

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/DICIEMBRE 2000 - VOLUMEN 10 - Nº 1 y 2



DISEÑO DE TURBINAS FRANCIS EN C++ BUILDER

Mary P. Morales R.¹

Resumen

En este artículo se presenta por medio de un programa en C++ Builder las diferentes teorías y ecuaciones para el cálculo de los principales componentes de una turbina Francis: la carcasa, el rodete y el tubo de aspiración. También se calculan la eficiencia, la potencia, el número y espesor de los álabes y el coeficiente de cavitación.

Summary

This paper presents a program in C++ Builder, the different theories and equations that are made for calculating the main components of Francis turbine: the spiral case, the runner and the draft tube. Also, the efficiency, the power, the number and thickness of the fin and the cavitation coefficient.

1. INTRODUCCIÓN

Conceptos

En la literatura existen muchas definiciones de velocidad específica, es por ello que Bovet [Bovet, 1964] recurre a una definición adimensional dada por la siguiente ecuación:

$$n_o = \frac{N_o \sqrt{Q/\pi}}{(2gH_n)^{3/4}} \quad (1)$$

donde:

- N_o : es la velocidad de rotación, rad/s,
- H_n : es la altura neta, m (pies),
- Q : es el caudal, m³/s (pies³/s), y
- g : es la aceleración de la gravedad, m/s² (pies/s²).

La turbina Francis con un buen funcionamiento se encuentra dentro del siguiente ámbito de velocidad específica adimensional:

$$0.1 < n_o < 0.8 \quad (2)$$

La velocidad específica según la definición clásica, n_o , no es adimensional y depende del sistema de unidades utilizado. En este caso se debe trabajar con el Sistema Internacional para poder utilizar la siguiente ecuación:

$$n_s = \frac{N_s \sqrt{P_a}}{H_n^{5/4}} \quad (3)$$

donde:

- N_o : es la velocidad de rotación, rpm.
- H_n : es la caída neta, m.
- P_a : es la potencia, KW.

El cálculo de la velocidad de rotación (rad/s) se hace con base en la velocidad sincrónica del generador, por lo que depende del número de pares de polos, n_p :

$$N_o = 2\pi f / n_p \quad [4]$$

donde:

f : es la frecuencia (en hertz). Para obtener la velocidad de rotación en rpm se utiliza la siguiente conversión:

¹ Ing., Prof. Escuela de Ingeniería Mecánica, Univ. de Costa Rica

$$N_s = N_0 30 / \pi \quad (5)$$

La eficiencia total de la turbina, η , está en función de la potencia hidráulica (P_h en KW):

$$\begin{aligned} \eta &= 0.835 & P_h < 1500 \\ \eta &= 0.840 + 6.67 \cdot 10^{-4} P_h & 1500 < P_h < 6000 \\ \eta &= 0.890 & P_h > 6000 \end{aligned} \quad (6)$$

Donde la potencia hidráulica esta definida por:

$$P_h = \rho g Q H_n \quad (7)$$

La potencia de entrada se calcula:

$$P_a = \eta P_h \quad (8)$$

2. MÉTODO DE BOVET

El método de Bovet [Bovet, 1964] es un estudio realizado para el trazado del álabe de una turbina Francis. Es un proceso gráfico, de cálculos tabulados y basado en recopilaciones y experimentos obtenidos de turbinas previamente construidas.

Los cálculos se han desarrollado por medio de ecuaciones empíricas y en función de la velocidad específica definida en forma adimensional (n_0 , ver ecuación (1)). Con estas ecuaciones se puede obtener la geometría del contorno del rodete en su plano meridional (ver figura No. 1) y los radios característicos de las aristas (ver ecuaciones [9] - [21]).

El diagrama de flujo (en el plano meridional) se lleva a cabo a partir de la división de la turbina, en un número par de conductos, y por medio de prueba y error se hace cumplir la

ortogonalidad en el trazado de las líneas equipotenciales con las líneas de corriente. Con base en el diagrama de flujo se calculan los coeficientes de velocidad meridional.

La ecuación de Euler se plantea con base en las definiciones de los rendimientos de la turbina (volumétrico, hidráulico y mecánico), los triángulos de velocidad y los coeficientes de velocidad. La ecuación de Euler se soluciona para los puntos a lo largo de las aristas, con el objetivo de calcular los ángulos característicos de los triángulos de velocidad.

