



**Universidad Autónoma del Estado de
México**

**Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica**



**“Prototipo de nano turbina para la generación de energía eléctrica a
partir de la captación de lluvia en zonas urbanas”**

TESIS

Para obtener el título de Ingeniero Mecánico

Presenta:

Miguel Ángel Zamora Juárez

Director de tesis:

Dr. en C.A. Carlos Roberto Fonseca Ortiz

Toluca, México, Febrero de 2017

Dedicatorias

A Dios, mi apoyo espiritual durante la realización de este proyecto.

A mi familia quienes me han brindado amor, apoyo y consejos para poder llevar a cabo mis sueños.

Al Dr. Carlos Fonseca quien ha sido un gran maestro y un buen amigo.

A mis amigos con quienes compartí muchas experiencias.

Contenido

Índice de figuras.....	2
Índice de tablas.....	3
Anexos.....	4
Simbología y nomenclatura	5
1. Introducción.....	7
1.1. Planteamiento del problema	8
1.2. Hipótesis.....	9
1.3. Objetivos	9
2. Marco teórico.....	10
2.1. Turbinas hidráulicas	10
2.2. Sistemas de cosecha de lluvia	15
2.3. Análisis de la precipitación.....	18
2.4. Tipos de generadores eléctricos	21
2.5. Parámetros de dimensionamiento de una turbina.....	23
2.6. Manufactura de la turbina	26
3. Metodología.....	28
4. Zona de estudio.....	40
5. Resultados.....	43
5.1. Definición de condiciones máximas y mínimas de operación	43
5.2. Diseño de la turbina	45
5.3. Manufactura de la turbina	48
5.4. Evaluación del sistema	50
5.5. Alcances y sugerencias.....	57
6. Conclusiones	59
Referencias.....	61
Anexos.....	65

Índice de figuras

Figura 2.1. Esquema general de una turbomáquina en operación	10
Figura 2.2. Clasificación de turbinas hidráulicas	11
Figura 2.3. Ejemplos de turbinas de impulso y reacción.	11
Figura 2.4. Diagrama de turbinas y sus regímenes de operación	12
Figura 2.5. Rangos típicos de eficiencia de turbinas Pelton, Francis y Kaplan.....	13
Figura 2.6. Polígonos de velocidades de una turbomáquina	14
Figura 2.7. Esquema general de un sistema de cosecha de lluvia	15
Figura 2.8. Esquema general de una nano central hidroeléctrica combinada con un sistema de cosecha de lluvia.....	16
Figura 2.9. Área bajo la curva $Px_1 < x < x_2$ en una función de distribución de probabilidad normal...	20
Figura 2.10 Función de densidad de probabilidad Gamma	21
Figura 2.11 Diagramas de generadores eléctricos: a) C.A. y b) C.D.	22
Figura 2.12 Generadores eléctricos comerciales.....	23
Figura 3.1. Diagrama de flujo del desarrollo de una nano central hidroeléctrica.	28
Figura 3.2 Diagrama de flujo del proceso de conteo de duración de eventos d_j	31
Figura 3.3 Diagrama de flujo del proceso de iteración para estimar el diámetro del chorro d_{jet}	33
Figura 3.4 Diagrama de la entrada del flujo a un cucharón de una turbina Pelton.....	34
Figura 3.5 Esquema básico de características geométricas de un cucharón.....	35
Figura 3.6 Esquema general del perfil de la turbina	36
Figura 3.7 Diagrama de separación de cucharones	36
Figura 3.8 Esquema general para monitoreo de voltaje y rpm	38
Figura 4.1 Distribución temporal y espacial de la precipitación media en el CARL.....	40
Figura 4.2 Distribución de la población en 2010 en el CARL.....	41
Figura 4.3 Croquis de ubicación del CIRA/UAEMex	42
Figura 5.1 Secuencia de reducción en la tubería.	46
Figura 5.2 Construcción de la turbina mediante impresión tridimensional.	48
Figura 5.3 Modelo ensamblado.	49
Figura 5.4 Correlación entre eficiencia η , voltaje generado V_{gen} , gasto Q y RPM.	54
Figura 5.5 Correlación entre eficiencia y tiempo de recuperación.....	56

Índice de tablas

Tabla 2.1 Factores de pérdidas locales	17
Tabla 2.2 Elementos principales de la geometría de turbinas Pelton, Kaplan y Francis	25
Tabla 2.3. Especificaciones de materiales usados en impresoras 3D	26
Tabla 3.1 Características de operación para distintos tipos de turbinas.....	29
Tabla 4.1 Lámina diaria media e intervalos de precipitación en cada mes del año	41
Tabla 5.1 Valores estadísticos T_s y T_k de test de normalidad para lámina de precipitación en el periodo 2013-2015.	44
Tabla 5.2 Valores estadísticos T_s y T_k de test de normalidad para duración de eventos en el periodo 2013-2015.	44
Tabla 5.3 Lámina de precipitación, duración de eventos y caudales esperados para el caso de estudio. .	45
Tabla 5.4 Factores de pérdida por reducción de área.	46
Tabla 5.5 Resultados obtenidos del proceso de estimación del diámetro del chorro <i>djet</i>	47
Tabla 5.6 Características geométricas adicionales de la turbina.	47
Tabla 5.7 Datos obtenidos de pruebas del sistema con caudal controlado.	50
Tabla 5.8 Desempeño de la turbina bajo condiciones controladas.	51
Tabla 5.9 Datos obtenidos durante un periodo de 30 días.....	52
Tabla 5.10 Desempeño de la turbina bajo condiciones reales de precipitación.	52
Tabla 5.11 Estimación de carga hidráulica neta en el sistema.	53
Tabla 5.12 Estimación de energía unitaria en el sistema.....	55
Tabla 5.13 Beneficio económico esperado.	56
Tabla 5.14 Alcances del sistema de generación de energía eléctrica mediante la cosecha de lluvia.	57

Anexos

Anexo 1. Diagrama universal de Moody	65
Anexo 2. Registros de lámina de precipitación diaria del mes de Septiembre 2016 (Estación 0994200-Calixtlahuaca, ESIME - México)	66
Anexo 3. Láminas acumuladas de precipitación y duraciones asociadas a partir de registros en la Estación 0994200-Calixtlahuaca, ESIME - México).....	67
Anexo 4. Planos de manufactura	79

Simbología y nomenclatura

Nombre	Descripción	Unidades
\vec{A}	Área de la sección transversal del fluido	m^2
A_c	Área de captación	m^2
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno	-
CAD	Diseño Asistido por Computadora	-
CARL	Curso Alto del Río Lerma	-
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua	-
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua	-
D	Diámetro de tubería	m
d_j	Duración de eventos	min
d_{jet}	Diámetro de chorro	m
E_u	Energía unitaria	$J/mm \cdot m$
f	Factor de fricción de superficie	-
g	Constante de gravitación universal	m/s^2
H_T	Carga hidráulica neta	m
H_E	Carga hidráulica efectiva	m
h_f	Pérdidas de energía por fricción	m
h_l	Pérdidas locales	m
$I_{almacen}$	Capacidad de almacenamiento eléctrico	Ah
I_{gen}	Corriente eléctrica generada	A
K	Coefficiente de pérdidas locales	-
L	Distancia entre secciones	m
l	Longitud entre puntos	m
L_{bucket}	Ancho de cucharón	m
L_{paso}	Longitud de paso	m
P	Potencia	W
PLA	Acido Poli Láctico	-
PVC	Poli cloruro de Vinilo	-
Q	Caudal	m^3/s
\vec{r}	Radio del eje	m
rpm	Revoluciones por minuto	-
$r_{externo}$	Radio externo de turbina	m
r_{rodete}	Radio de rodete	m
$r_{turbina}$	Radio de turbina	m
Re	Número de Reynolds	-
SMN	Servicio Meteorológico Nacional	-

\vec{T}	Torque	$N \cdot m$
T_e	Tarifa eléctrica	$\$/Wh$
T_{minimo}	Torque mínimo de generador	$N \cdot m$
T_s	Coefficiente de asimetría	-
T_k	Coefficiente de curtosis	-
t	Tiempo	s
t_{carga}	Tiempo de carga	s
\vec{U}	Velocidad del roto	m/s
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de México	-
V	Velocidad del fluido	m/s
\vec{V}	Velocidad absoluta	m/s
\vec{V}_r	Velocidad relativa	m/s
V_{gen}	Voltaje generado	V
\dot{W}_{gen}	Potencia de generador	W
\dot{W}_t	Potencia teórica	W
\dot{W}_{turbina}	Potencia de turbina	W
\bar{x}	Media	-
$x_{\text{acum } j}$	Lámina de precipitación media por evento	mm
x_i	Lámina de precipitación acumulada	mm
z	Carga por posición	m
α_{forma}	Parámetro de forma	-
β_{escala}	Parámetro de escala	-
β_2	Angulo de dirección de cucharón	$^\circ$
δ	Angulo de separación	$^\circ$
Ω_{sp}	Velocidad específica	rad/s
η_t	Eficiencia de turbina	-
η_{gen}	Eficiencia de generador	-
ρ	Densidad	kg/m^3
σ	Desviación estándar	-
θ_{bucket}	Angulo de separación de cucharón	$^\circ$
\forall	Volumen de control del fluido	m^3
ω	Velocidad angular	rad/s

1. Introducción

El presente trabajo busca definir un sistema que permita transformar la energía mecánica proveniente de la captación de lluvia en zonas urbanas en energía eléctrica y destinarla a la instalación del inmueble que cuente con este sistema.

Las razones que motivaron la elección de este tema consistieron básicamente en tres. Primero, la generación de conocimiento, al contar con muy pocos antecedentes de trabajos con características similares, se espera que este proyecto innove dentro del campo energético. En segundo lugar, la propuesta de un sistema sustentable que permita generar energía eléctrica y mitigar los impactos negativos al ambiente en su operación. Y en tercer lugar, la propuesta de utilizar nuevos métodos de manufactura para elementos de esta índole.

De acuerdo con la CONAGUA (2014, p. 29), la lámina media de precipitación anual en México durante el periodo de 1971- 2000 fue de 760 milímetros. Aunado a que en el país el 56.9% de la población reside en zonas urbanas (CONAGUA, 2014, p. 15), la aplicación de captación de lluvia tiene el potencial para convertirse en un medio útil de generación de energía.

Dicho lo anterior, destaca como objetivo principal de este proyecto; diseñar y construir un prototipo de turbina para la generación de energía eléctrica a partir de la captación de agua de lluvia en zonas urbanas. Para ello, son necesarios la definición de condiciones máximas y mínimas de operación, la selección de materiales para la construcción de la turbina, el diseño y construcción de la turbina y la medición de energía eléctrica producida bajo diferentes condiciones.

Es importante mencionar que como zona de estudio, es considerada la zona urbana del Valle de Toluca, Estado de México.

1.1. Planteamiento del problema

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía (Secretaría de Energía, 2013, p. 23), en 2012 el consumo de electricidad *per cápita* se incrementó 1.8% en relación con el año anterior, al ubicarse en 1,997.44 KWh *per capita*. Esto fue resultado de un crecimiento más acelerado del consumo de energía eléctrica (3.0%) comparado con el de la población nacional (1.2%). La quema de combustibles fósiles es el principal medio de energía primaria. En el caso de los derivados de petróleo, represento el 65.2% de producción de energía en el país. Sin embargo, en contraste con el incremento de consumo eléctrico, la generación de las hidroeléctricas disminuyó 12.2%, derivado de los escasos niveles de precipitación en 2012 y la consecuente disminución en el nivel de agua en los vasos de almacenamiento en las presas (Secretaria de Energía, 2013, p. 24).

Es evidente que la generación de “energía limpia” se ha vuelto un tema de interés común en la actualidad, el uso de una nano central hidroeléctrica ha llamada la atención como un medio para generar energía eléctrica debido a la facilidad de instalación comparada con una estación hidroeléctrica tradicional (Ikeda *et al.* 2010). Sin embargo, la captación de agua de lluvia en zonas urbanas no es considerada como una alternativa real para la generación de energía eléctrica. Esto se demuestra por la falta de dispositivos que aprovechen la captación de agua de lluvia, escasa cantidad de estudios o análisis que sugieran la aplicación de sistemas semejantes, metodologías que propongan como diseñar e incluso el desconocimiento de la generación de potencial que podrían lograr estos sistemas.

De acuerdo con Mataix (1986), las centrales hidroeléctricas se clasifican según la potencia generada, siendo las centrales de gran potencia la primera categoría (con una producción mayor a 10 MW), seguido de las centrales de potencia media (con una producción de potencia entre 1 MW y 9.9 MW), en tercer lugar se encuentran las centrales de pequeña potencia (con producción entre 100 y 999 kW) y finalmente las micro centrales (con una producción máxima de 99 kW). Es por ello, que para la producción de potencias generadas menores en propuesta una sub-clasificación como nano centrales hidroeléctricas.

El presente proyecto tiene como propósito diseñar y construir una turbina para ser utilizada en nano-centrales impulsadas por la captación de agua de lluvia. Para ello, se evaluará la factibilidad de utilizar este tipo de sistemas en zonas urbanas.

Adicionalmente, en el contexto de este proyecto deben ser considerados factores adicionales de diseño como: cargas hidráulicas pequeñas, intermitencia en el flujo (obligando a que el sistema trabaje por impulsos), la resistencia del material seleccionado, volumen estimado de agua pluvial cosechada, entre otros.

1.2. Hipótesis

El diseño y construcción de una nano turbina permitirá la generación de energía eléctrica a partir de la cosecha de lluvia en zonas urbanas.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y construir un prototipo de turbina para la generación de energía eléctrica a partir de la captación de agua de lluvia en zonas urbanas.

Los objetivos específicos serán los siguientes:

1. Definir las condiciones máximas y mínimas de operación, de acuerdo con las condiciones climatológicas encontradas en la zona de estudio.
2. Seleccionar un generador eléctrico que transforme la energía mecánica del agua en eléctrica.
3. Diseñar y construir un prototipo de turbina.
4. Evaluar la energía eléctrica producida bajo diferentes condiciones de operación.

2. Marco teórico

2.1. Turbinas hidráulicas

Una turbina hidráulica es un dispositivo que extrae la energía de un fluido en forma de trabajo y puede estar formada por aspas, álabes o cucharones (también conocidos como *buckets*) que se encuentran adheridas fijamente a un eje llamado rodete, rotor o *runner* (White, 1998, p. 742). La figura 2.1 muestra la estructura general de una instalación que opera con una turbina hidráulica como elemento principal.

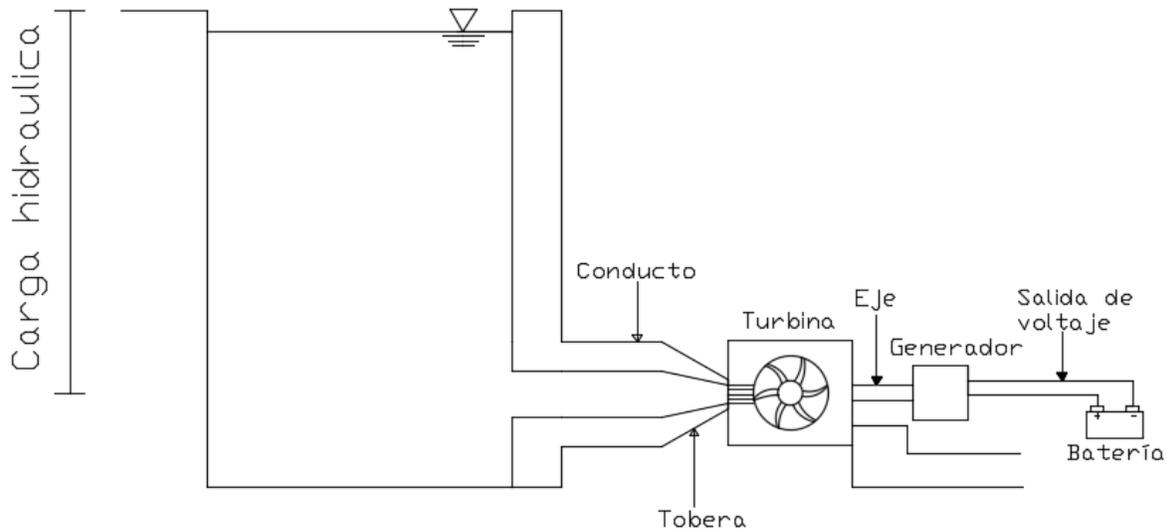


Figura 2.1. Esquema general de una turbomáquina en operación (Giafa, 2014).

