

# Propuesta de diseño de turbina tipo Turgo y sistema generador eléctrico sustentable de baja potencia

## Design Proposal of Turgo-type turbine and sustainable low power electric generator system

R. L. Palomino-Resendiz <sup>a</sup>, A. Cortés-Perales <sup>b</sup>, R. Gonzalez-Vega <sup>b</sup>, Y. Lozano-Hernández <sup>c</sup>, S. I. Palomino-Resendiz <sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.  
<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería en control y Automatización, Instituto Politécnico Nacional, Unidad ESIME-ZAC, 07738, G.A.M., CDMX, México  
<sup>c</sup> Sección de Estudios y Posgrado e Investigación, Instituto Politécnico Nacional, UPIIH, 42162, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

### Resumen

Este trabajo presenta la propuesta de diseño de un sistema generador eléctrico sustentable de baja potencia. Esto, a través de la conversión de energía hidráulica que se obtiene de transferir el total de recolección de agua pluvial (proveniente de lluvia) de contenedores localizados en el techo de viviendas/edificios a contenedores de almacenamiento. Por lo tanto, se busca entregar una alternativa sustentable respecto a métodos convencionales alimentados directa e indirectamente por combustibles fósiles. La propuesta se compone de dos elementos principales: 1.- Sistema de cosecha de agua, y 2.- Sistema de conversión de energía hidráulica a eléctrica. Para validar y caracterizar las capacidades de producción del sistema, se empleó una metodología experimental que consta de pruebas de producción utilizando una plataforma experimental equivalente (con condiciones controladas). También, se describe el proceso de modelado matemático, diseño y propuesta de instrumentación. Finalmente, de los resultados obtenidos se brinda un breve análisis y conclusiones.

**Palabras Clave:** Energía eléctrica, energía renovable, turbina Turgo, cosecha de agua de lluvia, generador de baja potencia.

### Abstract

This paper presents the design proposal for a sustainable low-power electrical generator system. This, through the conversion of hydraulic energy obtained from transferring the total collection of rainwater (from rain) from containers located on the roof of homes/buildings to storage containers. Therefore, it seeks to provide a sustainable alternative to conventional methods fed directly and indirectly by fossil fuels. The proposal is made up of two main elements: 1.- Water harvesting system, and 2.- Hydraulic to electric energy conversion system. To validate and characterize the production capabilities of the system, an experimental methodology consisting of production tests using an equivalent experimental platform (with controlled conditions) was used. Also, the process of mathematical modeling, design and instrumentation proposal is described. Finally, a brief analysis and conclusions are provided from the results obtained.

**Keywords:** Electric power, renewable energy, Turgo turbine, rainwater harvesting, low power generator.

## 1. Introducción

En las últimas décadas se ha presentado un consumo desmedido de energía eléctrica en el mundo. Esto, como resultado del crecimiento exponencial de la población, así como el de sus necesidades. Por lo tanto, recurrir a métodos alternativos para producir energía denominada limpia o renovable ha tomado gran relevancia, ya que permite disminuir los efectos negativos de métodos tradicionales basados en el uso de combustibles fósiles, tales como: contaminación,

desgaste de recursos no renovables, cambio climático por efecto invernadero, entre otros. Inclusive, derivado de los beneficios que la energía limpia propone, la Agencia Internacional de Energía (IEA) proyecta que la demanda de energía limpia aumentará a nivel mundial cerca del 3.7% entre el año 2007 al 2030 (Tyagi, 2016). Entre las alternativas de energías limpias disponibles se tienen ejemplos como: hidroeléctrica, solar, eólica, biocombustible, entre otras. Es así como la energía hidroeléctrica logra posicionarse como una de las mejores, debido a su alto rendimiento y eficiencia de

\*Autor para la correspondencia: spalominor@ipn.mx

**Correo electrónico:** roberto\_palomino@uaeh.edu.mx (R. L. Palomino-Resendiz), acortesp1300@alumno.ipn.mx (A. Cortés-Perales), rgonzalezv1202@alumno.ipn.mx (R. Gonzalez-Vega), ylozanoh@ipn.mx (Y. Lozano-Hernández), spalominor@ipn.mx (S. I. Palomino-Resendiz)

