

DETERMINACION DEL CALADO OPTIMO DE LAS TURBINAS REVERSIBLES EN UNA INSTALACION DE ACUMULACION POR BOMBEO (*)

Por CESAR GOMEZ CAFFARENA
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Las instalaciones de acumulación por bombeo están de moda en el mundo entero, si bien en España no son aún frecuentes. El proyectista no avezado en la materia tal vez tropiece con dificultades en la selección de ofertas de turbinas reversibles, especialmente en lo que se refiere a las diferentes posibilidades de calado o submersión. El autor pretende ofrecerle sólo una orientación teórico-práctica, acompañada de algunos consejos, con la intención de que le sirva de ayuda para la mejor solución de su caso. Advierte que sus quince años de experiencia en el campo hidroeléctrico le han hecho muy conservador, conservadurismo que aconseja muy sinceramente a los proyectistas más novatos.

1. Introducción y objeto.

Es sobradamente conocido que una instalación de acumulación por bombeo exige un fuerte calado (o altura de aspiración negativa) para poder obtener un buen rendimiento de las bombas, si se trata de grupos ternarios, o de las turbinas-bombas en su fase de bombeo, si de binarios.

Sin embargo, en la etapa de estudio o anteproyecto, el ingeniero que se estrena en la materia se pregunta: *¿Cuánto?*

El intento de prefijarlo mediante consultas estadísticas, lecturas o por instalaciones análogas le llevará a una primera conclusión: *Cuanto más, mejor.*

Con ello su pregunta no queda satisfecha, sólo se transforma en *¿Hasta cuánto?* Es decir: *¿Dónde está el límite o equilibrio económico entre las ventajas de aumentar el calado y el sobre coste que ello produce en la instalación?*

El objeto de estas notas o apuntes no es plantear la ecuación de este equilibrio, sino solamente exponer cuáles son los factores a considerar y sopesar en los dos platillos de la balanza económica; si bien teniendo en cuenta en todo momento su futura aplicación a un caso particular que preocupa al autor.

Estó creo no le resta generalidad y que el

lector no introducido en la materia, pero con deseo o necesidad de hacerlo, podrá sacar partido, no sólo de las materias expuestas con carácter general, sino de las que expongo con carácter práctico y aplicadas a un caso particular, aún sin resolver.

Doy por supuesto que la central es subterránea, como ocurre con la mayoría de las instalaciones de acumulación por bombeo puro, generalización fácilmente soslayable en otro caso.

Lo mismo puede decirse respecto a que los grupos sean binarios o ternarios.

2. Fuente de información.

Respecto a los factores en los que interviene la maquinaria hidráulica, utilizo la información general, datos y un gráfico que Hans Philipsen y Carl Stahlschmidt han publicado, bajo el título "Las máquinas hidráulicas de centrales de acumulación por bombeo y su estado actual de desarrollo", en la revista *Voith Forschung und Konstruktion* de mayo de 1967.

Como el título indica, esta publicación condensa y facilita al lector los conocimientos básicos sobre el estado actual de la técnica en esta materia y me evita tener que hacer otras referencias.

Cuando utilice esta única citaré simplemente a Philipsen, para abreviar.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de abril de 1972.

3. Factor básico: La velocidad específica.

Según Philipsen:

“El rendimiento de la bomba no sólo depende del tipo y del tamaño de la bomba y de la altura de elevación, sino que también es función de la velocidad específica. Para conseguir rendimientos óptimos es necesario tratar de conseguir un diseño con velocidad específica alta, siempre que sea posible lograr la correspondiente altura de aspiración.”

Aparece, pues, como factor básico, la velocidad específica. Al aumentar la velocidad específica hasta un cierto límite, se obtienen unos:

Factores positivos:

- Mayor rendimiento de la bomba (*).
- Menor coste de la maquinaria.
- Menores dimensiones de la central.

Pero ello implica tener que aumentar el calado o altura de aspiración negativa, con objeto de eliminar o reducir las cavitaciones, lo que da lugar a otros:

Factores negativos:

- Incremento de longitud de las tuberías de presión y de contrapresión (que incluye un incremento de coste y otro de pérdidas de carga, en el supuesto de que no se modifiquen los diámetros de dichas tuberías).
- Incremento del momento de inercia (PD^2) de las máquinas (suponiendo, igualmente, que no se modifiquen los diámetros de las conducciones) (**).
- Incremento de la altura de elevación de los escombros procedentes de las excavaciones de la central y cámaras anejas.
- Incremento de la longitud de las galerías de acceso, cables, ventilación, etc., así como de los conductos y conductores alojados en ellas.