La "representación conforme" de una línea de corriente se obtiene al calcular los ángulos de los triángulos de velocidad según los planos meridional y transversal.

El trazado del álabe se hace por "representaciones conformes" de las líneas de corriente y con la variación de su espesor en función de los ángulos de los triángulos de velocidad. Los cálculos parten de la arista de salida, escogiendo su espesor máximo y un espesor mínimo de variación entre dos líneas de corriente. Los espesores dependen del tamaño del rodete, de los esfuerzos y del material.

3. RODETE

La geometría básica del rodete en su plano meridional se observa en la figura 1, los radios indicados se dan a partir del eje rotacional de simetría.

Se utiliza la convención de representar los datos adimensionales y dimensionales con letras minúsculas y mayúsculas, respectivamente.

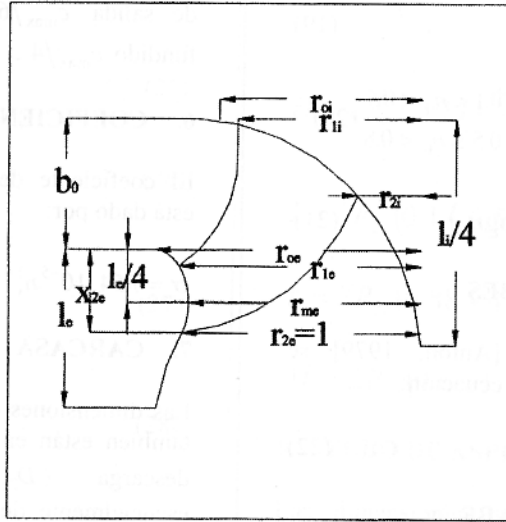


Figura No. 1. Rodete en el plano meridional.

Las coordenadas de las curvas i y e junto con todas las otras dimensiones definidas respecto a una dimensión básica r_{2e} que se toma como unidad al radio del punto $2e$ (intersección de la corona externa con la arista de salida). De la selección del punto $2e$ depende conseguir el rendimiento óptimo con relación al caudal. R_{2e} es la dimensión principal y se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_{2e} = \sqrt[3]{Q/0.27\pi N_0} \quad (9)$$

En forma análoga ocurre con el punto $1i$ y de su selección depende el rendimiento óptimo con relación al salto, R_{1i} es:

$$R_{1i} = \sqrt{2gH_n/1.72N_0^2} \quad (10)$$

$$R_{1i} = R_{2e} 0.493/n_0^{2/3}$$

Los parámetros dimensionales se obtienen al multiplicar los datos adimensionales por R_{2e} . Para la curva interior (corona interna):

$$R_{0i} = R_{2e} \left(0.7 + \frac{0.16}{n_0 + 0.08} \right) \quad (11)$$

$$L_i = R_{2e} (3.2 + 3.2(2 - n_0)n_0) \quad (12)$$

Para la curva exterior (corona externa):

$$Y_{me} = Y_{2e} / 3.08 \left(1 - \frac{x}{l} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{x}{l}} \quad (13)$$

$$L_e = R_{2e} (2.4 + 1.9(2 - n_0)n_0) \quad (14)$$

Las otras dimensiones se definen con las siguientes relaciones:

$$X_{2e} = 0.5R_{2e} \quad (15)$$

$$Y_{2e} = R_{0e} - R_{2e} \quad (16)$$

$$R_{0e} = R_{2e} 0.493n_0^{-2/3} \quad n_0 < 0.275$$

$$R_{0e} = R_{2e} (1.255 - 3n_0^{-2/3}) \quad n_0 > 0.275 \quad (17)$$

$$B_0 = R_{2e}(0.8(2 - n_0)n_0) \quad (18)$$

$$R_{me} = R_{0e} - Y_{me} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} R_{1e} &= R_{0e} & 0.1 < n_0 < 0.5 \\ R_{1e} &= R_{2e}(1.144 - 0.286n_0) & 0.5 \leq n_0 < 0.8 \end{aligned} \quad (20)$$

$$R_{2l} = R_{2e}(0.288 - 0.171 \log n_0) \quad (21)$$

4. NÚMERO DE ÁLABES

El número de álabes [Anton, 1979] se determina con la siguiente ecuación:

$$Z_Y = 14.054 - 0.011n_s \quad (22)$$

5. ESPESOR DEL ÁLABE

El espesor máximo (en m) del álabes [Anton, 1979] se estima con la siguiente relación:

$$e_{\max} = \frac{0.015R_{1e}H_n}{Z_r} + 0.002 \quad (23)$$

En la arista de entrada se recomienda que el espesor del álabes sea de $e_{\max}/3$ y en la arista de salida $e_{\max}/6$, excepto si el álabes es fundido $e_{\max}/4$.

