

Tallado de Hélices por el Método de Copiado por Proyección

Este dispositivo fue diseñado como parte de la investigación sobre Aerogeneradores que se está llevando a cabo en el Departamento de Ingeniería Mecánica, cuyo investigador principal es el Ing. Julio Mario Rodríguez Devis.

Como parte inicial de la investigación se adecuó un túnel situado en el Laboratorio de Hidráulica para hacer las pruebas de modelos. En la construcción de dichos modelos se requiere una buena precisión en la hechura de las aspas del molino, en especial por el tamaño reducido de éste. Se debe garantizar que el perfil aerodinámico se conserve a lo largo del aspa, por lo que se requiere de un dispositivo capaz de tallar los álabes con la precisión y rapidez necesarias.

Los resultados del trabajo fueron presentados al concurso del premio Worthington de la Ingeniería Colombiana 1982 (Categoría estudiantes), por los estudiantes que trabajaron en el proyecto, siendo acreedores al primer puesto.

JOSE VICENTE FIERRO VASCO
JOAQUIN LOPEZ CASTRO

El dispositivo que se presenta en este documento se diseñó y construyó como un medio para realizar el objetivo del Proyecto de Grado: "Diseño y construcción de un molino de viento, segunda parte: Modelos", enmarcado dentro de la investigación sobre aerogeneradores, el cual se desarrolló en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá.

El problema que se planteó en una etapa del mencionado proyecto fue la construcción de una serie de modelos de molinos de viento de pequeñas dimensiones (40 cms. de diámetro, como máximo).

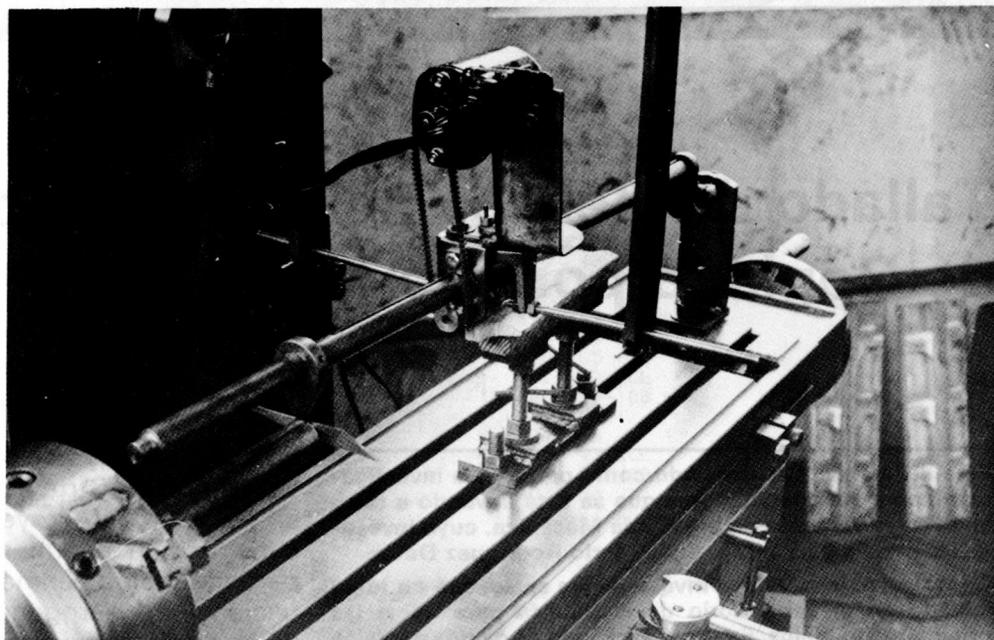
Se determinó el tamaño de estos modelos después de analizar las dimensiones y características del túnel de viento de mayor capacidad disponible en el laboratorio de hidráulica junto con los instrumentos de medición y las relaciones de semejanza que se debían conservar durante los ensayos para que los resultados experimentales fueran confiables.

La calidad del perfil aerodinámico del modelo y sus dimensiones, determinaron la construcción de un dispositivo capaz de tallar estos álabes con la precisión y rapidez necesarias.

Inicialmente se hizo un análisis de los movimientos que debía tener la cuchilla de corte con respecto al bloque de madera para tallar el álabe. Este análisis condujo a los diferentes mecanismos que en él se aplican.

El segundo paso fue construir con madera y varillas de aluminio la maqueta del dispositivo, mecanismos que una vez montados sirvieron para comprobar la factibilidad técnica del dispositivo. Basados en este dispositivo que realizaba los movimientos principales se hicieron modificaciones y se concluyó que la forma más económica de alcanzar el objetivo era adaptarlo a la fresadora, máquina en la cual se encuentran parte de los movimientos principales que se necesitan.

Posteriormente se elaboraron los planos de acuerdo con la fresadora disponible y se fabricaron todas las partes del dispositivo. Una vez ensamblado se hicieron los ajustes necesarios para que el perfil tallado fuera preciso, se fabricaron los



Vista del conjunto del dispositivo.

calibres necesarios y se procedió a la ejecución de los modelos.

DESCRIPCION GENERAL DEL DISPOSITIVO

A continuación se presentan el diseño, los planos principales y los cálculos geométricos más importantes para construir el dispositivo y para su aplicación.

