

# Diseño y fabricación de una turbina Tesla con un enfoque de diseño de experimentos

Humberto Arturo Béjar Sánchez<sup>1</sup>, Francisco Javier Solorio Ordaz<sup>1</sup>, Isidro Robledo Vega<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Termofluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, México D.F. 04510, México.

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México.

## Resumen

Se construyeron tres prototipos de la turbina Tesla, cuyos rotores se diseñaron a partir de la teoría analítica – paramétrica desarrollada por Rice [6]; los discos se fabricaron de lámina galvanizada de tres espesores distintos (0.45, 0.93 y 1.5mm) y la separación entre ellos se dio mediante arandelas hechas del mismo material y los espesores antes mencionados. Se presenta, además, la propuesta de un banco de pruebas para la obtención experimental de los parámetros de salida de la turbina, en el que para controlar la velocidad angular se utiliza un motor de inducción conectado al eje de la turbina, que, al ser alimentado mediante una fuente de voltaje, funciona como un freno magnético. Para medir el par, a la carcasa del motor se le acopla un brazo de palanca, que, al girar, uno de sus extremos hace contacto con una báscula. La potencia se calcula multiplicando el par por la velocidad angular, que se determina con un tacómetro.

**Palabras clave:** Turbina Tesla, diseño de experimentos, prototipos, banco de pruebas.

## Abstract

Three prototypes of the Tesla turbine were built, whose rotors were designed based on the analytical-parametric theory developed by Rice [6]; the discs were made of galvanized sheet metal of three different thicknesses (0.45, 0.93 and 1.5 mm) and the separation between them was given by means of washers made of the same material and the thicknesses mentioned above. In addition, the proposal of a test bench for the experimental obtaining of the output parameters of the turbine is presented, in which an induction motor connected to the turbine shaft is used to control the angular velocity, which, when fed by a voltage source, works as a magnetic brake. To measure the torque, a lever arm is attached to the motor casing, which, when rotating, one of its ends makes contact with a scale. The power is calculated by multiplying the torque by the angular velocity, which is determined with a tachometer.

**Keywords:** Tesla turbine, design of experiments, prototypes, test bench.

## 1. Introducción

Desde la antigüedad los seres humanos han desarrollado distintos métodos para generar energía y satisfacer sus necesidades, uno de estos es transformando la energía de los fluidos en energía mecánica por medio de turbinas. Una de ellas fue concebida por Nikola Tesla, quien generó la idea de una turbina no convencional, la cual desarrolló haciendo una analogía con su motor de inducción de capo magnético giratorio, buscando utilizar los fluidos para crear un efecto similar. El inventor encontró una forma de transformar la energía de los fluidos en energía mecánica valiéndose de sus propiedades de viscosidad y de la condición de no deslizamiento [1].

En su patente de 1913, Tesla describe que este tipo de turbomaquinaria funciona de una forma diferente a las convencionales, debido a que su rotor está compuesto por discos sólidos, planos, de espesor y diámetro finito, que están acomodados de forma paralela entre sí, espaciados una distancia determinada a lo largo del eje y perpendiculares al mismo (Figura 1). Como resultado del suministro del fluido de trabajo hacia el rotor desde una o varias boquillas distribuidas alrededor de la carcasa, esté fluye entre los discos y a medida en que avanza en el espacio entre ellos se genera el efecto de capa límite, por lo cual el fluido cede momentum al rotor provocando su rotación [2].

El propósito de la turbina Tesla de acuerdo con su creador es el de superar las desventajas que presentan otro tipo de turbinas convencionales como: vibraciones mecánicas, cambios en la velocidad, choques, cavitación, métodos que utilizaban para impartir o derivar energía a partir de un fluido, tales como pistones, álabes, paletas y palas, lo que introducía numerosos defectos, limitaciones, complicada y tardada fabricación, mantenimiento laborioso y alto costo.

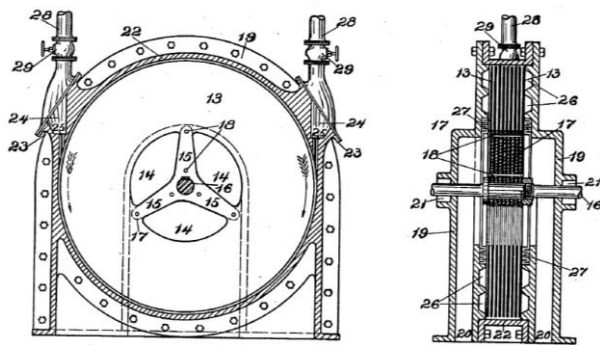


Figura 1. Diseño original de la patente de la turbina Tesla [2].

Desde su creación, se ha buscado su aplicación en la generación de energía eléctrica, es por ello que Tesla desarrolló tres pruebas con diferentes configuraciones y materiales para los discos de su turbina. Su primer prototipo en 1906 con ocho discos, cada uno de 6 in de diámetro, proporcionaba 30 hp, alcanzando velocidades de rotación muy altas (de hasta 35000 rpm). Debido a las altas rpm los discos de metal se deformaban y comenzaban a colisionar entre sí por el alabeo generado. En 1910 construyó un modelo más grande con discos de 12 in pero limitó su velocidad a 10000 rpm, de lo que obtuvo 100 hp. En 1911 desarrolló el tercer prototipo con discos de 9.75 in de diámetro. De nuevo, redujo a 9000 rpm y encontró que la potencia se incrementaba [1]. Tesla reportó las potencias supuestas desarrolladas en sus experimentos, pero no hay registro de las condiciones termodinámicas (presión y temperatura), así como el flujo másico o caudal utilizados para obtener estos resultados, y también se omiten las eficiencias obtenidas. Posteriormente, alrededor de 1950, la turbina tuvo un resurgimiento en el interés por otros investigadores para realizar nuevos estudios entre los que se destacan los realizados por Rice [6], los cuales abarcan trabajos analíticos, numéricos y sobre todo experimentales. Sin embargo, pese a los esfuerzos realizados, no se ha logrado obtener una eficiencia que compita con la de las turbinas convencionales actuales. A pesar de lo anterior, la turbina Tesla presenta algunas ventajas importantes, ya que es relativamente fácil de fabricar, su mantenimiento es accesible y los precios de

manufactura son bajos. El presente trabajo tiene como objetivo diseñar y manufacturar tres prototipos de la turbina Tesla y un banco de pruebas para estudiar su desempeño, sirviéndose de la adecuada asignación de los valores de los parámetros que son determinantes en el funcionamiento de la turbina, por medio de la técnica de diseño de experimentos (DOE) factorial fraccionado. Tal banco de pruebas es versátil para que se puedan variar parámetros de tipo geométricos, operacionales y termodinámicos, y que a su vez permita capturar la información de las variables propias para su evaluación mediante la técnica estadística.

