



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Reconstrucción por Ingeniería Inversa del álabe desgastado del rodete Francis de mediano salto

Reverse-engineering reconstruction of a worn Francis runner blade for a medium-head

Delgado-Sánchez, G.^a, Cerriteño-Sánchez, A.^a, Castro-Gómez, L.L.^b, Galván-González, S.R.^{a*}, Domínguez-Mota, F.J.^c, Ibarra-Bracamontes, L.A.^a

^a Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica, Morelia Mich., México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-1865>; <https://orcid.org/0000-0001-7925-0237>; <https://orcid.org/0000-0002-6925-707X>*; <https://orcid.org/0000-0003-1741-2936>.

^b Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Cuernavaca Mor., México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2507-0067>.

^c Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Morelia Mich., México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6837-172X>.

giovanni.delgado@umich.mx; angel.cerriteno.sanchez@umich.mx; lauracg@uaem.mx; sergio.galvan@umich.mx*; francisco.mota@umich.mx; laura.ibarra@umich.mx

Innovación tecnológica: Adaptación a la Ingeniería Inversa de reconstrucción de álabes el procesamiento de datos por una función paramétrica y ajuste por un algoritmo de optimización.

Área de aplicación industrial: Manufactura y reparación de álabes de rodetes Francis en Centrales Hidroeléctricas de mediano salto.

Recibido: 9 julio 2025

Aceptado: 19 febrero 2026

Abstract

After years of operation with a working fluid that produces not only cavitation but also contains solid particles, the Francis runner blade often shows wear, erosion, cracking, and pitting. When reconstructing very old runners, the original drawings rarely provide detailed technical information about the blade, which, due to its complex shape, cannot be measured using conventional techniques. Therefore, empirical and artisanal methods are often used. Recently, the reverse-engineering process has enabled reconstruction of blade surface geometries through data acquisition, processing, and construction of a 3D model. However, for used and worn blades, the point-cloud data obtained by scanning can be so distorted that the processing technique cannot reconstruct the surface in a continuous, smooth manner that is as close to the original as possible.

Consequently, this work aims to reconstruct the blade of an original Francis turbine using a parametric function as the data-processing technique. By manipulating the m , p , and t parameters of the four-digit NACA function using an optimization algorithm, the fitting error was minimized to 0.04 relative to the cross-sections extracted from the scanned digital file. The volume of the solid model obtained with the proposed methodology differs by only 0.25% from the original, while maintaining smooth, continuous surfaces. However, it remains to know whether the hydrodynamic and structural conditions generated by the rebuilt blade could affect the turbine's performance.

Keywords: *Francis Runner, Blade Reconstruction, Reverse Engineering, Optimization Algorithm, NACA Equations.*

Resumen

Resultado de operar con un fluido de trabajo no sólo con cavitación sino también con partículas sólidas, el álabe del rodete Francis suele presentar desgaste, erosión, agrietamientos y picaduras después de años de operación. En la reconstrucción de los rodetes muy antiguos, los planos originales no suelen contener información técnica detallada del álabe y no puede ser medido con técnicas convencionales debido a su forma compleja, teniendo que recurrir a técnicas empíricas y artesanales. Recientemente, utilizando el proceso de Ingeniería Inversa, ha sido posible reconstruir las geometrías de las superficies del álabe a través de la adquisición de los datos del sólido, su procesamiento y la construcción del modelo en 3D. Sin embargo, en álabes usados y desgastados la nube de puntos derivada del escaneo es tan distorsionados que la técnica de procesamiento no es capaz de reconstruir la superficie de forma continua y suave y lo más cercana a la original. En consecuencia, este trabajo pretende reconstruir el álabe de un rodete Francis original utilizando una función paramétrica como técnica en el procesamiento de los datos. Manipulando los parámetros m , p y t de la función NACA de cuatro dígitos por un Algoritmo de Optimización se logró minimizar el error de ajuste a un 0.04 en relación a las Secciones Transversales extraídas del archivo digital escaneado. El volumen del sólido del modelo obtenido por la metodología propuesta alcanza una diferencia de 0.25% respecto al original, pero con superficies suaves y continuas. Sin embargo, queda por conocer si las condiciones hidrodinámicas y estructurales generadas por el álabe reconstruido pudieran afectar el rendimiento de la turbina.

Palabras clave: *Rodetes Francis, Reconstrucción del Álabe, Ingeniería Inversa, Algoritmo de Optimización, Ecuaciones NACA.*

1. INTRODUCCIÓN

En una turbina hidráulica Francis, la forma del álabe del rodete determina su interacción con el fluido circundante, lo que provoca su desviación y cambio de velocidad, modificando así las fuerzas sobre la superficie del álabe y transformando éstas en torque en el eje de la turbina. Pero por las condiciones de operación demandadas a la

turbina provocan la aparición de la cavitación del fluido y el impacto de partículas por lo que estos álabes sufren daños severos como picaduras, agrietamientos y erosión. Con la constante reparación, este tipo de álabes acumula importantes desviaciones en su forma en relación a la geometría original (Tsuzuki et al., 2015), distorsionando el perfil y disminuyendo así la eficiencia de la turbina.

La geometría del álabe está compuesta de superficies de forma libre que no son comúnmente conocida ya que los dibujos originales no contienen información de los detalles de construcción al ser de uso exclusivo de los fabricantes de las turbinas (Ulucak, 2020). Además, estas superficies de forma libre han tenido la característica de no poder ser expresadas de manera exacta por medio de una o varias funciones analíticas (Gao et al., 2017).

Recientemente la Ingeniería Inversa ha sido aplicada para la reconstrucción de álabes de turbinas hidráulicas intentando crear modelos CAD (*Computational Aided Design*) lo más idénticos a los álabes originales (Basnet et al., 2021; Sedai et al., 2020 & Sierra & Correa, 2020). Los principales pasos en esta reconstrucción han sido el escaneo de la superficie, el procesamiento digital de los datos registrados y la generación del modelo CAD en 3D.

Pero lo disperso de la nube de puntos obtenida por el escaneo, en álabes desgastados por el uso, genera superficies distorsionadas por lo que la técnica de procesamiento de datos se vuelve fundamental para reconstruir la superficie de forma continua, suave y lo más aproximada a la original. Sedai et al., (2020) utilizaron el software de inspección GOM para suavizar los datos escaneados seguido por una reconstrucción de los bordes y así obtener el modelo CAD. Sierra & Correa, (2020) realizaron una aproximación de la superficie por curvas NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*) debido a la falta de datos obtenidos por el escaneo ya que la erosión por sedimentos provocó la falta de superficies en el álabe. Aunque Delgado et al., (2020) utilizó una función para interpolar los datos obtenidos de un modelo CAD (no escaneado) de cada Sección Transversal del álabe, la reconstrucción numérica de un álabe original, en donde los datos obtenidos por escaneo son

más dispersos, requiere entonces un proceso de aproximación, más que de interpolación.