Las dimensiones principales son la distancia entre el foco y el perfil guía (62 cms.) y la longitud útil de la mesa de altura variable, en la cual se fija el bloque de madera la cual tiene 16 cms. y sirve para colocar bloques de madera hasta 20 cms. de longitud.

Diseño

El modelo matemático para el diseño de álabes conduce a una geometría complicada de los mismos, en la cual la cuerda varía a lo largo del radio según una función no-lineal y lo mismo ocurre con el ángulo de posición estático β de cada cuerda con respecto al plano de rotación del molino (Fig. 1).

Para facilitar la construcción de las aspas se hacen modificaciones a esta geometría ideal mediante linealización de tales funciones (1) de manera conveniente con el fin de conservar al máximo la eficiencia del molino.

Así, un álabo sencillo y de fácil construcción tendrá cuerdas y ángulos de posición que varían según las funciones lineales:

$$C = f_1(r) \quad \text{y} \quad \beta = f_2(r)$$

Donde c es la longitud de la cuerda y r es el radio de cada elemento diferencial del álabo.

Principio del dispositivo

El principio fundamental del dispositivo es el de proyectar una superficie hacia un punto llamado origen o foco (Fig. 2).

Si a un pivote (foco) se fija un hilo (generatriz) el cual se mantiene tenso y se hace que éste siga

1 Para la teoría de la linealización véase Smúlders: Diseño de un molino de eje horizontal.

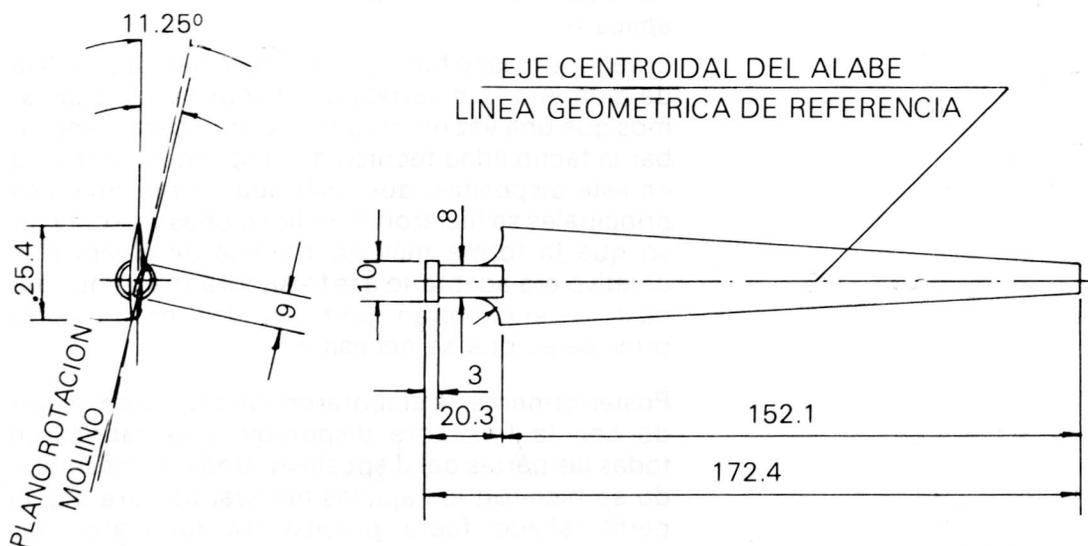


FIGURA 1. Geometría del álabo.

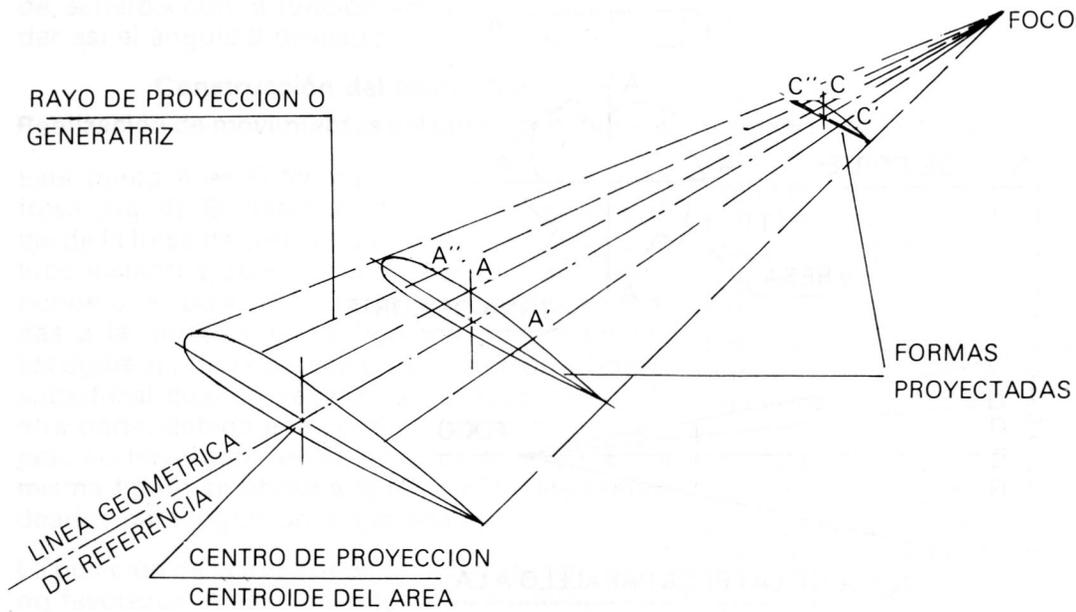


FIGURA 2. Proyección del perfil del álabe con un punto de fuga, (foco).

con su extremo la forma de un perfil aerodinámico (perfil guía), se tiene la situación presentada en la figura 2. La forma generada es una pirámide recta de base irregular. Esta base, así como todas las secciones transversales, es un perfil aerodinámico.