(*) Al hablar simplemente de la bomba, me refiero tanto a ésta, si el grupo es ternario, como a la turbina-bomba en funcionamiento como bomba, si el grupo es binario.

(**) Me refiero al incremento del momento de inercia motivado exclusivamente por el aumento de longitud de la conducción en presión.

- Incremento de la presión interior en los conductos hidráulicos, válvulas, etc.
- Incrementos de la presión exterior a soportar por las estructuras internas (conducciones, bóvedas, etc.).
- Posible incremento de las filtraciones de agua.
- Incremento del plazo de ejecución de las obras.

No obstante, el aumento de la profundidad puede dar lugar a:

Otro posible factor positivo:

- Mejora de las condiciones geológicas de ubicación de la central y cámaras anejas.

4. Valoración de factores.

Todos estos factores han de valorarse, aunque ello sea difícil en algún caso.

Trataré de exponer cómo se pueden realizar algunas valoraciones, empezando por el principal factor positivo:

5. Rendimientos de la bomba.

En el supuesto de que hemos elegido para nuestra instalación una turbina-bomba — lo que, aunque parece muy recomendable, no debe decidirse *a priori* —, estaremos en el caso de bombeo con una entrada y un escalón.

A guisa de ejemplo, y sin que se le pueda dar valor universal, admitamos una curva de rendimientos en función de la velocidad específica como la representada en el gráfico 1.

Vemos en ella una primera limitación o valor superior de la velocidad específica que podemos establecer — vuelvo a insistir: a guisa de ejemplo — en $n_s = 175$.

Pero vemos también que valores inferiores, $n_s = 150 - 125$, no producen gran pérdida en el rendimiento relativo.

Así, pues, tanto este factor del rendimiento como el del coste de la maquinaria en función de la velocidad específica, han de definirse con mucho detalle por las posibles casas suministradoras.