Por lo tanto, en este trabajo se utiliza una función paramétrica para alcanzar la reconstrucción del álabe. Esta función es dada por el *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) de cuatro dígitos para ajustar los datos de tres Secciones Transversales (STs) del álabe original: en la corona, en la banda y al 50% de su longitud transversal o conocida como envergadura del álabe. Para alcanzar el mayor ajuste, los parámetros de la función fueron manipulados por un Algoritmo Genético (AG) de manera automatizada. Las Secciones Ajustadas fueron apiladas con una distribución uniforme a lo largo de la envergadura del álabe, generando las Superficies del Lado Presión (SLP) y Succión (SLS).

A diferencia del álabe escaneado, las superficies obtenidas han sido bien definidas, es decir, continuas y suaves para construir el volumen del sólido y compararlo con el volumen del álabe original.

Sin embargo, para asegurar que el ajuste no provoque cambios considerables en el desarrollo del flujo, será necesario comparar computacionalmente el comportamiento hidrodinámico integrando todos los componentes de la turbina.

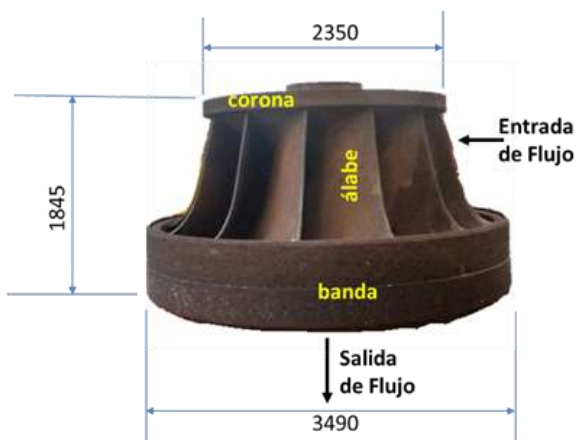
Así, el archivo CAD validado podría ser convertido en un modelo CAM (*Computational Aided Manufacturing*) para realizar su manufactura, o en un archivo CAE (*Computational Aided Engineering*) para crear nuevos diseños.

Se puede considerar entonces que, debido a la exactitud alcanzada y su relativa fácil implementación, esta metodología de reconstrucción del álabe a través de la Ingeniería Inversa podría reducir considerablemente los gastos de operación y

mantenimiento, ampliar la disponibilidad de la planta y mantener la generación de energía entre 30 a 50 años más.

2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁLABE ORIGINAL

La turbina Francis de mediano salto cuyas características se muestran en la Tabla 1 (Gómez et al., 2008 & Castro et al., 2011), alberga el rodete mostrado en la Figura 1 (a).



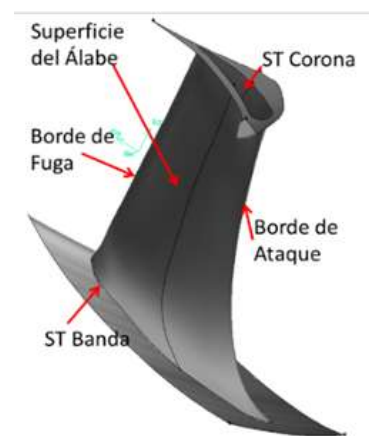
(a) Rodete Francis original (dimensiones en mm).

Tabla 1. Características de la turbina Francis.

Velocidad angular	180 rpm
Densidad del agua	998.7 kg m ⁻³
Caída de Agua	56.5 m
Caudal	94.8 m ³ -s
Potencia	38.5 MW

Este tipo de rodetes admite gran caudal ya que la distancia entre la Corona y la Banda es muy grande comparada con la distancia entre los Bordes de Ataque y de Fuga del álabe. Esto ha resultado en diseños donde la curvatura del álabe no es muy pronunciada y tienden a provocar, a la salida del rodete, un flujo en forma más axial.

La Figura 1 (b) muestra el sólido del archivo CAD obtenido por escaneo de las superficies del álabe del rodete.



(b) Sólido del álabe escaneado.

Figura 1. Rodete original y el modelo CAD del álabe obtenido por escaneo.

Este procedimiento se realizó mediante un escáner láser conectado a un brazo digitalizador marca FARO, como se observa la Figura 2, Castro-Gómez, (2011).



Figura 2. Brazo Faro con el cual se escaneo el álabe del rodete original.

La captura de puntos obtenidos por el escáner laser fue a través del software Geomegic Studio y posteriormente se realizó el procesamiento de datos para convertirlos en un modelo CAD y así importarlo al software GAMBIT encargado de la discretización del álabe.

Sin embargo, debido a lo desgastado y dañado del álabe, el modelo CAD presentó irregularidades y discontinuidades no sólo en las superficies del álabe sino también en las ST de la Corona y la Banda, así como en los Bordes de Ataque y de Fuga. Por lo tanto, la Ingeniería Inversa, con la técnica propuesta de procesamiento de datos, deberá de ser capaz de reconstruir las superficies del álabe de forma continua y suave y lo más cercano a la originales.

3. METODOLOGÍA DE RECONSTRUCCIÓN DEL ÁLABE

La Figura 3 muestra el diagrama de flujo del proceso para la reconstrucción del álabe.

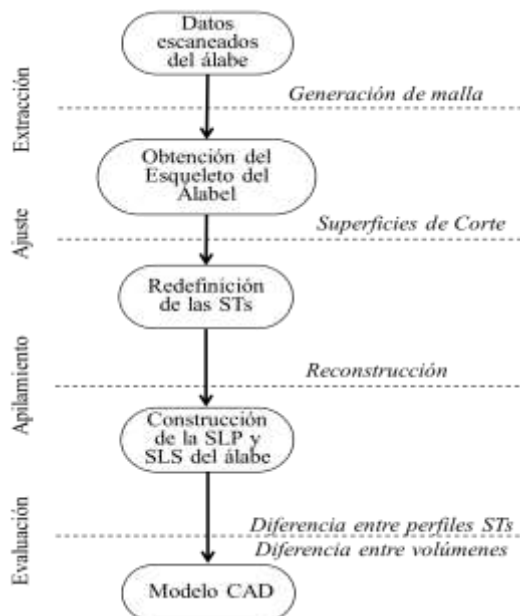


Figura 3. Proceso de reconstrucción del álabe.

La extracción de información del archivo digitalizado tiene como objetivo conocer los

puntos discretos que definen la ST de la Corona, Banda y Central. En la etapa de ajuste del álabe, a diferencia de Delgado et al., (2020) quien lo hizo con un alabe nominal (limpio y sin defectos), se lleva a cabo con una función matemática que define la distribución del espesor en las tres diferentes STs. Los parámetros de la función son manipulados por un algoritmo de optimización para minimizar el ajuste entre STs. En la etapa de apilamiento, las STs ya ajustadas, son colocadas ortogonalmente y en diferente número, a lo largo de la envergadura del álabe. Utilizando los bordes de Lado Presión y de Succión de las STs, se crea la Superficie del álabe para así definir el sólido del álabe. Finalmente, en la etapa de evaluación, se compara el ajuste entre STs y los volúmenes del álabe original y reconstruido.