La altura de la pirámide es lo que se llamará la línea geométrica de referencia. Si se coloca un bloque de madera dentro de los límites de esta pirámide se obtendrá un tronco de pirámide que corresponde a un álabe linealizado y recto, ya que las formas proyectadas son semejantes al perfil guía y guardan con él una relación lineal.

Movimientos del dispositivo

Si se observa el punto A sobre la generatriz (Fig. 2), este punto tiene las siguientes características:

- Pertenece a una generatriz cualquiera.
- El punto A se debe desplazar sobre ella debido a que la distancia al foco es variable cuando se trata de copiar una sección transversal determinada.

Gracias a estas dos características y teniendo en cuenta que este punto se puede reemplazar por un elemento infinitesimal de un filo de corte de una fresa, el dispositivo sobre el cual se monta la fresa debe ser muy versátil y permitir los dos desplazamientos independientes o combinados (simultáneos) del punto A, en cualquier proporción.

El primer movimiento (Fig. 3) es un movimiento transversal del punto generador A, el cual puede tomar, en forma continua, las posiciones A', A'', A''', etc., reproduciendo un perfil proyectado. En este movimiento el punto A tiene un pequeño desplazamiento sobre la generatriz, pues la distancia de las diferentes posiciones hasta el foco es variable.

El tallado completo de un álabe implicaría la repetición del procedimiento de copiado sección por sección y esto no es práctico. Por tanto, el tallado en esta dirección se usa solamente para copiar las secciones de los extremos del álabe

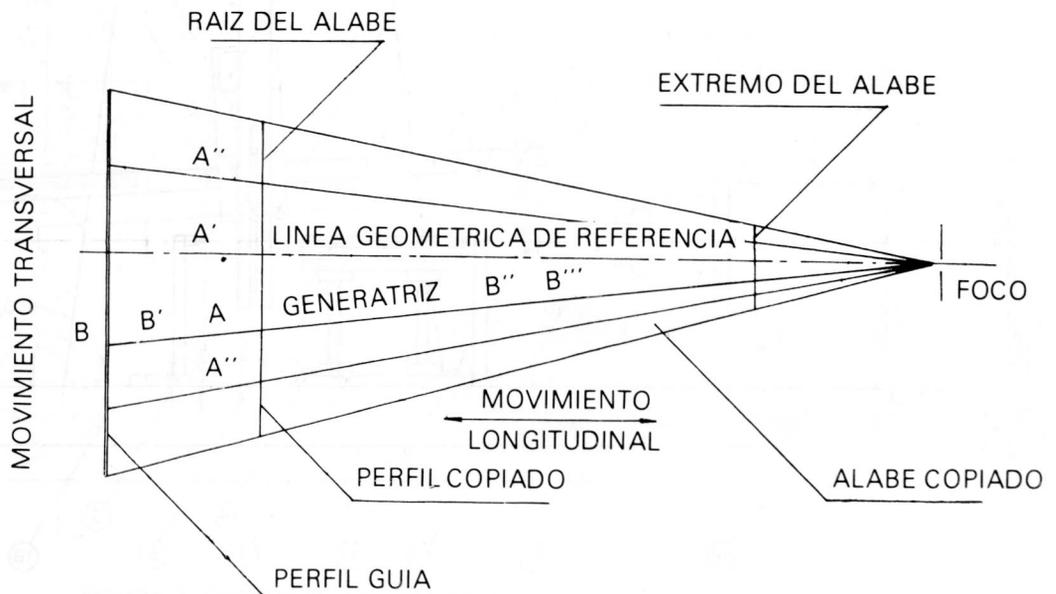


FIGURA 3. Movimientos transversal y longitudinal durante el maquinado del álabe.