producción. Por ejemplo, en México en 2016 la energía hidroeléctrica representó el 48% del total de la generación de energía anual en materia de energías limpias, esto de acuerdo con la PRODESEN (Palacios, 2017). Sin embargo, lo anterior se limita y enfoca en sistemas de capacidad de producción industrial, por lo que sistemas de producción de menor escala (con aplicaciones simples como iluminación u otros) cuentan con una carencia de desarrollo tecnológico, y a su vez un rezago en su implementación. No obstante, en los últimos años los avances tecnológicos principalmente hablando de la miniaturización de la electrónica y de los sistemas de almacenamiento de energía han permitido generar nuevas configuraciones a las formas ya existentes. Esto, bajo el concepto de “Cosecha de energía”, que se refiere a capturar, almacenar y transformar en fuentes útiles las pequeñas y permanentes cantidades de energía existentes en el entorno. En ese sentido, la energía se presenta como el resultado del desarrollo y funcionamiento de otros sistemas, por ejemplo: la energía mecánica que produce un fluido al transitar una tubería, la energía electromagnética por ondas de radio u otras redes de comunicación, la energía humana que se expresa de forma mecánica o térmica al realizar acciones como caminar, entre otras (Energy Harvesting, 2012). Cabe mencionar, que el concepto de cosecha también puede aplicarse y/o encontrarse ligado al desarrollo de otras actividades sustentables (como es el caso de captación de agua de lluvia). Por consiguiente, puede existir el caso de cosecha de energía durante el desarrollo de procesos sustentables aumentando los beneficios. Por ejemplo, en (Rodríguez, 2013) se propone la cosecha de aguas pluviales en techos empleando tanques comunes de 1000 litros de capacidad que cuentan con tuberías de desfogue verticales (de 6 metros de altura o más). En este trabajo, las tuberías se conectan a una turbina tipo Pelton a escala y lograr producir hasta 137 [W] en cada vaciado de cada tanque. Por otra parte, en (UAM, 2019) se plantea el diseño de una vivienda sustentable en la que sus beneficios derivan del cosechar agua para utilizarla en diversas tareas, entre las que pondera cosechar energía mediante el uso de microturbinas. Es importante mencionar que en ambos casos la cosecha de energía es baja y limitada, prácticamente se dirige a una vivienda en la que sus posibles aplicaciones impliquen iluminación con sistemas de bajo consumo. Es por ello que, en este trabajo, se pretende desarrollar un sistema capaz de integrarse de forma general a más viviendas para lograr producir una mayor cantidad de energía ampliando la gama de aplicaciones. Una forma de lograrlo es utilizar zonas en las que la cosecha de agua sea algo cotidiano. Por ejemplo, en la Ciudad de México (CDMX) la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) publicó recientemente una convocatoria denominada “Cosecha de Lluvia” (CLL) (SEDEMA, 2021) que pretende solucionar los problemas de escasez de agua de ciertas zonas bajo recolección y almacenamiento de agua de lluvia. De esta forma, se considera que los participantes contarán en sus viviendas con condiciones similares respecto al contenedor de almacenamiento (colocado en el techo del inmueble) y su transporte (por tubería) a la red general de abastecimiento u otro contenedor (como cisterna) se puede establecer que el problema se centra en el diseño de una turbina y la selección de un generador que homologue y aumente las capacidades de producción en cada vivienda.

El resto del trabajo se presenta de la siguiente manera: La sección II proporciona una descripción del Sistema de cosecha

de agua (SCA). La sección III muestra el diseño y desarrollo de la propuesta del Sistema de conversión de energía hidráulica a eléctrica (SCEHE). Adicionalmente, también se establece la selección del Sistema de producción de energía eléctrica. La sección IV presenta la implementación e integración de la instrumentación de los sistemas en un entorno de simulación. Luego, en la sección V se explica el procedimiento experimental empleado para validar el sistema obtenido. Finalmente, se presenta un análisis de los resultados obtenidos y se brindan las conclusiones.

## 2. Preliminares

En la Figura 1 se presenta un esquema del SCA con las características generales que establece el programa CLL (para mayor detalle ver (SEDEMA, 2021)). Aquí, la cosecha se da mediante una superficie de captación instalada en el techo de la vivienda. Luego, la cosecha se deposita por gravedad en un contenedor tipo cisterna mientras se realiza un tratamiento de limpieza.

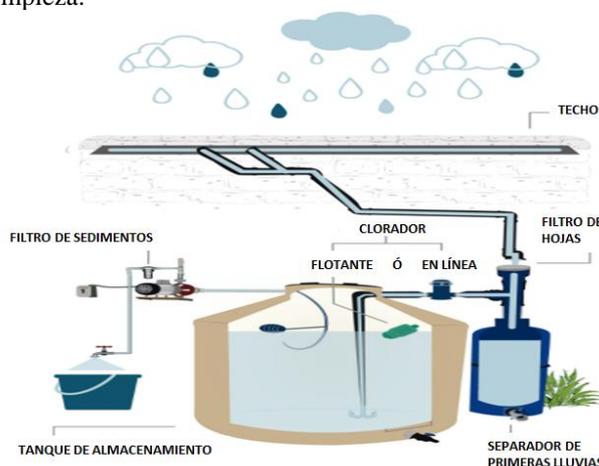


Figura 1: Esquema generalizado SCA (SEDEMA, 2021).