Según Potter y Wiggert (2002), existen dos grupos de turbinas: de reacción y de impulso (figura 2.1). Las turbinas de acción o turbinas de impulso (figura 2.2a) operan principalmente con flujo tangencial, son impulsadas por unos o varios chorros de agua a alta velocidad (acelerados por una boquilla externa) que chocan contra los álabes (White, 1998, p. 742). Las turbinas de reacción, en cambio, pueden operar con flujo diagonal (figura 2.2b) y flujo axial (figura 2.2c), debido a que parte del cambio de presión en el flujo tiene lugar antes de la entrada a la turbina y parte tiene lugar en los álabes (Fox, *et al.*, 2002, p. 490)

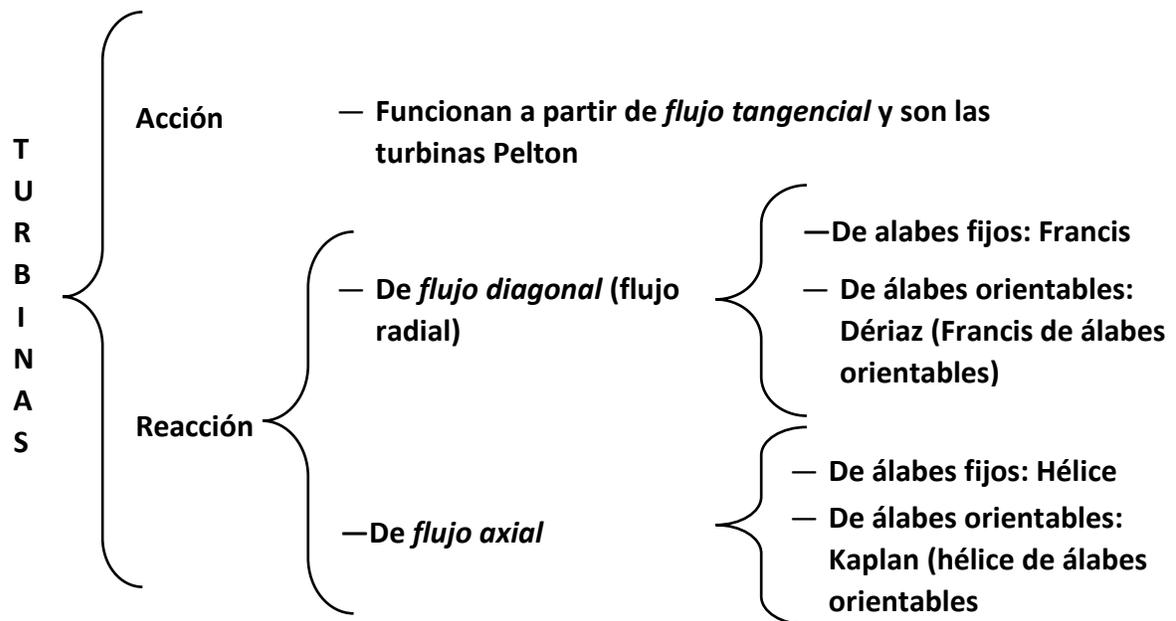


Figura 2.2. Clasificación de turbinas hidráulicas (Mataix, 1986, p. 463).

a. Turbina Pelton (Your Hydro Ltd, 2015)



b. Turbina Francis (Exatecno, 2016)



c. Turbina Kaplan (Orengine International Ltd, 2016)



Figura 2.3. Ejemplos de turbinas de impulso y reacción.

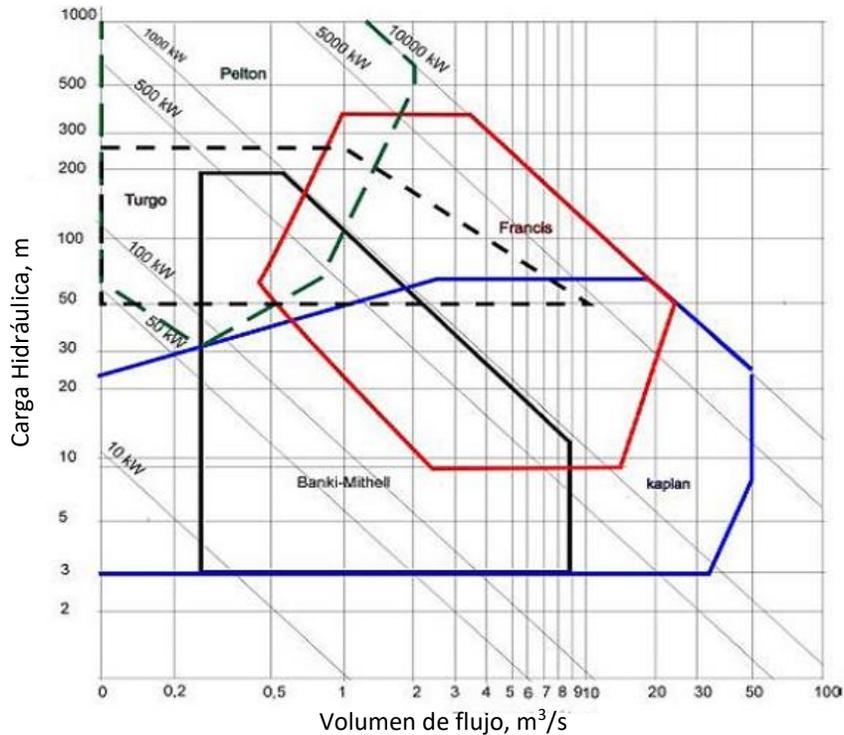


Figura 2.4. Diagrama de turbinas y sus regímenes de operación (Hydro Power, 2016)

La selección del tipo de turbina está definida en parte por las condiciones de operación como la carga hidráulica y el gasto. El diagrama de turbinas y regímenes de operación (figura 2.4) muestra las diferentes condiciones a las que puede operar cada turbina con mayor eficiencia. Por ejemplo, se puede observar que la turbina Pelton es más adecuada cuando la carga hidráulica es alta y el volumen de flujo es pequeño. Mientras que la turbina Kaplan trabaja usualmente con cargas hidráulicas bajas pero con volúmenes de flujo más grandes, en comparación de Pelton.

Por otro lado, la velocidad específica Ω_{sp} (rad/s) es útil para evaluar el desempeño de una turbina (Dixon, 2005, p. 293). La velocidad específica (ecuación 2.1) es una función de la potencia P entregada por el eje (W), la carga hidráulica efectiva en la turbina H_E (m), la densidad del fluido ρ (kg/m^3), la velocidad angular ω (rad/s) y la constante de gravitación universal g (m/s^2). Un valor bajo de velocidad específica corresponde a un bajo volumen de flujo y altas cargas hidráulicas, mientras que un valor alto indica un alto volumen de flujo y pequeñas cargas hidráulicas (Dixon, 2005, p. 293). Por ejemplo, las turbinas Pelton, Kaplan y Francis pueden alcanzar valores de eficiencia de hasta 0.9, 0.94 y 0.96 con velocidades específicas de 0.1, 3.0 y 1.5 rad . respectivamente (Figura 2.5).

$$\Omega_{sp} = \frac{\omega \sqrt{P/\rho}}{(g H_E)^{5/4}} \quad (2.1)$$

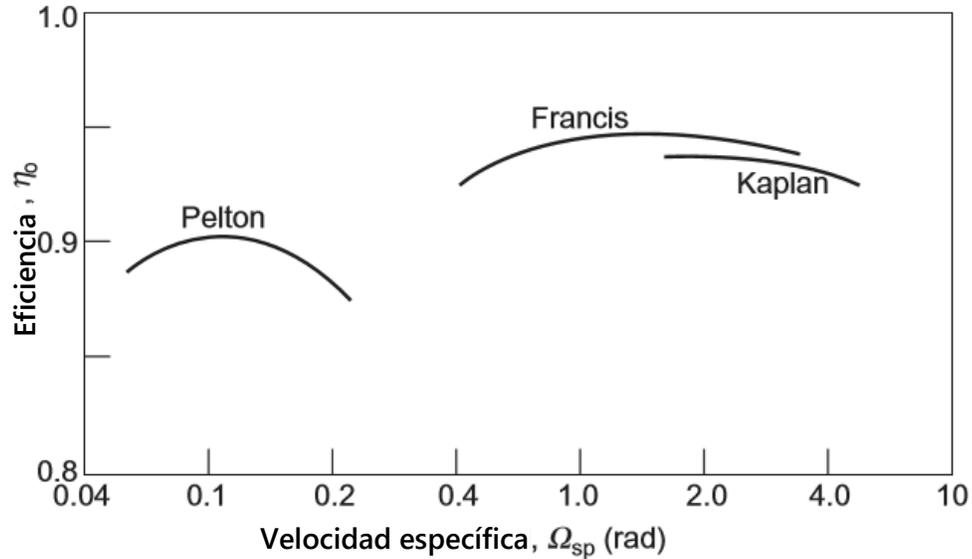


Figura 2.5. Rangos típicos de eficiencia de turbinas Pelton, Francis y Kaplan (Dixon. 2005, p. 292)

Mientras que la potencia suministrada por el fluido a la turbina o potencia teórica \dot{W}_t es estimada mediante la ecuación 2.2 (Potter and Wiggert, 2002, p. 560); donde H_T es la carga hidráulica en el sistema (m), ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), Q es el caudal suministrado al sistema (m^3/s) y g es la constante de gravitación universal (m/s^2).

$$\dot{W}_t = \rho_{agua} \cdot g \cdot H_T \cdot Q \quad (2.2)$$

El trabajo realizado por el fluido sobre la turbina y siguiendo el principio de conservación de movimiento angular, es estimado con la ecuación 2.3 donde \vec{T} es el torque total del eje ($N \cdot m$), ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), \vec{r} es el radio del eje (m), \vec{V} es la velocidad del fluido (m/s), \forall es el volumen de control del fluido (m^3) y \vec{A} es el área de la sección transversal del fluido (m^2). La ecuación 2.3 estima el momento resultante de las fuerzas de superficie (fricción y presión) y de cuerpo (gravedad) producido por un cambio del momento angular del fluido (Fox. *et. al.*, 2002, p. 491).

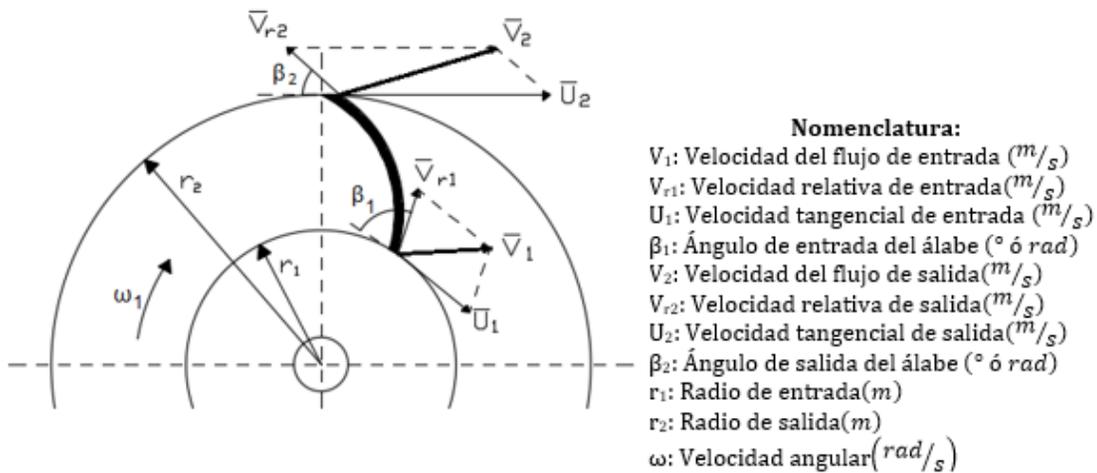
$$\vec{T} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho(\vec{r} \times \vec{V}) \partial \forall + \int_{SC} \rho(\vec{r} \times \vec{V})(\vec{V} \cdot \partial \vec{A}) \quad (2.3)$$

La velocidad absoluta \vec{V} en el sistema es la suma de la velocidad relativa \vec{V}_r del fluido y la velocidad del rotor \vec{U} . La figura 2.6a muestra el polígono de velocidades formado en una turbina que gira en torno a un solo eje.

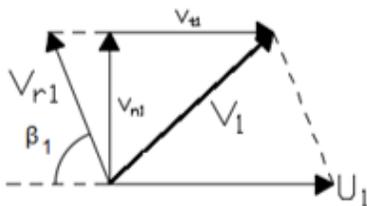
En este caso, el fluido atraviesa por su sección transversal con una velocidad igual a la relativa permitiendo establecer la relación $\vec{V} \cdot \partial\vec{A} = \partial\vec{Q}$. Mientras que las componentes tangenciales de \vec{V} en la entrada y la salida del flujo (figura 2.6b y 2.6c) son las generadoras del trabajo. Por lo tanto, el torque generado en este sistema para un flujo considerado permanente en un intervalo de tiempo Δt , es estimado a través de la ecuación 2.4.

$$\vec{T} = \int \rho(\vec{r} \times \vec{V})(\vec{V} \cdot \partial\vec{A}) \quad (2.4)$$

a. Polígonos de velocidades de entrada y salida en una turbomáquina.



b. Polígono de velocidad de entrada



c) Polígono de velocidad de salida.

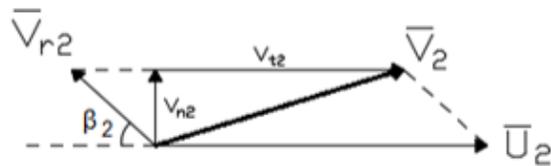


Figura 2.6. Polígonos de velocidades de una turbomáquina (Fox. *et. al.*, 2002, p. 494)

El producto del torque generado \vec{T} y la velocidad angular ω representa la potencia generada \dot{W}_p . De esta manera la eficiencia de la turbina η_t puede ser estimada como el cociente de la potencia producida $\dot{W}_{turbina}$ y la potencia teórica \dot{W}_t (W) (ecuación 2.5; Potter y Wiggert, 2002, p. 560).

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{W}_t} = \frac{\vec{T} \omega}{\rho g Q H_T} \quad (2.5)$$

2.2. Sistemas de cosecha de lluvia

La cosecha o captación de agua de lluvia es definida como la recolección y manejo de la caída o escurrimiento de agua para incrementar la disponibilidad de ésta para usos domésticos y de agricultura, así como del sustento ambiental (Mekdaschi, *et. al.*, 2013, p.4). La cosecha de lluvia ha sido una alternativa atractiva en los últimos años debido al aumento de demanda por parte de la población y la disminución de distribución de agua limpia (Thomas, *et. al.*, 2014, p. 166).