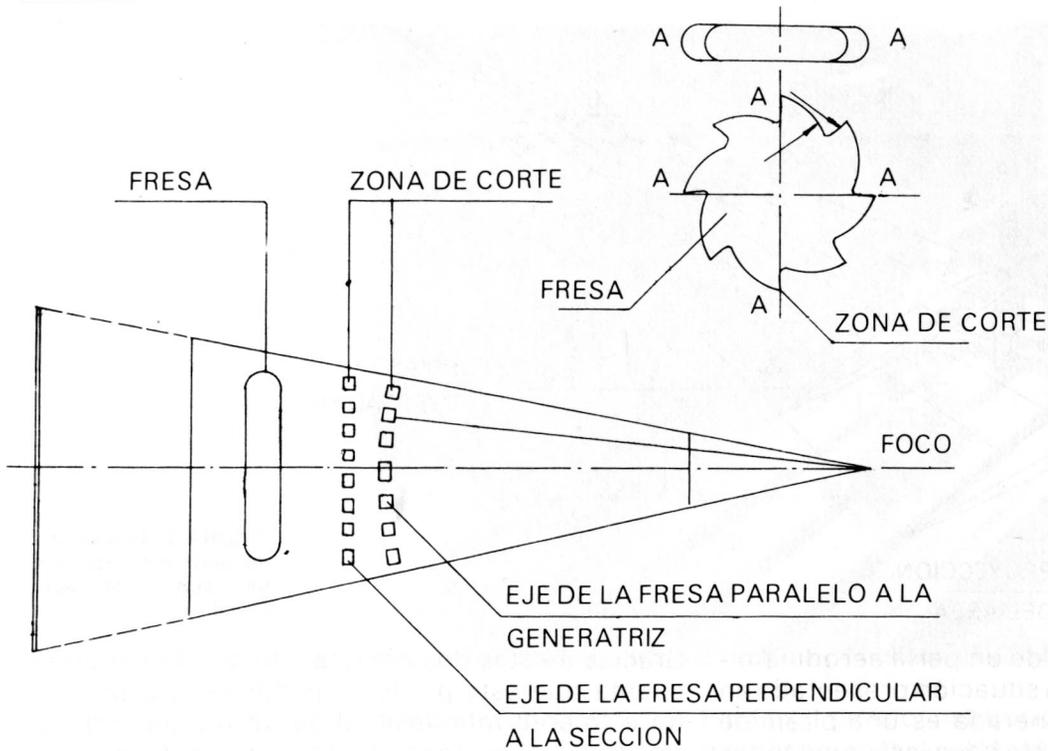


FIGURA 4. Posiciones esquemáticas de la zona de corte.

con el fin de verificar las dimensiones al comenzar el tallado.

El segundo movimiento del punto A es el movimiento longitudinal, en el cual se copian los puntos homólogos del perfil a lo largo de la misma generatriz. Este movimiento se obtiene manteniendo en una posición fija la generatriz y desplazando el punto A a lo largo de ella tomando las posiciones B', B'', B''', etc., con este movimiento se talla todo el álabe. Es decir, se trabaja a lo largo del álabe,

tallando generatriz por generatriz hasta copiar toda la sección transversal del perfil (ver Fig. 3). Por otra parte, se sabe que los álaves no son rectos sino que la posición del perfil para cada sección va girando alrededor del eje centroidal del álabe desde la base hasta el extremo del mismo; es decir, el ángulo β varía con el radio. Luego es necesario dar al perfil de cada sección el giro adecuado. Sin embargo, puesto que el principio de copiado no se afecta por el giro del perfil guía, se puede hacer rotar este perfil durante el copiado de todo el álabe

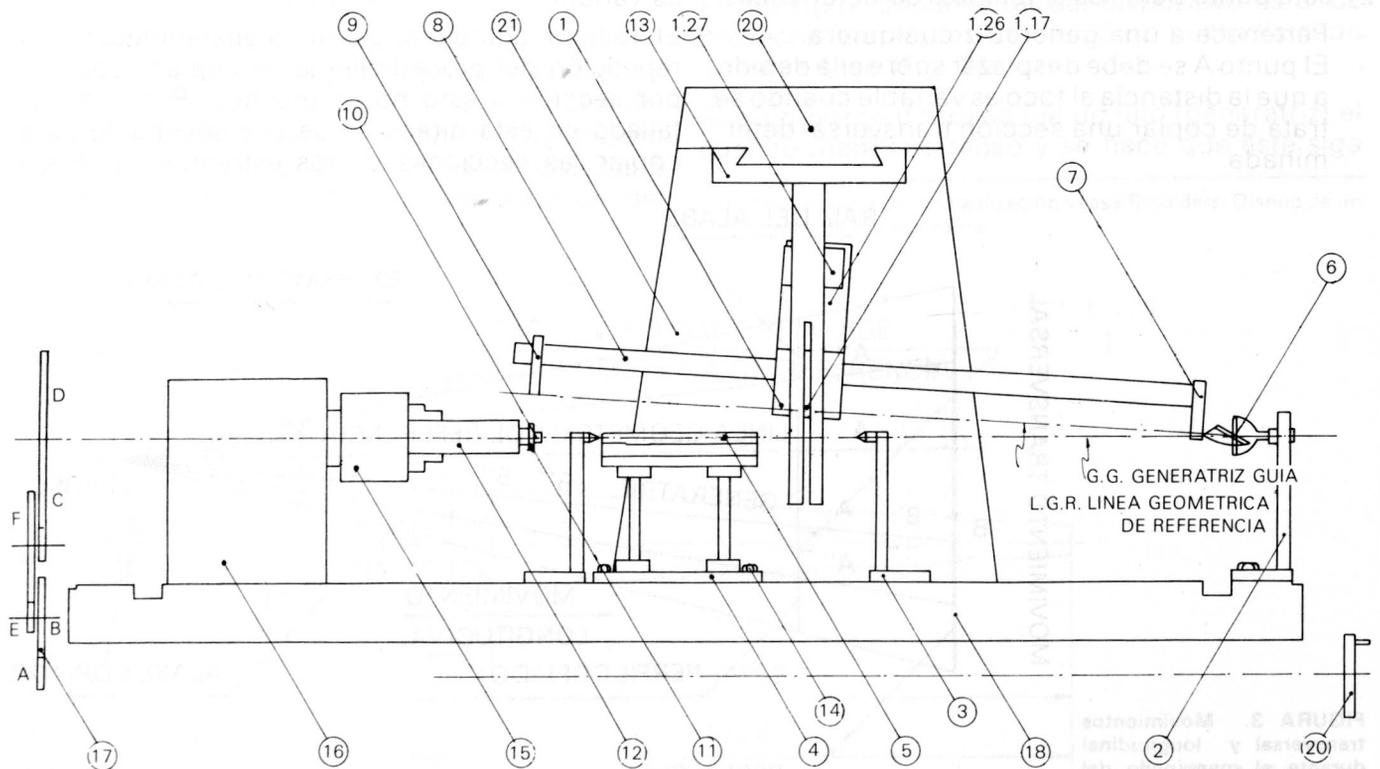


FIGURA 5. Esquema del dispositivo instalado en la máquina fresadora, escala 1:5.