## 2. Metodología

### 2.1 Modelo de análisis del flujo entre dos discos

Para desarrollar el diseño de la turbina Tesla se tomó como referencia la teoría analítica - paramétrica desarrollada por Rice [6], que se presenta en esta sección, la cual describe la interacción entre el rotor y el fluido el cual se considera incompresible, su flujo en estado permanente, entre otras consideraciones. Su análisis toma el espacio entre dos discos de acuerdo a la siguiente geometría:

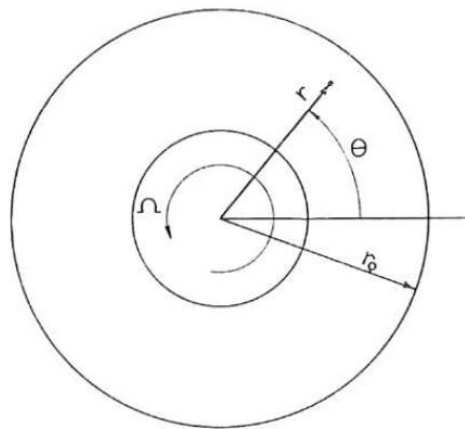


Figura 2. Geometría de referencia del análisis [6].

La Figura 2 muestra el sistema coordenado de “r” y “θ” donde,  $r_o$  es el radio externo y  $\Omega$  la velocidad angular. Las ecuaciones de Navier-Stokes en 2D se reducen aplicando las idealizaciones antes mencionadas como sigue:

$$\frac{dv}{dr} + \frac{v}{r} + \frac{f(v - \Omega r)}{4bu} [(v - \Omega r)^2 + u^2]^{1/2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} + u \frac{du}{dr} - \frac{v^2}{r} + \frac{fu}{4b} [(v - \Omega r)^2 + u^2]^{1/2} = 0 \quad (2)$$

estas ecuaciones se adimensionalizaron mediante la introducción de la distancia radial adimensional

$x = r/r_o$  y la componente de velocidad angular adimensional  $y = v/v_o$ . Además, se utilizó la ecuación de continuidad,  $u = -Q/2\pi br_o x$ , para eliminar el componente de velocidad radial en las ecuaciones, de lo que resulta:

$$\frac{dy}{dx} + \frac{y}{x} - \frac{fr_o^2\Omega}{4bv_o} \left( \frac{v_o}{\Omega r_o} y - x \right) * \left[ 1 + \left( \frac{2\pi br_o^2\Omega}{Q} \right)^2 x^2 \left( \frac{v_o}{\Omega r_o} y - x \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho\Omega^2 r_o^2} \frac{dp}{dx} - \left( \frac{Q}{2\pi br_o^2\Omega} \right)^2 \left( \frac{1}{x^3} \right) - \left( \frac{v_o}{\Omega r_o} \right)^2 \left( \frac{y^2}{x} \right) - \frac{fr_o}{4b} \left( \frac{Q}{2\pi br_o^2\Omega} \right)^2 \left( \frac{1}{x^2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{2\pi br_o^2\Omega}{Q} \right)^2 x^2 \left( \frac{v_o}{\Omega r_o} y - x \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (4)$$

La ecuación (3) describe el comportamiento cinemático del fluido en su dinámica a través de la turbina, por otra parte, la ecuación (4) describe el cambio de presión resultante a lo largo de líneas radiales en el flujo del fluido.

Con base en las ecuaciones (3) y (4) Rice [6] describe los siguientes parámetros básicos de operación adimensionales de su modelo:

Factor de fricción:  $f$ .

Relación de aspecto:  $\frac{r_o}{b}$ .

Parámetro de velocidad:  $\frac{\Omega r_o}{v_o}$ .

Parámetro de flujo:  $\frac{Q}{\Omega r_o^3}$ .

El conjunto de parámetros adimensionales que se presentan anteriormente son parámetros legítimos de operación de la turbina, los cuales se utilizan para diseñarla.

## 2.2 Solución numérica del modelo de Rice

Para diseñar la turbina, en este apartado se desarrolló un programa en Matlab mediante el cual se resolvieron las ecuaciones (3) y (4) de acuerdo a la condición en la frontera de  $y(1) = 1$ , ya que, en el límite del disco, el valor de la posición de la coordenada radial es igual a uno.

La ecuación (3) se resolvió por el método de Runge-Kutta de cuarto orden y la ecuación (4) se le dio

solución por medio de la regla trapezoidal extendida [7].

Partiendo del punto de diseño se obtienen los valores propios de los parámetros de operación, posteriormente se introducen en las ecuaciones, se resuelven y se obtienen las gráficas para los resultados, como se muestra en la Figura 3.

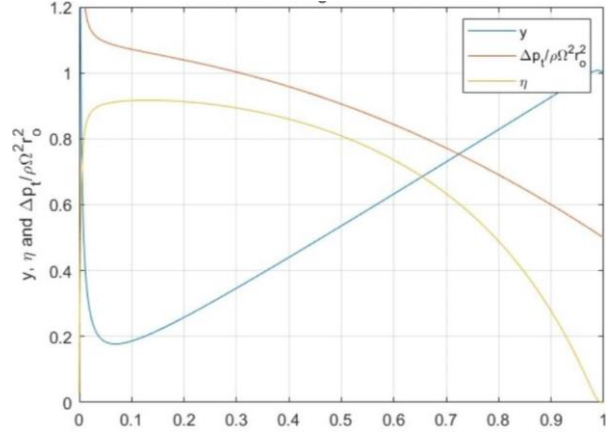


Figura 3. Gráfica de solución para las ecuaciones que describen la turbina Tesla. Graficado para:  $f = 0.02$ ,  $r_o/b = 50$ ,  $\Omega r_o/v_o = 1.00$  y  $Q/\Omega r_o^3 = 0.00001$ .