Para la determinación del calado óptimo no

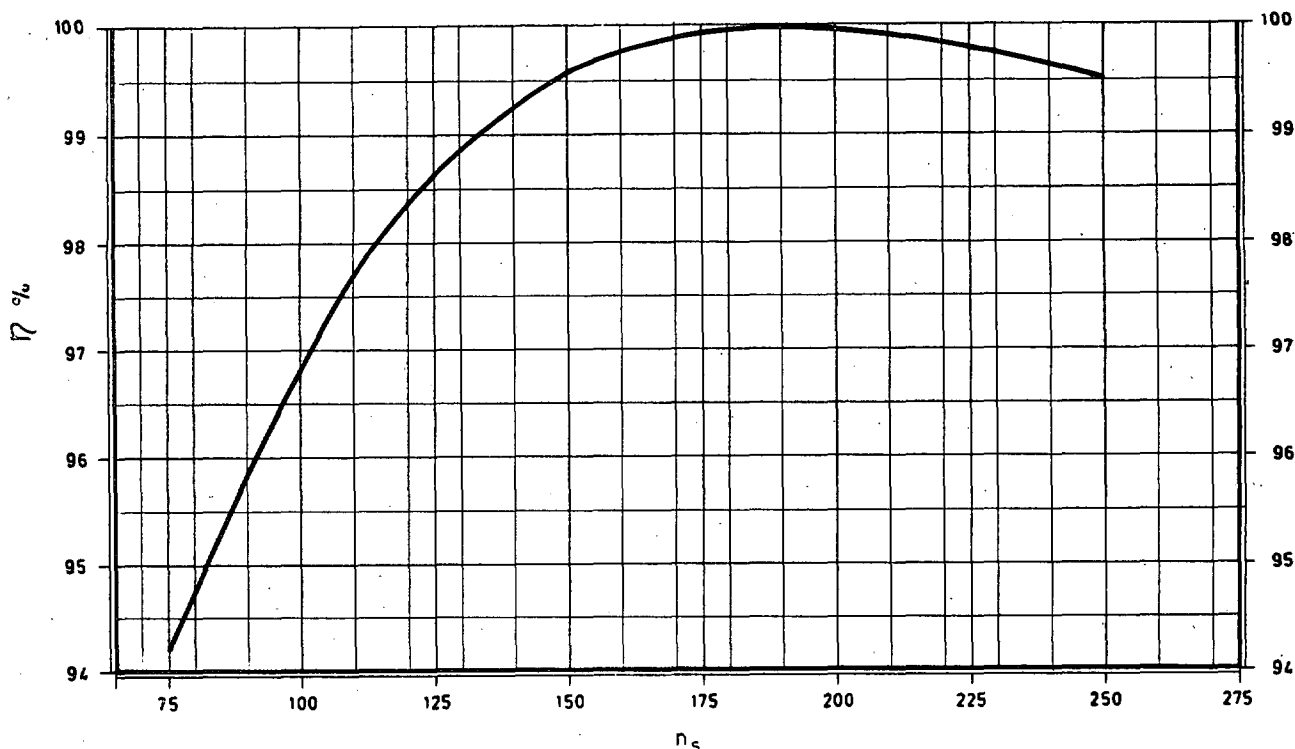


Gráfico 1. — Rendimientos relativos de bombas de una entrada y un escalón en función de la velocidad específica.

bastará con conocer la relación entre el rendimiento relativo de la bomba y la velocidad específica, ya que ésta influye también en el rendimiento de la turbina como tal. El rendimiento de la instalación es función del producto de ambos rendimientos, de turbina y bomba, dependientes directamente de la velocidad específica.

El proyectista deberá tener esto en cuenta y utilizar en el gráfico de rendimientos relativos (o absolutos, si prefiere) el producto de los rendimientos de turbina y bomba, referidos a la velocidad específica, siempre y cuando no opte por establecer potencias distintas para cada una de ellas, en cuyo caso el balance habría de establecerse bajo otras consideraciones y según la relación de las potencias.

En nuestro caso, y para simplificar, supondremos que en el gráfico está representado el producto de los citados rendimientos.

6. La altura de aspiración.

La altura de aspiración para bombas depende fundamentalmente del índice de cavitación,

coeficiente ideado por Thoma, y se expresa según la fórmula homogénea:

$$H_s = \sigma H + h_t - h_a,$$

en la que:

H_s = altura de aspiración negativa o desnivel entre el depósito inferior (o la línea de presión aguas abajo, si se contabilizan las pérdidas) y el plano medio del rodete.

σ = índice de cavitación.

H = altura manométrica.

h_t = tensión del vapor de agua.

h_a = presión atmosférica.

El valor de σ se indica siempre en función de la velocidad específica.

Para turbinas se obtienen valores muy moderados, como el propuesto por Rogers y Moody:

$$\sigma = 0,315 (n_s/100)^2,$$

con el que normalmente resulta $\sigma H + h_t$ comparable con h_a y, por tanto, H_s muy próximo a cero.

Sin embargo, en bombas y turbinas-bombas rigen otras fórmulas, como:

La de Pfleiderer:

$$\sigma = 0,1 (n_s/100)^{1,33}, \quad (I)$$

y la de Gerber y Sutherland:

$$\sigma = 0,124 (n_s/100)^{1,33}. \quad (II)$$

Según Philipsen, la de Pfleiderer da una primera idea para el cálculo.

No obstante, Gerber y Sutherland han propuesto su fórmula, como un valor límite inferior, "basados en valores experimentales adquiridos por la visita a 26 centrales de acumulación por bombeo en Europa".

Existe una cierta contradicción entre la fórmula (II), dada como límite inferior para la cavitación, y la (I), que los autores consideran aceptable en fase de anteproyecto, no obstante dar valores menores.

Esta contradicción se resuelve mediante las siguientes consideraciones:

- El índice de cavitación del rodete puede modificarse dentro de ciertos límites variando el diámetro de entrada y la forma y posición de las palas. Pero generalmente un rodete para rendimientos óptimos tiene coeficientes de cavitación menos favorables y viceversa.
- La resistencia del material utilizado permite, a veces, admitir cavitaciones de poca importancia que se definen como un estado de funcionamiento que, después de mantenerse durante mucho tiempo, no necesita una reparación por medio de soldadura de aportación, sino que es suficiente un repaso con pulidora.