Según Li *et al.* (2010) los sistemas de cosecha de lluvia se componen principalmente de tres elementos (Figura 2.7):

- **Captador o área de captación:** Este elemento debe ser poco permeable y evitar la contaminación del agua de lluvia. Los techos de construcciones son los tipos de captadores más comunes utilizados para la cosecha de lluvia. El material de construcción y la efectividad del área de captación influyen directamente en la eficiencia de la captación y calidad del agua.
- **Sistema de conducción:** Usualmente consisten en una red de tuberías y bajadas que dirigen el agua recolectada por el captador al tanque de almacenamiento. La red debe de estar diseñada de acuerdo con el rango de descarga de agua que se espera captar. Esta parte puede incluir elementos de limpieza que mejoren la calidad de agua que se deposita en el tanque de almacenamiento.
- **Tanque de almacenamiento:** En esta parte se almacena toda el agua captada y normalmente es el componente más costoso del sistema. El tanque debe ser capaz de almacenar toda el agua que se espera recolectar en un periodo de tiempo dado.

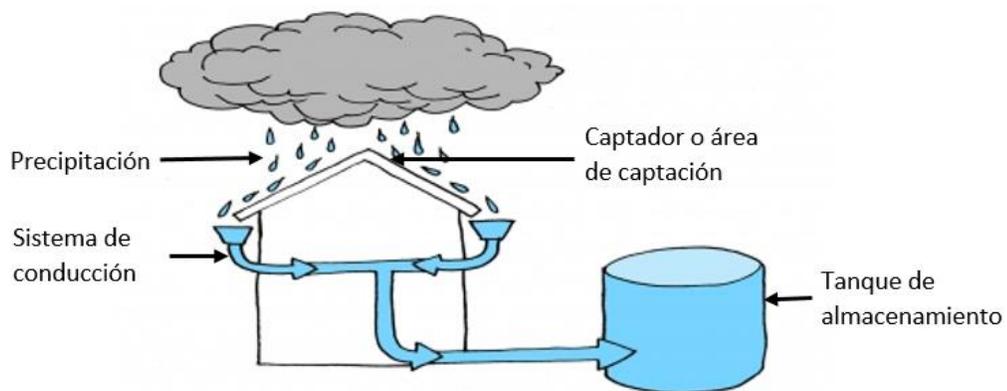


Figura 2.7. Esquema general de un sistema de cosecha de lluvia (Autodesk Sustainability Workshop, 2015)

De esta manera, la configuración de una nano central hidroeléctrica implementada en un sistema de cosecha de lluvia puede ser observada en el esquema de la figura 2.8. En este caso la carga hidráulica H_T [m] (ecuación 2.6) para una vena líquida está conformada por las cargas por posición z [m], presión $\frac{P}{\rho g}$ [m], velocidad $\frac{V^2}{2g}$ [m], las pérdidas de energía interna por fricción h_f [m] y las pérdidas locales h_l [m] (Sotelo, 2002, p. 121-127).

$$H_T = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V_i^2}{2g} - \sum h_f - \sum h_l \quad (2.6)$$

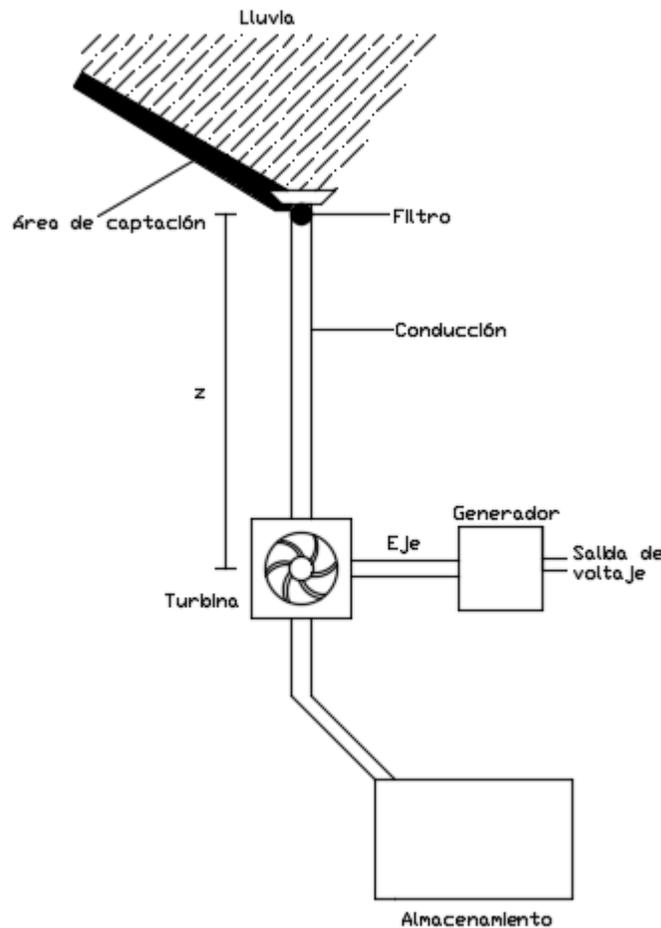


Figura 2.8. Esquema general de una nano central hidroeléctrica combinada con un sistema de cosecha de lluvia. Elaboración propia con información de Giafa (2014) y Autodesk Sustainability Workshop (2015).

Para estimar las pérdidas de energía por fricción en una vena líquida es posible utilizar la ecuación de Darcy-Weibach (ecuación 2.7) y de continuidad (ecuación 2.8),

donde f es el factor de fricción de la superficie, determinado por el diagrama de Moody (Anexo 1), L es la distancia entre secciones [m], D es el diámetro de la tubería [m], V es la velocidad del fluido a través de la sección [m/s] y g es la constante de gravitación universal [m/s^2] (Fox y McDonald, 1995, p. 116, 384).

$$\sum h_f = \sum_i^n \frac{f_i L_i V_i^2}{D_i 2g} \quad (2.7)$$

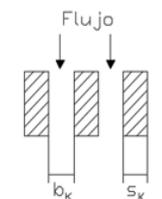
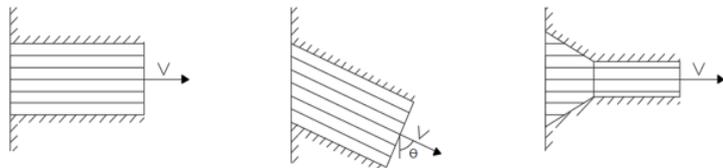
$$V_i = \frac{V_2 A_2}{A_i} \quad (2.8)$$

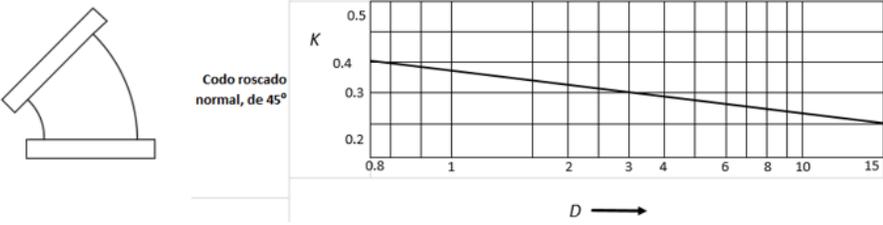
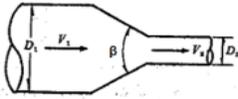
De manera análoga, las pérdidas locales de energía pueden ser estimadas mediante la ecuación 2.9 (Sotelo, 2002, p. 296), donde K es el coeficiente de pérdidas locales que depende del tipo y tamaño de la obstrucción (tabla 2.1).

$$\sum h_l = \sum_j^m K_j \frac{V_j^2}{2g} \quad (2.9)$$

Las pérdidas locales de energía que pueden presentarse son debido al cambio de geometría en la sección y de los distintos dispositivos para controlar el flujo y que se expresa como una fracción de la carga de velocidad (Sotelo, 2002, p. 297). Algunas pérdidas, están definidas por pérdidas locales de carga, de reducción y pérdidas por cambio de dirección.

Tabla 2.1 Factores de pérdidas locales

Tipo de pérdida	Esquema
Pérdida por rejilla protectora	<p>Forma: </p> <p>$C_f =$ 2.42 1.83 1.67 1.03 0.92 0.76 1.79</p> <p>Flujo </p> <p>$K_{rejilla} = C_f \left(\frac{s_K}{b_K} \right)^{\frac{4}{3}}$</p>
Pérdida por tipo de entrada	 <p>$K = 0.3$ $K = 0.5 + 0.3 \cos \theta + 0.2 \cos^2 \theta$ $K = 0.15 \text{ a } 0.25$</p>

Tipo de pérdida	Esquema																												
Pérdida por cambio de dirección	 <p data-bbox="721 359 813 394">Codo roscado normal, de 45°</p> <p data-bbox="581 533 711 562">$r = \pm 10\%$</p>																												
Pérdida por tipo de entrada	<p data-bbox="493 604 1016 632">Supeditado por el ángulo β de acuerdo con la tabla de Kisieliev.</p> <table border="1" data-bbox="521 653 1352 741"> <thead> <tr> <th>β</th> <th>4 a 5°</th> <th>7°</th> <th>10°</th> <th>15°</th> <th>20°</th> <th>25°</th> <th>30°</th> <th>35°</th> <th>40°</th> <th>45°</th> <th>60°</th> <th>75°</th> <th>80°</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K</td> <td>0.060 0.005</td> <td>0.16</td> <td>0.16</td> <td>0.18</td> <td>0.2</td> <td>0.22</td> <td>0.24</td> <td>0.26</td> <td>0.28</td> <td>0.3</td> <td>0.32</td> <td>0.34</td> <td>0.35</td> </tr> </tbody> </table> 	β	4 a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°	K	0.060 0.005	0.16	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.35
β	4 a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°																
K	0.060 0.005	0.16	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.35																

Elaboración propia con información de Sotelo (2002).

2.3. Análisis de la precipitación

La estimación del volumen de agua que fluye por un sistema de cosecha de lluvia depende principalmente de la intensidad de lluvia (mm/min), la duración (min), área de captación (m^2) y pendiente (JICA, 2015, p. 7). La lluvia se mide por la altura o lámina (mm) que alcanzaría el agua sobre una superficie plana y horizontal ideal, antes de sufrir pérdidas (Bustamante y Sanz García, 2006, p. II-48).

En la práctica, debido a la complejidad de los procesos hidrometeorológicos, es muy complicado pronosticar la ocurrencia y magnitud de los caudales utilizando las leyes físicas que rigen dichos procesos o en otras palabras, por medio de métodos determinísticos. Por lo tanto funciones de distribución de probabilidad son estimadas a partir de muestras de datos observados y un análisis estadístico posterior. Una función de este tipo, puede poseer una o varias variables aleatorias y al aplicar un valor particular de dichas variables se obtiene una estimación; asegurando que las estimaciones sean lo más cercanas posibles a los valores reales. (Cârsteanu *et al.*, 2006, p. II-111).

La función de distribución de probabilidad normal es usualmente utilizada para representar láminas de precipitación (Rao y Hamed, 2000). Sin embargo, es posible utilizar un test de normalidad para verificar esta asociación (Llamas, 1989, p. 197). Uno de los test de normalidad evalúa los coeficientes de asimetría T_s (ecuación 2.10) y de curtosis T_k (ecuación 2.11). Estos coeficientes dependen del tamaño N de la muestra y

los términos b_1 (ecuación 2.12) y b_2 (ecuación 2.13), las cuales son funciones de los datos x_i y su media \bar{x} .

$$T_s = \pm \sqrt{\frac{b_1(N+1)(N+3)}{6(N-2)}} \approx \pm \sqrt{\frac{Nb_1}{6}} \quad (2.10)$$

$$T_k = \left(b_2 - 3 + \frac{6}{N+1}\right) \sqrt{\frac{(N+1)^2(N+3)(N+5)}{24N(N-2)(N-3)}} = (b_2 - 3) \sqrt{\frac{N}{24}} \quad (2.11)$$

$$b_1 = \frac{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3\right]^2}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2\right]^3} \quad (2.12)$$

$$b_2 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2\right]^2} \quad (2.13)$$

La hipótesis de normalidad es rechazada si la relación del test (ecuación 2.14) no se cumple.

$$|T_s| \text{ o } |T_k| > \phi\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.14)$$

Siendo ϕ la función normal estandarizada y α el nivel de significación. Para una seguridad de 90%, $\alpha/2$ es igual con 0.05 y $\phi\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$ igual con 1.64 (Llamas, 1989, p. 164).

La distribución normal o distribución de Gauss es un modelo estadístico que permite describir adecuadamente diversos fenómenos, tales como experimentos meteorológicos, mediciones de lluvias, mediciones de piezas fabricadas, etc. (Walpole *et al.*, 1999, p. 147). Esta distribución está representada por una curva con forma de campana que se denomina curva normal y la media \bar{x} de una variable aleatoria puede tener cualquier valor en el intervalo $(-\infty, \infty)$.

Si x es una variable aleatoria con media \bar{x} y desviación estándar σ , su función de densidad de probabilidad está dada por la ecuación 2.15 (Navidi, 2006, p. 231).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{1}{2}\right)\left[\frac{(x-\bar{x})}{\sigma}\right]^2} \quad (2.15)$$

Dada una función de densidad de probabilidad, a cada nivel de confianza representado por un sub-intervalo de $[0,1]$, posicionado convenientemente sobre el eje de la función, le corresponde por la función un intervalo de confianza sobre el eje de la variable (cuantil) (Cărsteanu *et al.*, 2006, p. II-111). Para cuyo caso, la curva de cualquier función de densidad se construye de modo que el área bajo la curva limitada por dos ordenadas (cuantiles) x_1 y x_2 es igual a la probabilidad de que la variable aleatoria x tome un valor entre $x = x_1$ y $x = x_2$ (Walpole *et al.*, 1999, p. 147), como lo muestra la figura 2.9.

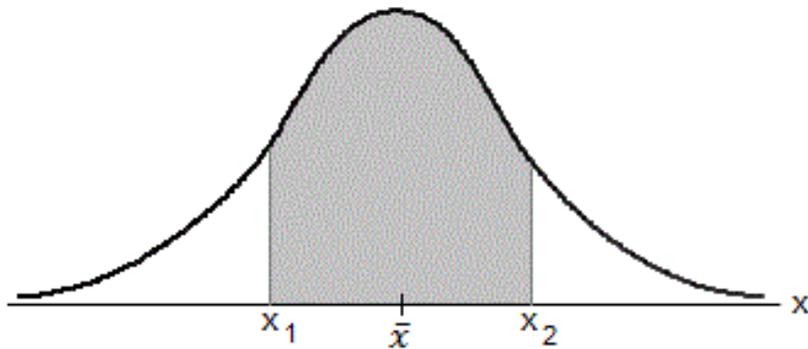


Figura 2.9. Área bajo la curva $P(x_1 < x < x_2)$ en una función de distribución de probabilidad normal. Elaboración propia con información de Oocities (2009).