La Figura 3 describe una solución particular para los resultados obtenidos al seleccionar los parámetros básicos de operación adimensionales:  $f = 0.02$ ,  $r_o/b = 50$ ,  $\Omega r_o/v_o = 1.00$  y  $Q/\Omega r_o^3 = 0.00001$ . La magnitud máxima de la eficiencia  $\eta$  ocurre para un valor definido de  $x$ , con una cifra correspondiente del cambio de presión adimensional del flujo a través de toda la turbina ( $\Delta p_t / \rho\Omega^2 r_o^2$ ). La cantidad de  $x$  para el cual la eficiencia  $\eta$  es máxima, representa el valor del radio interior adimensional de los discos. De acuerdo a esto, la cifra de  $x$  cambia dependiendo de la combinación de los parámetros básicos adimensionales. También es importante mencionar que el valor oportuno de  $\Delta p_t / \rho\Omega^2 r_o^2$  proporciona la presión adimensional que se debe proporcionar para impulsar el flujo a través de la turbina.

El conjunto de resultados de la solución del modelo comprende una correlación numérica general de los parámetros adimensionales básicos que estipulan el desempeño de la turbina Tesla, siempre y cuando se desprecien las pérdidas fuera del rotor.

Para una solución específica, las operaciones muestran los valores calculados de los parámetros de operación de la turbina como son: radio interno y externo del disco, separación entre discos, presión de operación, el caudal o flujo másico de fluido, velocidad en la tobera y la velocidad de rotación. Desde luego, para una potencia de salida de diseño se puede calcular el número de discos que compone el rotor, ya que es conocida la potencia por cada espacio entre discos.

### 2.3 Diseño de la turbina Tesla

El diseño de la turbina Tesla tiene como objetivo la generación de una potencia de salida mayor a 1KW (mediana escala), por medio de aire comprimido como fluido de trabajo. Para lograr la potencia de diseño, se tomó el diámetro de los discos de 203.2 mm, la velocidad de operación de 18000 rpm y un número de 24 discos.

Para el desarrollo del diseño se consideran los valores que son necesarios para resolver las ecuaciones que describen la dinámica y comportamiento del fluido (3), (4) y (5), así como los parámetros adimensionales básicos de operación, las condiciones termodinámicas del fluido se tomaron de los estudios realizados sobre la tobera de otros autores [7-9].

Debido a que el objetivo principal del diseño es la potencia de salida, se deben obtener primeramente los parámetros que permitan alcanzar este diseño.

Ya que se hace referencia en la investigación analítica y experimental realizada por Rice [6], se tomó como base el experimento que dio los mejores resultados (segunda turbina), se realizaron los cálculos y el diseño se adaptó a los valores comerciales disponibles en general. También se tomaron en cuenta nuevos resultados que muestran la viabilidad del diseño sobre parámetros que no se consideran en la teoría de Rice (1965), como por ejemplo el mejor ángulo de incidencia de la(s) toberas [8, 9] con el objetivo de mejorar su eficiencia de la turbina.

La Tabla 1 se muestra los parámetros de diseño y operación de la turbina utilizados por Rice y los utilizados en esta investigación como caso de diseño.

Tabla 1. Parámetros de operación y diseño del rotor de la turbina Tesla.

Parámetro	W. Rice	H. Béjar
Fluido de operación	Aire comprimido	Aire comprimido
Número de discos	24	24
Radio externo de los discos	203.2mm	203.2mm
Radio de borde de las ranuras	16.764mm	22.5mm
Espesor de los discos	0.508mm	0.45mm
Separación entre discos	0.508mm	0.45mm
Velocidad angular	18000rpm	18000rpm
Configuración de toberas radial	Opuestas	Opuestas
Configuración de toberas axial	Uno a muchos	Uno a muchos
Número de toberas	2	2

Ángulo de las toberas	20°	7°
Material de los discos	Acero inoxidable	Lámina galvanizada
Material de la carcasa	Acero dulce (mild steel)	ABS-M30
Número de pernos retención	4	6
Rodamientos	Bolas - aceite	Bolas - grasa
Separación axial rotor - carcasa	-	1mm
Separación radial rotor - carcasa	-	1mm

En la composición de su turbina Rice incluyó rodamientos de bolas con un sistema de lubricación por aceite, la construcción de la misma la realizó para reducir las fugas en el rotor y carcasa. Debido a que los discos a altas velocidades de giro presentan vibraciones y el fenómeno del alabeo, Rice utilizó cuatro pernos muy delgados en la cercanía a la mitad del radio de los discos para suprimir estos detalles.

Por otra parte, en este diseño se incluyeron 6 pernos de 4.7625mm (3/16in) posicionados 60° entre sí y a una distancia desde el centro de 85mm para asegurar la rigidez del ensamble, de esta manera evitando las vibraciones y alabeo de los discos (Figura 5).

Los rodamientos se seleccionaron de acuerdo al diámetro de diseño del eje, el cual tiene un valor de 12mm, pero que a su vez fueran aptos para altas velocidades de rotación y sus cargas estáticas y dinámicas adecuadas. Los rodamientos que cumplieron estas especificaciones fueron los SKF 6001-2Z/C3 y su tabla de características es la siguiente:

Tabla 2. Descripción general característica del rodamiento SKF 6001-2Z/C3.

Característica	Valor
Diámetro interno	12 mm
Diámetro externo	28 mm
Ancho	8 mm
Carga dinámica básica	5.4 kN
Carga estática básica	2.36 kN
Velocidad límite	30000 rpm
Lubricante	Grasa
Sellado	Ambos lados

El método de sujeción de los discos al eje fue por medio de 3 pernos que sobrepasaban axialmente todos los discos y que a su vez llegan a dos componentes en sus extremos los cuales cada uno lleva un tornillo que pasa radialmente por el eje como se muestra en la Figura 5.

### 2.3.1 Obtención del factor de fricción: $f$

Ya que la turbina Tesla opera bajo el principio de adhesión y viscosidad para el intercambio de momentum desde el fluido hacia los discos del rotor, es de vital importancia tomar en cuenta este parámetro. En la teoría de Rice se utiliza el factor de fricción de Darcy, el cual depende de la rugosidad absoluta y el número de Reynolds.