Estas razones parecen suficientes para que los autores se decidan por recomendar la utilización de la fórmula de Pfleiderer, pero el proyectista no debe perder de vista el interés de algunas casas suministradoras en presentar ventajas iniciales que animen al cliente a ser osado, aunque, posiblemente, después le recomendarán una mayor prudencia en beneficio de ambos, suministrador y cliente.

Así, pues, en beneficio exclusivo del cliente,

el proyectista debe ser inicialmente más prudente y, al igual que trabaja siempre con unos coeficientes "de seguridad" (que en aras de la sinceridad deberían llamar "de ignorancia", aunque ésta sea normalmente insalvable), admitir también un coeficiente de seguridad en esta materia.

Así, pues, creo que, cuanto menos, debe adoptarse la fórmula de Gerber y Sutherland, cuyo coeficiente de seguridad o ignorancia es sólo 1,24 respecto a la de Pfleiderer, en el supuesto de que ésta fuera más correcta.

7. Valoración de la altura de aspiración.

Con objeto de poner de manifiesto la importancia de la altura de aspiración negativa en instalaciones de acumulación por bombeo, en las que son deseables por razones económicas grandes alturas de salto, expreso a continuación los valores entre los que nos podríamos "mover" en un caso particular (el que me ocupa) de las siguientes características:

Altura manométrica de cálculo: $H = 464$ m.

Tensión máxima del vapor de agua: $h_t = 0,3$ m.

Presión atmosférica mínima: $h_a = 9,3$ m.

Potencia nominal en bombeo: $N = 150.000$ CV.

Utilizando la conocida fórmula:

$$n_s = \frac{n N^{1/2}}{H^{5/4}},$$

y las ya expresadas

$$\sigma = 0,124 (n_s/100)^{1,33}, \quad (II)$$

de Gerber y

$$H_s = \sigma H + h_t - h_a = 464 \sigma - 9,$$

tomo valores normales de la velocidad de sincronismo, n , con los que obtengo los valores correspondientes a H_s y, por medio del gráfico 1, los rendimientos relativos que se expresan en el cuadro 1. En él puede apreciarse la gran variación en las alturas de aspiración para relativamente pequeñas variaciones de velocidad.

CUADRO 1

Velocidad de sincronismo n (r/m)	Velocidad específica n_s	Coefficiente de cavitación σ	Altura de aspiración H_s (m)	Rendimiento relativo η_r (%)
428	77	0,0877	31,6	94,4
500	90	0,1078	41,0	95,8
600	108	0,1385	55,3	97,5
750	135	0,1850	76,9	99,1
1.000	180	0,2715	117,0	100,0

Adoptando para el coeficiente C un valor mínimo

$$C_{\min} = 0,1,$$

y otro medio recomendable

$$C_{\text{medio}} = 0,124,$$

resulta el siguiente cuadro 2 de valores, en que a partir de diversas velocidades específicas relacionamos alturas de aspiración y rendimientos según el gráfico 1, tomado como ejemplo.

CUADRO 2

Velocidad específica n_s	Altura mínima H_s min (m)	Altura recomendable H_s med (m)	Rendimiento relativo η (%)
75	22,6	30,2	94,2
100	37,4	48,6	96,8
125	53,5	68,5	98,65
150	70,7	90	99,6
175	89	112	99,95
200	108	136	99,95

8. La altura de aspiración en relación con el rendimiento.

Por lo expuesto hasta aquí, vemos que la altura de aspiración queda ligada a la velocidad específica mediante la fórmula

$$H_s = C (n_s/100)^{1,33} H + h_t - h_a, \quad (\text{III})$$

en la que C es un coeficiente que puede variar, a mi juicio, entre 0,10 y 0,15, siendo recomendable utilizar el valor de Gerber y Sutherland de 0,124.

En el caso concreto que hemos expuesto en el apartado anterior, la fórmula (III) resulta:

$$H_s = 464 C (n_s/100)^{1,33} - 9.$$

En el gráfico 2 quedan representadas estas relaciones calados-rendimientos.