de acuerdo con la función lineal apropiada para dar así el ángulo β deseado.

Construcción del dispositivo

Realización de movimientos del punto generador A

Este punto A es el filo de corte de una pequeña fresa (Fig. 4). El material de trabajo es madera. El eje de la fresa de corte es paralelo a la generatriz en todo instante y, su movimiento transversal, corresponde a las posiciones esquemáticas representadas a la derecha, en la Figura 4. La posibilidad escogida (la de la derecha) da un mejor acabado superficial cuando se trabaja por secciones. Por otra parte, debido a la continuidad de las secciones, no hay interferencia en la generación. En la misma figura se observa la fresa con filos redondeados para lograr un mejor acabado.

La posición de la fresa debe ser adecuada para que no favorezca el astillamiento de la madera, especialmente durante el tallado cerca del borde de fuga del álabe. En este lugar, se aconseja agregar pegante a lo largo del borde de fuga y en la cara opuesta al corte para tener mayor seguridad.

La fresa es movida por un motor para máquina de coser de 85W y de velocidad variable, con velocidad máxima de 4.200 rpm. La potencia se transmite a la fresa por medio de una transmisión por correa con relación de transmisión 1:1.

El perfil guía

El perfil guía es un perfil aerodinámico (el que se desee) con cuerda C_g , el cual se debe trazar y recortar cuidadosamente en lámina calibre 14. De la perfección de esta guía depende en gran parte la calidad del copiado. El mismo perfil guía sirve para copiar álabes de diferentes dimensiones.

La generatriz y el conjunto de corte

La generatriz es la línea formada por la alineación

correcta del seguidor, el punto generador A y el foco (Fig. 5).

Estos tres puntos pertenecen a un mecanismo formado por el seguidor, solidario con la barra o soporte guía; esta barra está conectada a un apoyo rígido por medio de la cruceta que hace esta barra completamente escualizable. El punto generador A está en la cuchilla de corte que se monta a un árbol sobre los apoyos del conjunto de corte (Fig. 6). Este conjunto de corte se puede deslizar sobre la barra-soporte guía longitudinalmente, pero no puede girar alrededor de ella; así se mantiene la colinealidad de los tres puntos.

Montados sobre el conjunto de corte están los brazos del conjunto de corte los cuales pueden girar alrededor de un eje vertical con respecto al resto del conjunto. El soporte guía es una barra de acero cold-rolled calibrado de 3/4" con una ranura longitudinal de 1/8" x 1/8" en la cual se deslizan las guías del conjunto de corte.

El conjunto posicionador

Son dos platinas verticales ranuradas que se montan solidarias con el carnero de la fresadora. Dentro de estas ranuras se deslizan los brazos del conjunto de corte, siempre en un plano vertical estático y transversal. Este conjunto tiene como función de mantener el bloque de corte trabajando en este plano vertical mientras la mesa se mueve longitudinalmente arrastrando el bloque de madera que se talla (Fig. 5). Debido a la presencia de las platinas verticales el conjunto de corte no puede tomar posiciones verticales para tallar el borde de ataque del álabe. Sin embargo, la geometría de este borde queda tan bien definida, que es muy fácil ajustarlo después en la operación de pulido manual.