Por otra parte, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) establece que en la CDMX entre los meses de mayo y octubre se tiene el periodo con mayor presencia de lluvia con un valor promedio de 70 [mm] mensuales en pluviosidad (cantidad de agua que puede acumularse por cada [m<sup>2</sup>]) (CONAGUA, 2021). Cabe mencionar que cada [mm] equivale a 1 litro de agua. Las bases del programa establecen que su enfoque se dirige a colonias con condiciones limitadas. Por lo tanto, aunque toda su población puede ser beneficiada para este trabajo deben excluirse viviendas que no cuenten con las condiciones para instalar los equipos. Así, la proyección del SGESEBP (Sistema Generador Eléctrico de Baja Potencia) se realiza sobre un SCA que sea instalado en una vivienda con una infraestructura mínima promedio de 45 [m<sup>2</sup>] de superficie, o bien 5.5 x 8 [m] de forma perimetral. Lo anterior, de acuerdo con el Instituto Nacional de la Vivienda (INVI) de la CDMX (INVI, 2021). Ahora, considerando, que los techos en su mayoría son irregulares, para fines prácticos solo se considera 50% de la superficie mencionada, es decir, 22.5 [m<sup>2</sup>] que son equivalentes a cosechar hasta 1575 litros en un mes. Cabe mencionar, que el valor de pluviosidad no puede asociarse a un lapso específico de obtención por cada día de lluvia, pues, dicho valor es el promedio del comportamiento de toda la temporada (que se interpreta como días con lluvia nula

o moderada, o de lluvias torrenciales). Entonces, para fines operativos el SCA se supone debe ser diseñado con la capacidad de almacenamiento de lo cosechado, y poder transferirlo cuando se encuentre lleno. Esto, por ejemplo, bajo la asistencia de una superficie que dirija la cosecha a un nuevo tanque auxiliar (TA) con dimensiones comerciales, ver Figura 2.

Así, el SCA en cada proceso de vaciado contará con las mismas condiciones de operación. En la Figura 2 se muestra el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) del sistema de cosecha de agua y el sistema generador eléctrico.

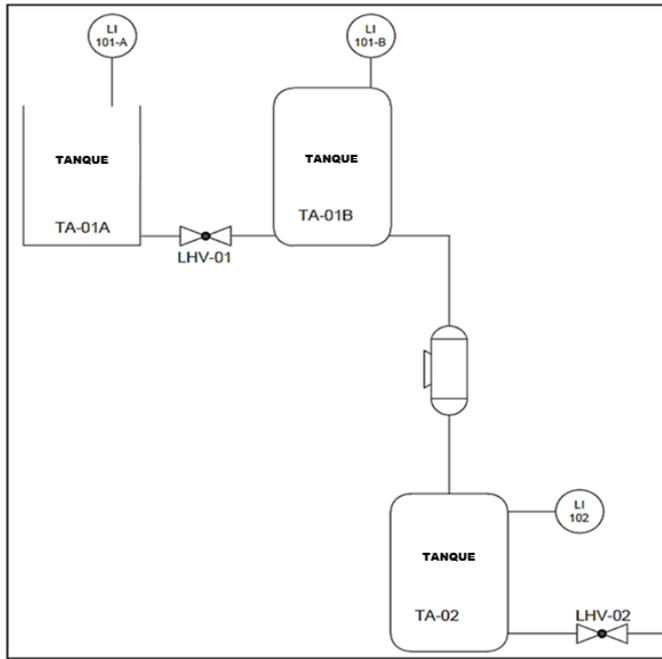


Figura 2. DTI del SCA con sistema auxiliar de almacenamiento.

El Tanque abierto TA-01A será el área de captación pluvial. El tanque TA-01B representa el tanque auxiliar al que llegará el agua captada para su filtrado y distribución. El tanque TA-02 representa el tanque de almacenamiento de fácil acceso situado en la parte baja de la vivienda. A su vez, se propone el uso de dos válvulas manuales para permitir el paso del agua entre el área de captación y el TA (LHV-01), y a la salida del tanque de fácil acceso (LHV-02). Por último, se propone utilizar 3 indicadores de nivel para los tanques, con la finalidad de que el usuario pueda conocer el nivel de agua que existe en cada sección del sistema propuesto.

Entonces, si la altura promedio de una vivienda es de 2.3 [m] (INVI, 2021), bajo la asistencia del principio de Bernoulli (1) se puede obtener la dinámica del caudal durante el desfogue de SCA de la forma:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho gh_2 \quad (1)$$

donde:  $P_1=P_2= 1$  [atm] representan la presión atmosférica,  $\rho=1000$  [kg/m<sup>3</sup>] que es la densidad del fluido,  $g = 9.81$  [m/s<sup>2</sup>] es la gravedad,  $h_1= 1.3$  [m], que es la altura total del TA,  $h_2= 0$  que es altura de referencia a la salida del tanque,  $V =$  velocidad del fluido en el punto 1 y 2 ( $V_1=0$  y  $V_2$ , respectivamente).

Así, despejando la velocidad de vaciado del tanque ( $V_2$ ) de (1), y sustituyendo valores, se tiene que  $V_2 = 0.05$  [m/s]. Por

otra parte, dado que se considera que el agua transita por una tubería de Cloruro de Polivinilo (PVC, por su siglas en inglés) de 1" (o bien, con área transversal  $a= 0.0005067$  [m<sup>2</sup>]). Se tiene el flujo como  $Q = V_2 a = 0.00255$  [m<sup>3</sup>/s].