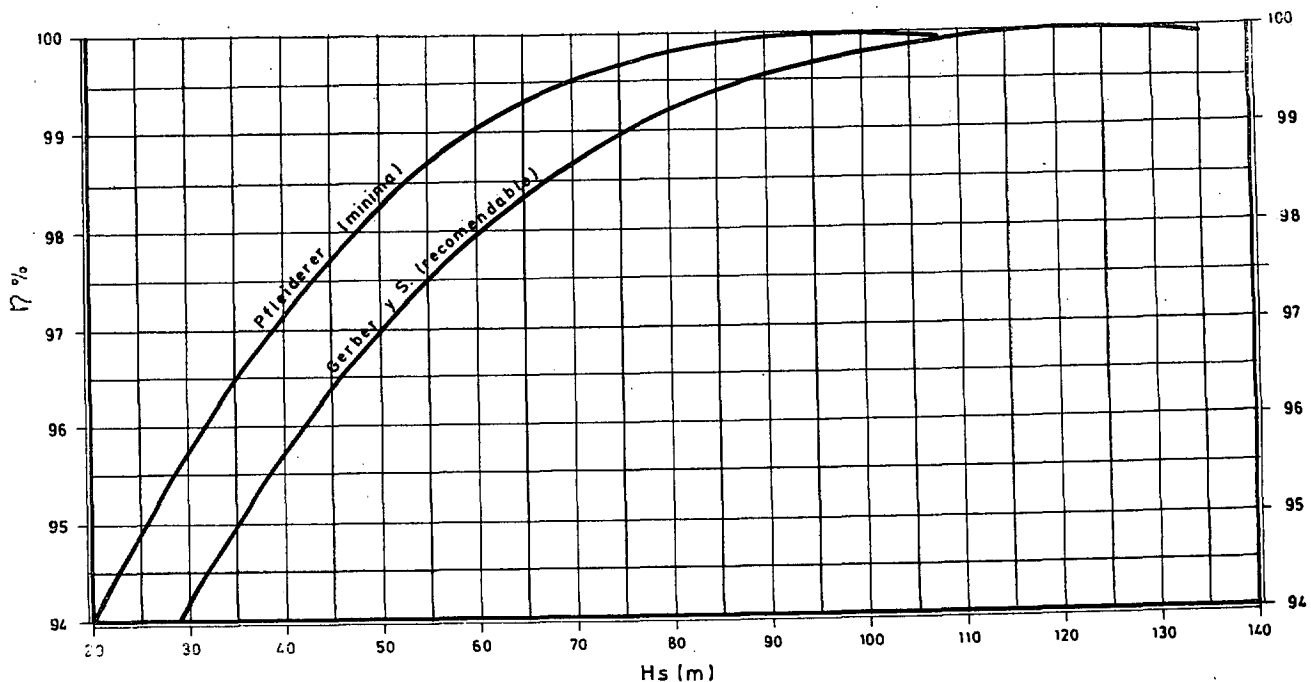


Gráfico 2. — Rendimientos relativos en función del calado de la turbina-bomba.

Se observa, siguiendo la curva recomendada, que un incremento de altura (profundización de la central) de 30 a 40 m representa una ganancia de 1,5 por 100 de rendimiento relativo. Si el incremento de altura es de 50 a 60 m, la ganancia de rendimiento relativo pasa a ser de 1 por 100, y si de 70 a 80 m, sólo ganaríamos un 0,5 por 100.

Por el contrario, éstos incrementos de altura de aspiración son sucesivamente más costosos: bajar el rodete de 50 a 60 m cuesta más que bajarlo de 30 a 40 m.

9. Valoración de los factores negativos que resultan de incrementar la altura de aspiración.

Es evidente que la valoración de todos los factores negativos que he enumerado en el apartado 3 es, normalmente, muy difícil. Hay algunos que no puede valorar el proyectista sin los datos precisos de las casas suministradoras, como son los incrementos de coste de la maquinaria debidos a los aumentos en el momento de inercia y presión interior. Los suministradores podrían "jugar" con el cliente y con su proyectista, sobre todo si éstos no les han obligado previamente (antes de seleccionar su oferta) a especificar claramente las repercusiones monetarias de todas las variantes posibles. Si no se ha hecho así, los suministradores tal vez intenten exagerar el sobrecosto de los incrementos que se les propongan e infravalorar la economía en los decrementos.

Es también muy difícil valorar el mayor coste producido por el posible aumento de las filtraciones y del tiempo de ejecución de la obra.