En casos donde la muestra es rechazada por el test de normalidad, se puede emplear la distribución de densidad de probabilidad Gamma que se expresa mediante la ecuación 2.16, la cual maneja dos parámetros α_{forma} , llamado parámetro de forma, y β_{escala} , llamado de escala. El vínculo de estos parámetros con la media \bar{x} y la desviación estándar σ son, respectivamente, las relaciones (Escalante y Reyes, 2005): \bar{x}^2 / σ^2 y σ^2 / \bar{x} . A valores mayores de α_{forma} resultan en menos sesgo (para valores entre 50 y 100 se aproxima a la distribución normal en forma; figura 2.10) mientras que el papel del parámetro de escala β_{escala} es alargar o estrechar la función gamma a la derecha o a la izquierda. Lo particular de esta función es su dependencia de la función gamma que permite extender el concepto de producto factorial a números que trasciendan del conjunto de los naturales y está definido por la ecuación 2.17 con n como número arbitrario y t la variable de integración (Fonseca, 2014, p. 36).

$$f(x) = \frac{x^{\alpha_{forma}} e^{-\frac{x}{\beta_{escala}}}}{\beta_{escala}^{\alpha_{forma}+1} \Gamma(\alpha_{forma} + 1)} \quad (2.16)$$

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} t^{n-1} e^{-t} \partial t \quad (2.17)$$

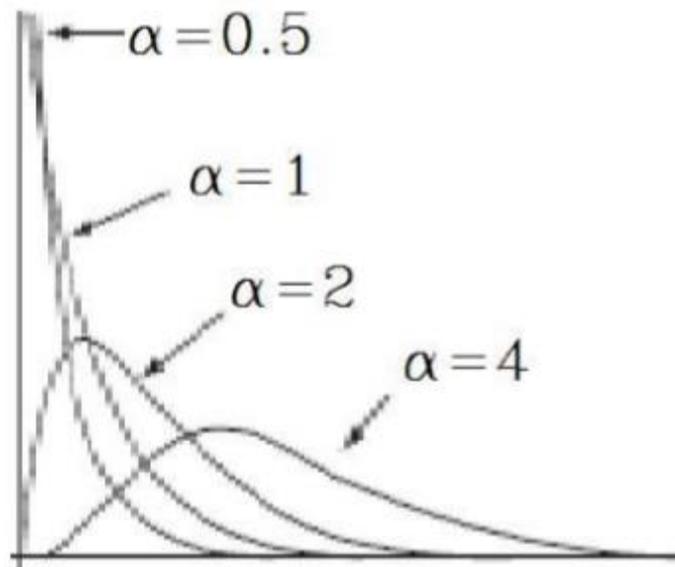


Figura 2.10 Función de densidad de probabilidad Gamma (Fonseca, 2014, p. 36)

2.4. Tipos de generadores eléctricos

El funcionamiento de un generador eléctrico de cualquier tipo se basa en el proceso de transformación de la energía mecánica en energía eléctrica, que lo pone en rotación con cierta velocidad angular ω [rad/s] (Kostenko y Piotrovski, 1975, p. 273). Para ello, se aprovecha la energía mecánica de distintos fenómenos como la caída de agua en un sistema de cosecha de lluvia.

Los generadores se clasifican principalmente como generadores de corriente directa (CD) o corriente alterna (CA). Los generadores de CD y CA (figura 2.11) están contruidos básicamente de la misma manera, una bobina gira entre los polos de un imán y se induce un voltaje de CA en ella. Las máquinas solo difieren en la forma en la que las bobinas están conectadas al circuito de salida. Un generador de CD utiliza un conmutador para convertir la CA generada en CD (Wildi, 2007, p.73).

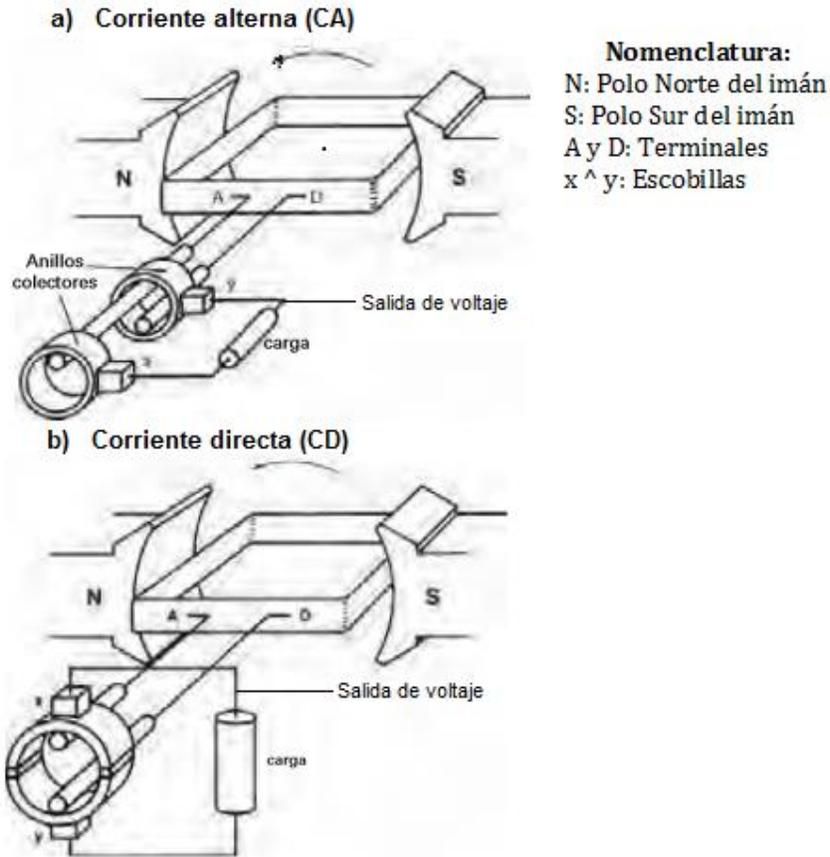


Figura 2.11 Diagramas de generadores eléctricos: a) C.A. y b) C.D. (Wildi, 2007, p. 72-73)

La potencia útil $\dot{W}_{gen} [W]$ (Ecuación 2.18) entregada por el generador de acuerdo con la lectura de voltaje $V_{gen} [V]$ y de corriente $I_{gen} [A]$, es menor que la potencia entregada al rotor en la entrada del generador debido a las pérdidas mecánicas y del material conductor (Kostenko y Piotrovski, 1975, p. 274).

$$\dot{W}_{gen} = V_{gen} \cdot I_{gen} \quad (2.18)$$

De acuerdo con lo anterior, se puede estimar la eficiencia del generador (Ecuación 2.19) como el cociente entre la potencia obtenida por el generador $\dot{W}_{gen} [W]$ y la potencia entregada a la entrada del generador $\dot{W}_{turbina} [W]$ determinada por el producto del torque generado \vec{T} y la velocidad angular ω .

$$\eta_{gen} = \frac{\dot{W}_{gen}}{\dot{W}_{turbina}} = \frac{V_{gen} \cdot I_{gen}}{\vec{T} \cdot \omega} \quad (2.19)$$

En el ámbito comercial existen una amplia gama de generadores eléctricos, desde los tipo industrial (figura 2.12a) que pueden trabajar a elevadas revoluciones por minuto (entre 1500 y 1800 rpm) y voltajes de alta tensión (de 220V a 4,160V) (CAT, 2016); hasta

generadores de menor tamaño como los dínamos (figura 2.12b) que generan un voltaje de 12V y operan a una baja velocidad (alrededor de 200 rpm).

a) Generador eléctrico industrial (CAT, 2016)



b) Dínamo de 12V



Figura 2.12 Generadores eléctricos comerciales.

2.5. Parámetros de dimensionamiento de una turbina

La cosecha de lluvia en zonas urbanas puede convertirse en una alternativa viable para la generación de energía. Sin embargo, esto no ha sucedido debido a la escasez de antecedentes sobre sistemas que operen combinando este sistema y una central hidroeléctrica y la falta tanto de métodos para diseñar sistemas de esta índole como análisis que indiquen los alcances y beneficios que conllevan el utilizar este sistema, entre otros. Aun así, algunos investigadores han desarrollado y propuesto nano sistemas para generar energía eléctrica con métodos similares. Por ejemplo, Ikeda *et al.* (2010) propusieron un modelo de nano-central eléctrica impulsada por la caída de agua en canales artificiales de agua y Nasir (2013) diseñó una micro estación hidroeléctrica para utilizar en corrientes superficiales de zonas rurales, utilizando un software de diseño asistido por computadora (CAD).

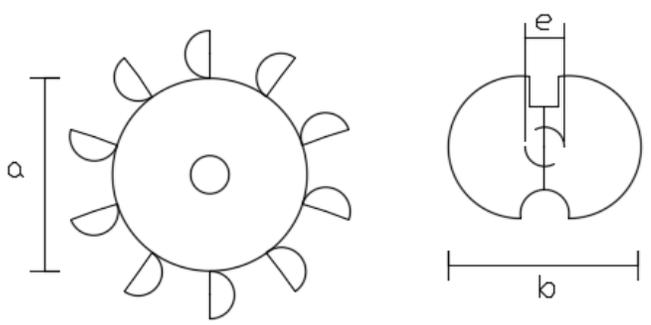
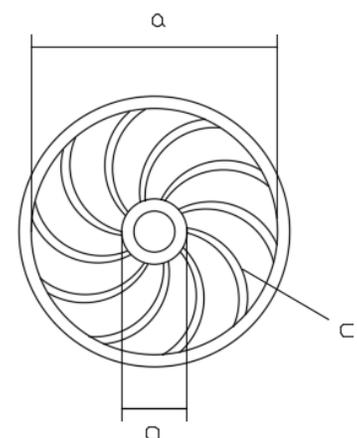
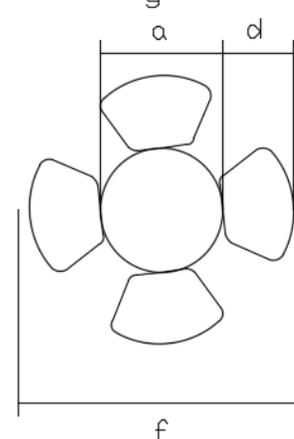
Dentro de una central hidroeléctrica uno de los elementos principales del sistema es la turbina, elemento que transforma la energía mecánica del agua en trabajo, que a su vez va dirigido al eje de un generador eléctrico y produce energía eléctrica (Mataix, 1986, p.460). Y como se ha mencionado en la sección 2.1, existen diversos tipos de turbinas que funcionan bajo diferentes condiciones. Por lo que depende del diseñador, definir estas condiciones de operación para seleccionar el tipo de turbina más adecuada y posteriormente diseñar la geometría de la misma.

De acuerdo con Nasir (2013) se tienen que considerar varios aspectos para diseñar una turbina en una corriente superficial de agua. Estos elementos pueden asociarse a un sistema de cosecha de lluvia y son representados por las variables de la tabla 2.2.

- **Medición del volumen de descarga:** Puede ser mediante diversos métodos. El método de relación velocidad-área (Ecuación 2.7) es el más común, considerando la velocidad del agua que cruza a través de la sección transversal de la tubería. Este es un enfoque útil para la determinación del caudal con un esfuerzo mínimo.
- **Presa o canal abierto:** Este tiene que ver con las condiciones del lugar donde se planea instalar la turbina y se determina el valor de la descarga del fluido y la carga hidráulica. En un sistema de cosecha de lluvia este elemento es representado por la caída o “bajada” del agua.
- **Entrada del flujo:** La forma de la entrada puede variar, ya que el fluido puede ser dirigido por una tubería o sistema de conducción (turbinas de reacción) o puede ser dirigida por un elemento independiente como una boquilla (turbinas de impulso). La entrada del flujo a la turbina es un punto importante en el sistema, ya que define el diámetro del flujo d_{jet} [m] y la velocidad angular de operación ω [rad/s], que son parámetros importantes en el diseño de la geometría de la turbina y los álabes.
- **Filtro o rejilla protectora:** Evita la entrada de elementos indeseados que afecten el desempeño del sistema, como lo puede ser basura, hojas, ramas, insectos, etc.
- **Compuertas y válvulas:** En cargas hidráulicas pequeñas, la mejor manera de incrementar la carga sin afectar el flujo es utilizando compuertas. En caso de realizar mantenimiento o modificaciones a la infraestructura es útil la instalación de válvulas que corten el flujo del sistema.
- **Tubería:** El sistema de conducción debe ser lo suficientemente resistente para soportar el peso del agua.
- **Medición de la carga hidráulica:** Es primordialmente la distancia vertical entre el nivel de la superficie del agua y la entrada flujo a la turbina (dependiendo del tipo de turbina utilizado). Deben ser considerados además las cargas por velocidad, presión y pérdidas.
- **Potencia esperada:** Indica la cantidad de trabajo por unidad de tiempo posiblemente generada y que ha sido representada en la ecuación 2.2.
- **Velocidad angular:** Es un valor que depende del volumen de descarga y la carga hidráulica, procurando que sea lo más constante posible.

Entonces, para el diseño de una turbina que opere con un sistema de cosecha de lluvia se debe de estimar y definir los factores mencionados, y con ello, poder definir la geometría de la turbina. Pero como se describió en la sección 2.1, existen diferentes tipos de turbinas, por lo que la geometría puede ser muy diferente una con respecto a la otra. Por lo que, para cada turbina se debe de identificar los elementos que deben definirse y permitan un funcionamiento adecuado (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Elementos principales de la geometría de turbinas Pelton, Kaplan y Francis. Elaboración propia.

Dimensión geométrica	Turbina			Esquema
	Pelton	Kaplan	Francis	
a. Diámetro del rodete	X	X	X	<p>Pelton</p> 
b. Ancho de cucharones	X			
c. Longitud álabes			X	<p>Francis</p> 
d. Longitud de aspas		X		
e. Diámetro del chorro	X			<p>Kaplan</p> 
f. Diámetro del conductor		X		
g. Diámetro de tubo de aspiración		X	X	
h. Número de álabes/aspas	X	X	X	

2.6. Manufactura de la turbina

En los últimos años se han desarrollado nuevos métodos y procesos de manufactura. Uno de ellos es la impresión tridimensional mediante el uso de paquetes informáticos especializados en Diseño Asistido por Computadora (CAD) para el modelado de piezas 3D, por ejemplo, el SolidWorks (SolidWorks Corporation, 2011, p. 1) o similares. Entonces, una impresora tridimensional se puede definir como un dispositivo capaz de generar un objeto sólido tridimensional mediante la inyección de material, es decir, el modelo generado en CAD no es más que la representación digital de lo que vamos a imprimir (3DImpresoras3D, 2016).

Los materiales que pueden utilizarse para ‘imprimir’ son muy variados. Cualquier impresora de bajo costo suele funcionar con termoplásticos como el PLA (Ácido Poli láctico) o ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Pero podemos encontrar impresoras capaces de trabajar con metal, fotopolímeros o resina líquida, aunque resultan prohibitivas para entornos no industriales (3DImpresoras3D, 2016). Es por ello que los materiales más comunes para el público son el PLA y el ABS, los cuales tienen propiedades mecánicas indicadas en la tabla 2.3 como la resistencia de fluencia y el módulo de elasticidad del material.

Tabla 2.3. Especificaciones de materiales usados en impresoras 3D (3D ALCHEMY, 2016; Prospector, 2016).

Material	Propiedad Mecánica	Prueba	Valor	Unidades
ABS	Resistencia de fluencia (XZ Axis)	D-790	58	MPa
	Módulo de elasticidad (XZ Axis)	D-790	2100	MPa
	Gravedad específica	D-792	1.04	---
PLA	Resistencia de fluencia (XZ Axis)	D-638	65	MPa
	Módulo de elasticidad (XZ Axis)	D-638	3500	MPa
	Gravedad específica	D-792	1.24	---

La impresión 3D es un proceso de manufactura de baja escala pero que es aplicable en varias industrias, entre las que podemos encontrar: diseño de productos, arquitectura y construcción, mecánica e ingeniería, arte y diseño, medicina, etc. (Ultra Print 3D, 2016). Por lo tanto, la impresión 3D se ha vuelto alternativa para la fabricación

de piezas o elementos que requieren una gran precisión o poseen una compleja geometría.

Existen gran variedad de tamaños de impresoras tridimensionales, desde aquellas que pueden producir piezas con dimensiones menores o igual con 30 cm. (Ideaz 3D, 2016) hasta aquellas de tipo industrial capaces de generar piezas con una dimensión de 100 cm. (Stratasys, 2016). Además, es importante señalar que la impresión tridimensional puede manejar diversos tipos de calidad de impresión, sin embargo, entre mayor sea la calidad que se desee de la pieza, mayor tiempo de impresión lleva consigo y también un costo mayor, por lo que depende de las necesidades o aplicaciones del modelo para definir la calidad de la impresión.

Las calidades de impresión se dividen principalmente en tres (Ultra Print 3D, 2016):

- **Laser:** De 0.025 a 25 micrones. Calidad ideal para fabricar prototipos totalmente funcionales que requieran gran precisión, también utilizada para joyería y aplicaciones médicas.
- **Alta:** De 0.1 a 100 micrones. Calidad ideal para piezas con alto grado de detalle, igual de ideal y útil para piezas mecánicas o piezas de elementos decorativos.
- **Estándar:** De 0.2 a 200 micrones. Calidad de impresoras comerciales, aun así permiten imprimir piezas de buena calidad.