6. COEFICIENTE DE CAVITACIÓN

El coeficiente de cavitación [Siervo, 1976] está dado por:

$$\sigma = 7.54 \cdot 10^{-5} n_s^{1.41} \quad (24)$$

7. CARCASA

Las dimensiones de la carcasa [Siervo, 1976] también están en función del diámetro de la descarga ($D_{2e} = 2R_{2e}$), y dependen esencialmente del valor de la velocidad del agua en la sección de entrada. Por medio de este valor se calculan las secciones transversales a lo largo del eje de la carcasa. El diseño de la carcasa se representa en la figura No. 2.

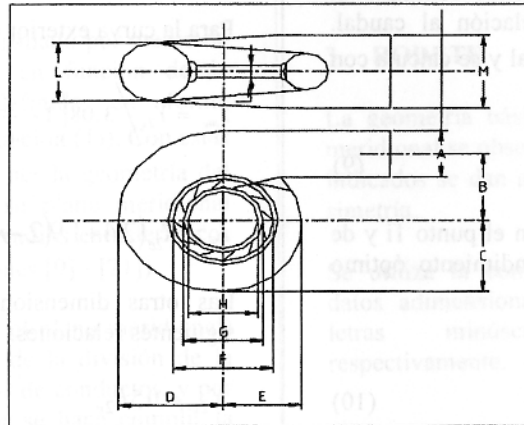


Figura No. 2. Dimensiones de la carcasa.

En forma promedio la velocidad absoluta del agua en la sección de entrada de la carcasa (en m/s) está dada por:

$$v_{ec} = 84.4n_s^{-0.44} \quad (25)$$

$$A = 2R_{2c} \left(1.2 - \frac{19.56}{n_s} \right) \quad (26)$$

$$B = 2R_{2c} \left(1.1 + \frac{54.8}{n_s} \right) \quad (27)$$

$$C = 2R_{2c} \left(1.32 + \frac{49.25}{n_s} \right) \quad (28)$$

$$D = 2R_{2c} \left(1.5 + \frac{48.8}{n_s} \right) \quad (29)$$

$$E = 2R_{2c} \left(0.98 + \frac{63.6}{n_s} \right) \quad (30)$$

$$F = 2R_{2c} \left(1 + \frac{131.4}{n_s} \right) \quad (31)$$

$$G = 2R_{2c} \left(0.89 + \frac{96.5}{n_s} \right) \quad (32)$$

$$H = 2R_{2c} \left(0.79 + \frac{81.75}{n_s} \right) \quad (33)$$

$$I = 2R_{2c} (0.1 + 6.5 \cdot 10^{-4} n_s) \quad (34)$$

$$L = 2R_{2c} (0.88 + 4.9 \cdot 10^{-4} n_s) \quad (35)$$

$$M = 2R_{2c} (0.6 + 1.5 \cdot 10^{-5} n_s) \quad (36)$$

8. TUBO DE ASPIRACIÓN

Las dimensiones del tubo [Siervo, 1976] también dependen del diámetro de la descarga ($D_{2c} = 2R_{2c}$) y de la velocidad absoluta en la sección de entrada del tubo que es igual a la velocidad de descarga en el rodete. El diseño del tubo de aspiración se representa en la figura No. 3.

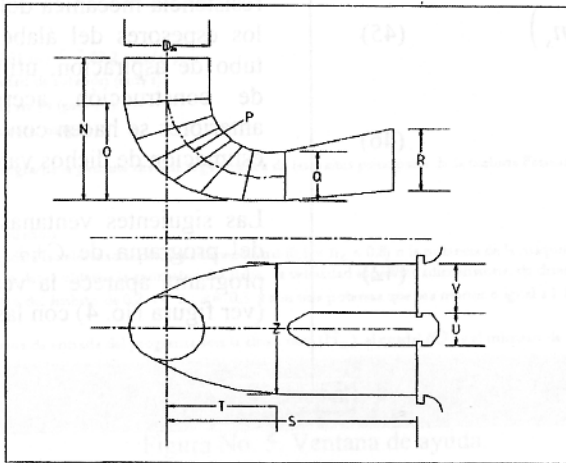


Figura No. 3. Dimensiones del tubo de aspiración.

