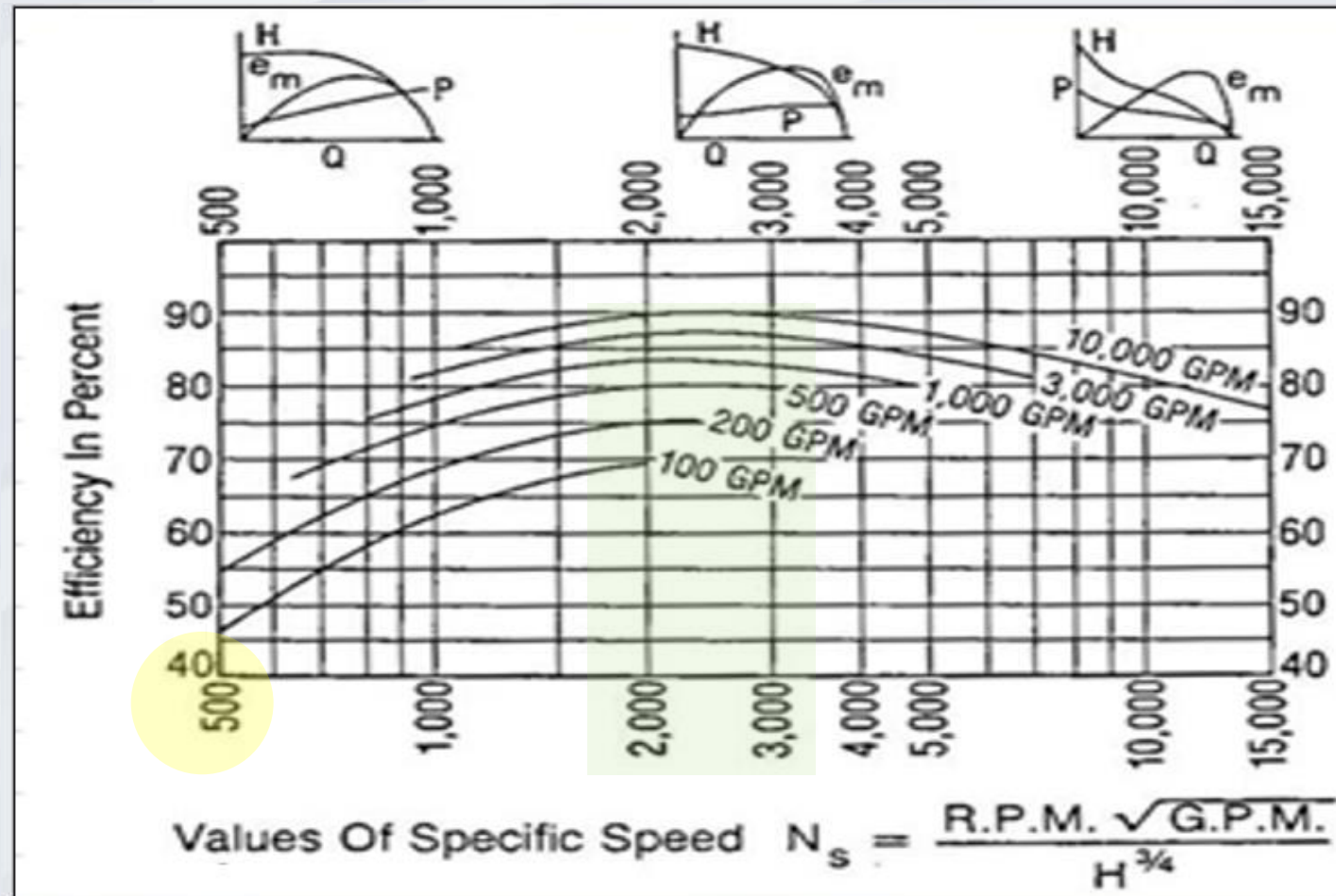
PURE/PURO



*LCC: Análisis de ciclo de vida del activo

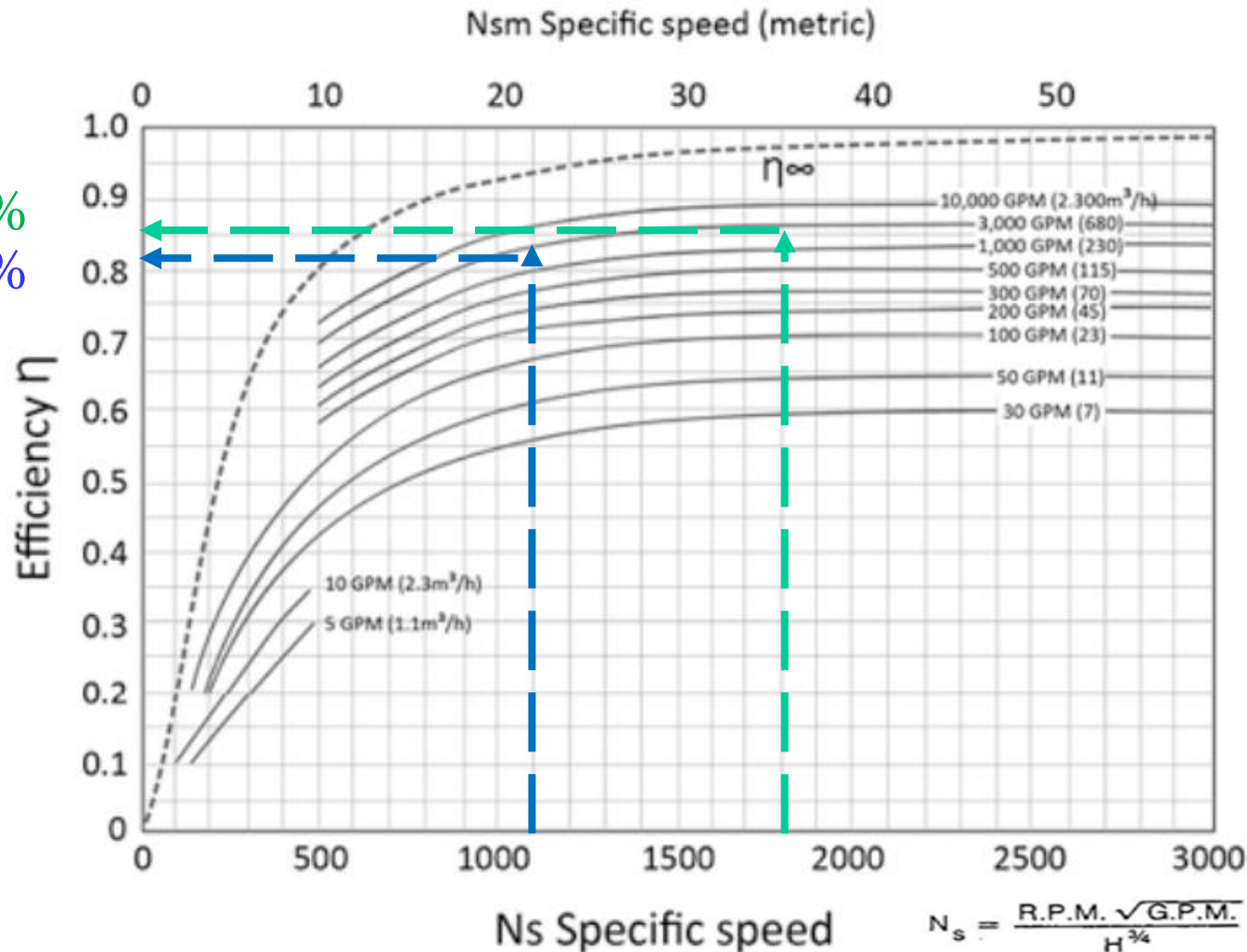
Paso 2. Seleccionar Tecnología

c. **Velocidad Especifica (Ns):** Por eficiencia, en los casos donde la Ns sea inferior a 500, se deberá optar por seleccionar bombas tipo PURE/PURO.