3. Metodología

El presente trabajo pretende construir un sistema de generación eléctrica desde la cosecha de lluvias en zonas urbanas, teniendo como zona de estudio el Valle de Toluca, Estado de México. La figura 3.1 muestra el diagrama de flujo correspondiente a la metodología para el desarrollo de una nano central hidroeléctrica que opere por medio de la cosecha de lluvia. La metodología está compuesta por 6 etapas principales, desde la selección de la turbina hasta la evaluación del sistema.

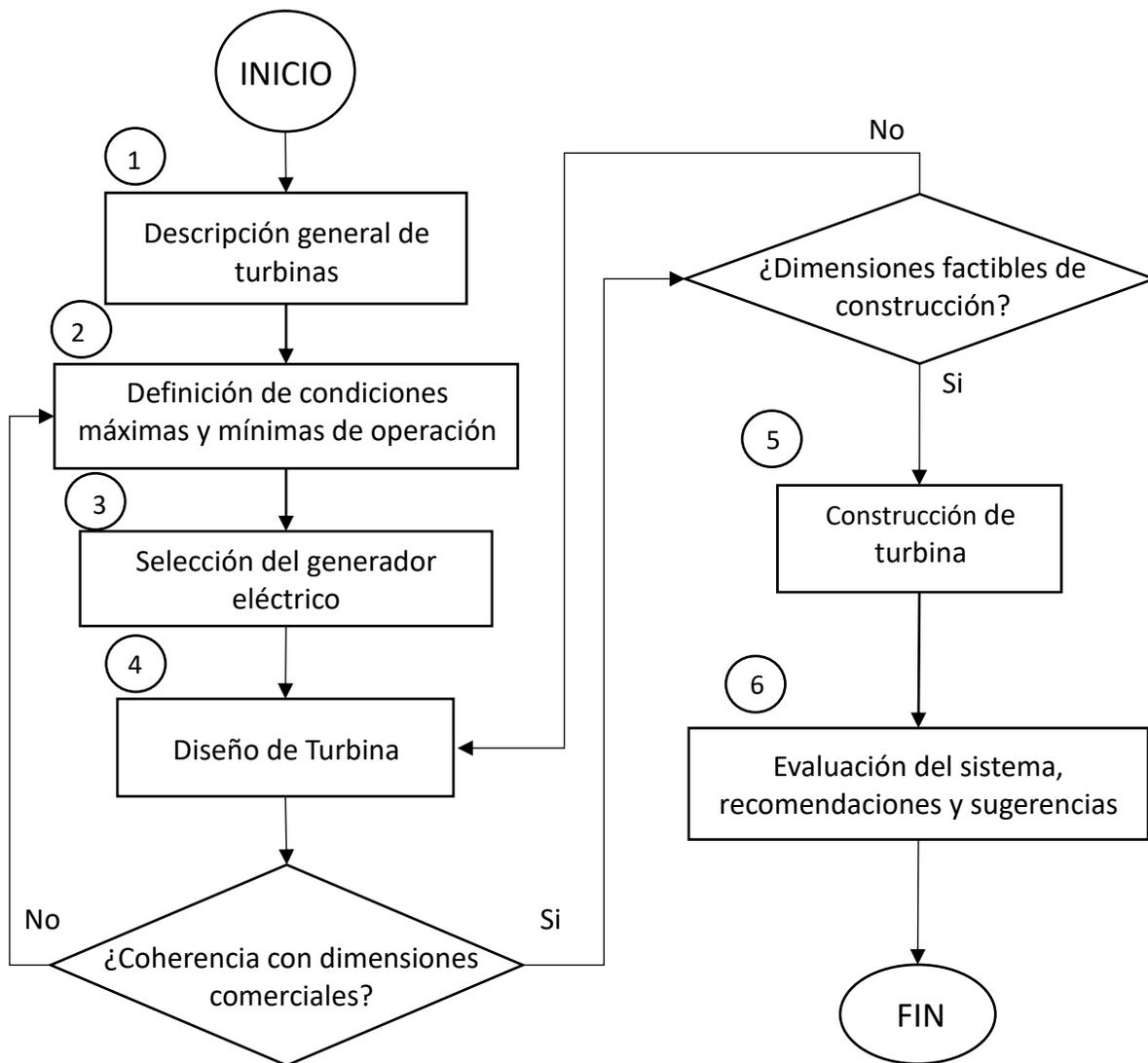


Figura 3.1. Diagrama de flujo del desarrollo de una nano central hidroeléctrica.

En el marco teórico se mencionaron los tipos y la clasificación de turbinas de acuerdo con sus características y condiciones de funcionamiento. En esta primera etapa del proyecto, un tipo de turbina es seleccionado en función de las ventajas y desventajas de las turbinas más utilizadas para la generación de energía eléctrica. La tabla 3.1 muestra

características a tener en cuenta para seleccionar el tipo de turbina, considerando que podría presentar caudales intermitentes (trabajar mediante impulsos), poco mantenimiento y la facilidad para modificar la infraestructura, entre otros.

Tabla 3.1 Características de operación para distintos tipos de turbinas.

		Tipo de turbina					
		Pelton	Kaplan	Francis	Turgo	Banki-Michell	
Características	Flujo	Radial	X			X	X
		Axial		X	X		
	Ventajas	Puede operar con caudales bajos.	X			X	X
		Puede operar con cargas hidráulicas bajas.		X	X		X
		Puede operar con flujo intermitente	X				
		Alta frecuencia de uso para generación de energía hidroeléctrica	X		X		
		Mínimo mantenimiento		X			
		Infraestructura más sencilla	X			X	X
		Menos peligro de erosión en los álabes	X		X	X	
		Velocidad específica < 1.0	X		X		
	Desventajas	Mayor peso			X		X
		Requiere boquillas para dirigir el flujo	X	X	X	X	
		Baja frecuencia de uso para la generación de energía hidroeléctrica		X		X	X
		Derechos de autor (restricción de patentes)	X	X	X		
		Cambios en la estructura cuando el caudal es bajo	X	X	X		X

Elaboración propia con información de Mataix (1986), Dixon (2005), Potter (2002), Fox *et al.* (2002), White (1998).

De acuerdo con lo anterior, se puede observar que las turbinas tipo Pelton pueden operar con caudales bajos pero requiere de un boquilla para dirigir el flujo a la turbina, mientras que los tipo Kaplan requieren un mantenimiento mínimo pero no poseen una infraestructura fácil de instalar y de modificar. Los tipos Francis y Kaplan pueden operar con cargas hidráulicas bajas pero requieren un caudal alto para funcionar adecuadamente. Los tipos Pelton y Francis tienen un peligro menor de erosión en sus álabes pero poseen restricciones para desarrollar por derechos de autor, además en ocasiones, tienen la característica de ser más aptas para operar con una velocidad específica menor o igual a 1 de acuerdo con Dixon (2005).

Por lo tanto, se puede decir que las turbinas más aptas para una nano central hidroeléctrica operando mediante la cosecha de lluvias son los tipo Pelton y Francis. Sin embargo, para el presente trabajo, es considerado un tipo de turbina Pelton por operar

con la menor velocidad específica (figura 2.5), presentar menor peso y trabajar con un flujo radial adecuado para el trabajo de reacción o impulso de un flujo intermitente.

La segunda etapa de la metodología identifica y analiza restricciones operativas en el diseño del sistema. Son consideradas aquellas que tienen que ver con la zona de estudio y las características del equipo generador de energía eléctrica.

Por una parte, se encuentran las condiciones mínimas impuestas principalmente por el generador, tales como la velocidad angular ω $[rad/s]$ y el torque mínimo \vec{T} $[J]$ necesarios para generar energía eléctrica. El torque puede ser estimado mediante la ecuación 2.4 para el caso de una turbina, además el momento aplicado debe ser lo suficientemente grande para que el generador eléctrico se encuentre en funcionamiento y permita entregar un voltaje y una corriente eléctrica. Por ejemplo, una estimación empírica por medio de un torquímetro realizada para este proyecto, proporcionó un valor de torque de $0.03 N \cdot m$ necesarios para el funcionamiento de uno de los generadores más pequeños existente en el mercado (dínamo de 12V).

La velocidad angular en generadores comerciales puede variar, desde un dínamo común de bicicleta que puede producir energía eléctrica a partir de $200 rpm$, hasta un alternador de automóvil convencional que trabaja normalmente alrededor de $2000 rpm$ (Prestolite, 2005, p. 9).

Por otro lado, las condiciones máximas de operación son determinadas principalmente por las condiciones climatológicas de la zona de estudio según la disponibilidad de agua obtenida con la captación de lluvia.

Para realizar el análisis de precipitación es necesario aplicar un test de normalidad (ecuación 2.14) a la muestra (registro lámina de precipitación y duración de eventos). Para ello se estiman los coeficientes de asimetría T_s (ecuación 2.10) y de curtosis T_k (ecuación 2.11) de acuerdo con Llamas (1989).

Si la prueba de hipótesis sobre normalidad es aceptada –rango de condiciones medias-, puede ser estimado por medio de una distribución de probabilidad normal (ecuación 2.15) a partir de los cuantiles tanto de las láminas de precipitación x_1 y x_2 , como de la duración de eventos d_1 y d_2 correspondientes a las probabilidades $P(x \leq x_1) = 0.4$ y $P(x \leq x_2) = 0.6$.

En caso de que la muestra sea rechazada, es posible emplear una función de densidad de probabilidad gamma (ecuación 2.16) para estimar las láminas de precipitación y duración de eventos, de acuerdo con el registro histórico proporcionado por el ESIME correspondiente al periodo 2013-2015 de estación meteorológica más cercana en la zona de estudio (SMN, 2016).

Los valores de la precipitación representan una lámina acumulada a partir de los registros diezminutarios consecutivos con ocurrencia de precipitación. Por ello, la figura 3.2 muestra el procedimiento para estimar las láminas de precipitación y duración de eventos a partir de registros de lluvia cada 10 minutos. En un día hay 144 registros de lluvia pero tantos eventos como conjuntos consecutivos con ocurrencia de precipitación.

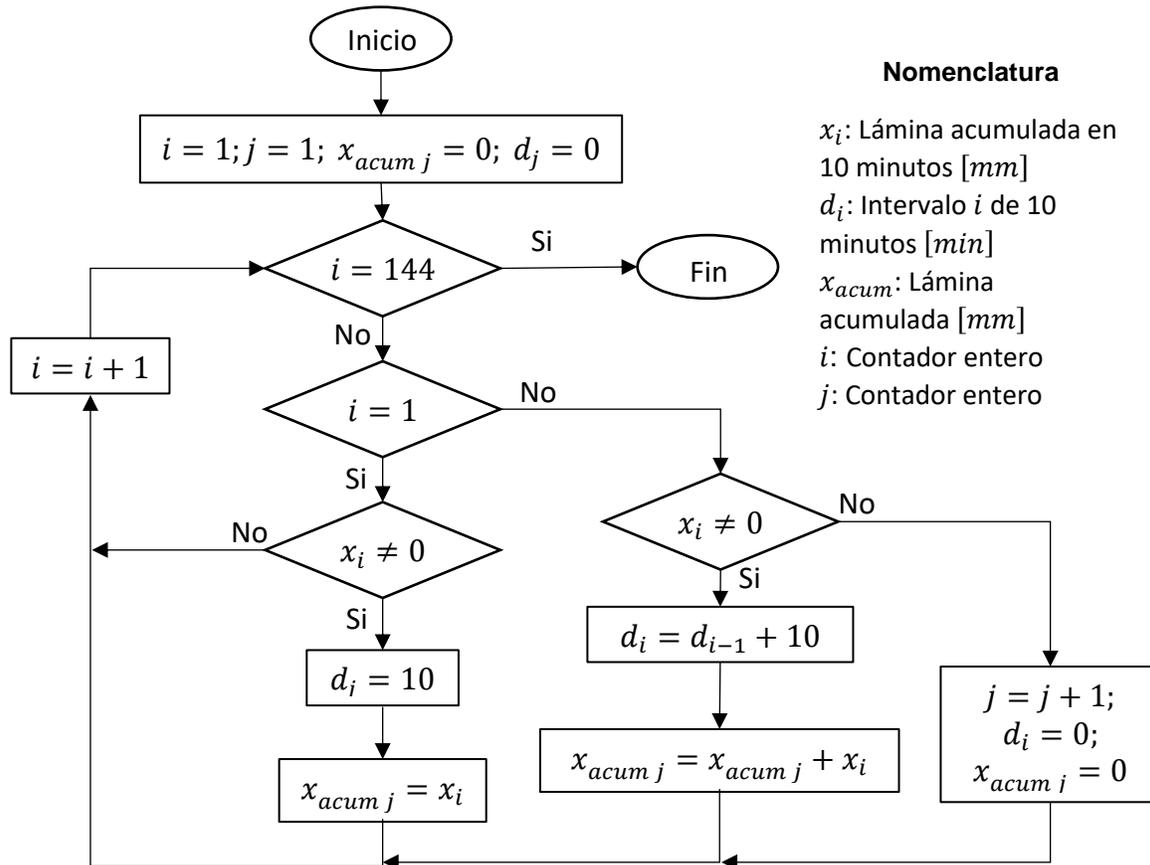


Figura 3.2 Diagrama de flujo del proceso de conteo de duración de eventos d_j .

Para estimar el caudal esperado Q [l/s] como una función de la lámina acumulada y la duración por evento, se utiliza la ecuación 3.1, donde $x_{acum j}$ es la lámina de precipitación media esperada por evento [mm], A_c es el área de captación de cosecha de lluvia [m^2] y d es la duración de eventos [min].

$$Q = x_{acum j} \left(\frac{1 m}{1000 mm} \right) \times A_c \times \left(\frac{1}{d} \right) \left(\frac{1 min}{60 s} \right) \times \left(\frac{1000 l}{1 m^3} \right) \quad (3.1)$$

La etapa 3 tiene por objetivo la selección de un generador eléctrico para la producción de energía eléctrica. Por lo que para el presente proyecto podría ser

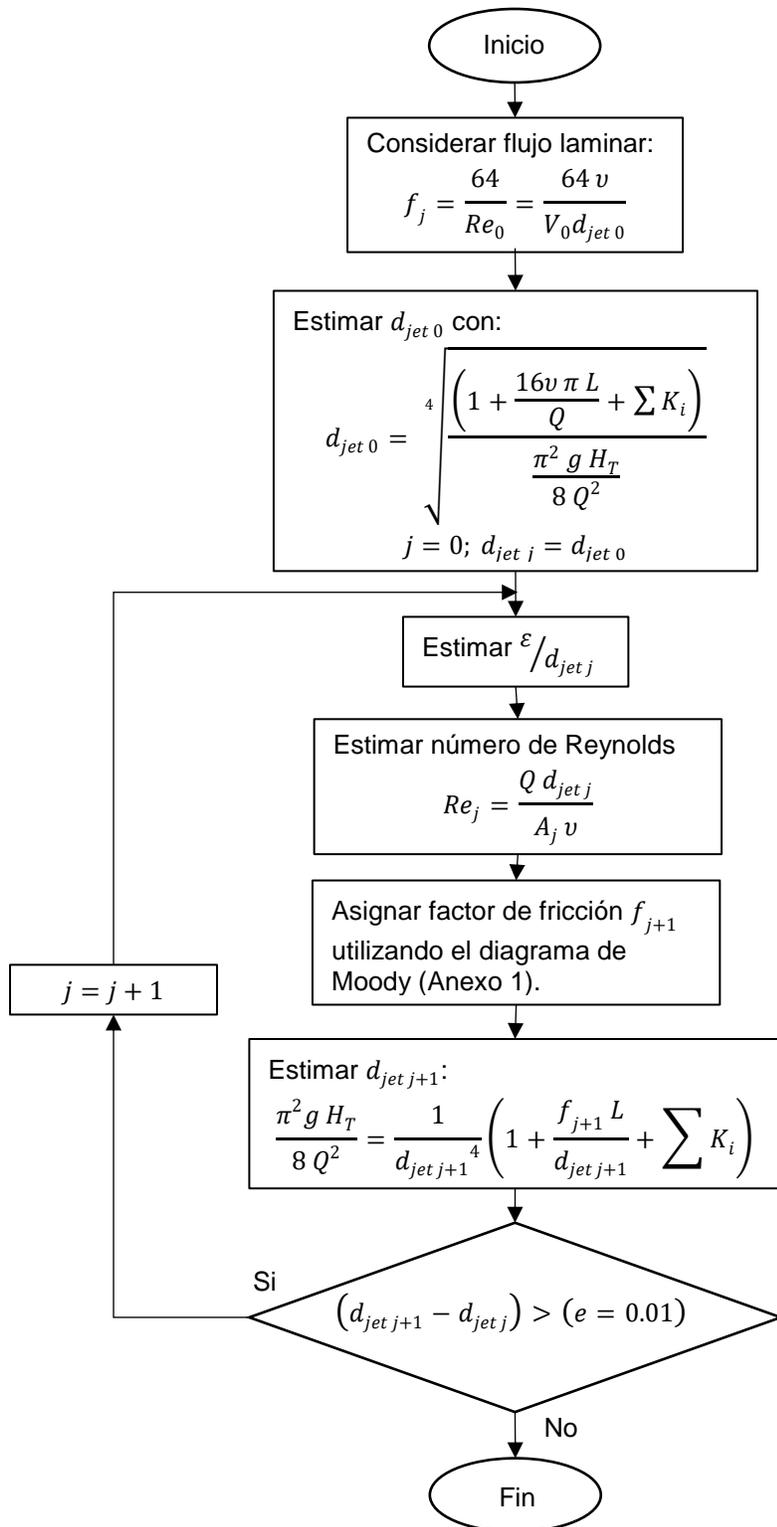
considerado un dínamo de 12V por operar con bajos valores de velocidad angular y torque.