La velocidad de descarga en el rodete(en m/s) tiene un valor estadístico de:

$$v_{et} = 8.74 + \frac{248}{n_s} \quad (37)$$

$$N = 2R_{2c} \left(1.54 + \frac{203.5}{n_s} \right) \quad (38)$$

$$O = 2R_{2c} \left(0.83 + \frac{140.7}{n_s} \right) \quad (39)$$

$$P = 2R_{2c} \left(1.37 - 5.6 \cdot 10^{-4} n_s \right) \quad (40)$$

$$Q = 2R_{2c} \left(0.58 + \frac{22.6}{n_s} \right) \quad (41)$$

$$R = 2R_{2c} \left(1.6 + \frac{1.3 \cdot 10^{-3}}{n_s} \right) \quad (42)$$

$$S = \frac{2R_{2c} n_s}{-9.28 + 0.25 n_s} \quad (43)$$

$$T = 2R_{2c} \left(1.5 + 1.9 \cdot 10^{-4} n_s \right) \quad (44)$$

$$U = 2R_{2c} \left(0.51 - 7 \cdot 10^{-4} n_s \right) \quad (45)$$

$$V = 2R_{2c} \left(1.1 + \frac{53.7}{n_s} \right) \quad (46)$$

$$Z = 2R_{2c} \left(2.63 + \frac{33.8}{n_s} \right) \quad (42)$$

9. PROGRAMA DE DISEÑO DE TURBINAS FRANCIS EN C++ BUILDER

La programación del diseño de la turbina está basada en la velocidad específica adimensional y dimensional. Con el programa: *Diseño de turbinas Francis* [Morales, 1997] se puede obtener el diseño geométrico del rodete, la carcasa y del tubo de aspiración para cualquier turbina Francis en función de su velocidad específica adimensional (ecuación [2]). Sin embargo, la esencia del algoritmo es la estimación de la geométrica del álabe y se puede aproximar para una gama de turbinas dentro del ámbito de $0.2 \leq n_0 \leq 0.3$ y con potencias menores o iguales a 1 MW, ya que con estas restricciones el diseño es confiable, porque las curvas de las intersecciones del álabe con los planos axiales se encuentran entre las aristas.

También se calculan la eficiencia, la potencia, el número y espesor de los álaves y el coeficiente de cavitación.

El cálculo de las presiones y velocidades se desarrollan con base en el método unidimensional; también en forma simplificada se obtienen el diseño por resistencia mecánica del diámetro del eje y de los espesores del álabe, de la carcasa y del tubo de aspiración, utilizando como material de construcción acero A36. Los datos anteriores se hacen con el objetivo de dar una estimación de dichos valores.

Las siguientes ventanas muestran las salidas del programa de *C++ Builder*. Al iniciar el programa aparece la ventana de presentación (ver figura No. 4) con las siguientes opciones:

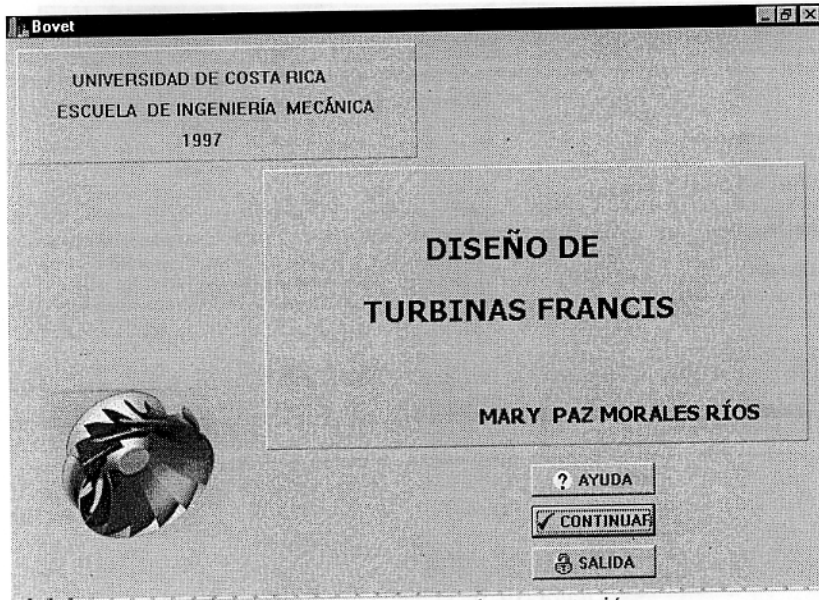


Figura No. 4. Ventana de presentación.

- I. **AYUDA** Esta opción aclara las dudas del uso del programa y recomienda las consideraciones para calcular las características de diseño.

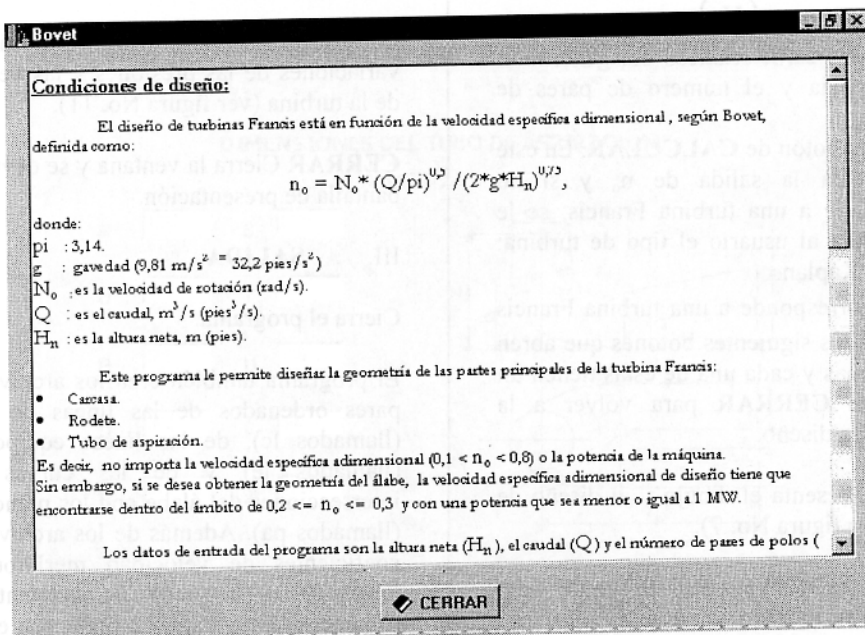


Figura No. 5. Ventana de ayuda.

- II. **CONTINUAR** Esta opción abre la ventana de diseño (figura No. 6), está desglosada de la siguiente manera:

Figura No. 6. Ventana de diseño.

- 1) Escoger el sistema de unidades en que se desea trabajar.
- 2) Introducir los datos hidráulicos: caudal (Q) y altura neta (H_n).
- 3) Escoger las características del generador: la frecuencia y el número de pares de polos.
- 4) Apretar el botón de **CALCULAR**. En este caso se da la salida de n_0 y si no corresponde a una turbina Francis, se le recomienda al usuario el tipo de turbina: Pelton o Kaplan.
- 5) Si n_0 corresponde a una turbina Francis aparecen los siguientes botones que abren las ventanas y cada una de estas tienen un botón de **CERRAR** para volver a la ventana de diseño.

CARCASA Presenta el dibujo y el diseño de la carcasa (ver figura No. 7).

TUBO Presenta el dibujo y el diseño del tubo de aspiración (ver figura No. 8).

RODETE Presenta el dibujo y el diseño del rodete en el plano meridional (ver figura No. 9).

ALABEO Presenta el diseño del álabe, el coeficiente de cavitación, la potencia de salida y la eficiencia (ver figura No. 10).

OTROS Presenta el diseño mecánico, las variaciones de las presiones y las velocidades de la turbina (ver figura No. 11).

CERRAR Cierra la ventana y se devuelve a la pantalla de presentación.

III. SALIDA

Cierra el programa.