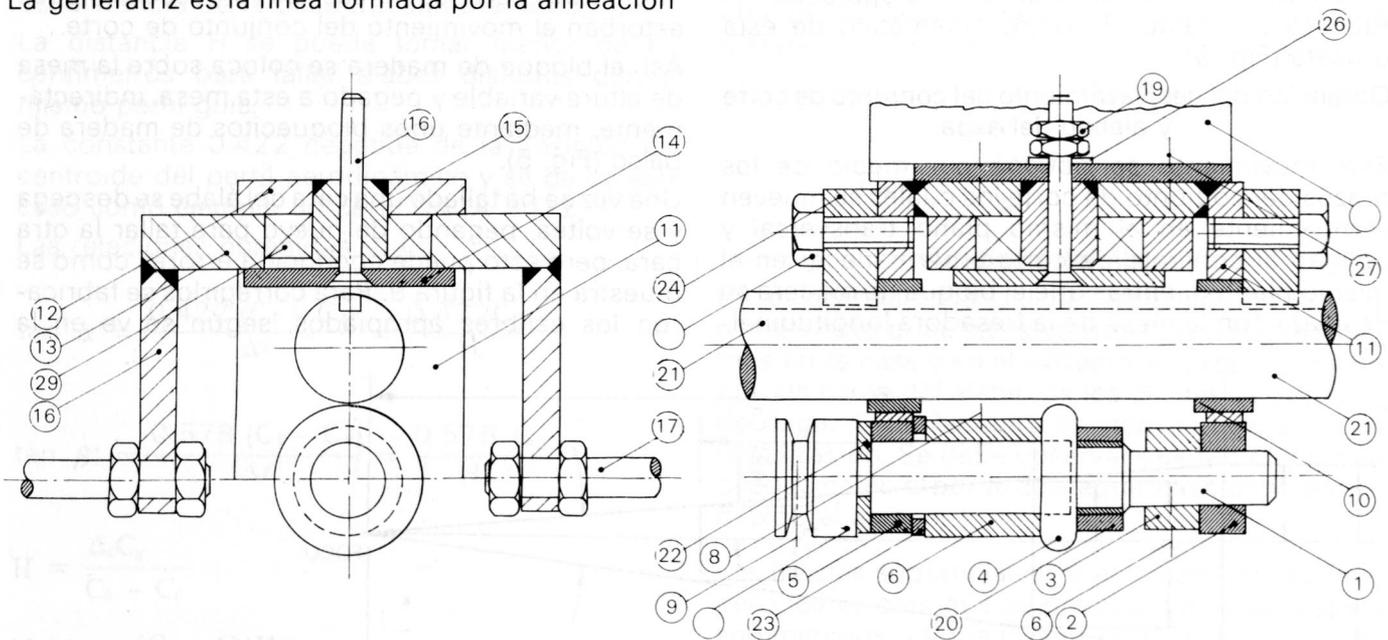


FIGURA 6. Conjunto de corte, arreglo general. Escala 1:1.

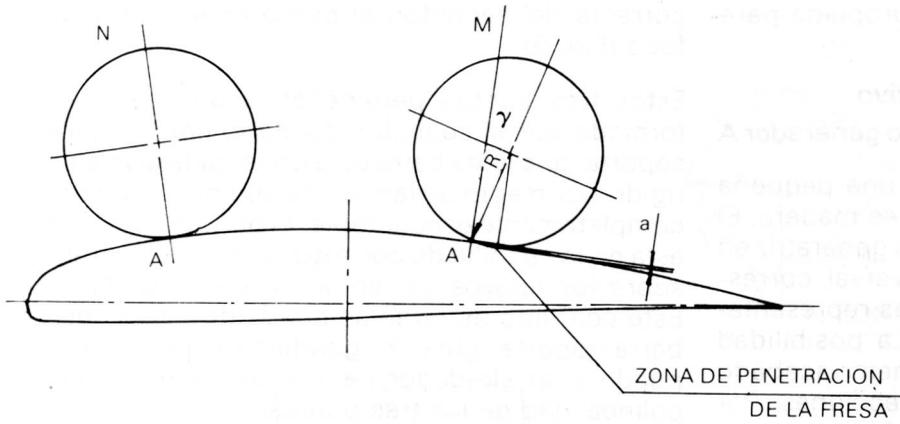


FIGURA 7. Error debido a la normalidad imprecisa del seguidor con relación al perfil guía.

Normalidad del seguidor

Si el seguidor es normal al perfil guía en el punto de contacto, entonces se garantiza la normalidad de la fresa con la superficie del álabe en el punto generado A. En la figura 7, N es la normal y γ es el ángulo de desviación de la fresa con respecto a la normal en A. La fresa estará correctamente colocada cuando el centro de la fresa quede sobre la normal al perfil en A.

La penetración de la fresa dentro del perfil debida a la desviación γ es:

$$P = R(1 - \text{Cos}\gamma) \quad (\text{Fig. 7})$$

Donde R es el radio de la fresa.

Así, para una fresa de 25.4 milímetros de diámetro si se acepta un error de penetración máximo de 0.1 mm., el máximo valor de γ debe ser de 7.2° durante la operación. Este posicionamiento se controla manualmente durante el tallado y se observó que operando cuidadosamente el error debido a esta desviación no tiene importancia.

El foco

El foco se logra por medio de una cruceta, fabricada también en el taller; ella permite la escualización de la barra durante la operación; el foco es por tanto el centro cinemático de esta cruceta (Fig. 5).

Obtención del desplazamiento del conjunto de corte y alabeo del aspa

Este movimiento se obtiene por medio de los brazos del conjunto de corte los cuales se mueven verticalmente en el mismo plano transversal y obligan al conjunto de corte a permanecer en el mismo plano mientras que el bloque de madera se desplaza con la mesa de la fresadora longitudinal-

mente. Sin embargo, el conjunto de corte puede girar alrededor de un eje vertical para permitir el movimiento de la barra guía, pues de no ser así, esta barra quedaría bloqueada durante el movimiento transversal.

Esta forma de movimiento relativo del conjunto de corte con respecto al bloque de madera se obtiene fijando el perfil guía en la copa de mordazas de la fresadora, el bloque de madera se fija a la mesa de la fresadora lo mismo que el foco o cruceta. Así, el perfil guía queda longitudinalmente quieto con respecto al bloque de madera y al foco, pero se puede girar gradualmente un ángulo $\Delta\beta$ a medida que se desplaza la mesa de la fresadora longitudinalmente. Para dar este giro se utiliza la lira de la máquina. En otras palabras, se aplica el método seguido para el tallado de engranajes helicoidales cilíndricos.