Paso 3. Seleccionar Configuración

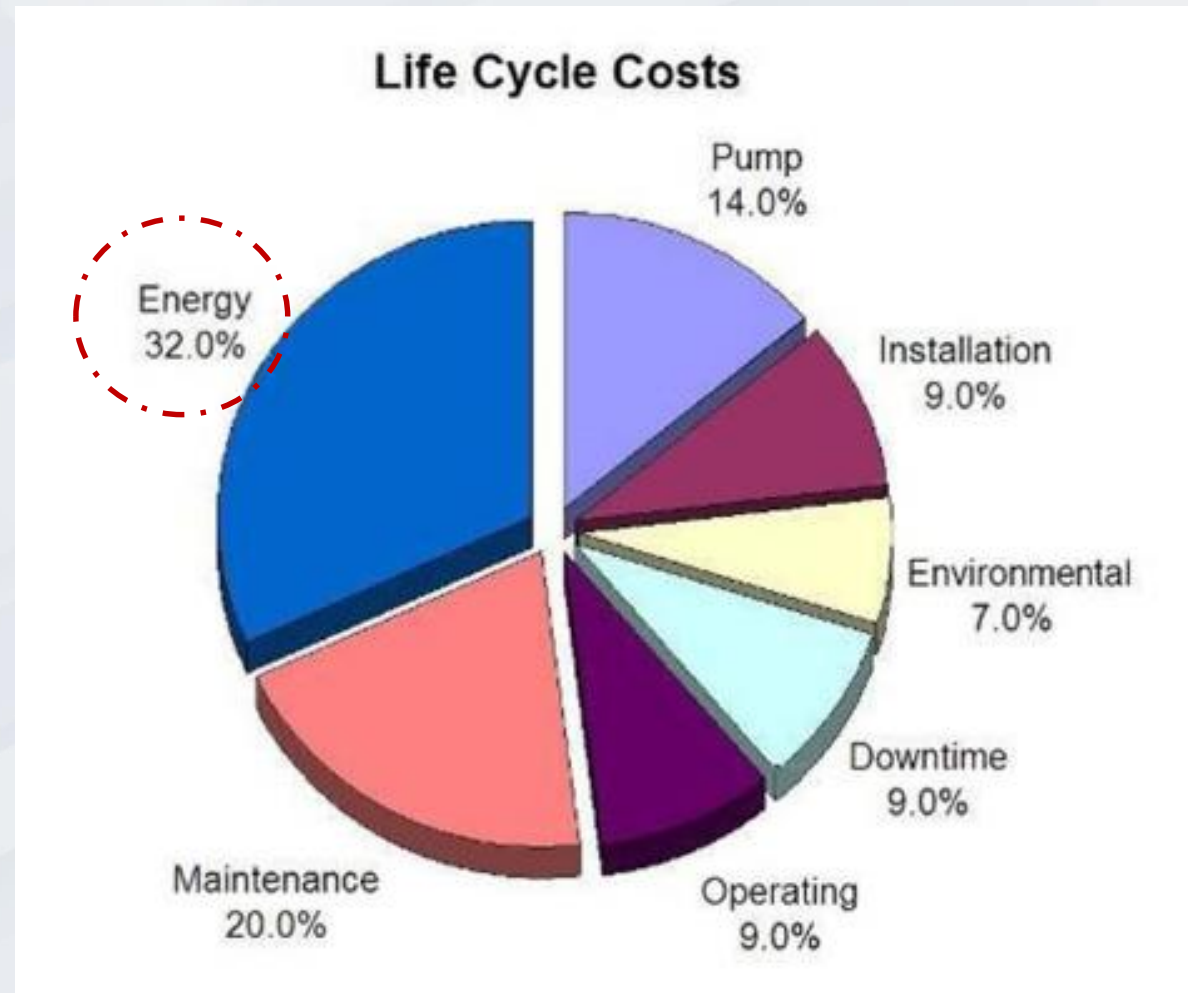
A. Eficiencia



	Serie	Paralelo
No. Bombas	2	2
Q Total	2000 gpm	2000 gpm
Q_PUCE	2000 gpm	1000 gpm
Htotal	3000 ft	3000 ft
H_PUCE	1500 ft	3000 ft
etapas	4	4
Hx etapa	375 ft	750 ft
N	3560 RPM	3560 RPM
Ns	1868	1111
Effic	85%	82%



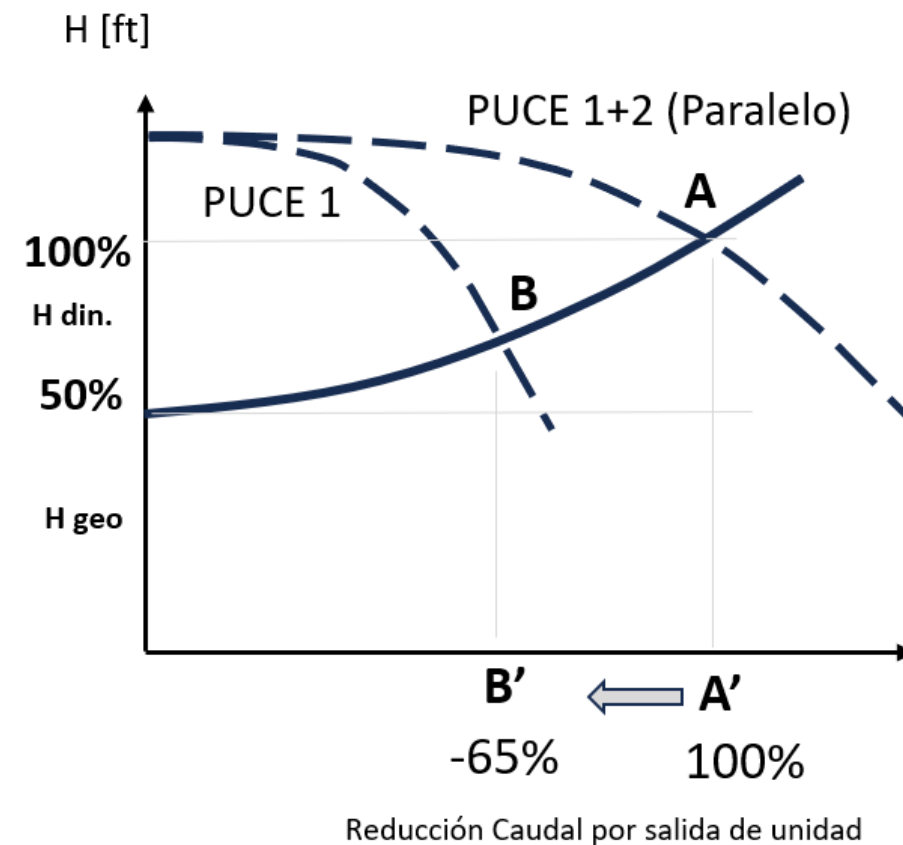
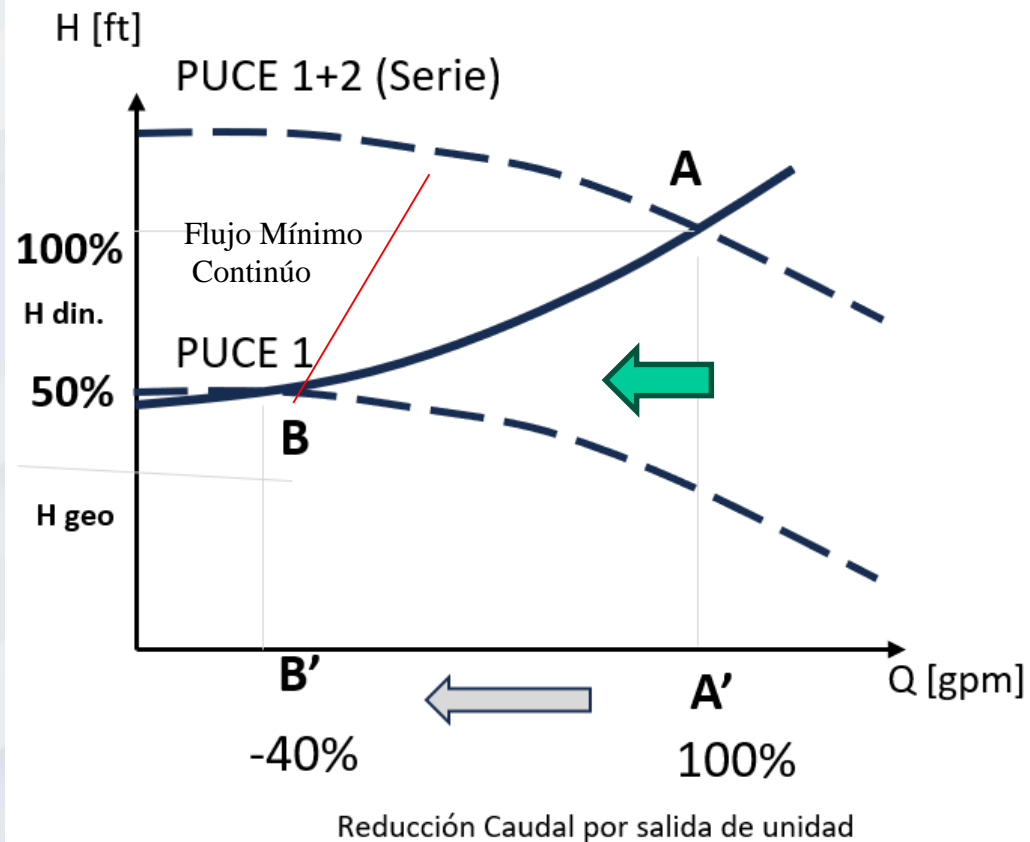
Entre más grande la Bomba en
caudal mayor Eficiencia