El programa también crea los archivos de los pares ordenados de las líneas de corriente (llamados lc), de las líneas equipotenciales (llamados le) y de las curvas de las intersecciones del álabe con los planos axiales (llamados pa). Además de los archivos de los coeficientes de velocidad meridional y la longitud de la línea de corriente media (llamados kcm). Estos archivos son en ASCII, por lo que se puede usar con cualquier paquete de graficación.

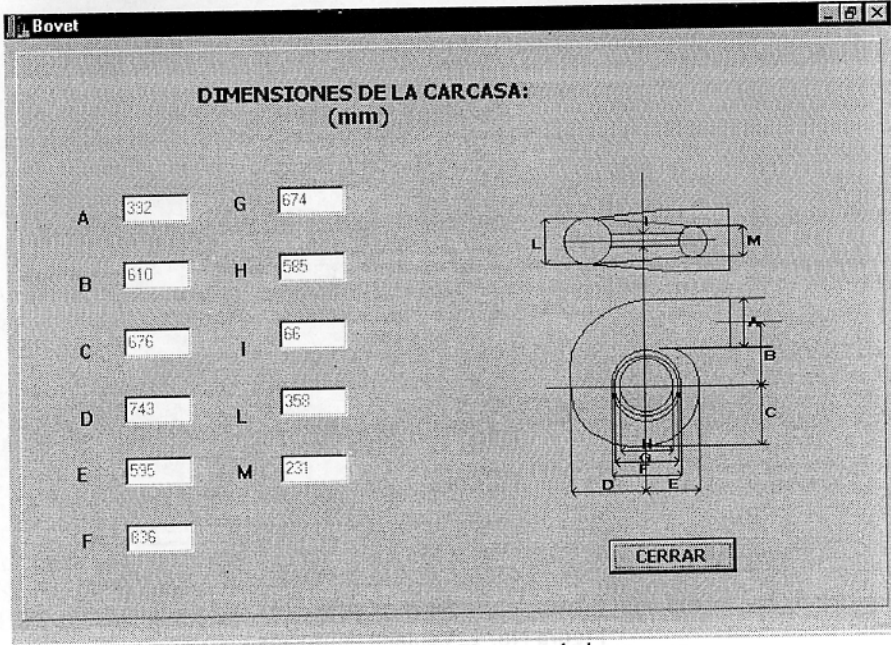


Figura No. 7. Ventana de la carcasa.

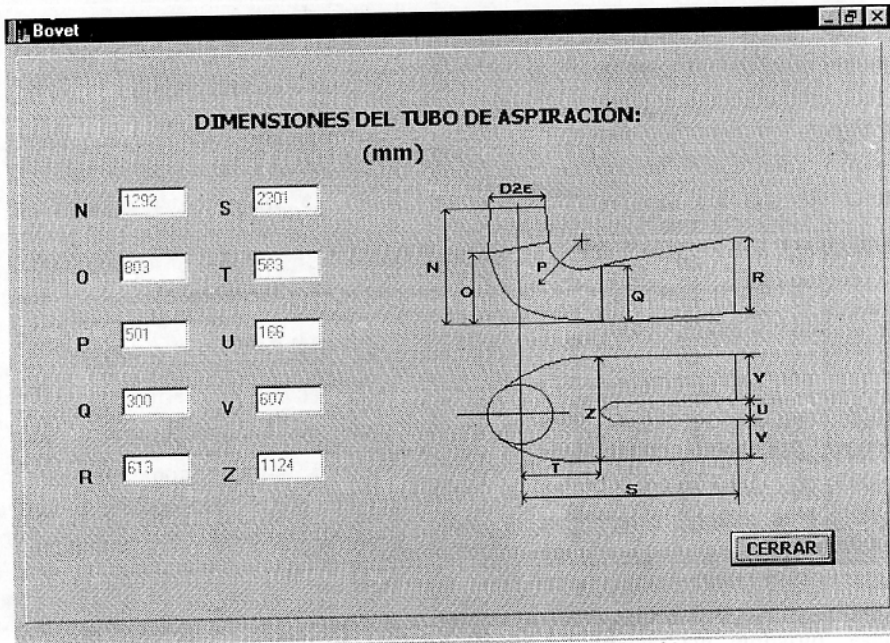


Figura No. 8. Ventana del tubo de aspiración.