4 ETAPAS DE RECONSTRUCCIÓN NUMÉRICA DEL ÁLABE

La metodología de la reconstrucción del álabe, de acuerdo a la Figura 3, cuenta con cuatro etapas; Extracción, Ajuste, Apilamiento y Evaluación y serán descritas a detalle en las siguientes subsecciones.

4.1 EXTRACCIÓN DE PUNTOS DISCRETOS

Con los puntos discretos de la ST de la Corona y Banda se define su Línea Media (LM) que junto con el Borde de Ataque y Fuga componen el Marco del Álabe (MA), Figura 4 (a). Mediante el método de Interpolación Transfinita (TFI) utilizado por (Perez Rubio et al., 2021), para la generación de mallas algebraicas, se logró interpolar los datos hacia al interior del dominio del álabe con la finalidad de generar una malla estructurada con una densidad de 10×10 , Figura 4 (b), y así crear el Esqueleto del Álabe (EA).

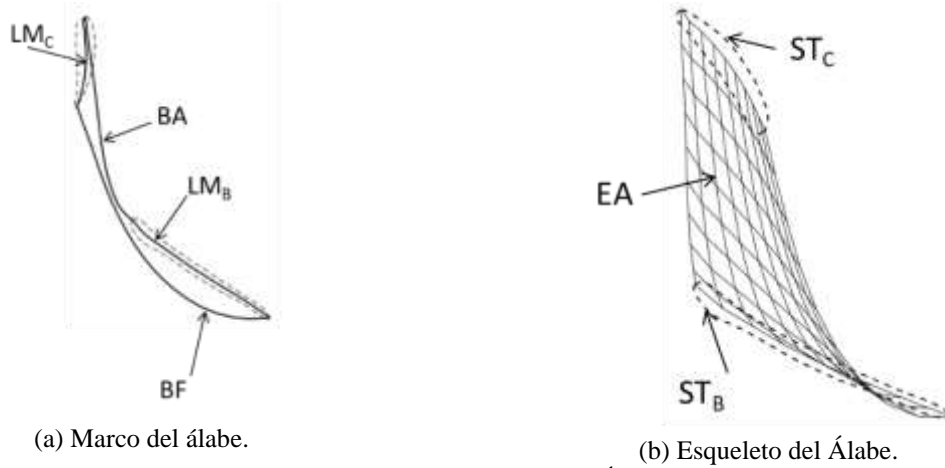


Figura 4. Marco y Esqueleto del Álabe.

Cabe destacar que con el método TFI se logró una importante densidad y ortogonalidad de las líneas de la malla sobre las cuales se colocaron a lo largo de la envergadura del álabe las superficies de corte (SC), como lo muestra la Figura 5, utilizando el software GAMBIT.

Dado que las SC intersectan a las SLP y SLS del álabe original, fue posible extraer con cada SC 212 puntos discretos para el lado Presión (x_p, y_p) y los mismos para el de Succión (x_s, y_s) del alabe original, Figura 6. Estos Puntos Discretos definieron las STs del álabe original a lo largo de la envergadura del álabe.

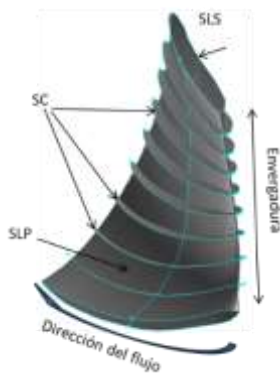
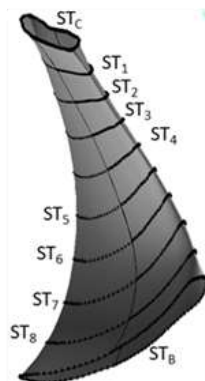
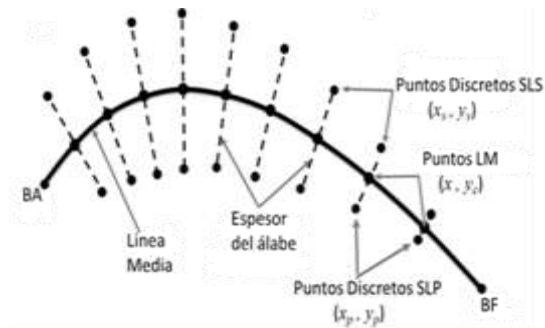


Figura 5. Inserción de las SC sobre el álabe original.



(a) Puntos Discretos sobre la Superficie.



(b) Puntos Discretos sobre la Sección.

Figura 6. Puntos discretos obtenidos del álabe original y que definen cada ST.

Los datos obtenidos mediante la técnica de corte por intersección de superficie-superficie, (Dubé et al., 2006 y Milos, 2006), no sólo definieron las STs, sino también sirvieron para conocer la distribución y evolución de espesor de cada ST del álabe original, Figura 7. La distribución define la variación del espesor de cada ST a lo largo de la dirección del flujo, es decir del BA hacia el BF. Por el contrario, la evolución lo define en relación a las otras STs del álabe. Es claro que la distribución del espesor del álabe original en las STs interiores es casi idéntica y sólo existe una diferencia con las STs de la Corona y la Banda. Esto pudo haber sido provocada por la soldadura añadida en la unión del álabe con la Banda y Corona. Ya que los puntos discretos de cada ST tienen una misma tendencia o forma a lo largo de la Línea Media, se puede asumir que una sola forma de ST es común para todo el álabe.

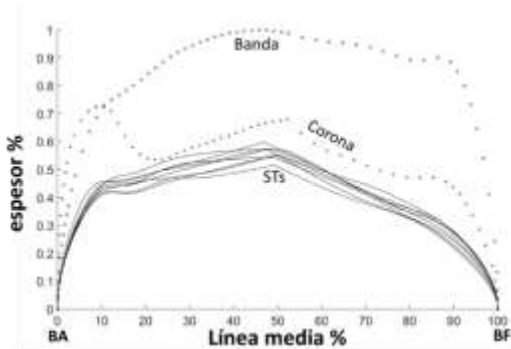


Figura 7. Distribución y evolución del espesor para cada ST.

4.2 AJUSTE DE LAS SUPERFICIES TRANSVERSALES

De acuerdo con Ferrando López (2006), existen tres formas para establecer la distribución del espesor de un álabe de turbina hidráulica; a través de una función, utilizando NURBs o Splines y por aproximación o interpolación. En Delgado et al., (2020), se definió esta distribución del espesor por esta última opción. En Cerriteño et al., (2021), se hizo este ajuste con la segunda opción, utilizando polinomios de Bernstein de 4to. orden. En este estudio se utilizará la primera opción, es decir una función paramétrica, que defina la distribución del espesor y_t a lo largo de la Línea Media, de acuerdo a la Figura 8.