### 3. Diseño y desarrollo del SCEHE

Para el SCEHE, de acuerdo con el procedimiento de (Mohaded, 2018) se realizó un análisis vectorial para la construcción de la turbina. El cual permite obtener la velocidad, dirección y sentido del choque del agua respecto a las cucharas o álabes de la turbina. Esto, en función de los datos previamente obtenidos, así como de datos asociados al inmueble (todos concentrados en la Tabla 1).

Tabla 1: Valores propuestos para el diseño de la turbina Turgo.

Parámetro	Valor
Flujo	$Q = 0.00255$ [m <sup>3</sup> /s]
Altura	$H = 2.3$ [m] (n)
Gravedad	$g = 9.81$ [m/s <sup>2</sup> ]
Densidad del agua	$\rho = 1000$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Eficiencia Propuesta	$E = 85\%$
Potencia	$P_t = 0.15$ [kW]
Potencia útil	$P_u = 0.1275$ [kW]

Donde, las n representa el número de niveles o plantas en una casa. De acuerdo a (INVI, 2021) los hogares promedio tienen 2 plantas, por lo que para fines de este trabajo los cálculos posteriores se desarrollan con  $n=2$  y  $H=4.6$  [m].

Del análisis, se obtienen dimensiones de la turbina, y a su vez se logra determinar el valor de los siguientes parámetros:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi z K_c \sqrt{2gH}}} = 0.01877 \text{ [m]} \cong 19 \text{ [mm]}$$

$$Q_N = \frac{V_1 \pi d_0^2}{4} = 0.00252 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$N = \frac{n_s (H)^{\frac{5}{4}}}{(Pa)^{\frac{1}{2}}} = 396.05 \text{ [RPM]}$$

$$D = \frac{60U}{\pi N} = 0.2436 \text{ [m]} = 24.36 \text{ [cm]}$$

donde:  $d_0$ =Diámetro del chorro,  $z$ = cantidad de chorros= $1$ ,  $K_c$ =Coeficiente de velocidad a la salida del inyector,  $V_1$ = Velocidad Absoluta de entrada,  $Q_N$ =Caudal Nominal Necesario,  $N$ =Número de Revoluciones,  $n_s$ =Número específico de Revoluciones,  $Pa$ = Potencia,  $D$ =Diámetro del Rodete,  $U$ = Velocidad Tangencial del álabe.

Con los datos obtenidos y basados en la Tabla (2), se obtienen los valores de las dimensiones de los alabes (que conservan una geometría como la que se muestra en la Figura 3).

Tabla 2.- Parámetros de diseño para alabes (Mohaded, 2018).

Parámetro	Relación	Valor
B	$1.5d_0$	28.15 [mm]
L	$2.5 < L < 2.8d_0$	49.74 [mm]
D	$0.8d_0$	15.016 [mm]
f	$1.25d_0$	23.46 [mm]
$\beta_1$	Directa	30[°]
M	$1.2d_0$	22.52 [mm]

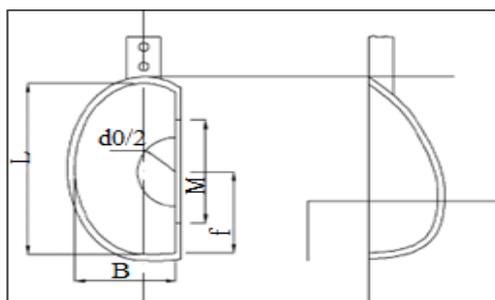


Figura 3: Forma generalizada de álabe.

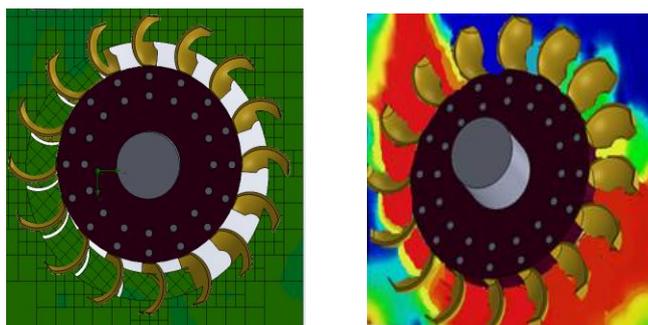


Figura 6: Simulación de flujo impactando álabes de turbina.

### 3.1. Entorno de simulación

Con los valores obtenidos para las dimensiones de la turbina y alabes, se procedió a la realización del modelado y construcción de la turbina en el entorno de simulación de SolidWorks® (ver Figuras 4 y 5, respectivamente).