El factor de fricción de Darcy " $f$ " es posible calcularlo de dos maneras: de forma gráfica por medio del diagrama de Moody, y mediante una correlación experimental como la ecuación de Churchill la cual es aplicable para flujo laminar y turbulento [7]:

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \left( \frac{1}{A + B} \right)^{3/2} \right]^{1/12} \quad (5)$$

Siendo:

$$A = \left\{ -2.457 \ln \left[ \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \left( \frac{\epsilon}{D_h} \right) \right] \right\}^{16}$$

$$B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

$$D_h = 2b$$

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$$

### 2.3.2 Configuración y forma de las toberas: uno a muchos y uno a uno.

A continuación, se muestran las imágenes que describen la geometría y disposición de las toberas en la carcasa de la turbina:

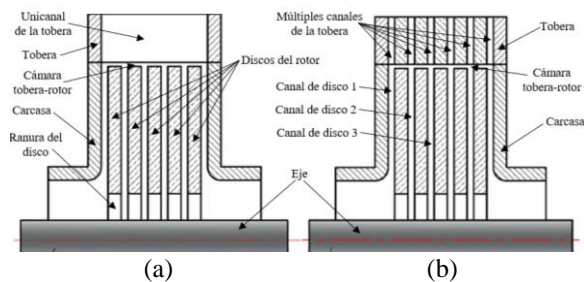


Figura 4. Esquema de las toberas en la turbina Tesla: (a) uno a muchos; y (b) uno a uno. [10].

La Figura 4 es una representación de sección transversal de la configuración que conforma la interfase entre la(s) tobera(s) y el rotor (discos). El lado izquierdo (a) muestra la configuración uno a muchos en la que un solo espacio (unicanal) suministra el fluido al rotor que está conformado por "muchos" discos. Por otra parte, en el extremo derecho (b) el esquema ilustra como la tobera tiene el mismo número de canales que

el rotor (espacio entre discos) lo que resulta en su configuración uno a uno.

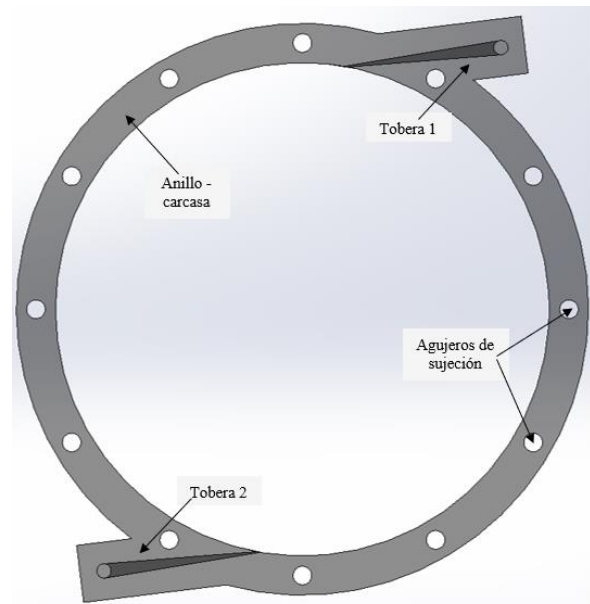


Figura 5. Disposición opuesta de las toberas en el anillo de la carcasa.

La Figura 5 muestra desde una vista lateral como se posicionaron de forma simétrica y opuestas las toberas alrededor del anillo para balancear los esfuerzos provocados por el fluido de trabajo sobre el rotor.

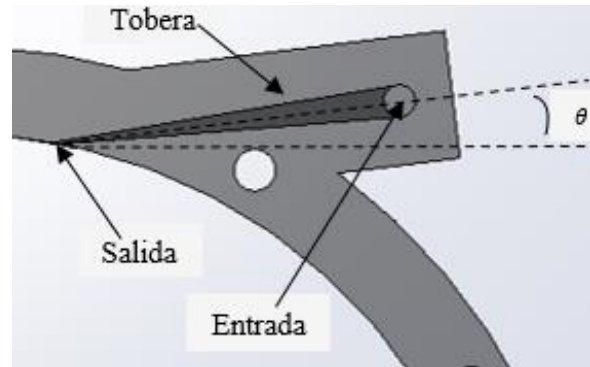


Figura 6. Vista de detalle de la tobera en el anillo de la carcasa.

En la Figura 6 se aprecia a detalle la configuración de la tobera y sus componentes principales, a su vez, la referencia del ángulo de inclinación el cual se toma como se ilustra desde la horizontal.

Las toberas se diseñaron tomando en cuenta una estructura rectangular plana en su sección transversal. Por otra parte, la forma de las mismas es del tipo convergente en la que el fluido de trabajo se acelera incrementando su energía cinética a expensas de una gran caída de presión en ellas.



## 2.4 Modelo 3D

Una vez obtenidos los valores de los parámetros adimensionales básicos de operación de la turbina, se realizaron los modelos 3D con la ayuda del software de diseño SolidWorks el cual es una herramienta muy útil y versátil para desarrollar los modelos y esquemas para su posterior fabricación. Cada pieza se desarrolló por separado y una vez terminadas todas ellas se realizó el ensamble de las mismas por medio del mismo programa, cabe mencionar que esto fue de gran ayuda para poder observar inconsistencias en el diseño y poder mejorarlas antes de su producción, lo que es una gran ventaja para evitar errores en las piezas y por ende en el ensamble de todo el conjunto de las turbinas. Lo antes descrito se puede apreciar en las Figuras 7 y 8 que se presentan a continuación:

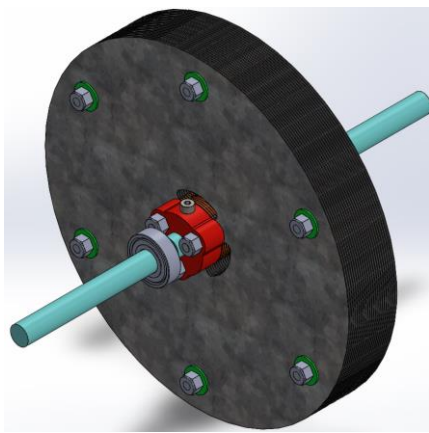


Figura 7. Modelo 3D del rotor de la turbina Tesla.