La etapa 4 del proyecto define las características geométricas de la turbina tipo Pelton de acuerdo con las condiciones presentadas en la etapa dos. La tabla 2.2 indica los parámetros principales que deben definirse para el modelado de la turbina. Entre las características definidas en la tabla 2.2 asociadas a la turbina Pelton está el diámetro de la turbina, diámetro del chorro, ancho de los cajones y número de álabes (*cucharones*).

El diámetro del chorro es estimado por medio de la ecuación de la energía para una vena líquida (ecuación 2.6) entre la altura del inmueble (sección 1) y la posición de la boquilla (sección 2), considerando además las pérdidas generadas por fricción mediante la ecuación de Darcy-Weibach (ecuación 2.7) y las pérdidas locales de energía (ecuación 2.9). A partir de la ecuación 3.2 resultante, es posible considerar poco significativo las cargas por presión (debido a la superficie libre en sección 1 y la descarga en sección 2), así como la carga por velocidad en sección 1. Además, por la ubicación del sistema de referencia, $z_2 = 0$. Despejando V_2 , la velocidad del chorro es entonces estimada con la ecuación 3.3. El método iterativo para encontrar el valor del diámetro del chorro es mostrado en la figura 3.2.

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + f \frac{L}{D} \frac{V_i^2}{2g} + \sum K_j \frac{V_j^2}{2g} \quad (3.2)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gH_T}{1 + f \frac{L}{D} \left(\frac{A_2}{A_i}\right)^2 + \sum K_j \left(\frac{A_2}{A_j}\right)^2}} \quad (3.3)$$



Nomenclatura:

f : Factor de fricción [adimensional]

Re : Numero de Reynolds [adimensional]

ν : Viscosidad cinemática [m^2/s]

V : Velocidad del fluido [m/s]

d_{jet} : Diámetro del chorro [m]

L : Longitud de la tubería [m]

Q : Caudal [m^3/s]

K : Factor de pérdidas locales de energía [adimensional]

g : Constante de gravitación universal [m/s^2]

H_T : Carga hidráulica [m]

ϵ : Rugosidad absoluta de la tubería [m]

A : Área transversal de la tubería [m^2]

j : Contador entero

ϵ : Rugosidad absoluta [m]

ϵ/D : Rugosidad relativa [adimensional]

e : Error aceptable

Figura 3.3 Diagrama de flujo del proceso de iteración para estimar el diámetro del chorro d_{jet} .

El radio de la turbina $r_{turbina}$ se puede estimar mediante la ecuación de principio de conservación de movimiento angular (ecuación 2.4) considerando el torque $\vec{T}_{mínimo}$ y la velocidad angular $\omega_{turbina}$ del generador obtenidos en la etapa 2. De acuerdo con la geometría de los polígonos de velocidad generada en la turbina Pelton (figura 3.4), donde la velocidad V [m/s] es estimada como $V = \vec{U} + \vec{V}_r$, la componente tangencial de la velocidad que genera el momento, ecuaciones 3.4 a 3.6.

$$V_t = |\vec{U}| + |\vec{V}_r|(1 - \cos \theta) \quad (3.4)$$

Donde:

$$\vec{U} = \omega_{turbina} \cdot r_{turbina} \quad (3.5)$$

$$\vec{V}_r = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{jet}^2} \quad (3.6)$$

Sustituyendo la ecuación 3.4 en la ecuación de la conservación de momento angular, la ecuación 3.7 es obtenida, donde $r_{turbina}$ es la distancia entre el paso del chorro de agua y el centro de la turbina.

$$T_0 = \rho r_{turbina} (U + V_r(1 - \cos \theta))Q \quad (3.7)$$

Relacionando las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7 se obtiene una ecuación de segundo grado en función del gasto Q (ecuación 3.8) para determinar el radio de la turbina $r_{turbina}$, a partir del torque mínimo $T_{mínimo}$ requerido por el generador. El diámetro de la turbina $D_{turbina} = 2 r_{turbina}$.

$$T_{mínimo} = \rho_{agua} \cdot r_{turbina} \cdot Q \cdot \left[\omega_{turbina} \cdot r_{turbina} + \frac{Q}{\pi \cdot r_{turbina}} (1 - \cos \theta) \right] \quad (3.8)$$

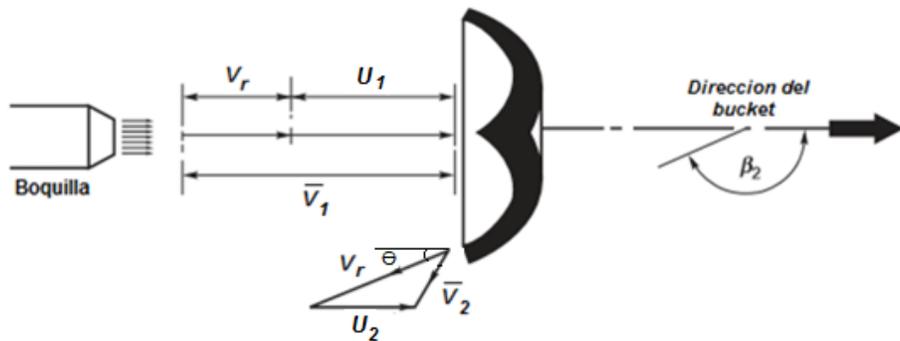


Figura 3.4 Diagrama de la entrada del flujo a un cucharón de una turbina Pelton (Dixon, 2005, p. 296)

La forma geométrica del *bucket* está definida por un ángulo β_2 y las dimensiones L_{bucket} y L_{paso} . El ángulo β_2 al que desvía el chorro de agua a través del *cucharón* (figura

3.4) es asignado con un valor de 165° , de acuerdo con relaciones empíricas usadas para el diseño de turbinas tipo Pelton (Atthanayake, 2009, p.12). El ancho del *cucharón* L_{bucket} [m] y la longitud del paso L_{paso} (figura 3.5) del chorro al entrar a la turbina [m], se determinan con las ecuaciones 3.9 y 3.10 (Atthanayake, 2009), en función del diámetro del chorro d_{jet} [m].

$$L_{bucket} = c_1 \times d_{jet} ; c_1 \in [3.5, 4] \quad (3.9)$$

$$L_{paso} = 2 \times d_{jet} \quad (3.10)$$

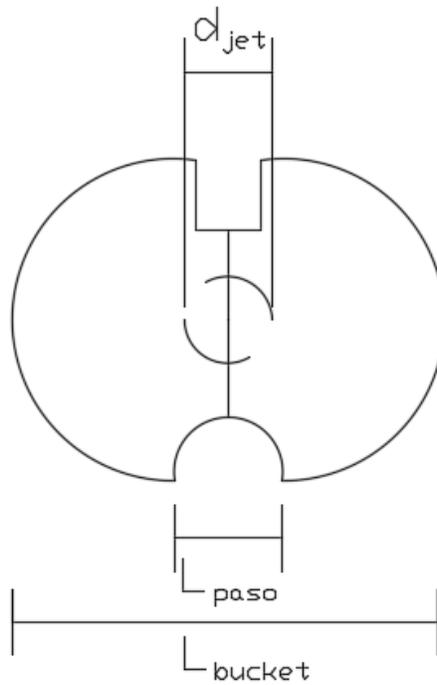


Figura 3.5 Esquema básico de características geométricas de un cucharón. (Mataix, 1986, p. 469)

Definidas las características geométricas del *cucharón*, se estima el radio del rodete r_{rodete} y el radio externo de la turbina $r_{externo}$ (figura 3.6) mediante las ecuaciones 3.11 y 3.12.

$$r_{rodete} = r_{turbina} - \frac{L_{bucket}}{2} \quad (3.11)$$

$$r_{externo} = r_{turbina} + \frac{L_{bucket}}{2} \quad (3.12)$$

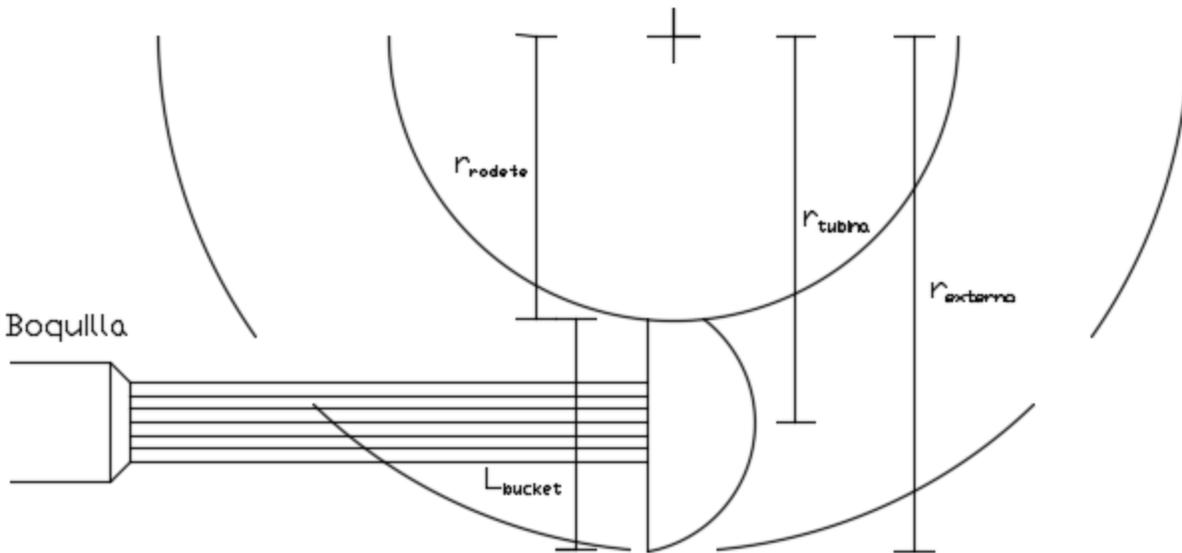


Figura 3.6 Esquema general del perfil de la turbina. Elaboración propia.

La estimación del número de cucharones se basa en la geometría de la entrada del chorro a la turbina (figura 3.7). El ángulo de separación δ apropiado entre cada cucharón y la longitud l [mm] (entre el punto de contacto del chorro y el cucharón y la salida de éste de la turbina) pueden ser obtenidos de manera gráfica, por ejemplo, por medio de un software para el diseño asistido por computadora (CAD).

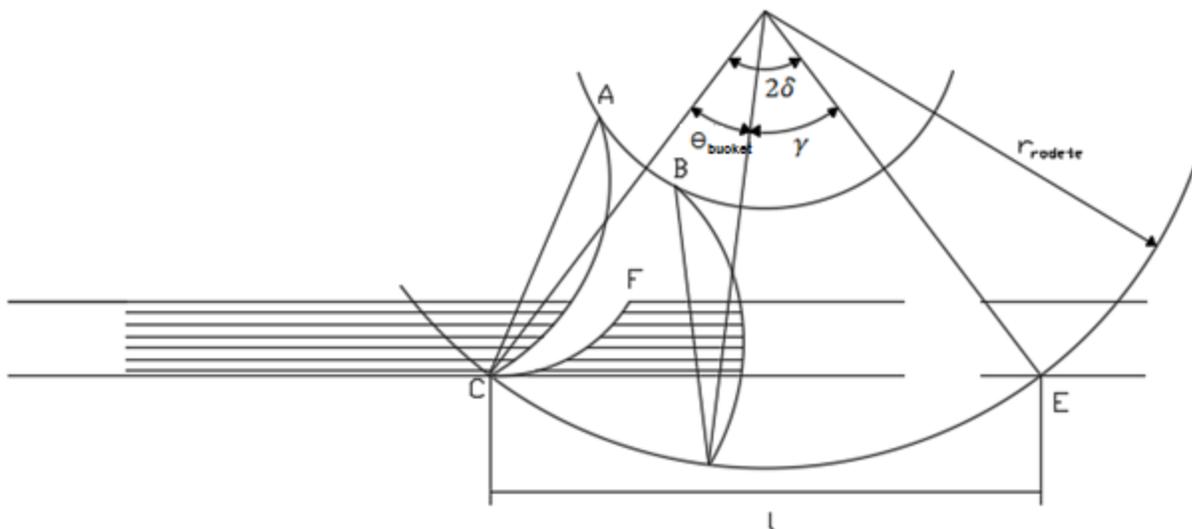


Figura 3.7 Diagrama de separación de cucharones (Daugherty, 1920, p. 205)

El ángulo de separación δ entre el punto de entrada del chorro (punto C) y el punto de salida del chorro (punto E) pueden estimarse de manera gráfica con ayuda del

software AutoCad (Autodesk Inc., 2016), posteriormente se determina el ángulo θ_{bucket} de separación de cucharón por medio de la ecuación 3.13 (Daugherty, 1920, p. 206).

$$\theta_{bucket} = 2\delta - 2\frac{U_1}{V_1} \sin \delta \quad (3.13)$$

Y finalmente, el número n de cucharones se estima a través de la ecuación 3.14 (Daugherty, 1920, 206).

$$n = \left(\frac{2\pi}{0.8}\right) \theta_{bucket} \quad (3.14)$$

En la construcción de la turbina (etapa 5) es necesario, en primer lugar, definir la selección del material, de acuerdo con las características de los polímeros mencionados en la tabla 2.2. Por ello, para el presente trabajo, es considerado el plástico ABS (Acrlonitrilo-Butadieno-Estireno) debido a las propiedades mecánicas que posee y practicidad del material para realizar modificaciones a la estructura de la pieza con procesos de manufactura convencionales (fresado, taladrado, etc.). En segundo lugar, la modelación de la turbina es realizada de acuerdo con las características geométricas definidas en la etapa 4 y con un paquete informático especializado en CAD, en este caso SolidWorks (SolidWorks Corporation, 2010).