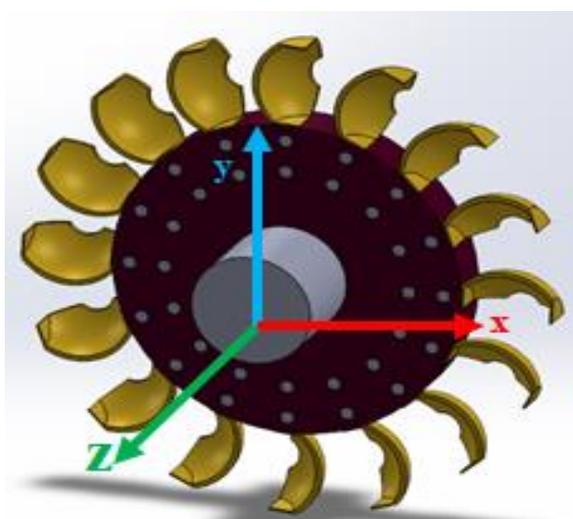


Figura 4: Turbina tipo Turgo en entorno de simulación.

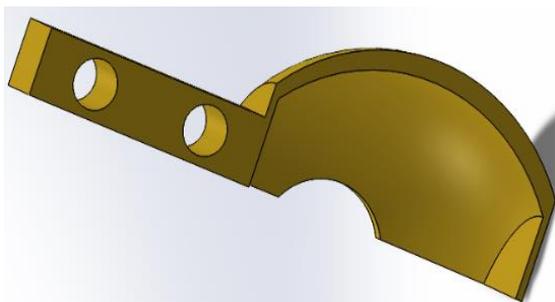


Figura 5: Álabe de turbina Turgo en entorno de simulación.

Es importante mencionar, que para validar la propuesta de diseño de la turbina, se realizó un procedimiento experimental en el propio entorno de simulación (asistidos de la herramienta *Flow Simulation*). El procedimiento consta de impactar los alabes con la corriente de un fluido de tal forma que se garantice su capacidad de giro (ver Figura 6). Lo anterior, ante una configuración del entorno de simulación utilizando los valores de los parámetros con los que se diseñó la turbina.

De forma adicional al cumplimiento del objetivo de giro, se obtuvo que durante la variación del flujo (considerando su correspondencia con el vaciado del tanque) la turbina registro valores que van de 1000 a 300 RPM.

### 3.2. Selección del generador

Considerando que la naturaleza de operación del SCEHE es tipo pasivo, y a su vez que el objetivo de este trabajo se centra en los beneficios de la cosecha de agua y energía, también se propone que el generador a utilizar conserve un criterio de selección basado en una filosofía similar. Por lo tanto, se establece que el generador a emplear sea un motor (genérico modelo C9058-60072) de CD (corriente directa) que puede ser recuperado de cualquier impresora convencional en campañas de reciclaje.

## 4. Integración de sistemas

En términos generales en la Figura 7 se presenta la integración del SCA, la turbina y el generador. Es importante mencionar que las orientaciones de la turbina, se asocia a disposición genérica que puede cambiar conforme a la arquitectura del inmueble. Además, lo anterior también puede influir en el número de turbinas que pueden colocarse a lo largo de la tubería, por lo que, por el momento solo se considera una por cada domicilio beneficiado con el programa del sistema de cosecha de lluvia.

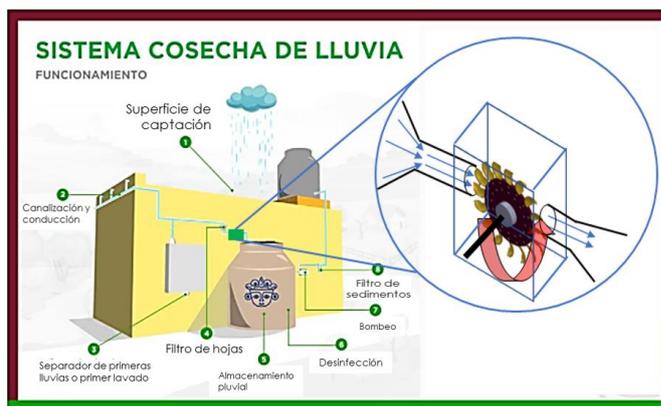


Figura 7: Diagrama generalizado del SCEHE.

## 5. Validación de la propuesta

Debido a que el sistema propuesto requiere de la infraestructura e instrumentación que se muestra en términos generales en la Figura 7, se propuso una metodología experimental que permite caracterizar la capacidad de producción del generador. Esto, empleando una plataforma que permite emular las condiciones obtenidas en el entorno de simulación. La plataforma consiste de dos motores unidos por un cople de manera concéntrica respecto a sus flechas. Donde,

uno de los motores (asistido de un sistema de control de velocidad) reproduce las condiciones de RPM que desempeñaría la turbina durante el vaciado del tanque, y el otro siendo el generador se instrumentó para realizar la medición de producción de energía. Cabe mencionar que las emulaciones de las condiciones de vaciado del tanque se dividieron en 3 casos: tanque lleno, tanque con 2/3 de capacidad y tanque con 1/3 de capacidad, que en promedio cuentan con un desempeño de 1000, 570, y 360 RPM, respectivamente. Lo anterior, por lapsos aproximados de 3 minutos. En la Figura 8, se muestra la plataforma, y a su vez los elementos que la componen.

