



CONTRIBUCIÓN DE PROTOTIPOS 3-D PARA IMPULSAR EL DISEÑO PROPIO Y CARACTERIZACIÓN DE TURBINAS EN MINI-CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN CANALES DE RIEGO

**Fidel Rafael Gómez Mendoza^{1*}; Sebastián López Noriega; Flavio Ferrán Riquelme³;
Alessandra Beauregard León⁴**

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Av. Cuauhnáhuac 8532 Progreso, Jiutepec, C.P. 62550, Morelos, México.

rafael_gomez@tlaloc.imta.mx – 777 3293600 (*Autor de correspondencia)

^{2 y 4}Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Ingeniería en Energías Renovables, Priv. Xochicalco S/N Temixco, C.P. 62580, Morelos, México.

³Consultor Independiente. 3ª Privada de la Luz N° 2, Chapultepec, C.P. 62450, Cuernavaca Morelos, México.

Resumen

La tecnología 3-D para diseño y generación ha constituido una alternativa idónea para prototipos de geometría compleja en diversos campos de la ingeniería. En particular constituye la primera fase para convertir una idea en un producto tangible, seguida de la caracterización en laboratorio. Se describe el proceso inicial para generar un prototipo polimérico a escala, de una turbina Kaplan-Hélice por medio de tecnología 3-D. Fase preliminar al ensayo en laboratorio con diversas condiciones para caracterizar el diseño específico de esta turbina.

Palabras claves: Prototipos 3-D, mini-turbina Kaplan-Hélice, mini-central hidráulica.

Introducción

De la iniciativa para disponer de una turbina con aplicación potencial en canales de riego, se requiere de operaciones concatenadas para la validación del diseño conceptual. El prototipo 3-D es la primera fase para convertir un diseño en un producto real, para operar en una corriente en campo.

En este artículo se describe el desarrollo de un prototipo operacional generado en 3-D para una turbina Kaplan-Hélice. Constituye un modelo factible de trabajo para realizar simulación y evaluación en laboratorio, más que una representación dimensional de la turbina, un producto que permita ensayar bajo diferentes condiciones de flujo y carga; considerando la ecuación básica (1):

$$P = 9.81H_n Q \eta \quad (1)$$

En donde P : Potencia kgm/s, H : Carga m, Q : Flujo m^3/s y η : Eficiencia

Se diseñó una turbina de reacción Kaplan-Hélice, de flujo axial; ex profeso para eficiencia en caídas medias y bajas. Posterior al diseño y dimensionamiento, se efectuó la representación gráfica por medio de *3D Builder*, aplicación de *Windows*, desarrollado por *Microsoft Corporation*, (Figura 1); exportando archivo *STereoLithography (STL)*, en constante desarrollo hasta obtener un prototipo operacional.

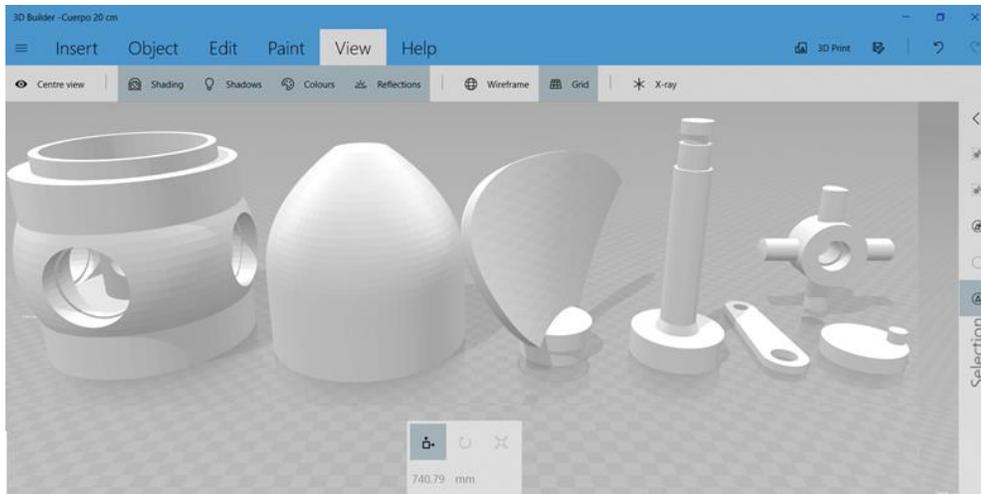


Figura 1. Componentes digitales de la turbina por medio de *3D Builder*.