<https://www.linkedin.com/pulse/20141020030256-120635610-should-i-worry-about-pump-nss-part-3/?trackingId=SJoiS3iaRqavpw4B0Fsqow%3D%3D>

Paso 3. Seleccionar Configuración

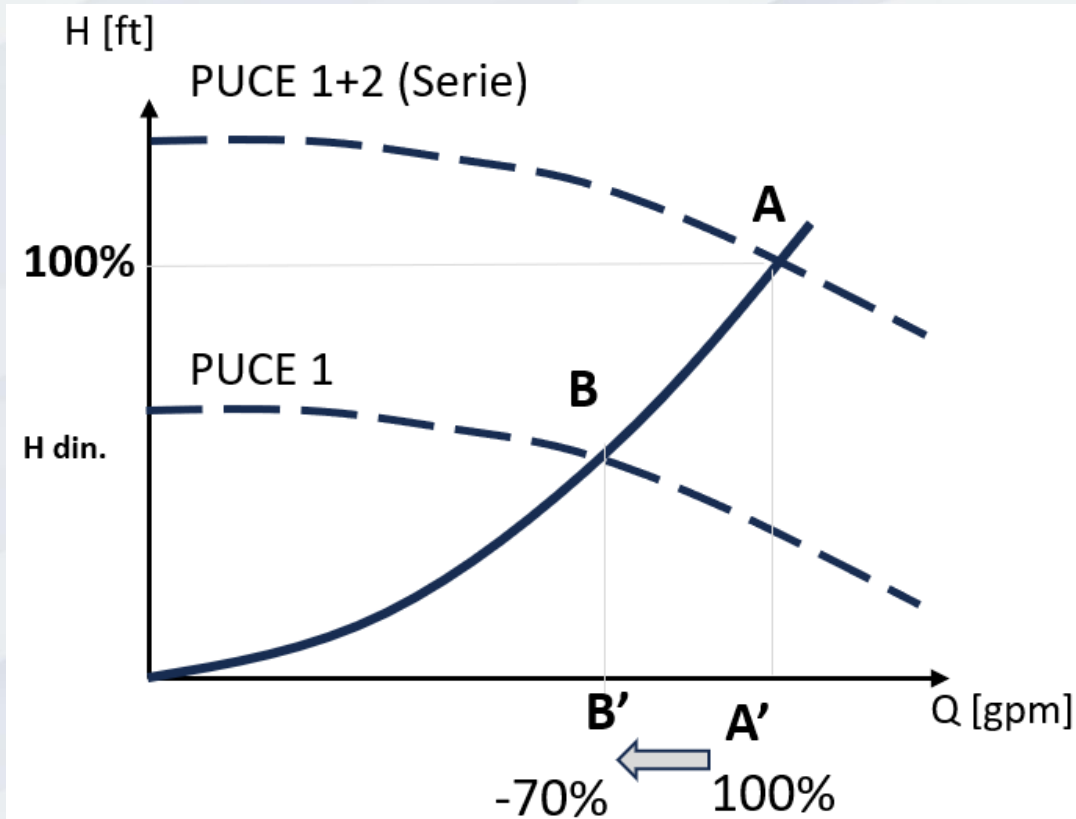
A. Operación en estado Transitorio (Arranques/Paradas)



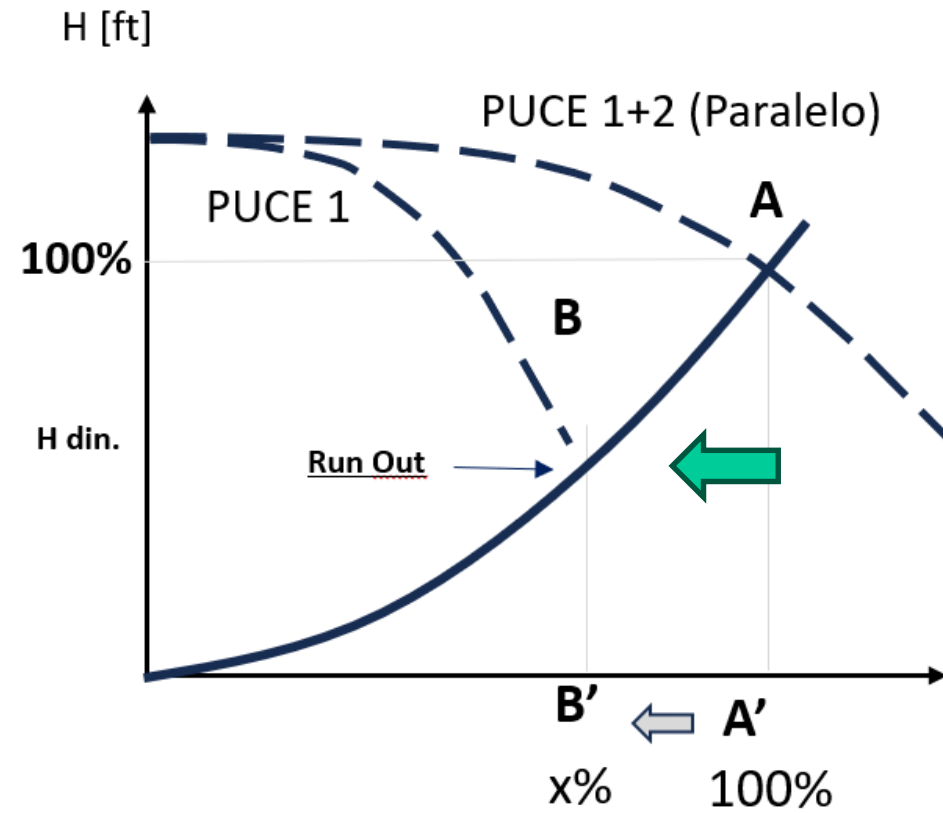
Se debe validar si a futuro se van a tener nuevos escenarios operacionales