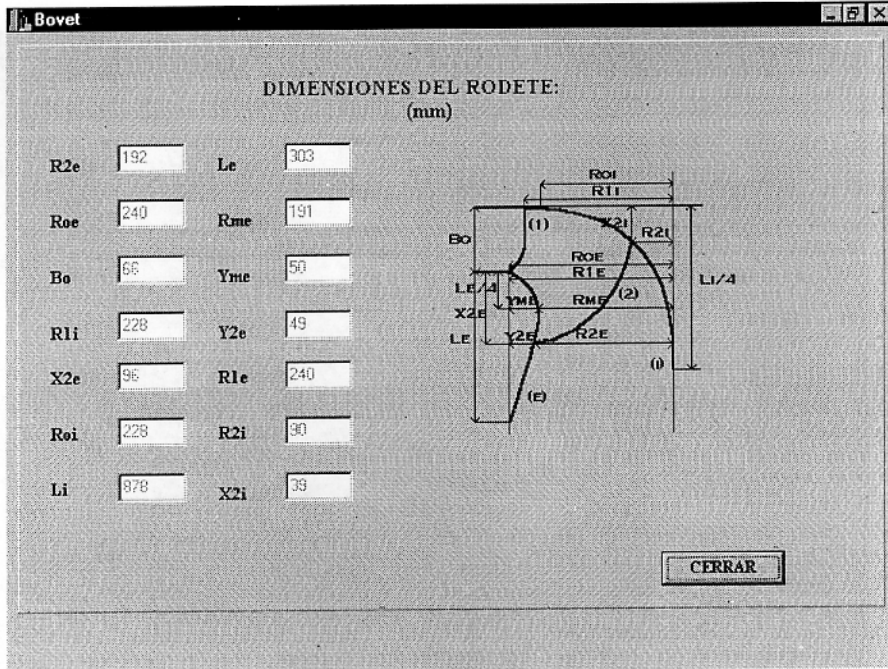


Figura No. 9. Ventana del rodete.

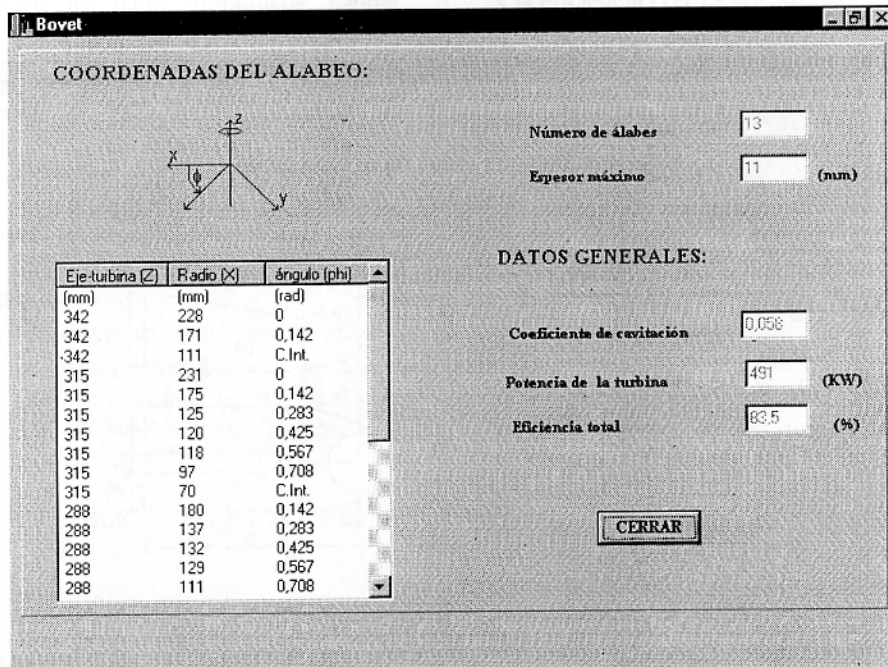


Figura No. 10. Ventana del alabeo.