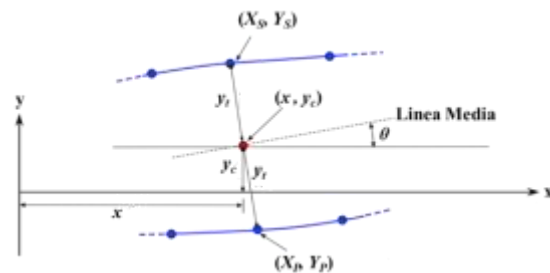


Figura 8. Definición de la distribución del espesor del álabe en función de las coordenadas.

Esta distribución se puede encontrar por la Ec. (1), NACA de 4 dígitos.

$$y_t = t \left[a_0 \sqrt{\frac{x}{c}} - a_1 \left(\frac{x}{c} \right) - a_2 \left(\frac{x}{c} \right)^2 - a_3 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - a_4 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right] \tag{Ec. 1}$$

Donde: $a_0 = 1.4845$; $a_1 = 0.6300$; $a_2 = 1.7580$; $a_3 = 1.4215$; $a_4 = 0.5075$

Y t es el espesor máximo del perfil de acuerdo a la Figura 9.

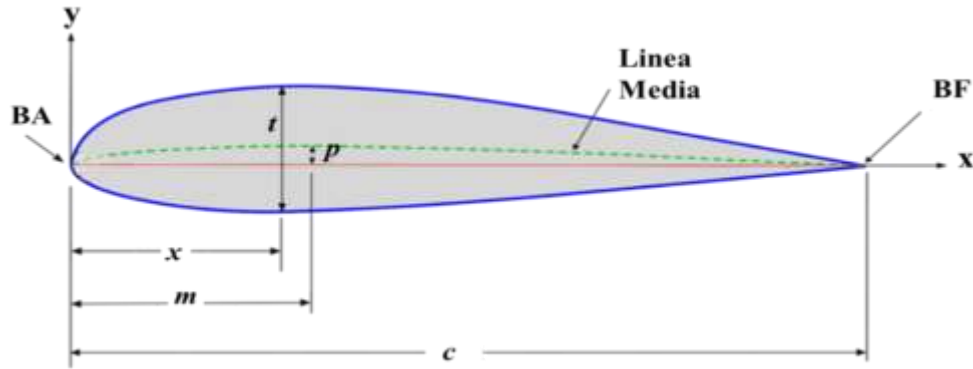


Figura 9. Parámetros que definen un perfil aerodinámico usados por NACA.

Donde:

c = Cuerda del álabe

m = Localización de la máxima combadura.

p = Máxima combadura.

Que serán los parámetros que nos ayudarán a definir por medio de las Ec. (2) y Ec. (3) la posición de y_c conocida como la distribución de la LM, Figura 8.

$$y_c = \frac{m}{p^2} \left[2p \left(\frac{x}{c} \right) - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right] ; 0 \leq \left(\frac{x}{c} \right) \leq p \quad (\text{Ec. 2})$$

$$y_c = \frac{m}{(1-p)^2} \left[1 - 2p + 2p \left(\frac{x}{c} \right) - \left(\frac{x}{c} \right)^2 \right] ; p \leq \left(\frac{x}{c} \right) \leq c \quad (\text{Ec. 3})$$

Y las coordenadas finales de cada punto discreto de la nueva ST en el Lado Succión o superior (X_S, Y_S) Ec. (4), y en inferior o Lado Presión (X_P, Y_P) por la Ec. (5).

$$X_S = c(t - y_t \sin \theta) ; Y_S = c(y_c + y_t \cos \theta) \quad (\text{Ec. 4})$$

$$X_P = c(t + y_t \sin \theta) ; Y_P = c(y_c - y_t \cos \theta) \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde la Ec. (6) define al ángulo de la pendiente de la LM.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{dy_c}{d\left(\frac{x}{c}\right)} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

4.2.1 Proceso automático de ajuste entre Secciones Transversales del álabe

La Figura 10 muestra el diagrama de flujo diseñado para minimizar el ajuste de la distribución entre espesores de los álabes original y numérico.

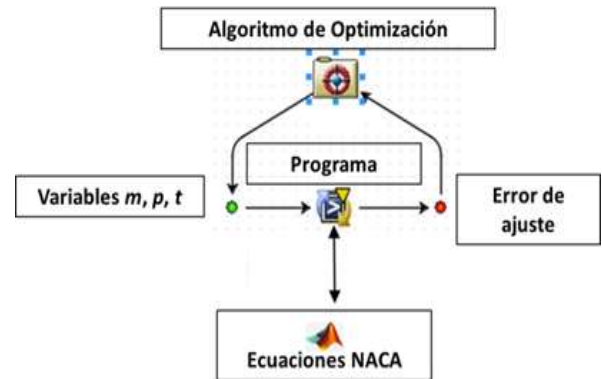


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso automático de minimización del ajuste.

El programa creado interconecta los diferentes softwares y automatiza el proceso que comienza con la propuesta de las variables m, p y t las cuales definirán el perfil del álabe a través de las Ecuaciones NACA especificadas en Matlab (2019). Esta propuesta es hecha por el Algoritmo Genético de optimización, Multi-Islands (MIGA), y está implementado dentro de iSIGHT (1994).

La característica principal del MIGA es que la población de diseños es dividida a sub-diseños llamadas islas. La operación genética normal (selección, reproducción y mutación) se desarrollan separadamente sobre cada isla. Una operación adicional llamada migración se usa para transferir algunos diseños de una isla a otra. Así, el proceso de optimización está controlado por el número de sub-diseños que cada isla tendrá que desarrollar a través del número de generaciones.

Para desarrollar la minimización del error de ajuste como función objetivo se utilizaron los parámetros primarios los establecidos por el software que son diez islas con una población de diez individuos realizada durante diez generaciones lo que resultaría en 100 evaluaciones. Los parámetros secundarios fueron la razón de reproducción de 1.0%, de mutación 0.1%, de migración de 0.5% y el intervalo de migración de cada 5 generaciones. Una de las grandes ventajas de este MIGA es que cada sub-diseño puede ser distribuido a un diferente nodo para calcular su ajuste individualmente, reduciendo el tiempo del proceso.