Paso 3. Seleccionar Configuración

Operación en estado transitorio



Reducción Caudal por salida de unidad

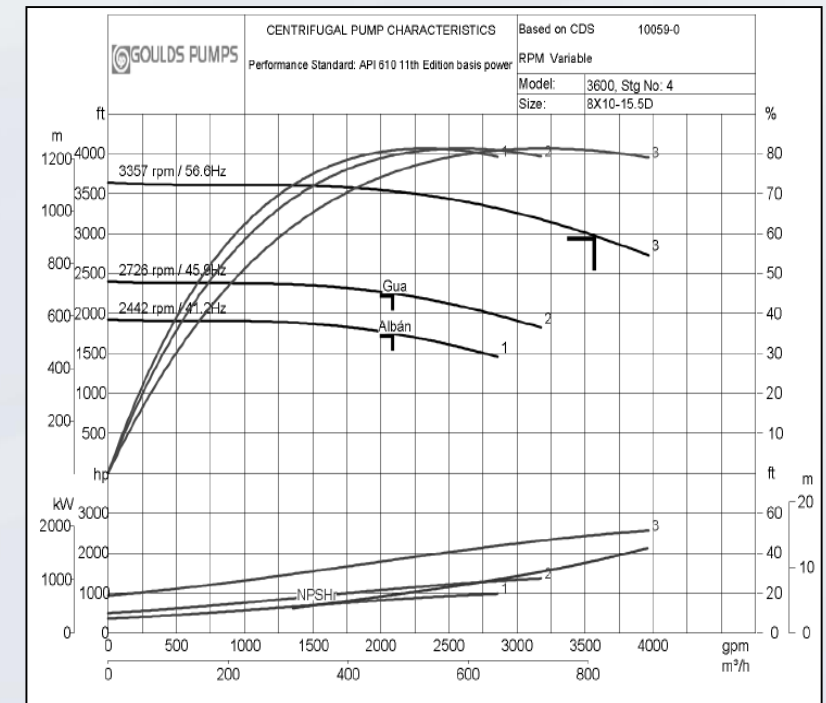
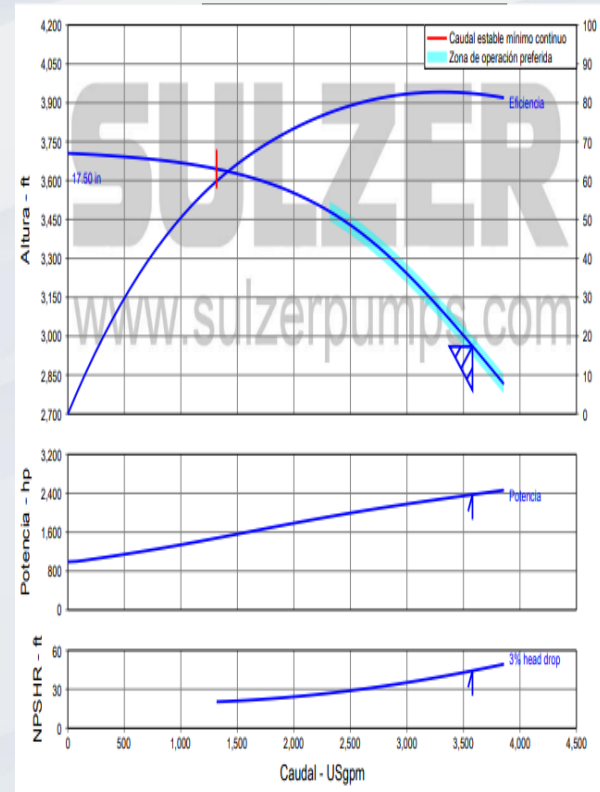
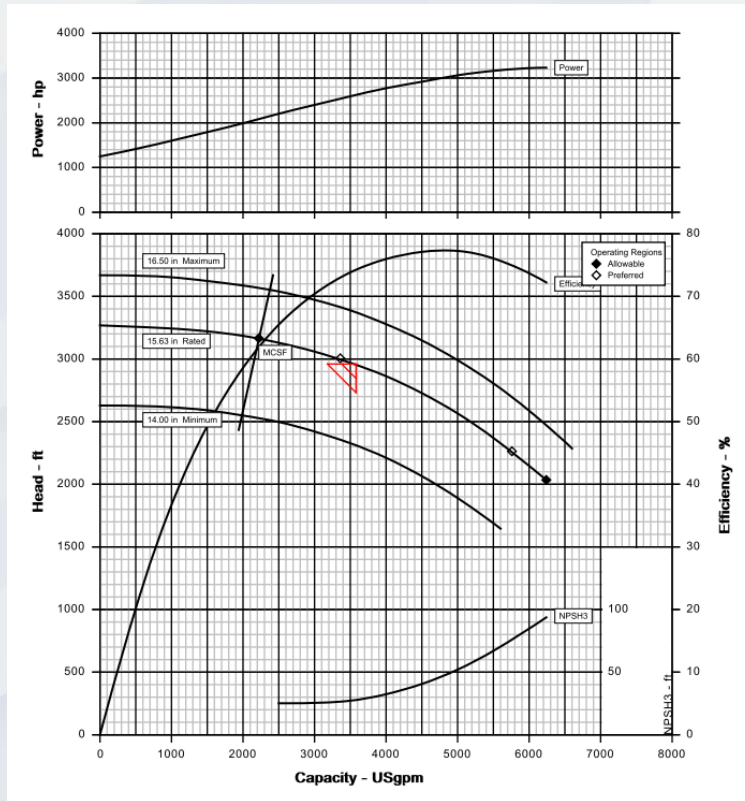


Reducción Caudal por salida de unidad

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

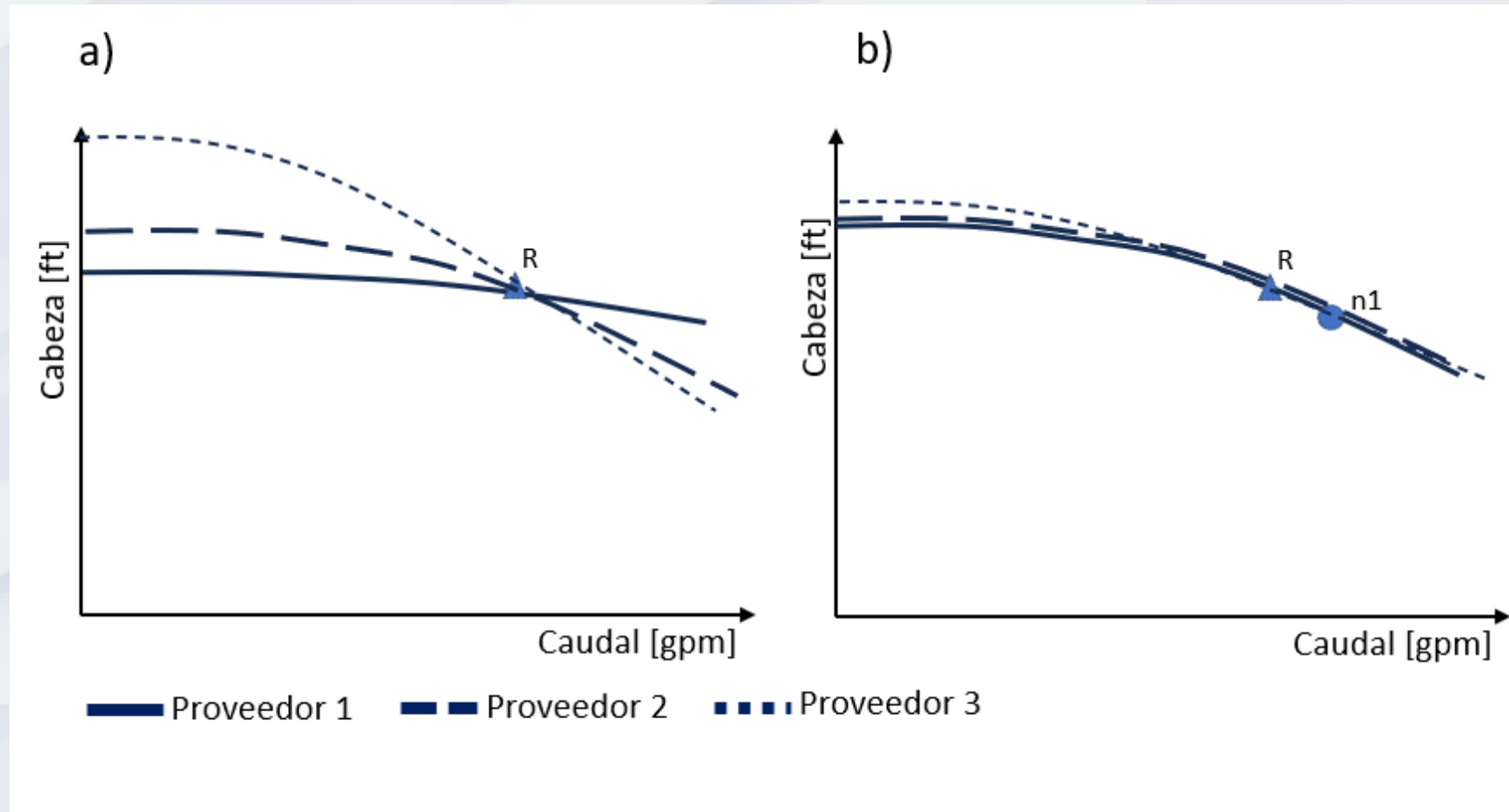
Paso 4. Preseleccionar Equipos

Se recomienda validar simuladores de diferentes fabricantes para validar las características de la Preselección.