Sujeción del bloque de madera

Al ser las dimensiones de los álaves tan pequeñas, es inútil tratar de sujetar la madera entre puntos, pues tanto el material como los espesores lo impiden. Por otra parte, ningún sistema de sujeción puede tener partes que sobresalgan o interfieran con las líneas de proyección pues estorban el movimiento del conjunto de corte.

Así, el bloque de madera se coloca sobre la mesa de altura variable y pegado a esta mesa, indirectamente, mediante unos bloquitos de madera de balsa (Fig. 5).

Una vez se ha tallado una cara del álabe se despega y se voltea, pegando de nuevo para tallar la otra cara, pero esto puede conducir a errores como se muestra en la figura 9. Para corregirlos se fabricaron los calibres apropiados, según se ve en la

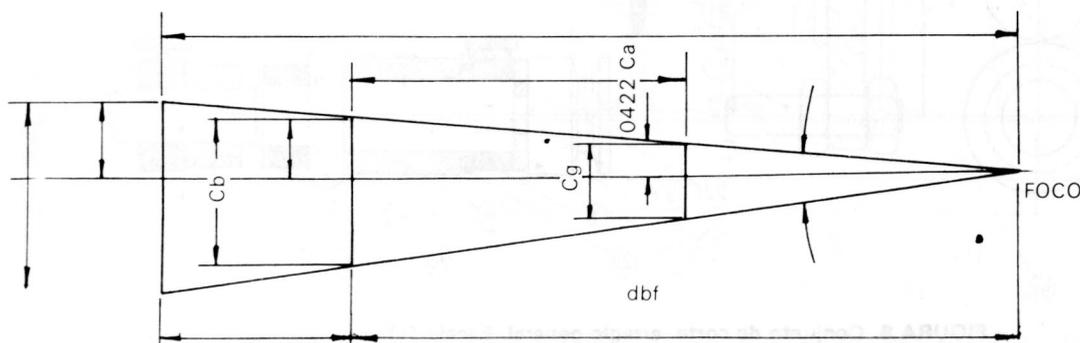


FIGURA 8. Geometría del dispositivo en el plano horizontal.

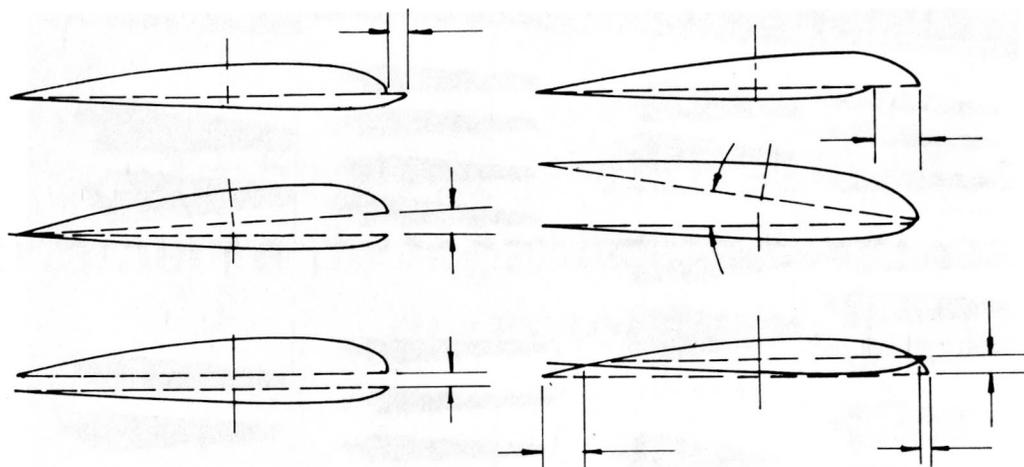


FIGURA 9. Errores de maquinado debidos al dispositivo del álabe.

figura 5, que garantizan un adecuado posicionamiento entre puntos durante la pegada del bloque de madera. Un buen uso de estos calibres, del nivel y del calibrador convencional permiten obtener la precisión geométrica necesaria.

Cálculos para la construcción de álabes con el dispositivo

Relaciones geométricas.

Requerida la construcción de un álabe linealizado, los datos necesarios son:

r_b , r_e radio en la base y en el extremo respectivamente.

C_b , C_e cuerda en la base y en el extremo respectivamente.

β_b , β_e ángulo de posición de las cuerdas del álabe en la base y en el extremo respectivamente.

La figura 8 muestra las medidas C_g y d_{gb} como funciones de H , siendo:

H , distancia útil entre el foco y la guía, limitada por las dimensiones a 62 cms.

C_g , Cuerda del perfil guía.

d_{gb} , Distancia del perfil guía a la base del álabe.

d_{bf} , distancia de la base del álabe al foco.

La distancia H se puede tomar menor de 62 centímetros para tallar álabes distintos con el mismo perfil guía.

La constante 0.422 depende de la posición del centroide del perfil aerodinámico y se da en este caso como ejemplo un perfil NACA 4412.