Para la manufactura de la turbina es posible hacer uso de una impresora tridimensional marca Mbot (Mbot 3D, 2016) de una boquilla, con temperatura de operación promedio de 230 °C. Lo anterior, debido a la flexibilidad de producir figuras con geometría compleja comparada con métodos convencionales.

La última etapa, evaluación del sistema, está orientada a determinar la eficiencia del sistema analizando la relación entre las mediciones de energía eléctrica producida, las revoluciones por minuto de la turbina y los registros de precipitación bajo diferentes condiciones de operación.

El patrón de comparación para la eficiencia del sistema es la potencia teórica que se puede extraer de la caída de agua (ecuación 2.2) y que depende de la carga hidráulica $H_T [m]$ y el caudal $Q [m^3/s]$. Posteriormente se proponen dos maneras para inferir la eficiencia real de la turbina. La primera es someterlo bajo condiciones que se puedan controlar, principalmente el caudal, por lapsos de 5 a 10 minutos. Obteniendo el promedio de voltaje y revoluciones por minuto (rpm) producidas por el generador y la turbina respectivamente es posible estimar la eficiencia alcanzada en cada elemento (turbina y generador). Para ello, es necesario estimar los valores de torque y las potencias generada por la turbina y el generador mediante las ecuaciones 2.4, 2.5, 2.18 y 2.19.

La segunda consiste en someter al modelo a condiciones reales de precipitación, dejándolo operar por un periodo de 30 días y estimar, de igual forma, la eficiencia alcanzada en cada elemento del sistema. Sin embargo, bajo condiciones reales no se

cuentan con registros cada diez minutos de lámina de precipitación en la ubicación geográfica del sistema. Por ello, se llevará a cabo la relación del registro de voltaje acumulado y la media de revoluciones por minuto diarias, con el registro de la estación meteorológica más cercana en la zona, en este caso la estación 0994200-Calixtlahuaca, a cargo de ESIME – México y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2016).

En ambos casos se debe realizar una asociación entre el caudal, la energía eléctrica generada y la eficiencia alcanzada por el sistema. Para realizar las lecturas del voltaje generado V_{gen} y el número revoluciones por minuto producidas se empleará un circuito electrónico diseñado para este propósito (figura 3.8).

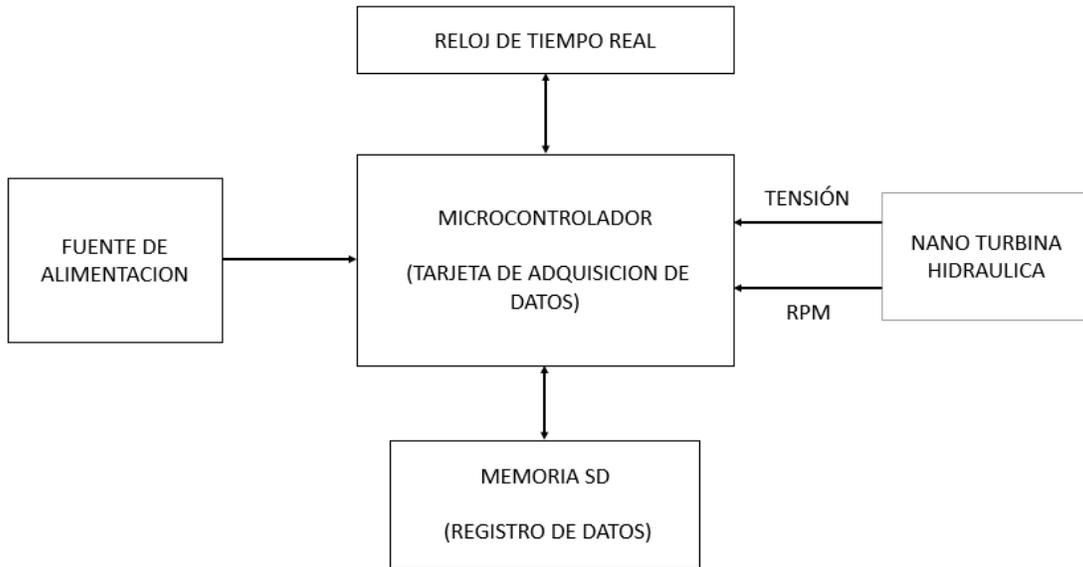


Figura 3.8 Esquema general para monitoreo de voltaje y rpm.

Como parte de la evaluación del sistema propuesto, también es posible comparar el tiempo de carga hipotético con diferentes sistemas de almacenamiento. Para ello, se estima el tiempo t_{carga} [s] que toma cargar una batería comercial de 12 V y 12 Ah (Stereon, 2016). Para estimar dicho tiempo, propuesta la relación entre la capacidad de almacenamiento de corriente eléctrica de la batería $I_{almacen}$ [Ah] y la corriente eléctrica producida por el sistema I_{gen} [A], mediante la ecuación 3.15.

$$t_{carga} = \frac{I_{almacen}}{I_{gen}} \quad (3.15)$$

Por último, el análisis de costo-beneficio compara la manufactura de la nano turbina y un ahorro de estimado bajo condiciones medias de precipitación en la zona de estudio en función de la tarifa actual del servicio de energía eléctrica proporcionada por Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2016). Considerando la energía unitaria

promedio E_u [$J/mm \cdot m$], concebida como la relación entre la energía producida E_{sep} [J] y la lámina acumulada de precipitación L_{sep} [mm] en el mes de prueba (septiembre) por unidad de carga hidráulica [m], el ahorro económico B (ecuación 3.16) puede ser estimado como la suma del producto entre las precipitaciones medias esperadas mensualmente $L_{mes j}$ (mm/mes), la tarifa de la energía eléctrica T_e ($\$/J$) y la energía unitaria esperada E_u [J], bajo una carga hidráulica h [m].

$$B = \sum_{j=4}^{10} E_u \cdot L_{mes j} \cdot T_e \cdot h \quad (3.16)$$

4. Zona de estudio

El caso de estudio considerado para el presente trabajo está ubicado dentro de la zona metropolitana del Valle de Toluca, Estado de México que abarca una extensión territorial de aproximadamente 1 035. 8 km² y abarca 15 municipios (Toluca, Metepec, Lerma, Calimaya, Temoaya y Zinacantepec, entre otros) (INECC, 2012). En el contexto fisiográfico, la región está asociada con la cuenca del Curso Alto del Río Lerma (CARL) y presenta tres tipos de clima: templado (el más predominante en el valle), semifrío y frío (en zonas altas) (INECC, 2012). El volumen de lluvia total en la zona se estima en 2013 hm³ para un año medio con una lámina promedio de precipitación de 965 mm (Fonseca, 2014, p. 78). El periodo con mayor precipitación abarca del mes de mayo a octubre, como se muestra en la distribución de la precipitación para un año medio se muestra en la figura 4.1.

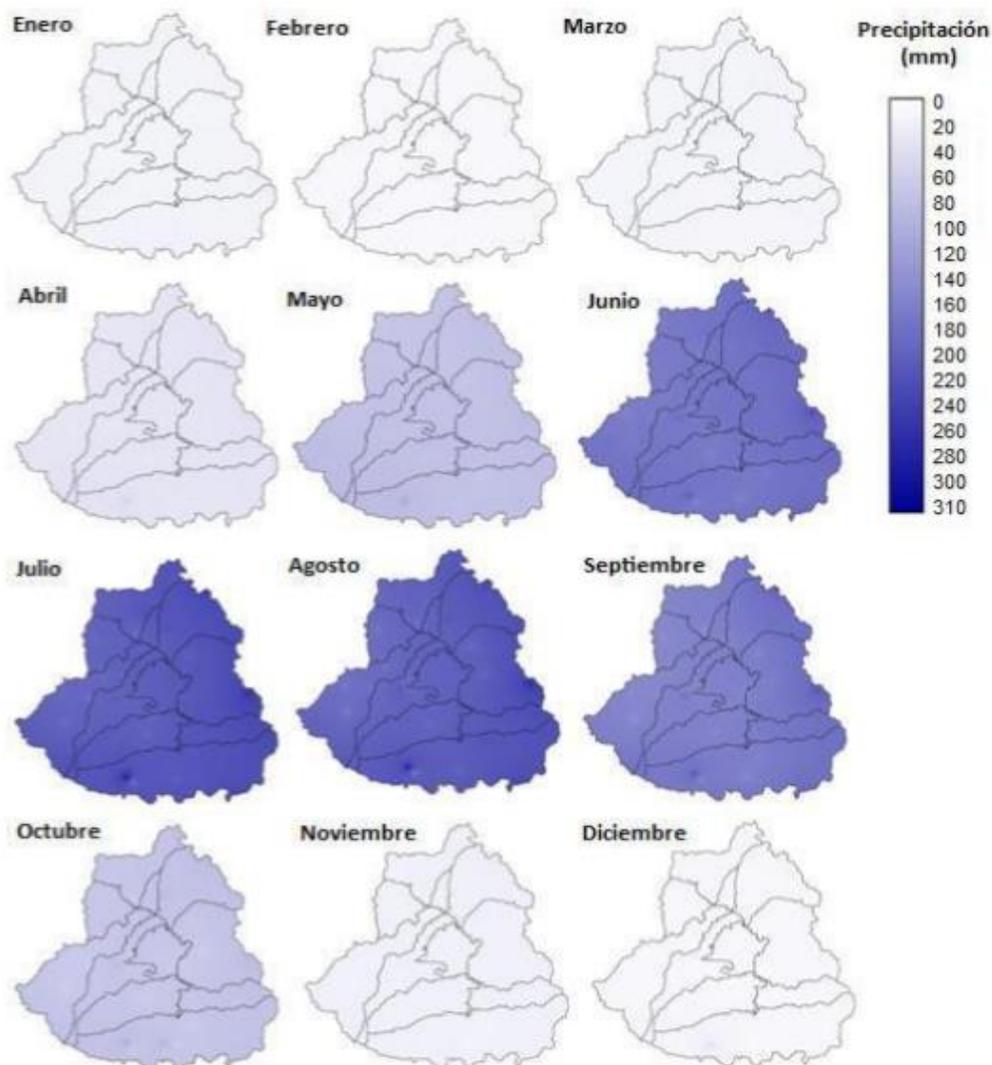


Figura 4.1 Distribución temporal y espacial de la precipitación media en el CARL (Fonseca, 2014, p. 78)

En el 2010 se estimó una población de un poco más de 1.6 millones de personas distribuidas en 109 localidades (Fonseca, 2014, p. 90) como lo muestra la figura 4.2. De la cual el 92.5% de la población reside en zonas urbanas, el resto de la población reside en zonas de carácter rural (H. Ayuntamiento de Toluca, 2014, p. 51).

La lámina diaria media y los intervalos de precipitación para cada mes en la zona se puede apreciar en la tabla 4.1. De acuerdo con el registro histórico del ESIME (SMN, 2016).

Tabla 4.1 Lámina diaria media e intervalos de precipitación en cada mes del año.

Mes	Media diaria [mm]	Precipitación mínima [mm]	Precipitación máxima [mm]	Mes	Media diaria [mm]	Precipitación mínima [mm]	Precipitación máxima [mm]
Enero	0.4293	0	2.5903	Julio	5.6964	1.7357	9.6571
Febrero	0.2661	0	1.2148	Agosto	5.5634	1.5560	9.5707
Marzo	0.3953	0	1.8442	Septiembre	4.9957	0.5372	9.4542
Abril	0.9118	0	2.8907	Octubre	2.1728	0	5.2607
Mayo	2.1127	0	4.8652	Noviembre	0.5169	0	1.6834
Junio	5.1679	0.4131	9.9227	Diciembre	0.3046	0	1.4921

Elaboración propia con datos de SMN (2016).

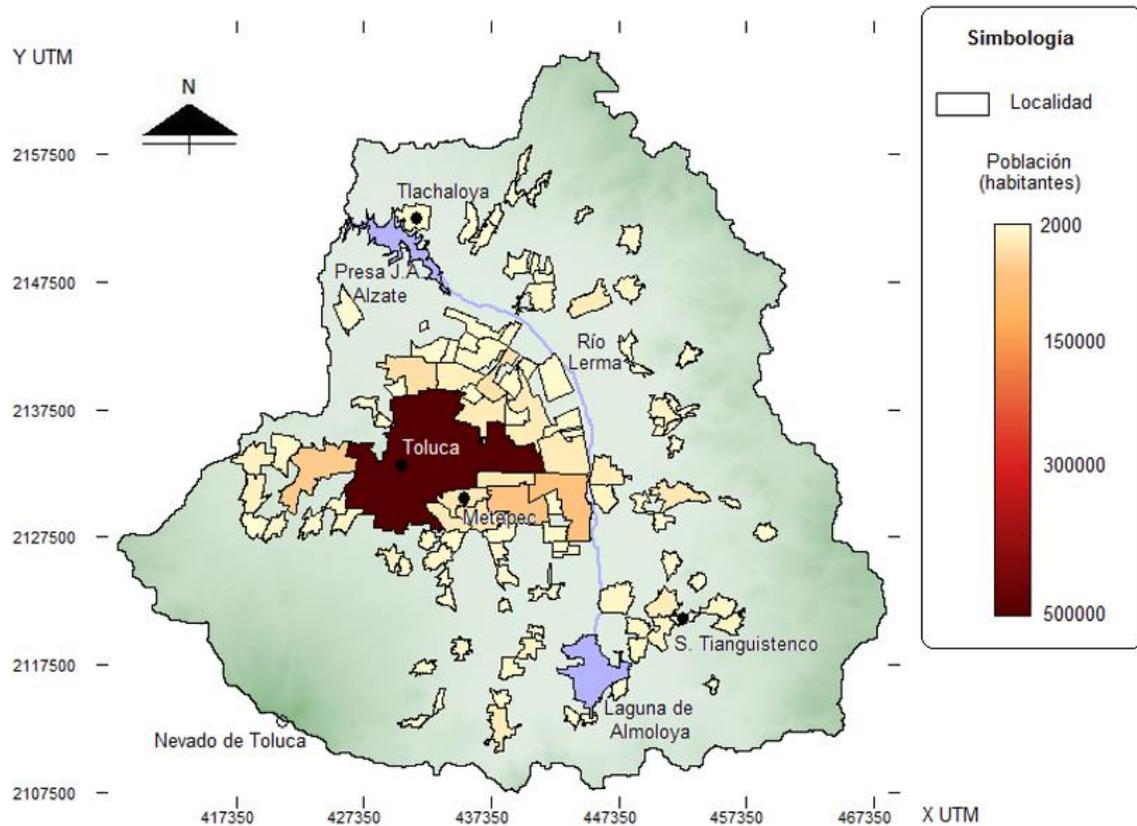


Figura 4.2 Distribución de la población en 2010 en el CARL (Fonseca, 2014, p. 90)

De acuerdo con el Reglamento de Imagen Urbana del Municipio de Toluca (2008), la altura máxima para edificaciones no debe exceder de 2.0 veces el ancho de la calle. Mientras que el ancho mínimo de las calles locales será de 12 metros. Por lo tanto, la altura máxima para edificaciones en la zona urbana del valle de Toluca es de 24 metros.

El caso de estudio donde se lleva a cabo la implementación del sistema es en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) y que a su vez pertenece a la Universidad Autónoma del Estado de México. Ubicado en Carretera Toluca-Atlacomulco Km. 14.5, Unidad San Cayetano C.P. 5200, Toluca, Estado de México (Figura 4.3).