Fuente: a) Flowserve, b) Sulzer, c) Goulds Pumps

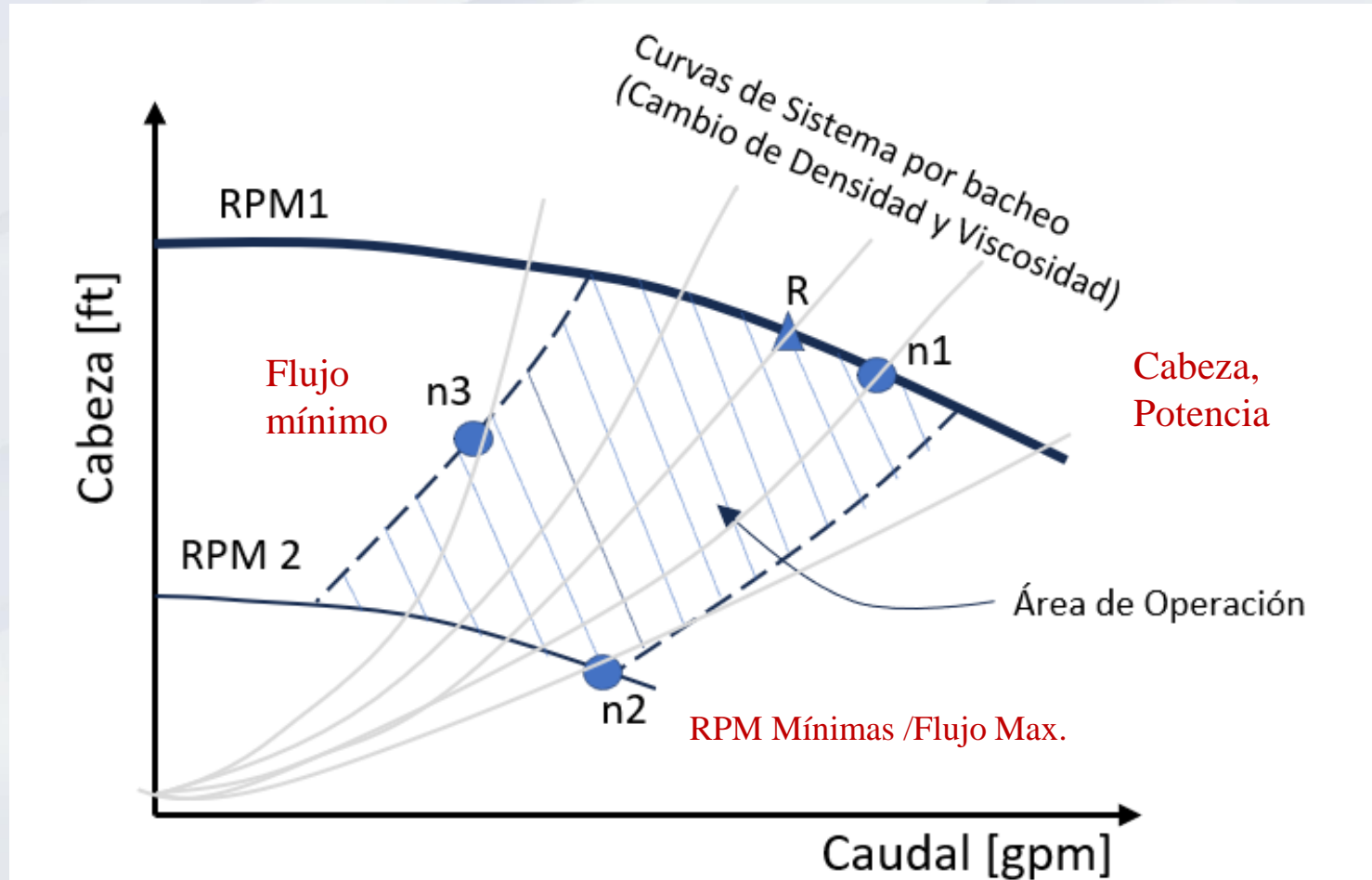
Paso 4. Preseleccionar Equipos



Diferencia entre curvas de desempeño de fabricantes ofertadas, A) Especificando un solo punto, B) Especificando dos puntos.

Fuente: Elaboración propia.

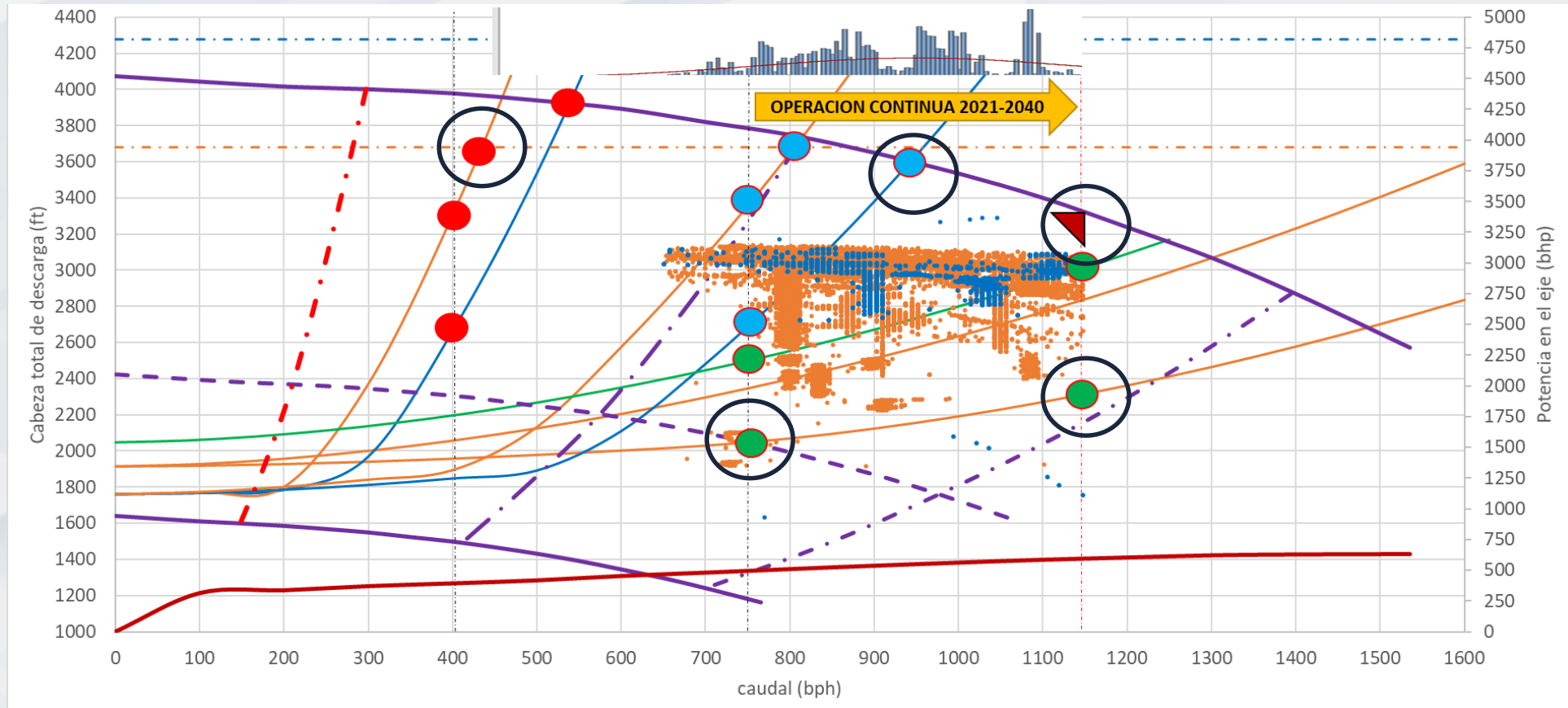
Paso 4. Preseleccionar Equipos



Puntos requeridos en la preselección. Fuente: elaboración propia.