Si los diseños no minimizan el error establecido de ajuste para la misma coordenada (x, y_c) entre la ST del álabe original, y la numérica, dado por la Ec. (7), el algoritmo deberá proponer nuevamente otras variables para repetir el proceso hasta alcanzar la convergencia o el número de generaciones establecidas.

$$Error = [(\Delta y_s)^2 + (\Delta y_p)^2]^{1/2} \quad (\text{Ec. 7})$$

Dónde:

$$\Delta y_s = y_s - Y_S \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\Delta y_p = y_p - Y_P \quad (\text{Ec. 9})$$

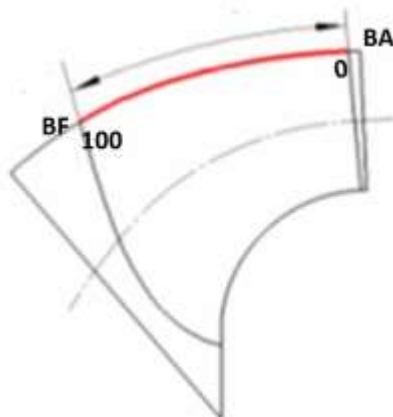
Para lo cual, de la Figura 6 (b), se definen las coordenadas para el álabe original:

y_s : Puntos discretos en el lado succión.

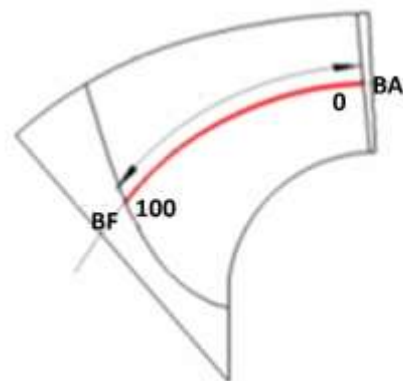
y_p : Puntos discretos en el lado presión.

4.2.2 Evaluación del ajuste

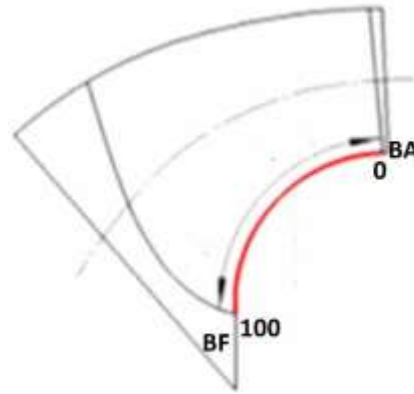
Cada variable de diseño m , p y t fueron calculados para cada ST en la Corona, la Banda y en la ST₅, es decir, al 50% de la envergadura del álabe, como lo presenta Chen et al (2016) en la Figura 11.



(a) ST_c



(b) ST₅

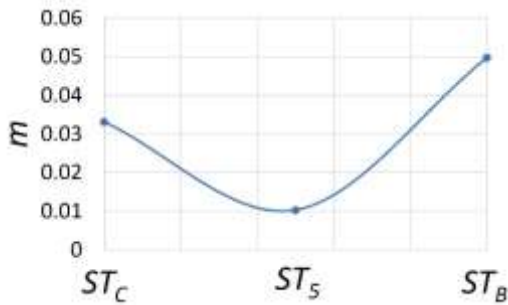


(c) ST_B

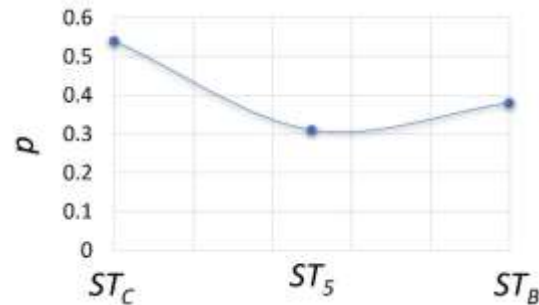
Figura 11. Localización del ajuste efectuado en las diferentes STs del álabe.

La Figura 12 presenta los valores alcanzados por los parámetros que definen la distribución

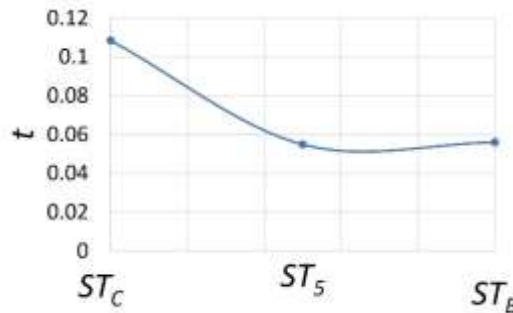
del espesor del álabe cuando se minimizó el ajuste entre las STs.