Lo mismo sucede con el aumento de presión del macizo rocoso que puede convertirse en favorable, si lo es el empuje pasivo que puede proporcionar (tuberías de presión no blindadas que pueden precomprimirse mediante inyecciones). Sin embargo, es desfavorable en el caso de que hayan de construirse bóvedas resistentes en las cavernas, galerías, etc.

Por todo ello es fundamental la inspección geológica y geofísica en vertical, que pudiera ser muy decisiva.

Creo que los demás incrementos citados son fáciles, aunque penosos de valorar, por lo numerosos. Algunos pueden dar incrementos de

coste sumamente pequeños, pero como todos influyen en el mismo sentido, no convendrá despreciarlos, sino, a lo sumo, englobarlos en un tanto por ciento estimativo sobre los importantes.

10. Valoración de los factores positivos.

Al hablar en el apartado 5 del rendimiento de la bomba me he limitado a dar un ejemplo de su posible variación en función de la velocidad específica (gráfico 1), lo que me ha permitido relacionar después rendimientos y alturas de aspiración (gráfico 2).

Falta valorar el rendimiento en pesetas.

Podría caerse en el error de infravalorar la ganancia o pérdida de rendimiento de la bomba si solamente se considerase como repercusiva en el coste de la energía consumida en el bombeo. Esto tal vez sea válido en algunas instalaciones de bombeo mixto con importante aportación natural. Pero en una instalación de bombeo puro una pérdida de rendimiento de la bomba no se traduce sólo en un mayor consumo de energía en bombeo, sino en una reducción del rendimiento global, toda vez que, como ya he dicho, el rendimiento de la bomba es uno de sus factores.

Así, pues, la pérdida de rendimiento en bombeo se traduce ineludiblemente en una pérdida de rendimiento del conjunto de la instalación, esto es, en una pérdida relativa idéntica en los beneficios, y así debe valorarse económicamente.

Respecto al menor coste de la maquinaria por aumento de la velocidad específica, insisto en lo dicho en el apartado anterior: hay que exigir a los suministradores que expresen clara y previamente su repercusión monetaria.

11. Ejemplo cuantitativo.

Lo dicho hasta aquí tiene sólo un contenido orientativo de carácter fundamentalmente cualitativo, si bien ya han ido algunas cifras, más o menos reales, por delante.

Falta una orientación cuantitativa que, para no fatigar al lector de este artículo, ha de ser sencilla y poco detallista.

En el primer estudio o anteproyecto de la instalación que he citado, algunos de cuyos datos he expuesto en el apartado 7, tomamos como altura de aspiración, basándonos en datos estadísticos, $H_s = 35$ m.

Con dicha altura resultó el presupuesto que se detalla:

PRESUPUESTO	MPTas.
1. Depósito superior artificial	322,00
2. Torre de toma superior, obra de fábrica	24,20
3. Tuberías de presión	101,93
4. Central y cámaras anejas, obra	124,00
5. Maquinaria hidráulica y eléctrica	759,54
6. Tuberías de contrapresión	13,73
7. Cámara de equilibrio, aguas abajo	13,58
8. Galería inferior de toma y reintegro	39,50
9. Toma en el embalse inferior (realizado), obra	12,10
10. Galería de acceso a la central	23,59
<i>Presupuesto de la instalación</i>	<i>1 434,17</i>
11. Sondeos, geofísica, topografía, galerías de reconocimiento, anteproyecto, proyecto y tramitaciones administrativas	50,00
12. Expropiaciones, poblados, caminos de obra y definitivos, energía, pruebas, etc.	50,00
13. Cargas financieras, dirección de obras y varios	230,12
<i>Presupuesto total de la inversión</i>	<i>1.764,29</i>

Esta solución tenía una potencia total instalada de 420 MW con la cual se obtenía una producción de 715 GWh/año mediante un consumo de 1.070 GWh/año.

En la hipótesis de un coste del kWh de valle de 0,25 ptas./kWh y de una facturación de 1,00 ptas./kWh de punta, los beneficios brutos obtenidos serían:

$$715 \times 1,00 - 1.070 \times 0,25 = 447,5 \text{ MPTas/año,}$$

con lo que la rentabilidad bruta resultaría:

$$\frac{447,5}{1.764,29} = 25,4 \%$$

Como velocidad de giro adoptamos 500 r./m, que corresponde a una velocidad específica $n_s = 90$ y para la que, según Gerber y Sutherland, debería adoptarse un calado $H_s = 41$ m (cuadro 1), pero con la fórmula de Pflaiderer solamente 33 m, por lo que los 35 m adoptados no caían en lo "imprudente".