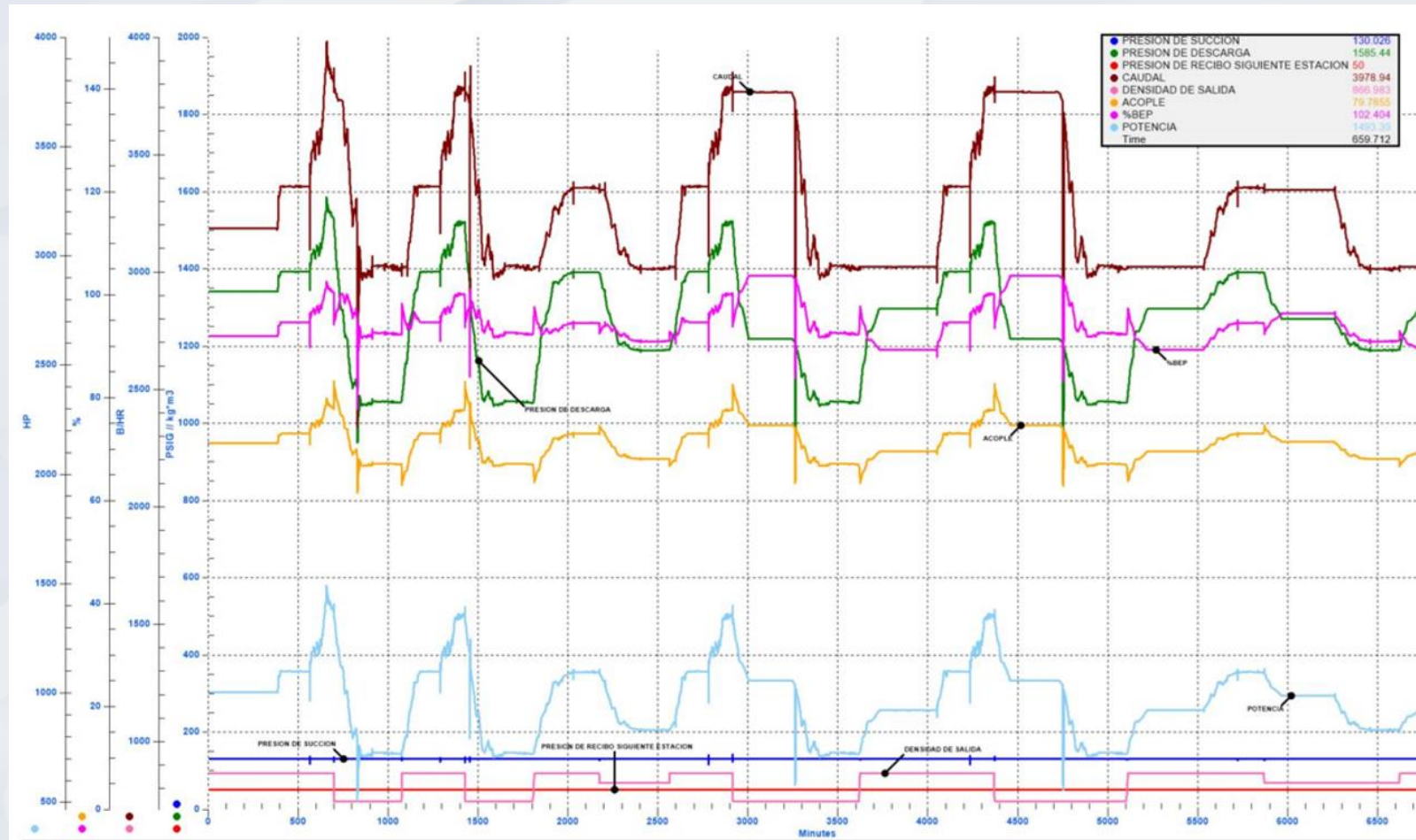
Paso 4. Preseleccionar Equipos



Ejemplo de Preselección

Paso 4. Preseleccionar Equipos

Validación de preselección con software de simulaciones Hidráulicas



Ejemplo de simulación hidráulica para validación de bomba preseleccionada (SPS)



Paso 5. Validar el Mercado

Vendor List: Es importante contar con un listado de proveedores validado previamente con diferentes criterios como:

- a) Experiencia en el mercado.
- b) confiabilidad de la marca.
- c) política de servicio al cliente.
- d) facilidad de acceso a información técnica.
- e) portafolio de servicios en campo.
- f) certificaciones de calidad (ISO 9001, etc.), entre otros.



Cada Empresa debe definir
y aplicar sus criterios

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.

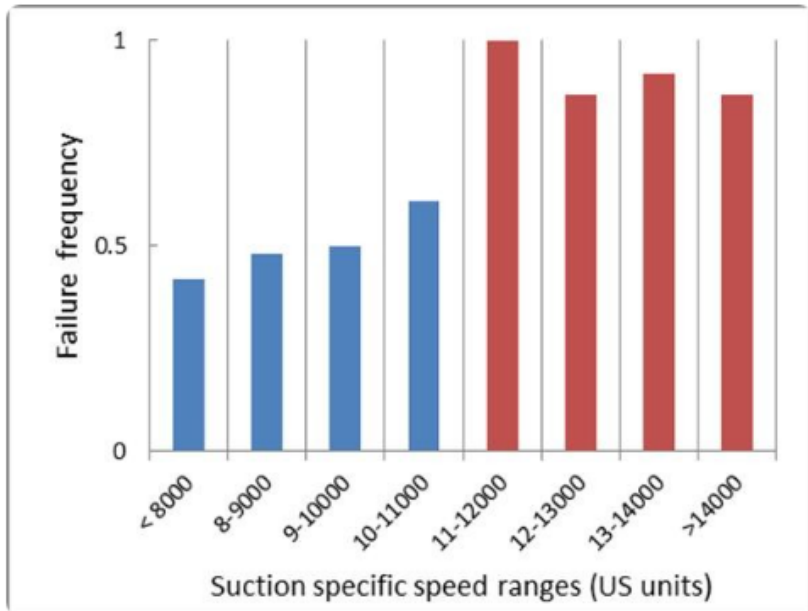


Entre Más oferentes más
esfuerzo en la evaluación

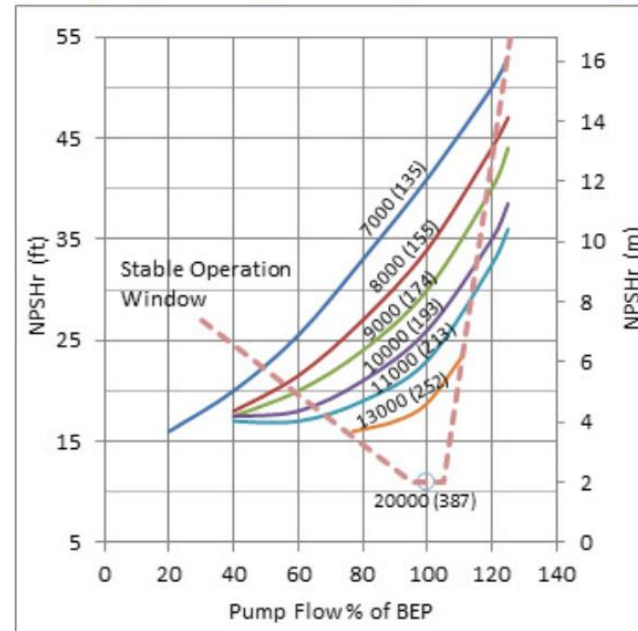
Paso 6. Elaborar Términos de Referencia (TR)

1- Velocidad Especifica de Succión (Nss): Se adoptó el criterio dado por (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 tener baja NPSHr en el impulsor de primera etapa.

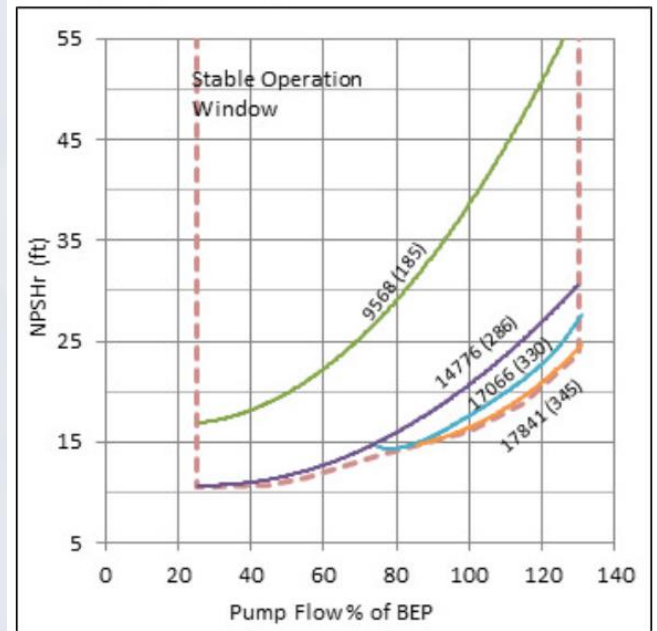
Resultado estudio Halam (19282)



Pump operating window, 1970s design



Pump operating window 2013 design





Paso 6. Elaborar Términos de Referencia (TR)

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

3- 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 supone 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.