Las relaciones obtenidas son:

$$\tan \alpha' = \frac{0.422 (C_b - C_e)}{\Delta r} = \frac{0.422 C_g}{H}$$

$$\tan \beta' = \frac{0.578 (C_b - C_e)}{\Delta r} = \frac{0.578 C_g}{H}$$

$$H = \frac{\Delta r C_g}{C_b - C_e}$$

$$C_g = \frac{(C_b - C_e) H}{\Delta r}$$

$$\frac{0.422 (C_b - C_e) H}{\Delta r} = \frac{0.422 C_b}{d_{bf}}$$

$$d_{bf} = \frac{\Delta r C_b}{C_b - C_e}$$

$$d_{gb} = d_{gf} - d_{bf} = H - d_{bf}$$

$$\Delta \beta = \beta_b - \beta_e$$

en una distancia o longitud del álabe

$$\Delta r = r_e - r_b$$

Para obtener el alabeo del aspa se deberá definir el paso del aspa. Puesto que el ángulo β varía linealmente en $\Delta \beta$ desde la base hasta el extremo del álabe, el paso del aspa es el recorrido longitudinal que se necesita para que el perfil guía gire 360 grados. Con este valor calculado se seleccionan las ruedas dentadas para armar la lira con la relación de transmisión apropiada para obtener $\Delta \beta$ cuando la mesa se desplaza a una distancia igual a la longitud del álabe; así,

$$\frac{\Delta \beta}{360} : \Delta r$$

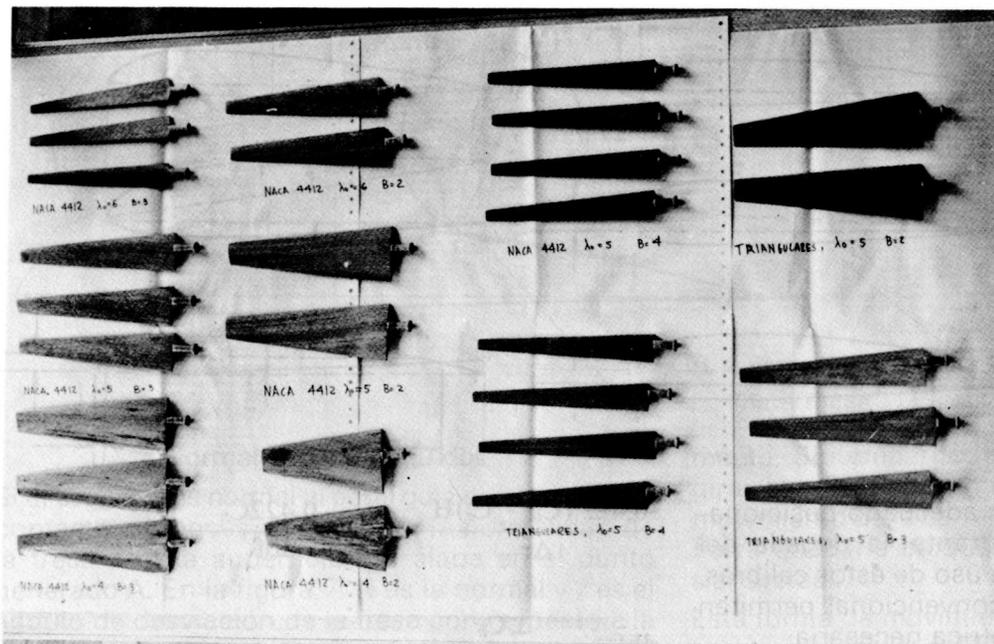
$$360 : \text{Paso}$$

$$\text{Paso} = \frac{360}{\Delta \beta} \Delta r$$

Acabado del álabe

En el acabado manual del álabe se ajustan las dimensiones principales, cuerdas y espesores máximos en la base y en el extremo, y la rectitud (visto por las caras del álabe) de los bordes de ataque y de fuga. Esta rectitud es consecuencia de la linealización. Se debe observar que tanto el borde de fuga como el borde de ataque son curvas planas debido al alabeo.

Las crestas superficiales se eliminan con lija fina, pero los errores que se producen en este trabajo son mínimos, ya que durante el maquinado queda claramente marcado hasta dónde se deben pulir las crestas.



Algunos perfiles tallados.

La magnitud del ángulo $\Delta\beta$ no requiere ningún ajuste y es bastante confiable por la precisión de la fresadora. Sin embargo se recomienda tallar los álabes con madera muy seca y mantenerlos lejos del sol y en lugares frescos.

Después de pulido el álabe se debe pintar con laca, lo cual se hace inmediatamente con el fin de evitar que se presenten torceduras inadecuadas de la madera. Las raíces de los álabes se tallan y pegan al álabe después del pulido del mismo. Estas son operaciones manuales.

CONCLUSIONES

A pesar de los errores de precisión inherentes a la construcción del dispositivo y debidos a la manipulación en la operación del mismo, los modelos fabricados superan en calidad cualquier modelo tallado a mano y se reduce considerablemente el

tiempo de ejecución.

(Ver la muestra que se incluye con el original de este documento).

El dispositivo sirve para tallar álabes linealizados con diferentes clases de perfil. Esto abre las posibilidades de hacer ensayos con álabes de perfiles muy variados para desarrollar y optimizar la tecnología que tiene aplicación en la producción de rotores para turbinas, ventiladores, bombas, etc., con perfiles aerodinámicos de alta eficiencia.

Aunque el dispositivo se diseñó para tallar álabes linealizados, su principio es muy sencillo y es posible optimizarlo para tallar álabes no-linealizados que tienen una aplicación comercial muy amplia.

Los álabes fabricados se tallaron en madera. Pero se pueden tallar en metal si es necesario.