Para cumplir la misión de este ejemplo y tomando, como si de una realidad se tratase, los valores de rendimientos obtenidos en función de H_s , expongo a continuación los incrementos de costes y beneficios obtenidos al aumentar la velocidad específica en los sucesivos posibles escalones superiores de la velocidad de giro.

11.1. Incrementos de coste.

Las partidas afectadas por los sucesivos incrementos de calado, de acuerdo con lo expuesto en el apartado 9, son:

3. Tuberías de presión.
4. Central.
5. Maquinaria.
6. Tuberías de contrapresión.
10. Galería de acceso.
11. Sondeos, galerías, geofísica, etc.
13. Cargas financieras y dirección de obra.

Tengo, en primer lugar, en cuenta el incremento consiguiente a pasar de $H_s = 35$ m, valor tomado en el anteproyecto, a $H_s = 41$ m, siguiendo a Gerber y Sutherland, con lo que resulta el presupuesto aumentado en 6 MPTas., es decir, un presupuesto total de 1.770 MPTas.

Los sucesivos incrementos de coste resultantes quedan expresados en el cuadro 3.

CUADRO 3

Velocidad nominal r./m	Velocidad específica	Altura de aspiración (m)	Incremento de coste (MPTas.)
500	90	41	—
600	108	55	26
750	135	77	46,5
1.000	180	117	120

El último escalón, de 77 a 117 m, ha sido calculado muy groseramente y sólo por llegar a la condición más extrema que de antemano ya se prevé fuera de lugar.

11.2. Incrementos de beneficios.

Como ya hemos indicado antes, el cálculo de los incrementos de beneficios ha de basarse

en la relación alturas de aspiración-rendimientos relativos de la bomba.

Partiendo del cuadro 1 (o, en otro caso, del gráfico 2) para los tres escalones que estamos estudiando, y teniendo en cuenta que el beneficio bruto anual está valorado en 447,5 MPtas., los incrementos de beneficios quedan indicados en el siguiente cuadro 4.

CUADRO 4

Altura de aspiración H_s (m)	Rendimiento relativo η (%)	Incremento $\Delta \eta$ (%)	Incremento de benefic. (MPtas./año)
41	95,8		
55	97,5	1,7	7,94
77	99,1	1,6	7,48
117	100,0	0,9	4,20

11.3. Rentabilidades marginales.

Primer escalón: De $n = 500$ a $n = 600$ r./m:

$$\frac{7,94}{26} = 30,6 \%$$

Segundo escalón: De $n = 600$ a $n = 750$ r./m:

$$\frac{7,47}{46,5} = 16,0 \%$$

Tercer escalón: De $n = 750$ a 1.000 r./m:

$$\frac{4,20}{120} = 3,5 \%$$

El resultado del primer escalón no merece discutirse: la rentabilidad marginal no sólo es

muy interesante, sino que supera la rentabilidad bruta del punto de partida.

Tampoco debe discutirse el planteamiento del tercer escalón: está fuera de lugar, como ya había advertido.

Toda discusión y afinamiento debe centrarse en el segundo escalón: una rentabilidad marginal del 16 por 100 es muy interesante, pero el incremento de ganancias es relativamente pequeño (1,64 por 100) y representa pasar de una profundidad de 55 m, que es ya inhabitual, a la muy expuesta de 77 m. Antes de tomar tal decisión las hipótesis deben ser revisadas.

11.4. Cuadro resumen.

En el cuadro 5 se resumen los resultados obtenidos en el ejemplo estudiado.

11.5. Una conclusión que se deduce del ejemplo.

Se trata, en realidad, de una conclusión general de todo estudio económico:

Si la rentabilidad de la instalación es alta, el punto óptimo no es el de máxima rentabilidad absoluta, sino aquél en que la rentabilidad marginal descende al interés mínimo admitido, aunque con ello disminuya la rentabilidad absoluta.