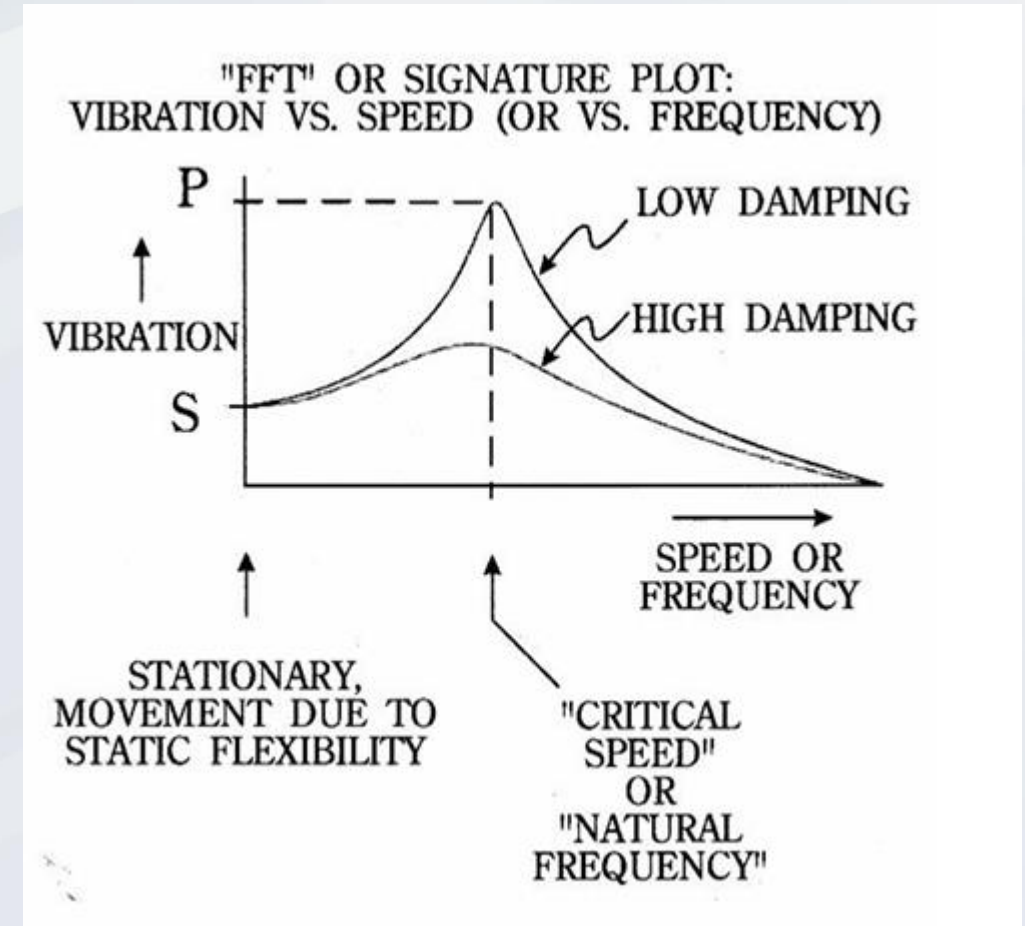
Paso 6. Elaborar Términos de Referencia (TR)

4- Zonas de resonancia: Se debe solicitar al proveedor que declare las zonas prohibidas de operación (rango de RPM) en las cuales no se podrá operar de manera continua las unidades. Estas zonas se deberán validar contra las áreas de operación esperadas durante los ciclos de operación de los equipos.

5- Eficiencia: Parámetro esencial para la evaluación económica de ofertas y para asegurar que se compre un equipo alineado con la política de reducción de huella de carbono.

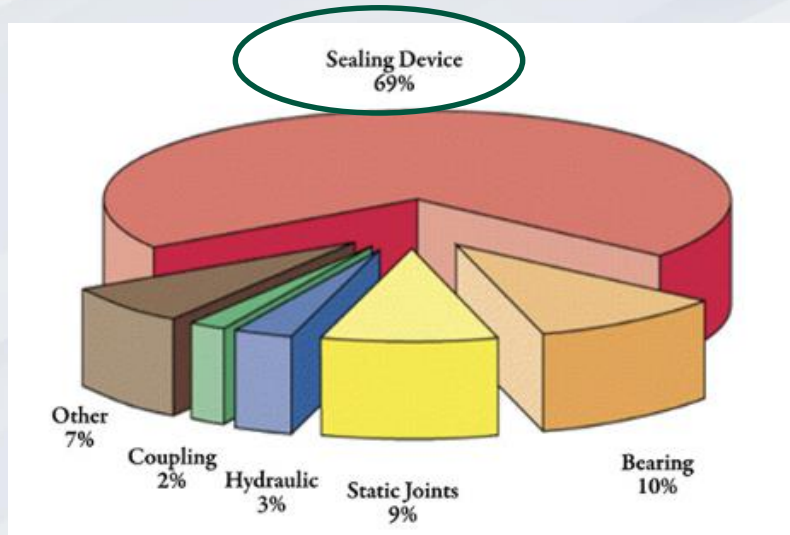


Se debe dejar claro el listado de documentos que debe entregar el Proveedor, incluyendo idioma.



Paso 6. Elaborar Términos de Referencia (TR)

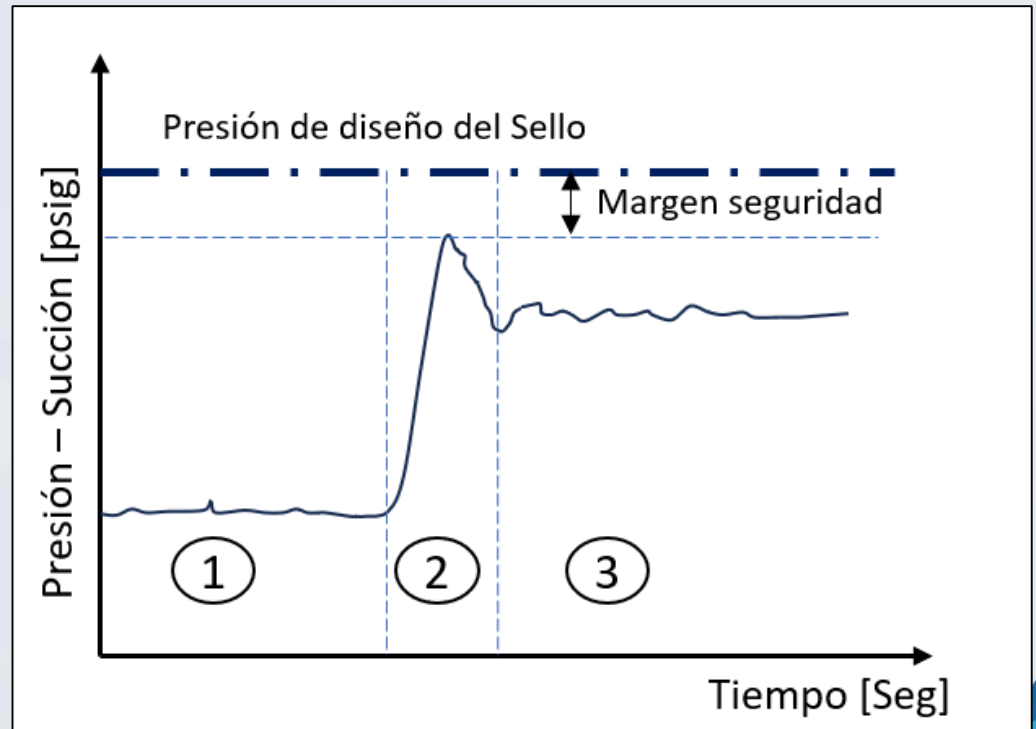
7- Sistema de sellado del eje: Es el componente más crítico de una PUCE. Una buena práctica es realizar simulaciones de transitorios hidráulicos para identificar picos de presión por encima de la presión máxima esperada en condición estable.