Diseño

Una vez seleccionada la turbina para el propósito que interesa, se realizó el diseño convencional y dimensionamiento; iniciando con base en curva típica, (Figura 2), para parámetros de flujo base; considerando el factor característico $\sigma = 1.6$ y carga 2.0 m.

$$\text{La velocidad de rotación: } N = \frac{\sigma(2gH)^{\frac{3}{4}}}{2\sqrt{\pi}V} = \frac{\sigma(2(9.81 \frac{m}{s^2})(2 m))^{\frac{3}{4}}}{2\sqrt{\pi}(0.11365 \frac{m^3}{s})} = 20.98 s^{-1} \quad (2)$$

$$\text{Velocidad Específica: } N_s = \frac{N\sqrt{V}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{(20.98 s^{-1})\sqrt{0.11365 \frac{m^3}{s}}}{2^{\frac{5}{4}}} = 4.2 \quad (3)$$

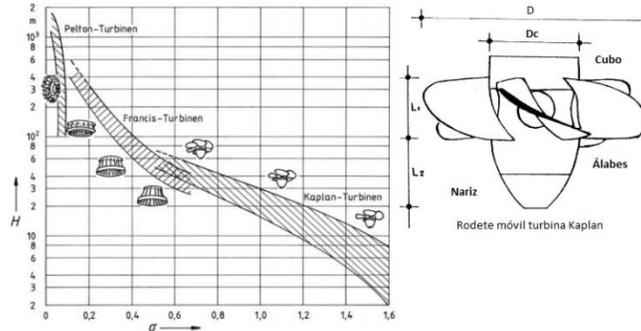


Figura 2. Campo de aplicación de turbinas hidráulicas para selección. Rodete Kaplan.

$$\text{Coef. de velocidad periférica: } \phi = 0.79 + 0.00161 N_s = 0.79 + 0.00161(4.2) = 0.7968$$

$$\text{Diámetro del rodete móvil: } D = \frac{84.59 \phi H^{0.5}}{N} = \frac{84.59 \phi (2 m)^{0.5}}{20.98 s^{-1}} = 4.5 m \quad (5)$$

$$\text{A partir del diámetro del rodete móvil: } D = (15.324 + 17.8) cm = 0.33 m \quad (6)$$

$$\text{Diámetro del cubo: } D_c = 15.324 cm = 0.153 m \quad (7)$$

Velocidad Específica N_s :

$$D_c = \left(0.25 + \frac{94.64}{N_s}\right) \Rightarrow N_s = \frac{94.64}{(D_c - 0.25)} = 975.67 \quad (8) \text{ Conforme la } \mathbf{Tabla 1.}$$

Tabla 1. Velocidad específica por tipo de turbina.

| Tipo de turbina | Velocidad específica N_s | $H_{m\acute{a}x}$ Admisible m |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Pelton de una tobera | 10 a 29 | 1800 - 400 |
| Pelton de dos o más toberas | 25 a 59 | 400 - 350 |
| Michell-Banki | 29 a 220 | 400 - 80 |
| Francis lenta | 59 a 124 | 350 - 150 |
| Francis normal | 124 a 220 | 150 - 80 |
| Francis rápida | 220 a 440 | 80 a 20 |
| Kaplan-Hélice | 342 a 980 | 35 a 5 |