a) Parámetro m



b) Parámetro p

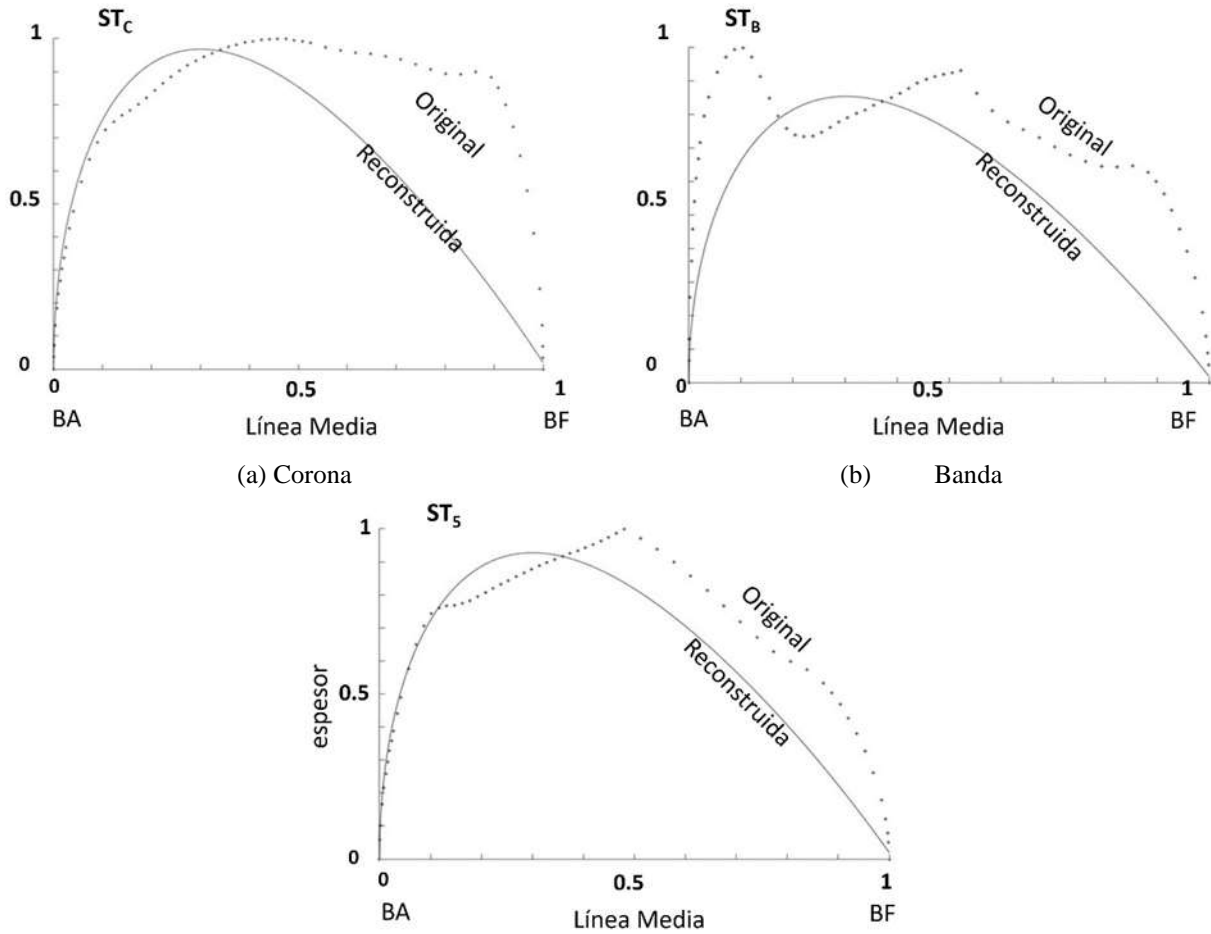


c) Parámetro t

Figura 12. Parámetros finales alcanzados en las STs del alabe reconstruido.

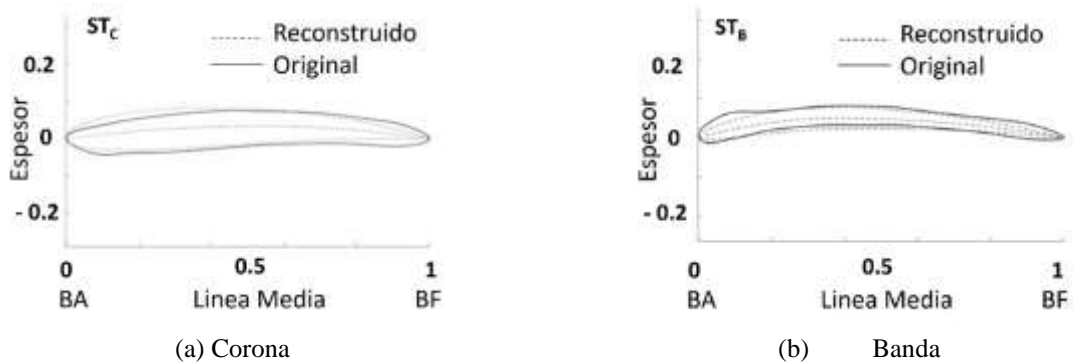
La Figura 13 muestra la comparación entre la distribución del espesor de las STs originales y las reconstruidas en las diferentes posiciones del álabe: Figura 13 (a) para la

corona, Figura 13 (b) para la banda, y Figura 13 (c) para la mitad de la envergadura del álabe.



(c) 50% de la envergadura.
Figura 13. Comparación entre la distribución del espesor.

La Figura 14 muestra gráficamente el ajuste entre STs para la Banda, Corona y ST_5 .



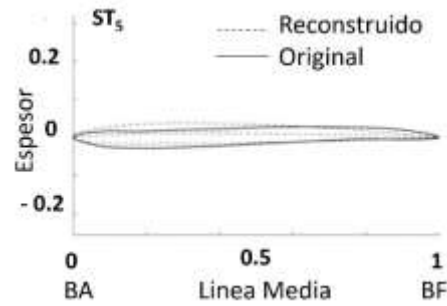
(c) ST_5 , 50% de la envergadura,

Figura 14. Comparación entre las STs originales y las ajustadas a lo largo de la envergadura del álabo.

4.3 APILAMIENTO DE LAS STs PARA LA DEFINICIÓN DE LAS SLP y SLS

Para definir el álabo con las SLP y SLS de forma continua y suave se apilaron sobre el EA, a lo largo su envergadura, las STs reconstruidas. La Figura 15 (a) muestra la

comparación entre el apilamiento de STs del álabo original, la Figura 15 (b) contra los álabos reconstruidos con 10 STs, y la Figura 15 (c) con 100 STs. Ésta última demuestra que 100 STs ortogonales apiladas en el EA prácticamente definen las superficies de ambos lados del álabo.

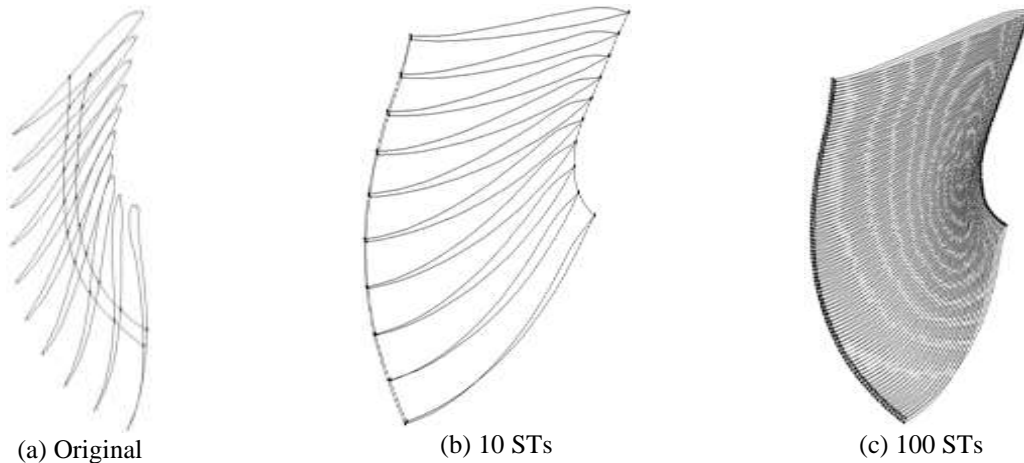


Figura 15. Apilamiento de las STs en el Esqueleto del Álabo (EA).

La Figura 16 muestra la definición de las superficies del álabo. El sólido del modelo CAD final se construyó mediante superficies revestidas cuando se utilizaron 10 y 100 STs.