Concretamente, en el ejemplo, si imaginamos los beneficios reducidos en un 50 por 100, optaríamos por una velocidad de rotación de 600 r./m que nos obligaría a una altura de aspiración de 55 m. Si no, pasaríamos, tras estudiarlo con la máxima ponderación posible, a 750 r./m con un calado de 77 m.

Vemos, pues, que hay un factor más a considerar, que es la rentabilidad o bondad propia

CUADRO 5

Velocidad nominal n (r./m)	Velocidad específica n_s	Altura de aspiración H_s (m)	Coste de la invers. (MPtas.)	Incremento de coste (MPtas.)	Beneficio bruto (MPtas./año)	Incremento beneficio (MPtas./año)	Rentabilidad bruta (% anual)	Rentabilidad marginal (% anual)
500	90	41	1.770	26	447,5		25,3	
600	108	55	1.796	46,5	455,44	7,94	25,4	30,6
750	135	77	1.842,5	120	462,91	7,47	25,1	16,0
1.000	180	117	1.962,5		467,11	4,20	23,8	3,5

de la instalación que, si es alta, exige tender a alcanzar el rendimiento máximo, aumentando la velocidad específica y, por consiguiente, incrementando la altura de aspiración.

11.6. Aclaración a los rigoristas.

El lector de espíritu cartesiano que haya seguido el planteamiento y desarrollo del ejemplo no puede haber quedado satisfecho de los mismos. Verá claramente que no he hecho intervenir una variable importante: la potencia del grupo, que he fijado en 150.000 CV. Esto me obliga a establecer unos escalones de mucha "contrahuella", ya que el valor de n , submúltiplo de 3.000, sólo puede ser, como hemos visto, 600 ó 750 r./m, lo que hace poco flexible el valor de n_s , y así resulta que el calado tiene que ser 55 ó 77 m.

Ahora bien, si modificamos la potencia unitaria, quedará modificada la velocidad específica y, por tanto, la altura de aspiración. Pero entonces introducimos en el problema, ya complejo, de la determinación del calado óptimo toda la complicación del estudio general de la instalación: estudio de mercados, dimensionamiento general de la instalación, capacidades de los depósitos superior e inferiores, número de grupos, etc. Todo ello para una incidencia relativamente pequeña en el posible incremento de beneficios y rentabilidades.

En resumen, no me parece aconsejable que el proyectista introduzca el factor H_s como una variable inicial en el estudio general de la instalación, como no lo haría sin duda con otros factores de poco peso, tales como la situación en planta de la central, situación de los transformadores, etc.

Pero si le asusta una contrapresión de 77 m y no quiere renunciar a obtener una mayor rentabilidad en un punto intermedio entre los 55 y los 77 m, no tendrá otro camino que tantear

las repercusiones económicas de una potencia mayor con $n = 600$ r./m u otra menor con $n = 750$ r./m.

12. Conclusiones generales.

La determinación del calado óptimo es un problema técnico-económico suficientemente abordable mediante el estudio conveniente en el que se tengan en cuenta todos los factores que intervienen.

Es inevitable establecer *a priori*, en la fase de estudio o anteproyecto, un valor estimado por casos análogos (como se fijan los diámetros de las conducciones), pero bajo el conocimiento de su provisionalidad, de su indeterminación, de que no es un asunto a fijar sólo por la casa suministradora de la maquinaria.

En este sentido me atrevo a recomendar mucho cuidado con los optimismos previos, cavitaciones de "poca importancia", indeterminación de los rendimientos, etc.

Más vale pecar de más que de menos. Aun después de resuelto el problema, "¿hasta cuánto?", sigue latente el lema "Cuanto más, mejor", puesto que, aunque ya el aumento de profundidad no nos proporcione beneficio económico "visible", por haber fijado el factor básico — la velocidad específica —, el incremento de profundidad está del lado de la seguridad, seguridad no muy costosa relativamente (véase el ejemplo), salvo casos especiales.

Y, sobre todo, es recomendable no aceptar nunca como definitiva una oferta en que no se detallen con toda precisión y garantía los rendimientos, índice de cavitación, etc., y, especialmente, las consecuencias económicas de modificar la velocidad específica y el momento de inercia, para poderlas relacionar con las modificaciones de la instalación que permitan deducir *previamente* la altura óptima de aspiración.