Coeficiente de Velocidad Periférica:

$$\phi = 0.79 + 0.00161 N_s = 0.79 + 0.00161(975.67) = 2.36 \quad (9)$$

Velocidad de Rotación:

$$D = \frac{84.59 \phi(H)^{0.5}}{N} \Rightarrow \frac{84.59 \phi(H)^{0.5}}{D} = \frac{84.59 (2.36) 2^{0.5}}{0.33 \text{ m}} = 855.52 \text{ s}^{-1} \quad (10)$$

$$\text{Velocidad Periférica: } V = \frac{\pi DN}{60} = \frac{\pi (0.33 \text{ m}) (855.52 \text{ s}^{-1})}{60} = 14.78 \text{ m/s} \quad (11)$$

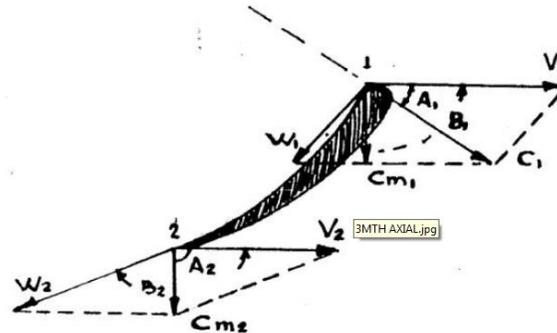
Área efectiva:

$$A = \frac{\pi}{4} [D^2 - (Dc)^2] = \frac{\pi}{4} [(0.33 \text{ m})^2 - (0.153 \text{ m})^2] = 0.067 \text{ m}^2 \quad (12)$$

$$\text{Velocidad Axial: } C_m = \frac{Q}{A} = \frac{0.11365 \text{ m}^3/\text{s}}{0.067 \text{ m}^2} = 1.7 \text{ m/s} \quad (13)$$

La tecnología 3-D permite el diseño pragmático de turbinas, la versatilidad de optimar el diseño de turbinas por proceso iterativo; el intercambio energético se debe a la cantidad de movimiento del fluido que pasa entre los álabes del rotor. Destaca el triángulo de velocidades, modificando los ángulos de Entrada₁, y Salida₂, de cada álabes del rodete de la turbina, seguido de evaluación de flujo en el proceso de caracterización de una turbina dada. La confirmación del coeficiente de velocidad ϕ y diseño geométrico; transferencia de energía fundamentada en la ecuación de Euler simplificada.

- V: Velocidad periférica [m/s]
- C: Velocidad absoluta
- W: Velocidad relativa
- C_m: Velocidad meridiana
- A: ángulo formado por V y C
- B: ángulo formado por V y W



Ángulo de entrada, considerando $V_1 = V_2 = V$, $A = 90^\circ$

$$H = \frac{(C_1 \cos A_1 V_1) - (C_2 \cos A_2 V_2)}{gE} = H \frac{(C_1 \cos A_1 V_1)}{gE} \quad (14)$$

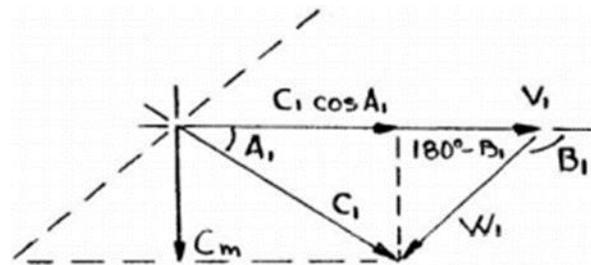
Considerando: $C_m = W \sin(180^\circ - B_1)$ $C_1 \cos A_1 = V_1 - W \cos(180^\circ - B_1)$

$$H = [V_1 - W_1 \cos(180^\circ - B_1)] \left[\frac{V_1}{gE} \right] \quad (15)$$