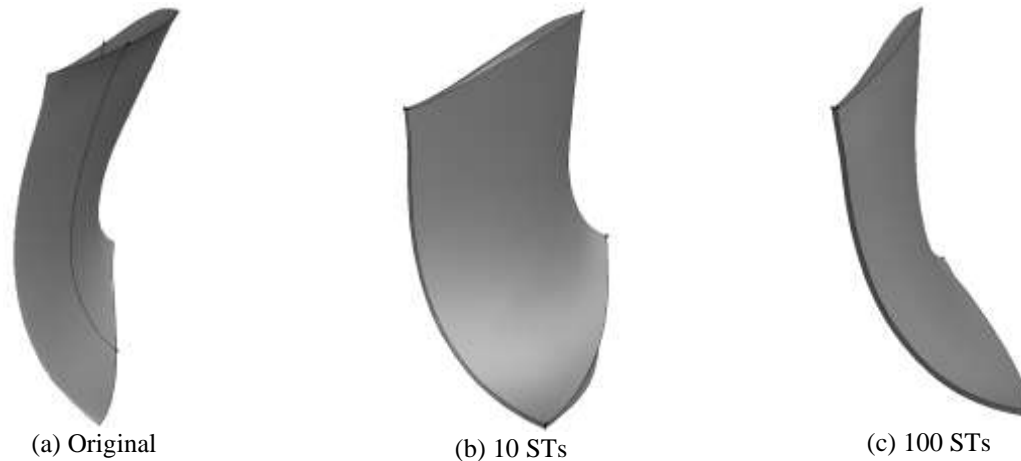


Figura 16. Comparación del sólido obtenido del álabe reconstruido contra el original.

4.4 EVALUACIÓN DE LA RECONSTRUCCION

Como se mencionó anteriormente este tipo de álabes no se tienen medidas de referencia por lo que para evaluar la aproximación alcanzada por esta metodología se tomaron dos consideraciones: El ajuste alcanzado entre STs y la diferencia entre volúmenes.

La Figura 17 muestra el error en el ajuste entre las STs de la Corona, la Banda y la ST_5 .

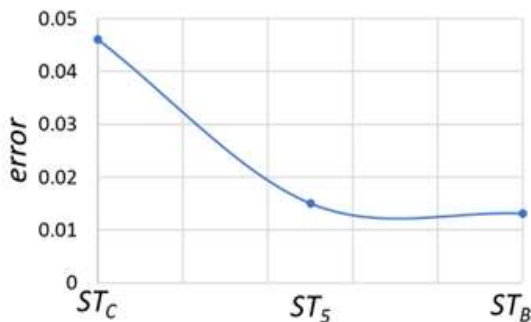


Figura 17. Error en el ajuste entre STs dado por la Ec. 7.

Una vez definidas las SLS y la SLP, se determinó el porcentaje de variación del volumen del álabe respecto al original. La Figura 18 muestra que el álabe reconstruido alcanza un cambio de volumen del 0.23% en relación con el original, cuando se utilizó un apilamiento de 10 STs sobre el EA. De la misma manera, el volumen sólo alcanzó el

0.24% cuando se utilizó el apilamiento de 100 secciones para su reconstrucción.

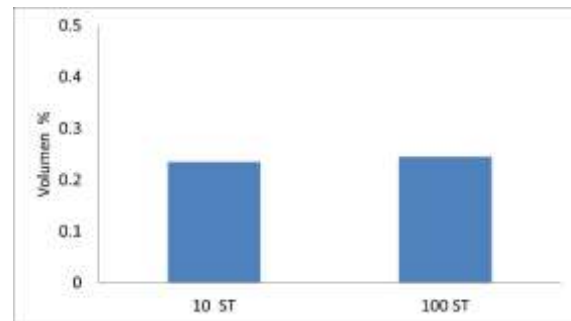


Figura 18. Variación volumétrica del ajuste entre el álabe reconstruido respecto al original.

5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La proximidad en el valor los parámetros m , p y t entre las diferentes STs del álabe confirma que en este tipo de álabe no cambia mucho en su forma a lo largo de la envergadura. Además, el ajuste alcanzado en las diferentes STs del álabe demuestra que la ecuación del perfil NACA de 4 dígitos puede ser utilizada para este tipo axial-radial de rodete como función paramétrica y con ella procesar los datos escaneados para redefinir las STs del álabe. El posterior apilamiento de estas STs sobre su esqueleto es capaz de crear las SLP y SLS del álabe de forma continua y suave.

5.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para evaluar al ajuste entre las SLP y SLS del álabe, Dubé et al., (2006) and Tsuzuki et al., (2015) establecieron un error cuantificable de aproximación. El primero establece un error en relación al diámetro de rodete de 0.1%. Basados en estos resultados, Delgado et al., (2020) reconstruyó el álabe nominal del rodete de la turbina Francis 99 runner con una exactitud del 0.21% y Cerriteño et al., (2020) consiguió un mejor del ajuste con un 0.04%.

Sin embargo, en este trabajo, al no tener medidas de referencia de las SLP y las SLS del álabe original, solo ha sido posible evaluar la diferencia de volumen alcanzada, 0.23% con 10×10 STs y 0.24% con 100×100 STs. Delgado et al., (2020) alcanzó una diferencia de volúmenes de 0.032% con 10×10 STs y de 0.075% 100×100 STs solo que con álabes nominales.

Así, en la correcta definición del álabe el número de STs no es fundamental, como lo demuestra cuantitativamente Cerriteño-Sánchez et al., (2023). Esto se debe a que las STs son colocadas ortogonalmente siguiendo el EA y no siguiendo las líneas de corriente para apilar las STs como generalmente se ha hecho en otros procesos de reconstrucción (Iliev et al., 2020).

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Como continuación a este trabajo se pretende analizar el espacio de diseño del álabe generado por los diferentes parámetros de las STs. Utilizando la DFC se estudiaría si las superficies creadas de los álabes reconstruidos numéricamente mejoran o al menos no provocan problemas fluido-dinámicos y estructurales que afecten el rendimiento de la turbina. Así, se pretende utilizar la metodología establecida por Cerriteño et al., (2023) con el modelo de turbina estudiado por Castro et al., 2011.

6. CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha aplicado una metodología para reconstruir un álabe de rodete Francis original (desgastado y dañado) basada en la Ingeniería Inversa, dónde el principal aporte fue la utilización de una función paramétrica manipulada por un algoritmo de optimización para lograr el mejor ajuste de cada STs del álabe.

Esta metodología demuestra también que, extrayendo los puntos discretos del archivo del álabe original, se puede obtener el marco del álabe para crear una malla estructurada en 3D y definir el EA. Es así que este conjunto bien organizado de líneas de coordenadas permitió, en primer lugar, colocar Superficies de Corte ortogonales para obtener información importante del álabe real y, en segundo lugar, construir las ST del álabe directamente sobre el espacio real, eliminando los problemas de distorsión de longitud inherentes a los álabes axial-radiales con alto grado de torsión geométrica.

Ya que no se cuentan con las medidas de referencias del álabe escaneado, la diferencia encontrada entre volúmenes del álabe desgastado del 0.23% en comparación con ajustes hechos con álabes nominales, 0.0325%, se puede considerar como aceptable, ya que la variación de este volumen es imperceptible a pesar de que se aumenten el número de Secciones Transversales, (STs). Así, sólo el hecho de reconstruir un álabe utilizando una ecuación paramétrica para generar STs bien definidas y continuas, debería resultar en un desarrollo del flujo uniforme y sin fluctuaciones de presión en sus superficies.