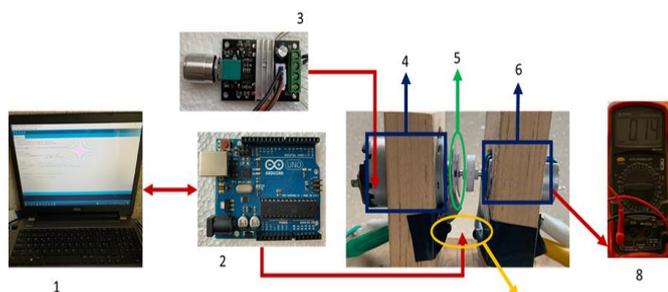


Figura 8: Configuración de la plataforma de pruebas.

En la Figura, los índices representan lo siguiente: 1. Computadora corriendo el programa en la plataforma Arduino. 2. Microcontrolador ATmega 328. 3. Circuito PWM YOSOO0614. 4. Motor MITSUMI M28N-1 de 24V DC. 5. Hélices del motor que cortarán la señal del sensor IR. 6. Motor-generador MOT-050 Steren de 5V DC. 7. Sensor de luz infrarroja (emisor IR333C y receptor PT331C). 8. Multímetro UT55 Steren, para las mediciones de corriente y tensión.

De forma adicional a las pruebas de producción, también se realizaron pruebas para las mismas condiciones con la inclusión de perturbaciones (mediante la obstrucción de la transmisión del giro en el cople, por un lapso de 20 segundos). Esto, con el objetivo de caracterizar la capacidad de producción del sistema ante condiciones que en la realidad representarían bajas de velocidad en la turbina por presencia de sedimentos, tierra, u otros objetos en las tuberías, o bien causadas por factores externos al sistema. Por otra parte, el control de velocidad y sentido de giro del motor se realizó mediante un circuito integrado externo de tipo Modulador de Ancho de Pulso (o bien PWM, por sus siglas en inglés) que se asiste de un controlador de tipo proporcional, ya que únicamente modifica el ancho de pulso del motor tratando de llegar al punto de referencia (de RPM) establecido en cada caso. La ley de control se gobierna bajo la siguiente ecuación:

$$u = K_p e(t)$$

con  $u$  = la señal de control,  $K_p$  = la ganancia proporcional y  $e(t)$  = error.

En la Figura 9 se muestra el desempeño de la ley de control para los objetivos de velocidad (de arriba hacia abajo: 360 RPM, 570 RPM y 1000 RPM).

Puede notarse en términos generales, que el desempeño del controlador es bueno, pues alcanza el objetivo de velocidad en cada caso. Esto, debido a que el ajuste de la ganancia  $K_p$  se asocia directamente con el porcentaje de la señal de salida que el módulo de PWM envía al motor. Además, ya que la resolución del dispositivo de procesamiento, así como la sensibilidad del sensor son limitados, es evidente que se tiene un error permanente promedio de  $\pm 20$  [RPM] (que según el

caso representa el  $\pm 5\%$ ,  $\pm 3.5\%$  y  $\pm 2\%$ , respectivamente). Sin embargo, lo anterior para los fines de este trabajo no limita los siguientes desarrollos ya que esas variaciones podrían considerarse como equivalentes a la dinámica propia del fluido mientras transita por la tubería.

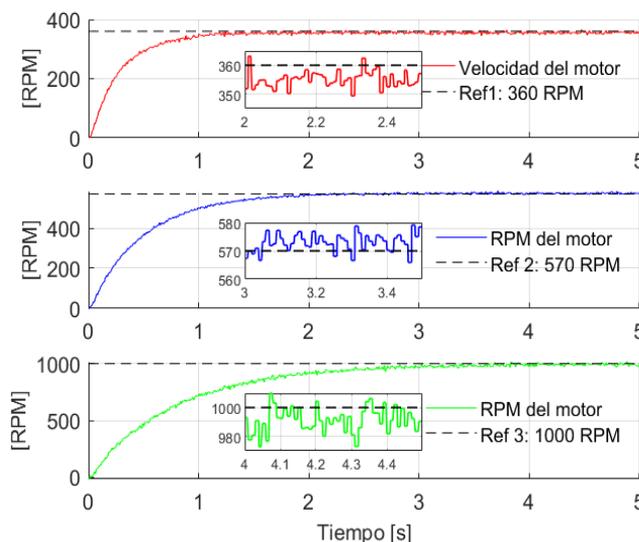


Figura 9. Desempeño del controlador velocidad para diferentes objetivos de RPM.

### 5.1. Resultados

En las Figuras 9 y 10 se presentan los resultados de producción para cada caso, respectivamente.

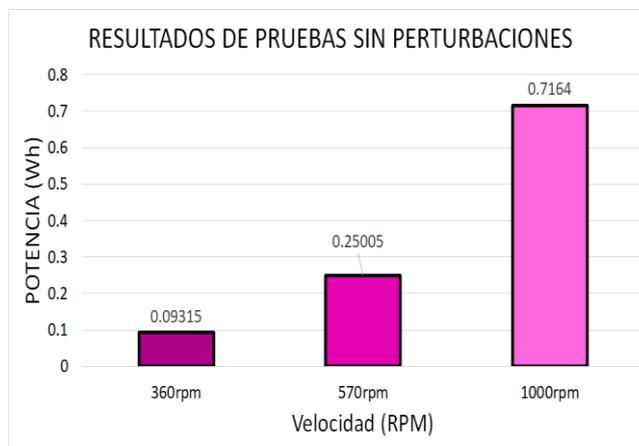


Figura 10. Potencia acumulada en pruebas sin perturbaciones.