Sustituyendo W_1

$$H = \frac{V^2 - C_m \cot(180^\circ - B_1) V}{gE} \quad (16)$$

$$\therefore B_1 = 180^\circ - \arctan \frac{C_m}{V} \quad (17)$$



$$A_1 = \arctan \frac{V C_m}{gEH} \text{ Y } B_1 = 180^\circ - \arctan \left[\frac{(14.78 \text{ m/s})(1.7 \text{ m/s})}{(14.78 \text{ m/s})^2 - (9.81 \text{ m/s}^2)(0.85)(2 \text{ m})} \right] = 173^\circ \quad (19)$$

Ángulo de entrada de la velocidad absoluta:

$$A_1 = \arctan \left[\frac{V C_m}{gEH} \right] = \arctan \left[\frac{(14.78 \text{ m/s})(1.7 \text{ m/s})}{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.85)(2 \text{ m})} \right] = 56.42 \quad (20)$$

$$\text{Ángulo de salida: } B_2 = \arctan \left[\frac{C_m}{V} \right] = \arctan \left[\frac{1.7 \text{ m/s}}{14.78 \text{ m/s}} \right] = 6.56 \quad (21)$$

El prototipo 3-D

El prototipo operacional se generó en ácido poliláctico (PLA), CAS #26100-51-6, polímero que se comporta como plástico rígido conforme a la designación ASTM D621, posee suficiente estabilidad al intemperismo; incluso resistencia a la radiación UV por lapsos mayores a 18 meses. Considerando la exposición en operación, se requiere obtener piezas de calidad superficial óptima, las superficies expuestas al fluido de trabajo se perfeccionan. Se ha optado como práctica probada por el uso de recubrimientos orgánicos e incluso metálicos.

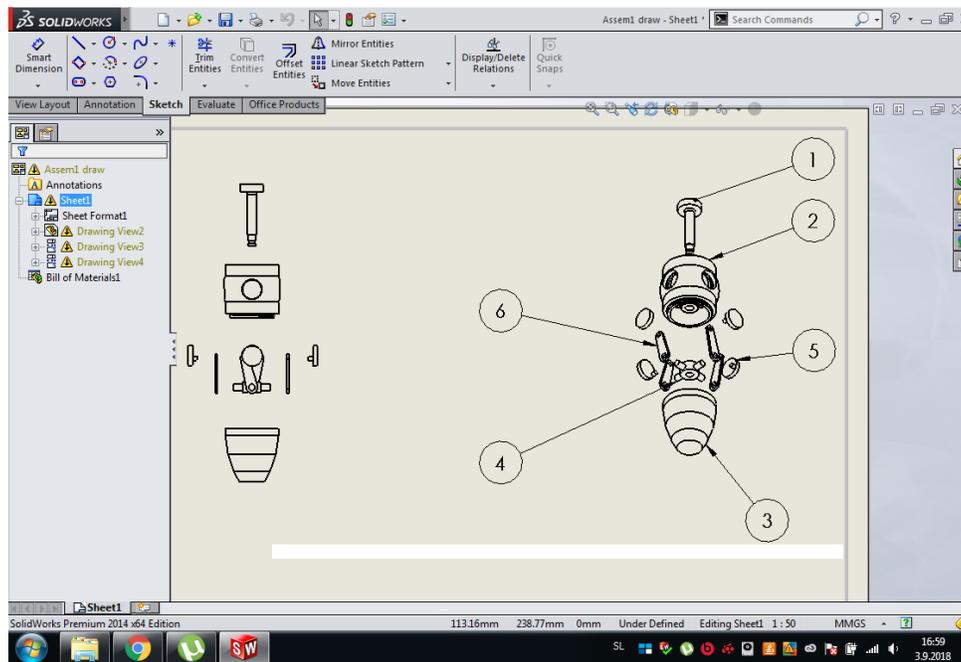


Figura 3. Diseño y ensamble de componentes de turbina por medio de *SolidWorks*.