La Figura 7 es una vista isométrica de un rotor tipo Tesla, de acuerdo al diseño planteado y como están dispuestas sus piezas para mantener las características geométricas estables.

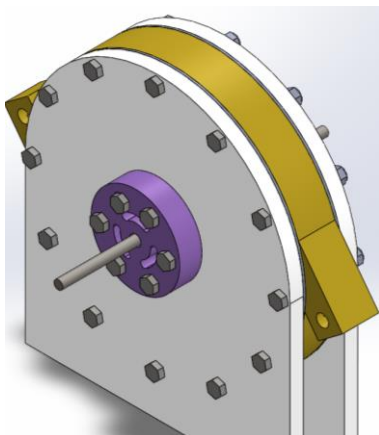


Figura 8. Modelo 3D de prototipo de la turbina Tesla.

La Figura 8 muestra el ensamble de todos los elementos que conforman un prototipo de la turbina, en su interior está el rotor que se muestra en la Figura 7 y

en el exterior las piezas propias del estator: anillo y toberas (amarillo), tapas laterales (blanco) y soporte para rodamiento (morado).

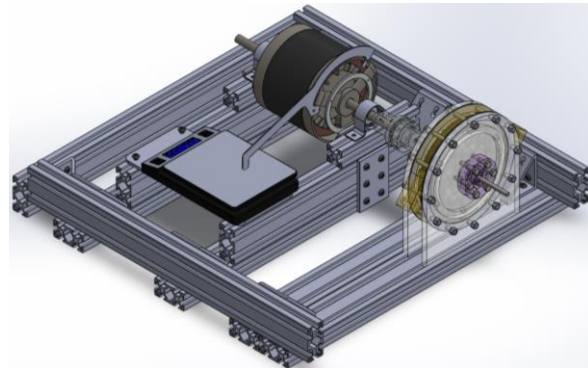


Figura 9. Ensamble de la configuración entre un prototipo de turbina Tesla y el motor de inducción.

La Figura 9 ilustra como están dispuestos los elementos principales del banco de pruebas, la finalidad del motor de inducción es la de regular la velocidad de giro de la turbina al inducir en el mismo una corriente directa, lo que conlleva a un funcionamiento como un freno magnético, para lograr lo anterior los ejes de los dos dispositivos se posicionaron de manera colineal y se conectan por medio de un cople doble. Por otra parte, otro objetivo del motor de inducción es por medio del mismo obtener la medición del torque generado por la turbina a cierta velocidad angular, por lo que se fijó un brazo de palanca por medio de 2 tornillos sobre el estator, el cual al estar el banco en funcionamiento comienza a presionar la báscula, la cual da una medición.

## 2.4 Diseño de experimentos

Debido a que no existe una teoría completa para el diseño de la turbina y que, además no se ha tipificado experimentalmente en su totalidad cuales son los parámetros más importantes para su diseño y la interacción entre estos, se pensó en utilizar la herramienta estadística de Diseño de Experimentos para evaluar cuales son los parámetros más importantes en el diseño de la turbina y como interactúan con los parámetros de salida (torque, potencia y eficiencia). Para abordar estas cuestiones se realizó un diseño de experimentos utilizando el análisis factorial fraccionado. De acuerdo a una exhaustiva revisión de la literatura y haciendo énfasis en la última publicación de Rice (2003) [8], se llegó a la conclusión de que las siguientes variables son las más importantes:

- Velocidad de rotación del eje.
- Diámetro interior del disco.
- Diámetro exterior del disco.
- Separación de los discos.
- Caudal.

- Densidad del fluido.
- Viscosidad del fluido.
- Toberas

Sin embargo, se deben considerar algunos otros aspectos que no se mencionan en la lista anterior y que, algunos de ellos si se toman en cuenta en la presente investigación, por lo que el diseño de experimento se describe de acuerdo a la Tabla 3. Como variable dependiente se seleccionó el torque. Iniciando el cálculo:

$$N = 2^n \quad (6)$$

donde  $N$  es el número de corridas experimentales y  $n$  los factores, que en este caso son 7, aplicando la ecuación (12) resulta:

$$N = 2^7 = 128 \text{ corridas experimentales}$$

Ya que el número total de corridas experimentales es extenso y que además para asegurar la veracidad del análisis se deben realizar 2 réplicas, este diseño se fraccionó por medio del software Minitab 17.

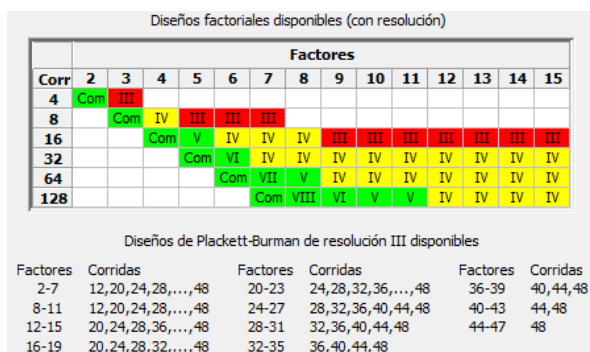


Figura 10. Diseños factoriales disponibles para 2 niveles con resolución después de ser fraccionados.

La Figura 10 muestra como pueden ser fraccionados los diseños de acuerdo al número de factores. Además, muestra en colores la nomenclatura de si es completo o bueno (verde), aceptable (amarillo) o inaceptable (rojo) y las corridas que corresponden a cada uno de acuerdo a su resolución (color).