### 5.2. Análisis de resultados y discusión

De las Figuras 10 y 11, puede notarse que el caso sin perturbaciones ofrece en promedio un total de producción de 1.05 [Wh] y con perturbaciones de 0.88 [Wh]. Es decir, un 18 por ciento menor. Donde, si bien dicho valor depende directamente del tipo de perturbación. También, permite ver que el sistema logra producir cierta cantidad de energía a pesar de que su lapso de operación sea reducido.

En ambos casos, es evidente que el proceso de cosecha es lento, y poco significativo si se trata de un solo generador, así como para su implementación en un solo tanque. Sin embargo, debe recordarse que el objetivo de esta propuesta es complementar el programa de cosecha de agua, mismo que en caso de escalar a toda la población de la Ciudad de México,

podría beneficiar aproximadamente a 2.7 millones de domicilios particulares con los que cuenta (esto, de acuerdo al último censo de 2020 (INVI, 2021)). De esta forma, tener un sistema pasivo en espera de las condiciones de operación, podría ofrecer una producción significativa que logre remplazar de forma parcial y/o temporal (al menos durante la temporada de lluvia) las fuentes de producción convencionales, e inclusive sistemas basados en el aprovechamiento de energías limpias. Es decir, si bien la energía solar está disponible todos los días del año, en realidad su periodo funcional es durante el día, e implica contar con instrumentación especializada dirigida solamente al cumplimiento de esos fines. Por lo que, tener un sistema que lograr operar de forma paralela al cumplimiento de un objetivo principal que es captación de agua, brinda mayores beneficios.

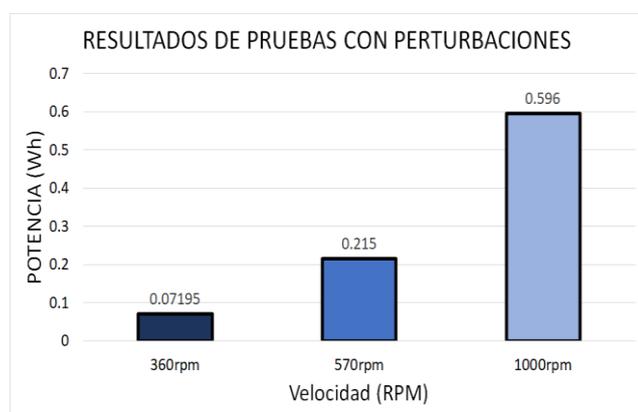


Figura 11. Potencia acumulada en pruebas con perturbaciones

Por otra parte, es importante mencionar que de acuerdo a las bases del programa se establece que el beneficiado solamente realiza el pago del 50% del costo total de instalación. Es decir, pagaría un valor promedio de \$3425.25 pesos (esto, considerando la información contenida en la Tabla 3 que se asocia a los requerimientos mínimos para la cosecha de agua) más el costo del de producción de la turbina, pues el generador al considerarse como un dispositivo de reciclaje no implica un aumento. Entonces, para fines inmediatos de este trabajo se consideró que el material de fabricación sea Poliacido Láctico (PLA) que de acuerdo a la cotización con (IMPRESIÓN 3D, 2022) tendría un costo unitario de \$15 pesos. Es decir, el aumento es poco significativo a la inversión original del programa.

## 6. Conclusiones

Se logró el diseño del prototipo de una turbina tipo Turgo con fines de generación de energía eléctrica que es compatible con las bases del programa de cosecha de agua publicada por SEDEMA. Es decir, si bien el objetivo de este trabajo se enfoca en el diseño de un generador de baja potencia, no se pierde de vista que el objetivo del programa se enfoca en resolver el problema de desabastecimiento de agua mediante la integración de tanques de captación en domicilios. Por lo que, la integración del generador no debe modificar sustancialmente el tanque y/o tuberías que pueden disponerse. Así, la propuesta se presenta como una alternativa viable y sustentable, ya que adicionalmente el generador a utilizar

puede provenir de la recuperación de motores de impresoras a través de otros programas de reciclaje.