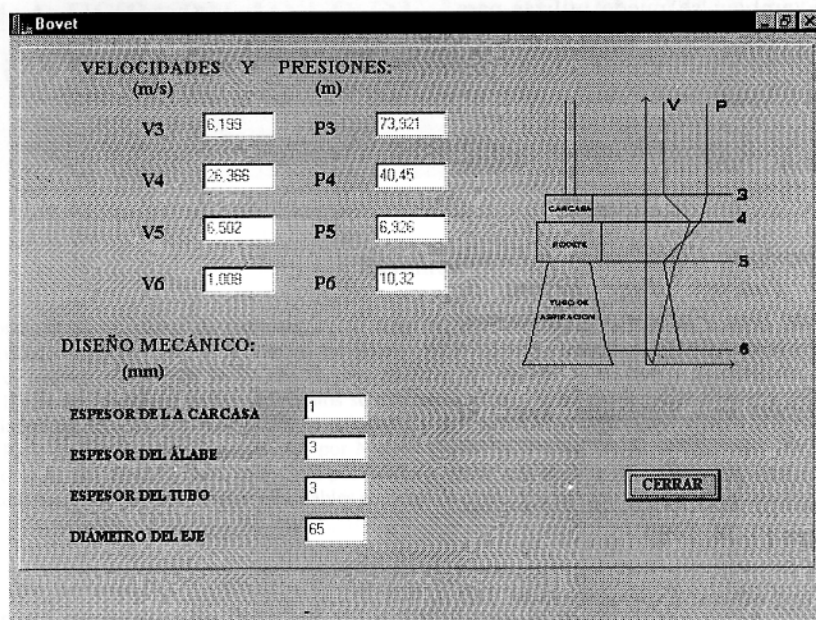


Figura No. 11. Ventana de las velocidades, presiones y diseño mec

10. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones con respecto al diseño de las turbinas Francis y los resultados de dicha programación:

- El intercambio de energía mecánica y del fluido se da en el rodete, por ello las otras partes son órganos para conducir el fluido o transformarle su energía y se diseñan en función del rodete, específicamente en proporción a su diámetro de descarga: R_{2e} .
- En teoría, las turbinas con iguales velocidades específicas adimensionales (n_0) son geoméricamente semejantes debido a que poseen los mismos coeficientes de velocidad. Por lo que no importa que sus condiciones de caudal, altura neta y velocidad de rotación sean diferentes para diseñarlas igual.
- Conforme se aumenta la velocidad específica adimensional n_0 :
 - la dirección del flujo cambia a más axial y menos radial.
 - disminuye el número y la longitud de los álabes, ya que se requiere de una menor superficie mojada.
 - la relación entre el radio de intersección de la arista de entrada con la corona externa y el radio de descarga del rodete tiende a uno, es decir, $R_{1e}/R_{2e} \rightarrow 1$.
 - aumenta el ancho de la entrada del agua en el rodete (B_0), debido a que se aumenta el caudal (Q).
 - aumenta el coeficiente de cavitación.
- La confiabilidad del diseño del álabes de este trabajo se da para turbinas con velocidades específicas adimensionales entre $0.2 \leq n_0 \leq 0.3$ y con potencias menores o iguales a 1 MW. En este ámbito las curvas de las intersecciones del álabes con los planos axiales generadas por el programa siempre se encuentran entre las aristas; sin embargo, estas pierden precisión debido a su distribución. Pero para fines didácticos o visuales, el

programa también se puede utilizar para turbinas con potencias de hasta 12 MW.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Anton, Ioan; *Turbine Hidraulice*; Facla; Romania; 1979.
- [2]. Bovet, Theodore; *Contribution a l'étude du trace d'aubage d'une turbine de réaction du type Francis* Lausanne; novembre 1964; ASME.
- [3]. Grein, Herbert and Shneebeli, Fritz; *El modelado de superficies tridimensionales: un instrumento para diseño y fabricación de maquinaria hidráulica*; Sulzer-Escher Wyss; pages 17-24; 1989.
- [4]. Kech, H. and others; *Experience with 3-D Euler flow analysis as preactical design tool*; pages 1-16; 1990.
- [5]. Mataix, Claudio; *Turbomáquinas Hidráulicas*; ICAI; España; 1984.
- [6]. Morales, Mary Paz; *Diseño por computadora de turbinas Francis*, Tesis de Licenciatura; Universidad de Costa Rica; 1997.
- [7]. Polo, Encinas; *Turbomáquinas Hidráulicas*; Limusa; México; 1976.
- [8]. Siervo, F. and Leva, F.; *Moderns trends in selecting and designing Francis turbines*; Water Power & Dam Construction; pages 28-34; August 1976.
- [9]. Snel, H.; *Diseño por computadora del rodete de una turbina Francis*; Instituto Tecnológico de Costa Rica.