Conforme a experiencia durante experimentación, se han evaluado los cambios dimensionales que los prototipos pueden sufrir, e.g. por la velocidad relativa de absorción de agua, encogimiento y elongación. El deterioro por intemperismo en modelos estacionarios, por ciclos de inmersión, secado, cambios de temperatura, diarios y estacionales; incluso incrustación debida al fluido de trabajo en lapsos de inactividad, como en una turbina real. Se ha desarrollado experiencia para diversas opciones de junta, adhesión y ensamble del PLA; considerando la naturaleza química y

compatibilidad de materiales y resina poliéster catalizada produce la unión con mayor resistencia a la tracción y libre de poros y fricción.

Resultados y Discusión

El prototipo 3-D, generado en *SolidWorks*, (Figura 3), se escaló en congruencia con la capacidad del equipo utilizado, *Makerbot*, Modelo *Replicator Z18*. El desarrollo implicó corregir errores, tanto sistemáticos, como aleatorios; fase de aprendizaje en la operación y optimización del rendimiento, así como condiciones y ajustes del equipo. Con base en la función del componente, se definió la posición de generación y tipo de superficie.

La integración de la turbina Kaplan-Hélice requirió de 14 elementos: casco; cuerpo, el elemento central de la turbina, donde todas las partes se acoplan; (Figura 3). Eje, construido preliminarmente en PLA, por deposición fundida de filamento; considerando la resistencia mecánica necesaria, para ensayos, se requiere una barra metálica. Cuatro álabes, elementos responsables de transformar el movimiento unidireccional del flujo en un movimiento giratorio de la turbina; inclinación para saltos de pequeña altura y grandes caudales. El perfeccionamiento de álabes considera un perfil aerodinámico análogo a superficies sustentadoras en aeronaves conforme a la *National Advisory Committee for Aeronautics (NACA)*.

Discos para conectar los álabes, así como sendas barras para acoplamiento de las salientes circulares de los discos con el resto de la turbina, por medio de la rueda. Este elemento, acoplado a las barras, se conecta con el eje vertical en el interior del cuerpo. En la (Figura 4) se muestran los elementos en PLA obtenidos con 3-D.



Figura 4. Componentes generados en PLA con 3-D, previo al tratamiento superficial. Relleno estructural hexagonal, de panal abeja.

Todos los elementos, requirieron mejorar el acabado, incluso por maquinado (Figura 5) en torno. Un aspecto trascendente fue el diseño del espesor, para resistencia mecánica, permitir el maquinado y minimizar tiempo de generación y consumo de

material. Con base en la experiencia, los prototipos operacionales son híbridos. Aun cuando la resistencia del PLA es suficiente, en elementos críticos es conveniente utilizar partes metálicas e incluso rodamientos para máquinas rotativas; considerando la temperatura crítica de flexión bajo esfuerzo a 65 °C en la literatura gris.



Figura 5. Rectificado en torno, con lija.

Conclusiones

La tecnología 3-D constituye una herramienta para generar prototipos de turbinas, obras y equipos hidráulicos. Permite perfeccionar el diseño, con riguroso apego a la ingeniería o en forma pragmática. El objetivo de esta iniciativa, es lograr que se adopte e implemente tecnología en forma exitosa con mínimos recursos y ayuda. Intentar producir energía, sin la búsqueda de la máxima eficiencia; considerando la disponibilidad real del recurso agua.

A partir del prototipo 3-D es factible caracterizar y construir turbinas útiles para aprovechamientos efectivos al implementar mini-centrales hidráulicas para generación de energía. La difusión y transferencia de la secuencia de implementación, contribuirá a que usuarios del sector rural desarrollen tecnología propia para ampliar actividades productivas y mejoramiento de calidad de vida.

La adopción de esta tecnología, puede propiciar el construir capacidad de replicar el aprovechamiento de corrientes de agua, minimizando la dependencia de tecnología extranjera.

Referencias Bibliográficas

Ferrán Riquelme F. (1992). Diseño hidráulico de una mini-turbina de tipo axial. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Morelos, México.

Ferrán Riquelme F. (2018). Diseño hidráulico de una mini-turbina de tipo axial. NA, 1, 5. 2018, abril 10, Google Drive Base de datos.