Tabla 3: Costos del sistema de captación

Costos del sistema de captación				
Elemento	Descripción de actividad a realizar	Número de piezas usadas	Costo (MXN)	Subtotal
Tanque abierto 1500L	Captación del agua pluvial en el techo de la vivienda	1	\$ 953.70	\$ 953.70
Tanque de almacenamiento de 1100L	Tanque Auxiliar después del filtrado y tanque de almacenamiento de fácil acceso	2	\$ 820.40	\$ 1,640.80
Flotador para tinaco de plástico	Indicador de nivel en los tanques de captación, TA, y de fácil acceso	3	\$ 96.00	\$ 288.00
Válvula manual de bola	Permitir o impedir el paso del agua entre los 2 primeros tanques y al final del sistema	2	\$ 280.00	\$ 560.00
Tubo de PVC 1" (3m c/t)	Tubería para canalización y transporte del agua captada	3	\$ 337.00	\$ 1,011.00
Filtro de agua	Separador de primeras lluvias, filtro de hojas y de sedimentos	3	\$ 799.00	\$ 2,397.00
<b>Total</b>				<b>\$ 6,850.50</b>

Como trabajo a futuro, se propone la construcción física de la turbina, así como de un entorno similar al propuesto para probarse en condiciones reales. Lo anterior, también implica un análisis más exhaustivo en la selección de los materiales y procesos de fabricación de la turbina, la integración con el generador, la instrumentación y aislamiento del generador, el diseño del acoplamiento entre el generador, tubería y turbina, entre otras cosas. También, debido a que las condiciones de los sistemas (de forma individual y/o en conjunto) pueden disponer nuevas dinámicas, se propone el diseño e implementación de leyes de control más sofisticadas, mismas que garanticen condiciones de operación y robustez ante perturbaciones provocadas por la propia operación.

Adicionalmente, como una etapa en paralelo al desarrollo de la turbina también se propone definir el sistema involucrado en la etapa de cosecha de energía, en la que pueden aplicarse arreglos como los que presenta (DIGIKEY, 2022), así como el sistema a emplear para garantizar el suministro de la energía producida hacia la red eléctrica local.

## Referencias

- CONAGUA. (última consulta, 2021). Precipitación acumulada mensual. Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- Energy Harvesting. (2012). (última consulta, 2021). Energy Harvesting Electronic Solutions For Wireless Sensor Networks & Control Systems. Energy Harvesting Forum. <https://www.energyharvesting.net/>
- Instituto Nacional de Vivienda. INVI (última consulta, 2021). <https://www.invi.cdmx.gob.mx/>
- Mohaded, M. G. (2018). (última consulta, 2021). Diseño de una micro turbina Turgo. Universidad Nacional de Córdoba. <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/11414/PS%20MARTIN%20MOHADED.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Palacios Fonseca, A. A. (2017). (última consulta, 2021). Bases para un Centro Mexicano en Innovación de Energía Hidroeléctrica (1.a ed ed., Vol. 1). <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros/Potencial-Hidroelectrico-Mexico-1era-Parte.pdf>
- Rodríguez, S. S. (2013). (última consulta, 2021). Diseño de una Pequeña Central Hidroeléctrica a escala laboratorio utilizando aguas de lluvias del bloque A de la Universidad Libre, Sede Bosque Popular. [Tesis de Licenciatura Universidad Libre Colombia].

- SEDEMA. (última consulta, 2021, Abril 03). Cosecha de Lluvia. SEDEMA. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/servicios/servicio/programa-de-sistemas-de-captacion-de-agua-de-lluvia-en-viviendas-de-la-ciudad-de-mexico>
- Tyagi, V. V. (2016). (última consulta, 2021). Renewable energy scenario in Indian context: Vision and achievements. In 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016) (pp. 1-8). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8278646>
- Universidad Autónoma Metropolitana. (2019, Mayo 7). (última consulta, 2021). PLANTEA INVESTIGADORA SISTEMA GENERADOR DE ENERGÍA A PARTIR DE AGUA DE LLUVIA. Boletines UAM. <http://www.comunicacionsocial.uam.mx/boletinesuam/123-19.html>
- IMPRESIÓN 3D, PRECIOS POR IMPRESIÓN 3d ([impresora3dmexico.com.mx](http://impresora3dmexico.com.mx)) (última consulta, 25 de mayo de 2022)
- DIGIKEY Conversión de potencia baja para recolección de energía | DigiKey <https://www.digikey.com.mx/es/articles/low-power-conversion-for-energy-harvesting> (última consulta, 25 de mayo de 2022)
- CONAGUA.- Comisión Nacional del Agua.
- DTI.- Diagrama de Tuberías e Instrumentación.
- IEA.- International Energy Agency, por sus siglas en inglés o Agencia Internacional de Energía.
- INVI.- Instituto Nacional de la Vivienda.
- PRODESEN.- Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional.
- PVC.- Polyvinyl chloride, por sus siglas en inglés o Cloruro de Polivinilo.
- PWM.- Pulse Width Modulation, por sus siglas en inglés o Modulador de Ancho de Pulso.
- RPM.- Revoluciones Por Minuto.
- SCA.- Sistema de cosecha de agua.
- SCEHE.- Sistema de conversión de energía hidráulica a eléctrica.
- SEDEMA.- Secretaría del Medio Ambiente.
- SGESBP.- Sistema Generador Eléctrico de Baja Potencia.
- TA.- Tanque Auxiliar.

## Apéndice A. Abreviaciones y Acrónimos

CLL.- Cosecha de Lluvia.