## 2.5 Fabricación de prototipos y banco de pruebas

Después de obtener los valores de los parámetros geométricos, de operación y termodinámicos de la turbina y sus prototipos se procedió a la fabricación de los mismos, en el caso de los 3 rotores en los cuales solo se variaron los espesores y separación de los discos, estos, sus separadores y arandelas se manufacturaron con lámina galvanizada con cedulas y espesores siguientes (Tabla 4):

Tabla 4. Medidas de espesor de la lámina galvanizada

Lámina Galvanizada		
Cedula	Espesor (catalogo)	Espesor (real)
26	0.49 mm	0.45 mm
20	0.95 mm	0.93 mm
16	1.56 mm	1.50 mm

Primeramente, se elaboraron por medio de máquinas y herramientas convencionales de un taller/laboratorio de maquinados (fresadora y torno), sin embargo, por el espesor delgado de las láminas fue complicado lograr las medidas con precisión y sin causar un daño sobre los mismos por lo que se realizó posteriormente su manufactura con centros de maquinado CNC y por último una máquina de corte laser por control numérico lo cual ofreció un resultado excepcional. El eje se fabricó con acero rolado en frío 1020, los sujetadores de los discos al eje con aluminio, el anillo, las toberas de la carcasa y los retenes para los rodamientos se fabricaron por medio de la impresora 3D profesional Stratasys F120 con ABS-M30 la cual tiene una resolución de 0.01mm y con una densidad de impresión del 100%. Las piezas restantes fueron de tipo comerciales (tornillos, pernos, placas, arandelas, tuercas, ángulos, mangueras y conexiones) lo que facilitó su obtención y además del costo accesible.

A continuación, se muestran imágenes que evidencian la manufactura de algunas de las piezas antes descritas:

Tabla 3. Propuesta de variables independientes para el diseño de experimentos.

Parámetro	Tipo de factor	Factores (variables independientes)	Niveles
Geométrico	Cualitativo	Configuración de la tobera	2: (uno a uno, uno a muchos)
	Cualitativo	Rugosidad de los discos	2: (liso, rugoso).
	Cuantitativo	Espesor de los discos (mm)	2: (0.5, 1.5).
	Cuantitativo	Separación de los discos (mm)	2: (0.5, 1.5)
Operacional	Cuantitativo	Velocidad de rotación (rpm)	2: (12000, 24000 ).
	Cuantitativo	Flujo másico (Kg/s)	2: (0.015, 0.025)
Termodinámico	Cuantitativo	Presión de entrada (Pa)	2: (40, 90)

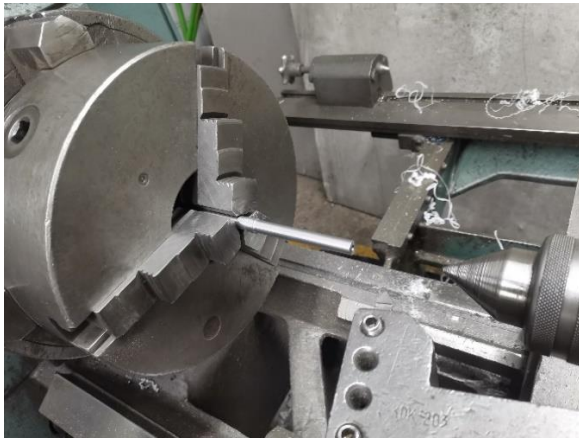


Figura 11. Fabricación de los ejes mediante el torno.

La fabricación de los ejes se realizó por medio de un torno convencional y con el material acero 1020, tal como se muestra en la Figura 11.

Tabla 5. Comparación de propiedades mecánicas entre el acero inoxidable y la lámina galvanizada.

Propiedad mecánica	Acero inoxidable	Lámina galvanizada
Módulo elástico	$2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	$2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Módulo Poisson	0.26	0.29
Densidad	$8000 \text{ Kg/m}^3$	$7870 \text{ Kg/m}^3$
Límite elástico	$206807000 \text{ N/m}^2$	$20394324216$

La Tabla 5. Muestra que la lámina galvanizada ofrece casi las mismas propiedades que el acero inoxidable, pero agregando como ventajas, una mayor facilidad de manufactura y precio.

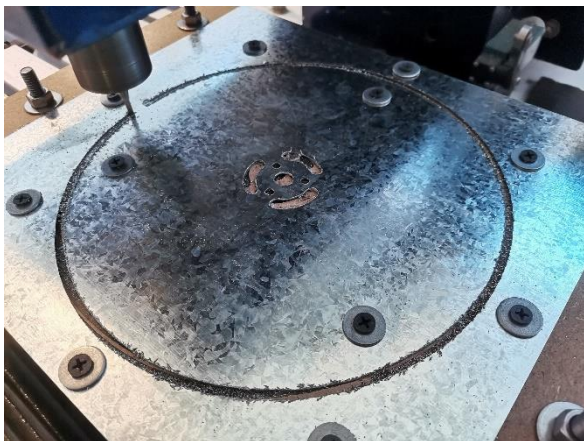


Figura 12. Manufactura de los discos por medio de maquinado por control numérico CNC.

Las figuras 11 y 12, constituyen las ilustraciones de los procesos de fabricación que se utilizaron para elaborar las piezas necesarias fundamentales que conforman la turbina Tesla.

### 3. Resultados

#### 3.1 banco de pruebas

Una vez manufacturadas todas las piezas se realizó el ensamblaje de los prototipos manteniendo la alineación de los discos en su agujero central y los 6 agujeros de apoyo para asegurar la estabilidad estructural, separación uniforme, y la intercambiabilidad de las piezas de separación ya que el propósito del diseño fue la de generar una versatilidad para el intercambio y/o reemplazo de piezas para sus posteriores pruebas. Los resultados de la construcción y unión de los dispositivos en el banco de pruebas se muestran a continuación:

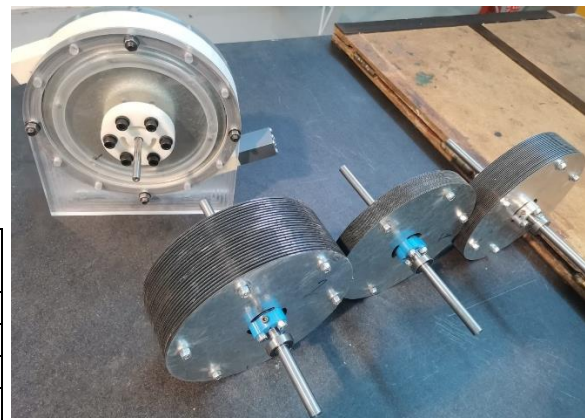


Figura 13. Rotores experimentales con distintos espesores y separaciones de los discos y prototipo de prueba (atrás).