Aunque la reconstrucción numérica debió alcanzar una suavidad y continuidad debido al número de secciones insertadas, debe tenerse en cuenta que la distribución y evolución del espesor del álabe podrían

cambiar con las formas de los álabes, lo que implicaría utilizar varias ecuaciones paramétricas para analizar en qué medida el rendimiento del álabe podría verse afectado o mejorado.

Además, la metodología puede apilar una gran cantidad de STs para definir a las superficies de presión y succión del álabe, no obstante, se debe considerar disminuir el número de STs en caso de que se requiera realizar un proceso de optimización de la geometría, esto con la finalidad de reducir el número de parámetros para hacer más eficiente el proceso.

Para tener certeza de la efectividad en la reconstrucción del álabe, se pretende analizar posteriormente por medio de la Dinámica de Fluidos Computacional, las condiciones hidrodinámicas creadas por el rodete en relación al estudio hecho por Gómez et al., (2008). Para esto se deberá establecer a través del método de Taguchi, el espacio de diseño del álabe con el cual pudiera mejorar el rendimiento de la turbina.

Así, una vez evaluado el rendimiento total de la turbina con los álabes reconstruidos, este método de Ingeniería Inversa podría ser propuesto para el proceso de reparación o reemplazo de álabes dañados de rodetes de turbinas de mediano y bajo salto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el soporte financiero al primer autor, a las Aulas CIMNE Morelia por el apoyo técnico, y a la Coordinación de la Investigación Científica (CIC) de la UMSNH por el apoyo financiero para realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Tsuzuki, M. S., Vatanabe, S. L., Castro, E. G., Silva, E. C., Martins, T. C., Taniguchi, D. & Tiba, H. (2015). Development of a complete methodology to reconstruct, optimize, analyze and visualize Francis turbine runners. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1900-1905. <https://doi.org/10.1016>
- [2] Ulucak, O. (2020). Rehabilitation of old francis turbines using reverse engineering and computational fluid dynamics simulations (Master's thesis). [URL](#)
- [3] Gao, B., Hao, C., Li, T., & Ye, J. (2017). Grid generation on free-form surface using guide line advancing and surface flattening method. *Advances in Engineering Software*, 110, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.04.003>
- [4] Basnet, S., Dhulikhel, N., Kapali, A., & Chitrakar, S. (2021). Application of Reverse Engineering Method on Francis Turbine Runner Using 3D Scanning Techniques. In *KEC Conference* (Vol. 2021, p. 2021). [URL](#)
- [5] Sedai, A., Thapa, B. S., Thapa, B., Kapali, A., Qian, Z., & Guo, Z. (2020, August). Application of Reverse Engineering method to model eroded Francis runner. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1608, No. 1, p. 012012). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1608/1/012012>
- [6] Sierra, J., & Correa, E. (2020). Obtaining the CAD Flow Models in the Francis Turbine of the Sancancio Hydroelectric Power Plant by Means of Reverse Engineering. *International Journal of Integrated Engineering*, 12(1), 172-187. [URL](#)
- [7] Delgado, G., Galván, S., Dominguez-Mota, F., García, J. C., & Valencia, E. (2020).

Reconstruction methodology of a Francis runner blade using numerical tools. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34, 1237-1247. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0222-4>

[8] Gómez, L. L. C., Beltrán, G. U., & Szyszka, J. K. (2008). Estudio numérico del flujo en componentes de una turbina hidráulica. *Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM 17 al 19 de septiembre, 2008 Puebla, México*. pp. 1209-1223. [URL](#)

[9] Castro, L., Urquiza, G., Adamkowski, A., & Reggio, M. (2011). Experimental and numerical simulations predictions comparison of power and efficiency in hydraulic turbine. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2011(1), 146054. <https://doi.org/10.1155/2011/146054>

[10] Castro-Gómez L., (2011). Estudio experimental y numérico de la potencia y eficiencia de una turbina Francis: efecto de la modificación geométrica del tubo de aspiración. Doctoral tesis. CIICAP, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

[11] Pérez Rubio, L. D., Galván González, S. R., Domínguez Mota, F. J., Cerriteño Sánchez, A., Tamayo Soto, M. A., & Delgado Sánchez, G. (2021, June). Reconstruction of a Steam Turbine Blade Using Piecewise Bernstein Polynomials and Transfinite Interpolation. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 85017, p. V008T22A005). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/GT2021-58632>

[12] Dubé, J. F., Guibault, F., Vallet, M. G., & Trépanier, J. Y. (2006). Turbine blade reconstruction and optimization using subdivision surfaces. In *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 1327). <https://doi.org/10.2514/6.2006-1327>

[13] Milos, T. (2006). A New method to obtain the blade surface intersections with horizontal cutting planes of the Francis turbine runner. *Hydraulica*, 2(19), 26-35. [URL](#)

[14] Ferrando López, L. (2006). *Surface parameterization and optimum design methodology for hydraulic turbines* (No. 3448). EPFL. [URL](#)

[15] Cerriteño, A., Delgado, G., Galván, S., Domínguez, F., & Ramírez, R. (2021, June). Reconstruction of the Francis 99 main runner blade using a hybrid parametric approach. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 774, No. 1, p. 012074). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/774/1/012074>

[16] The Math Works, Inc. (2019) Matlab.

[17] isight, iSIGHT 9.0.1. (1994) Engineous Software Inc.

[18] Chen, Z., Singh, P. M., & Choi, Y. D. (2016). The effect of runner blade loading on the performance and internal flow of a Francis hydro turbine model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, 1617-1623. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0317-0>

[19] Cerriteño-Sánchez, Á., Arispe-Angulo, T., Ramírez-Camacho, R., Domínguez-Mota, F., Delgado-Sánchez, G., & Galván-González, S. (2023). Reconstruction of the blade model of the Francis GAMM runner using a smoothed numerical blade. *Alexandria Engineering Journal*, 81, 489-500. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.09.038>

[20] Iliev, I., Tengs, E. O., Trivedi, C., & Dahlhaug, O. G. (2020). Optimization of Francis turbines for variable speed operation using surrogate modeling approach. *Journal*

of Fluids Engineering, 142(10), 101214.
<https://doi.org/10.1115/1.4047675>

NOMENCLATURA

SLP	Superficie del Lado Presión
SLS	Superficie del Lado Succión
ST_c	Sección Transversal de la Corona
ST_B	Sección Transversal de la Corona
ST₅	Sección Transversal a la mitad del álabe
EA	Esqueleto del Álabe

MA	Marco del Álabe.
SC	Superficies de Corte
BA	Borde de Ataque
BF	Borde de Salida.
LMB	Línea Media en la ST _B
LM_c	Línea Media en la ST _c
BA	Borde de Ataque
BF	Borde de Fuga