Estandarizar los tipos de sellos mejora la estrategia de mantenimiento



Asuma un margen de seguridad para la Presión del Sello



Paso 7. Elaborar Ofertas

Se desarrollaron matrices de características garantizadas de los equipos, las cuales reúnen los variables descritas en las hojas de datos de los equipos, MR de compra y especificaciones Técnica del proceso de compra, incluyendo el sistema de control.

*SDF: Según Diseño fabricante

ITEM	DATOS CENIT			DATOS OFERENTE			
	PARAMETRO	UND	DATO SOLICITADO	DATO OFERTADO	CUMPLE	CARPETA	DESVIACIONES/ OBSERVACIONES
1	Equipo						
1,1	Fabricante bomba	Dato	SDF				
1,2	Tipo bomba	Dato	SDF				
1,3	Etapas	#	SDF				
1,4	Modelo	Dato	SDF				
1,6	Tiempo de entrega (semanas)	Sem.	SDF				
1,7	Número curva de desempeño	#	SDF				
2	Condiciones de operación		*				
2,1	Servicio intermitente o continuo	Dato	Intermitente				
2,2	Numero de arranques	#	3				
2,3	Operación en Serie o paralelo	Dato	PARALLEL				
2,4	Flujo Normal (GPM)	GPM	805				
2,5	Flujo Rated (gpm)	GPM	1358				
2,6	Flujo en BEP a velocidad rated (gpm)	GPM	SDF				
2,7	Flujo en BEP a velocidad normal (gpm)	GPM	SDF				
2,8	Ns a velocidad RATED	#	SDF				
2,9	Nss a velocidad RATED	#	SDF				
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				

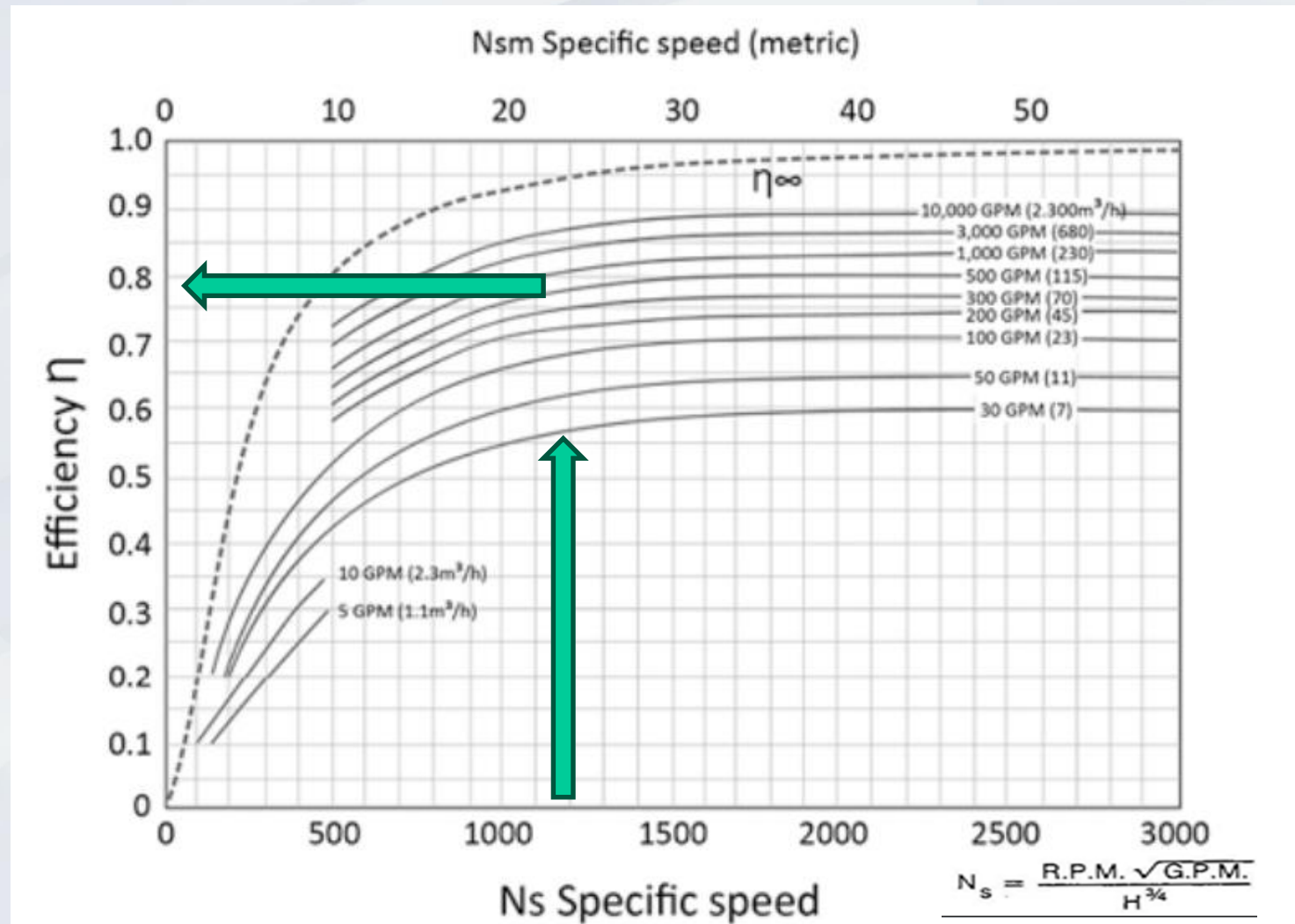


La evaluación
Económica se debe
hacer sobre LCC no
sobre precio de compra



Paso 7. Elaborar Ofertas

Es buena práctica validar que las eficiencias de las PUCE ofertadas son alcanzables





Paso 8. Revisar Ingeniería de Fabricación

Es importante que el mismo equipo multidisciplinar que elaboró los TR valide el cumplimiento de las especificaciones técnicas y de la oferta técnica.

Se recomienda 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 ET, esto con el fin de evitar reprocesos o situaciones que puedan generar sobre costos para alguna de las partes.



Paso 9. Asistir Pruebas Funcionales

Atestiguar 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 quiera 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 NPSH** cuando se tenga alta incertidumbre en los cálculos de NPSH disponible o cuando se tenga antecedentes de cavitación en las bombas actuales (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.



Se debe enviar personal
idóneo a testiguar las
pruebas



RESULTADOS

La implementación del proceso propuesto trajo los siguientes beneficios para la compañía:

- ✓ Compra de equipos con el **menor costo de ciclo de vida** de acuerdo con la tecnología disponible en el mercado.
- ✓ **Ahorros en consumo de energía** a través de equipos de alta eficiencia (baja huella carbono).
- ✓ Equipos suministrados con **cumplimiento** de más del 95% de los **criterios** acordados en los TR.
- ✓ Generación de **alertas tempranas** para la corrección de diseños y/o configuraciones de equipos.
- ✓ Ahorros en costo y tiempos de **evaluación de Ofertas** en valores cercanos al 25%.
- ✓ **Estandarización** del proceso de **procura** de PUCE al interior de la empresa. **Mejora Continua.**
- ✓ Apalancamiento de política de **estandarización de repuestos**



RESULTADOS

- ✓ Adquisición de **planes de sellado robustos**, acorde con las presiones máximas esperadas en la operación, lo cual incrementa el Tiempo medio entre fallas.
- ✓ Se incrementó la cantidad de preguntas técnicas relevantes durante el proceso de las ofertas a partir de la profundidad técnica de los TR.

Se presentan algunos resultados de procesos de compra, donde se destaca: i) por lo 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 inferiores 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



CONCLUSIONES

1. Comprar una PUCE con un fabricante reconocido no es suficiente, se debe implementar **procesos de compra de equipos de manera estructurada**, estableciendo controles administrativos y técnicos permite generas beneficios económicos a corto y largo plazo para las empresas, reflejados principalmente en ahorro de OPEX durante el LCC.
2. La **especificación Técnica** de compra de las PUCE debe ser el producto de un **proceso multidisciplinar** donde se miren diferentes aspectos para comprar un equipo **confiable, eficiente** y que se **adapte** lo mejor posible a los requerimientos operativos del negocio de la compañía.
3. 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 construcción de los equipos para asegurar su implementación.