A través de la Figura 13 se puede apreciar que el armado se llevó satisfactoriamente, evitando las interferencias mecánicas, las cuales solo por diseño están presentes en el ensamble entre el eje y los rodamientos ya que su ajuste debe ser de interferencia para asegurar el buen desempeño de los mismos, al mismo tiempo el ajuste entre los rodamientos y la pieza de la carcasa que los resguarda (reten para rodamientos) se diseñó y fabricó con un ajuste ligero de manera que encaja de manera suave pero sin tener el más mínimo movimiento radial sobre ellos por parte de los rodamientos, lo que permite el buen funcionamiento del rotor al ser ensamblado en el estator.



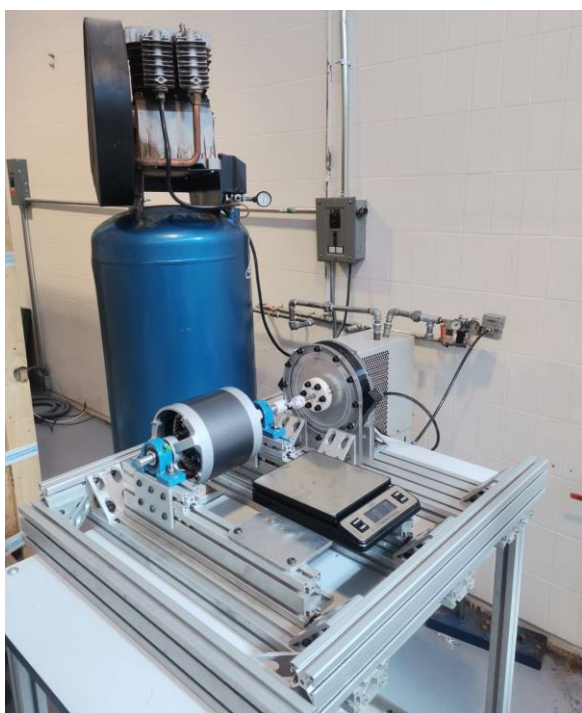


Figura 14. Vista general del banco de pruebas con conexión a la fuente de aire comprimido (compresor).

Ya que es necesario evaluar el desempeño de la turbina bajo el esquema del diseño de experimentos, se elaboró un banco de pruebas para capturar la información necesaria para evaluar como interactúan estos parámetros con las variables dependientes (torque, potencia y eficiencia), así como se involucran los factores (variables independientes) entre ellos y sus combinaciones. Para ello se conectó al eje de la turbina un motor de inducción y ambos se alinearon y fijaron a la estructura a base de ángulos, placas y tornillos comerciales que se muestra en la Figura 14. A su vez, se puede apreciar el compresor de pistón que se a estado utilizando para las pruebas el cuál puede proveer a plena carga hasta 450 KPa, con lo cual los experimentos registraron velocidades de rotación por encima de las 10000 rpm. También están presentes otras piezas del experimento como la báscula, el deshidratador y los demás componentes.

### 3.2 Corridas experimentales del DOE

El diseño en Minitab 17 con una resolución de IV (bueno) y 2 réplicas que dio un total de 64 corridas que se muestra a continuación:

Tabla 6. Representación gráfica de las combinaciones de los valores de cada factor a evaluar

	Tipo de Tobera	Rugosidad	Espesor	Espacio	rpm	Flujo másico	Presión
1	Uno a muchos	Rugoso	1	1	1	1	1
2	Uno a uno	Rugoso	1	1	-1	-1	1
3	Uno a muchos	Liso	-1	-1	-1	-1	-1
4	Uno a muchos	Rugoso	-1	-1	-1	1	1
5	Uno a uno	Rugoso	-1	-1	1	-1	1
6	Uno a uno	Liso	1	-1	1	-1	-1
7	Uno a muchos	Rugoso	1	1	-1	1	-1
8	Uno a muchos	Liso	-1	1	1	1	-1
9	Uno a uno	Liso	-1	1	1	-1	1
10	Uno a uno	Liso	-1	1	-1	-1	-1
11	Uno a muchos	Rugoso	-1	1	-1	-1	-1
12	Uno a uno	Rugoso	-1	-1	1	-1	1
13	Uno a muchos	Liso	1	1	1	-1	-1
14	Uno a uno	Liso	-1	-1	-1	1	1
15	Uno a muchos	Rugoso	1	1	1	1	1
16	Uno a muchos	Liso	-1	1	-1	1	1
17	Uno a muchos	Rugoso	1	-1	-1	-1	1
18	Uno a uno	Rugoso	-1	1	1	1	-1
19	Uno a muchos	Liso	1	-1	-1	1	-1
20	Uno a muchos	Liso	-1	1	1	1	-1
21	Uno a uno	Liso	-1	1	1	-1	1
22	Uno a muchos	Rugoso	1	-1	1	-1	-1
23	Uno a uno	Liso	1	-1	1	-1	-1
24	Uno a uno	Rugoso	1	1	-1	-1	1
25	Uno a uno	Rugoso	-1	-1	-1	-1	-1
26	Uno a muchos	Rugoso	-1	-1	-1	1	1
27	Uno a muchos	Rugoso	1	-1	1	-1	-1
28	Uno a muchos	Rugoso	1	-1	-1	-1	1
29	Uno a uno	Rugoso	-1	1	-1	1	1
30	Uno a muchos	Liso	1	-1	-1	1	-1
31	Uno a uno	Rugoso	1	-1	1	1	1
32	Uno a uno	Liso	1	1	1	1	1
33	Uno a muchos	Rugoso	-1	-1	1	1	-1
34	Uno a uno	Rugoso	-1	-1	-1	-1	-1
35	Uno a muchos	Liso	1	1	1	-1	-1
36	Uno a muchos	Liso	-1	-1	1	-1	1
37	Uno a uno	Liso	-1	-1	-1	1	1
38	Uno a muchos	Liso	-1	-1	1	-1	1
39	Uno a muchos	Rugoso	-1	-1	1	1	-1
40	Uno a muchos	Rugoso	-1	1	-1	-1	-1
41	Uno a uno	Liso	1	1	1	1	1
42	Uno a muchos	Liso	-1	1	-1	1	1
43	Uno a muchos	Rugoso	-1	1	1	-1	1
44	Uno a uno	Liso	-1	1	-1	-1	-1
45	Uno a uno	Rugoso	1	-1	-1	1	-1
46	Uno a uno	Liso	1	1	-1	1	-1
47	Uno a muchos	Liso	1	-1	1	1	1
48	Uno a muchos	Rugoso	-1	1	1	-1	1
49	Uno a muchos	Liso	1	1	-1	-1	1
50	Uno a uno	Liso	-1	-1	1	1	-1
51	Uno a muchos	Liso	1	1	-1	-1	1
52	Uno a uno	Rugoso	-1	1	1	1	-1
53	Uno a uno	Rugoso	1	-1	-1	1	-1
54	Uno a muchos	Rugoso	1	1	-1	1	-1
55	Uno a uno	Liso	-1	-1	1	1	-1
56	Uno a muchos	Liso	1	-1	1	1	1
57	Uno a uno	Rugoso	1	1	1	-1	-1
58	Uno a uno	Liso	1	-1	-1	-1	1
59	Uno a muchos	Liso	-1	-1	-1	-1	-1
60	Uno a uno	Liso	1	-1	-1	-1	1
61	Uno a uno	Rugoso	1	1	1	-1	-1
62	Uno a uno	Rugoso	-1	1	-1	1	1
63	Uno a uno	Liso	1	1	-1	1	-1
64	Uno a uno	Rugoso	1	-1	1	1	1

La Tabla 6, Muestra la secuencia en la cual se debe llevar a cabo las corridas experimentales y sus combinaciones ilustrando en los factores cuantitativos

para el nivel mayor = 1 y su valor mínimo = -1, tomando en cuenta la tabla 3. Es importante señalar que todas las corridas deben ser realizadas de forma continua para asegurar la fiabilidad de los resultados desde el punto de vista de diseño de experimentos (estadística).

#### 4. Conclusiones

En general se puede decir que unas de las ventajas de la turbina Tesla es su relativa facilidad de fabricación y bajo costo, ya que es posible maquinarse en un taller/laboratorio de máquinas-herramientas convencionales y de control numérico. Sin embargo, entre más delgada es la lámina del material de los discos se torna más complicada y tardada su manufactura ya que tienden a deformarse y esto en algunas ocasiones generó pérdidas de distintos indoles. De acuerdo a los cálculos del diseño se obtuvieron como solución las medidas geométricas y de operación de la turbina, pero estas tuvieron que ser adaptadas a valores comerciales disponibles de forma que se acercara los más posible a los valores dados.

Dado que el espesor de los discos es delgado se optó por agregar 6 pernos pasados distribuidos de forma equitativa circunferencialmente para evitar la falla mecánica de los prototipos, ya que bajo la operación del rotor a altas revoluciones los discos tienden a estirarse y también a ciertas velocidades de giro el rotor presentó una tendencia a entrar en resonancia. Fuera de esto el comportamiento del banco de pruebas fue bueno, al motor de inducción se le cambiaron los rodamientos por unos de alta eficiencia y velocidad de giro lo que permitió lograr valores mayores en las rpm alcanzadas, ya que como se mostró en la tabla 1, la velocidad de giro de diseño a la que de acuerdo a la teoría se obtiene el máximo rendimiento es 18000 rpm, de lo que de acuerdo al artículo de Rice alcanzo bajo una presión de entrada de 615.3 KPa.

Por otra parte el DOE permitió planificar de una manera eficiente las corridas que se deben realizar para obtener el comportamiento de la turbina como también los resultados de cuáles son los parámetros que tienen mayor impacto en el comportamiento y desempeño de la turbina, de esta manera abriendo un campo para trabajar sobre los mismos para encontrar el camino para incrementar la eficiencia de la turbina Tesla, lo cual es de vital importancia para su aplicación práctica y aprovechar las ventajas que brinda en cuanto a su facilidad de fabricación, escaso mantenimiento y bajo costo por mencionar las más notables, pero para ello debe ser competitiva con sus homologas turbinas convencionales.

#### 5. Agradecimientos

La investigación que se presenta en este documento se llevó a cabo en el laboratorio de manufactura del

Instituto Tecnológico de Chihuahua (ITCH), en conjunto con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), las cuales trabajan en unión por medio de un convenio de colaboración científica.

El primer autor expresa su agradecimiento al personal del laboratorio de Manufactura y su jefe Arq. David Holguín, así también al personal del laboratorio de Ingeniería Eléctrica y su jefe Ing. Manuel Rodríguez, por facilitar todos los medios disponibles en los mismos para el desarrollo de este trabajo.

Los autores expresan su gratitud al Dr. Gabriel Ascanio quien sugirió el uso del análisis mediante el DOE.

También se agradece a las diversas personas que participaron y contribuyeron en el modelado 3D, construcción y prueba de los diversos dispositivos.

Entre ellos se encuentran: A. A. Neri, I. R. Meraz, J. F. Prado, F. Pérez & C. A. Pérez.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por proporcionar una beca doctoral a Humberto Béjar para el desarrollo del proyecto.

#### 6. Referencias

- [1] W. B. Carlson, Tesla. Inventor de la Era Eléctrica, 1st ed. Crítica, México (2015).
- [2] Tesla N. Tesla turbine. 1913. 1061142.
- [3] E. Logan.: Handbook of Turbomachinery. 2nd edn. Marcel Dekker, Inc. New York (2003).
- [4] K. Rusin, W. Wróblewski, S. Rulik. Efficiency optimization of a Tesla turbine. *Energy*, vol. 236, 1-11 (2021).
- [5] A. L. R. Thomazoni et al. Influence of operational parameters on the performance of Tesla turbine experimental Investigation of a small-scale turbine. *Energy*, vol. 261, 1-22 (2022).
- [6] W. Rice. An Analytical and experimental Investigation of multiple-disk turbines. *J Eng Power*, 29-36 (1965).
- [7] G. Mendoza, "Diseño de una Turbina sin Álabes con enfoque de Optimización," Centro Nacional De Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2012.
- [8] A. Guha and B. Smiley: Experiment and Analysis for an Improved Design of the Inlet and Nozzle in Tesla Disc Turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical*, vol. 224, no. 2, 261–277, (2010).
- [9] G. P. Hoya and A. Guha, "The design of a test rig and study of the performance," vol. 223, pp. 451–465, 2008.
- [10] W. Qi, Q. Deng, Y. Jiang, Q. Yuan, and Z. Feng, "Disc thickness and spacing distance impacts on flow characteristics of multichannel tesla turbines," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 1, Jan. 2019.