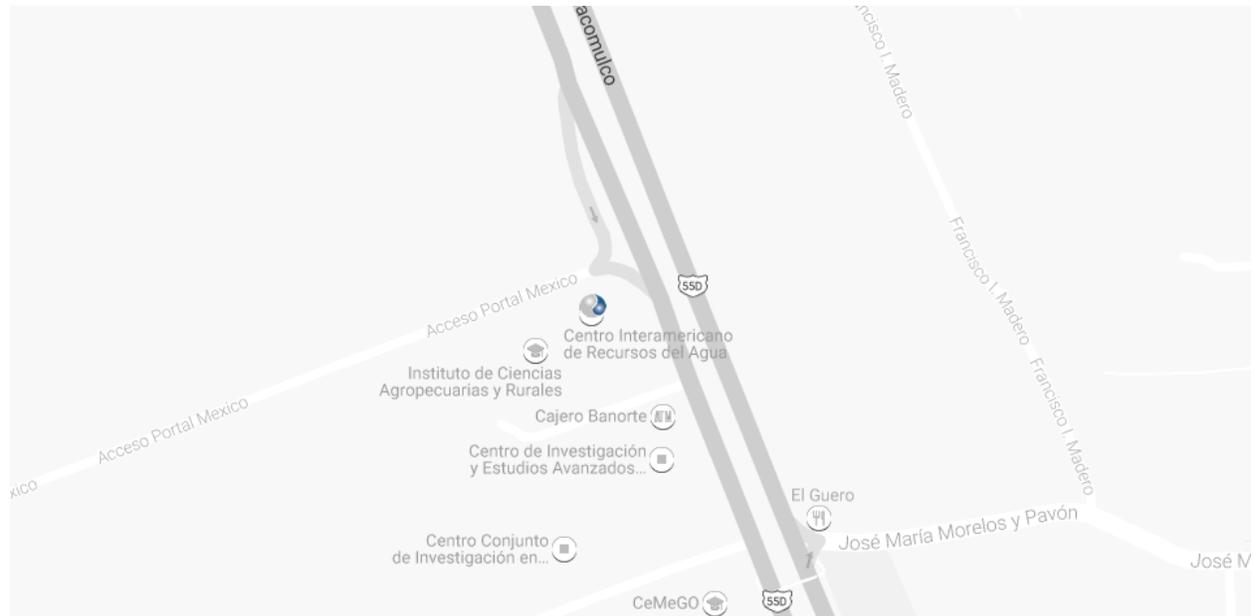


Figura 4.3 Croquis de ubicación del CIRA/UAEMex (CIRA, 2016)

El laboratorio de modelos hidráulicos del CIRA ofrece las condiciones de trabajo adecuadas para la experimentación en el área de hidráulica ambiental. El edificio posee una altura de aproximadamente 20 metros y un área de captación para agua de lluvia de $150 m^2$. Además, el laboratorio cuenta con la infraestructura suficiente para el desarrollo y funcionamiento de modelos hidráulicos, por ejemplo, un sistema listo para la captación de agua de lluvia con bajadas a la tubería del edificio (con un diámetro de 6 pulgadas y hecho de PVC).

5. Resultados

El prototipo desarrollado en este trabajo ha sido instalado en el Laboratorio de Modelos Hidráulicos perteneciente al Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEM), ubicado dentro del área geográfica de la cuenca del CARL. El presente capítulo muestra los resultados obtenidos durante el diseño, construcción y evaluación del sistema de generación de energía eléctrica mediante la cosecha de lluvia y que de acuerdo con el marco teórico y metodología es una turbina tipo Pelton debido al bajo rango de velocidad específica a la que puede operar, el peso reducido de la turbina y la capacidad de operar con flujo intermitente.

5.1. Definición de condiciones máximas y mínimas de operación

En definición de condiciones de operación se identificaron y definieron restricciones y limitaciones de operación para el diseño del sistema, siendo las condiciones mínimas impuestas por el generador eléctrico y las condiciones máximas por la cantidad de precipitación diaria disponible de la zona de estudio. Por un lado, un torque mínimo, para el generar energía por medio de un dinamo de 12V, fue acotado en $0.03 \text{ N} \cdot \text{m}$ de acuerdo con pruebas empíricas realizadas con un torquímetro para el presente estudio, además de operar a 200 revoluciones por minuto para producir energía eléctrica y una intensidad de corriente nominal del 0.5 A.

Por otro lado, la tabla 5.1 y 5.2 muestran los valores estadísticos T_s y T_k (ecuaciones 2.10 y 2.11 respectivamente) obtenidos mensualmente por el test de normalidad para los valores de lámina acumuladas y duraciones de eventos desde registros de SMN (2016) y encontrados en el Anexo 3.

Por ello, se empleó una función de densidad de probabilidad gamma (ecuación 2.16), para las láminas acumuladas de precipitación estimadas desde el registro histórico de la estación 0994200-Calixtlahuaca ESIME (SMN, 2016; anexo 3). Ajustando esta f.d.p. se obtuvieron como resultados la lámina esperada, la duración media de eventos y el caudal promedio disponible para cada mes del año (tabla 5.3). Se puede apreciar que los meses con un valor alto de lámina de precipitación y caudal se presenta en los meses de junio, julio, agosto y en menor medida septiembre y octubre.

Tabla 5.1 Valores estadísticos T_s y T_k de test de normalidad para lámina de precipitación en el periodo 2013-2015.

	Test Lámina de precipitación			
Mes	Factor T_s	Hipótesis	Factor T_k	Hipótesis
Enero	27.68	No aceptada	101.38	No aceptada
Febrero	2.11	No aceptada	17.41	No aceptada
Marzo	12.73	No aceptada	20.60	No aceptada
Abril	0.24	Aceptada	16.53	No aceptada
Mayo	8.00	No aceptada	7.46	No aceptada
Junio	0.07	Aceptada	4.93	No aceptada
Julio	5.68	No aceptada	4.19	No aceptada
Agosto	0.41	Aceptada	0.96	Aceptada
Septiembre	3.34	No aceptada	0.45	Aceptada
Octubre	0.04	Aceptada	11.68	No aceptada
Noviembre	16.90	No aceptada	36.52	No aceptada
Diciembre	5.12	No aceptada	43.80	No aceptada

Elaboración propia con información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2016)

Tabla 5.2 Valores estadísticos T_s y T_k de test de normalidad para duración de eventos en el periodo 2013-2015.

	Test Duración de eventos			
Mes	Factor T_s	Hipótesis	Factor T_k	Hipótesis
Enero	19.38	No aceptada	49.06	No aceptada
Febrero	15.98	No aceptada	29.64	No aceptada
Marzo	18.09	No aceptada	18.09	No aceptada
Abril	17.23	No aceptada	37.40	No aceptada
Mayo	11.56	No aceptada	22.65	No aceptada
Junio	12.20	No aceptada	20.99	No aceptada
Julio	6.08	No aceptada	2.98	No aceptada
Agosto	9.62	No aceptada	13.00	No aceptada
Septiembre	9.58	No aceptada	11.60	No aceptada
Octubre	20.73	No aceptada	66.58	No aceptada
Noviembre	12.19	No aceptada	19.52	No aceptada
Diciembre	21.16	No aceptada	59.07	No aceptada

Elaboración propia con información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2016)

Tabla 5.3 Lámina de precipitación, duración de eventos y caudales esperados para el caso de estudio.

Mes	Lámina [mm]		Duración [min]		Q _{mínimo}	Q _{máximo}
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Q (X ₁ ,Y ₁) [L/s]	Q (X ₂ ,Y ₁) [L/s]
Enero	0	0	0.0000	2.1619	0	0
Febrero	0.0014	0.0286	0.0000	5.5287	0	0
Marzo	0.0171	0.1228	0.0000	5.2718	0	0
Abril	0.1078	0.4412	0.6969	11.0809	0.0269	0.1103
Mayo	0.8035	1.8428	16.5204	39.1786	0.1216	0.2789
Junio	2.7252	4.5465	24.5941	57.6282	0.2770	0.4622
Julio	3.605	5.5348	24.9299	44.1023	0.3615	0.5550
Agosto	4.4422	6.204	26.7553	47.7608	0.4151	0.5797
Septiembre	3.8818	5.8903	35.9825	73.7953	0.2697	0.4092
Octubre	0.6496	1.733	8.5056	28.6987	0.1909	0.5094
Noviembre	0.0015	0.0232	2.9293	11.2929	0.0013	0.0198
Diciembre	0	0.0092	0.2744	13.9192	0.0000	0.0838

Elaboración propia.

5.2. Diseño de la turbina

Considerando una carga hidráulica por posición H_T de 20 metros y el caudal mínimo promedio de 0.40 l/s , obtenido desde la tabla 5.3, se estimó la potencia teórica $P_{teorica}$ (ecuación 2.2) de 79.016 W .

Las pérdidas locales de carga hidráulica del sistema están definidas principalmente por la rejilla protectora, el tipo de entrada del agua, por reducción y por cambio de dirección implementadas para el proyecto (figura 5.1) y se estimaron de acuerdo con la tabla 2.1. Los factores correspondientes fueron: a) para rejilla $K_{rejilla} = 0.209$ (con $C_f = 1.79$, $s_K = 1 \text{ mm}$ y $b_K = 5 \text{ mm}$); b) por entrada $K_{entrada} = 0.3$; c) por reducciones desde 6 a $1/2$ pulgadas en un rango de K entre 0.19 y 0.31 (tabla 5.4); d) por cambio de dirección $K_{codo} = 0.3$ con un codo a 45° .

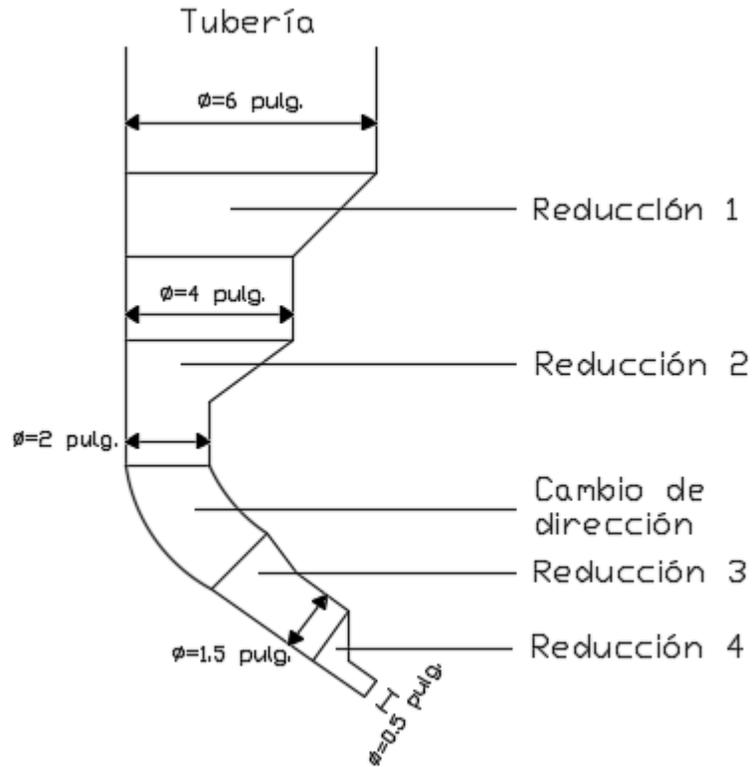


Figura 5.1 Secuencia de reducción en la tubería.

Tabla 5.4 Factores de pérdida por reducción de área.

No.	Reducción [pulgadas]	Angulo de reducción β	Factor de pérdida K
1	6 a 4	27°	0.23
2	4 a 2	27°	0.23
3	2 a 1.5	17°	0.19
4	1.5 a 0.5	52°	0.31

Elaboración propia.

El diámetro del chorro d_{jet} estimado a partir del proceso iterativo de la figura 3.3 proporcionó un valor de 1.41 cm (tabla 5.5). Donde, de acuerdo con los valores de número de Reynolds estimados, se presenta flujo turbulento en el sistema de conducción. Sin embargo, debido a la disponibilidad de tubería comercial, se empleó una tubería de PVC con un diámetro de 0.5 pulgadas (1.27 cm). Por lo tanto, el diámetro del chorro d_{jet} se considera el mismo valor del diámetro de la tubería.

Tabla 5.5 Resultados obtenidos del proceso de estimación del diámetro del chorro d_{jet} .

Iteración	Rugosidad Relativa [mm]	Numero de Reynolds Re	Factor de fricción f	Diámetro [cm]
0	-	-	-	0.76
1	0.0015	6.93×10^4	0.033	1.35
2	0.0015	3.74×10^4	0.040	1.40
3	0.0015	3.59×10^4	0.041	1.41
4	0.0015	3.59×10^4	0.041	1.41

Elaboración propia.

El diámetro de la turbina $\phi_{turbina} = 0.112 \text{ m}$ se obtuvo mediante la ecuación 3.8. Donde los valores de las variables son el torque mínimo impuesto por el generador $T_{minimo} = 0.03 \text{ N} \cdot \text{m}$, el caudal de diseño obtenido del análisis de precipitación $Q = 0.40 \text{ l/s}$, la velocidad angular de operación de la turbina $\omega_{turbina} = 200 \text{ rpm} = 20.94 \text{ rad/s}$ y el ángulo de salida del flujo en el cucharón $\theta = 15^\circ$.

Las dimensiones geométricas adicionales, longitud de *cucharón* L_{bucket} , longitud de paso L_{paso} , radio de rodete r_{rodete} , radio externo de la turbina $r_{externo}$, ángulo de separación δ , longitud l , el ángulo de separación de cucharones θ_{bucket} y el número n de cucharones, se muestran en la tabla 5.6. Estos valores fueron obtenidos respectivamente con las ecuaciones 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14; con excepción del ángulo de separación δ y la longitud l , que se obtuvieron de manera gráfica de acuerdo con Daugerthy (1920).

Tabla 5.6 Características geométricas adicionales de la turbina.

Característica geométrica	Valor
L_{bucket}	4.445 cm
L_{paso}	2.54 cm
r_{rodete}	3.377 cm
$r_{externo}$	7.822 cm
δ	37°
l	94.464 mm
θ_{bucket}	48.567°
n	9

Elaboración propia.

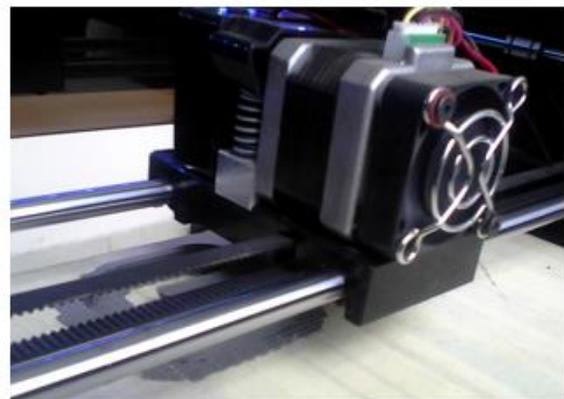
5.3. Manufactura de la turbina

Definidas las condiciones geométricas de la turbina, pudo ser construido el prototipo mediante un software de tipo CAD. Las características geométricas para el *cucharón* y el rodete se encuentran disponibles en el anexo 4.1 y anexo 4.2 respectivamente.

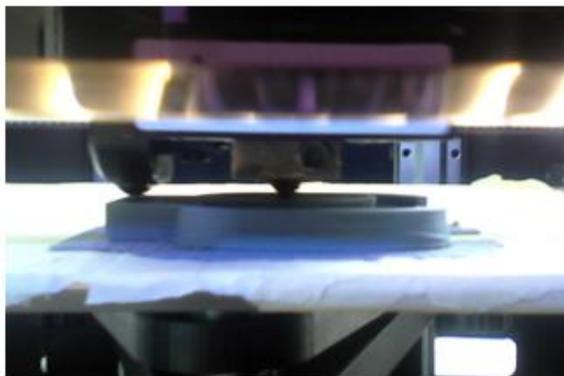
Una vez generado el modelo en CAD y seleccionado el material, se manufacturó la turbina mediante una impresora tridimensional marca Mbot (Mbot 3D, 2016) de una boquilla a una temperatura de $240\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un grosor de capa de impresión de 0.15 mm y una velocidad de inyección de material de 25 mm/s , como se muestra en la figura 5.2. Es importante mencionar, que entre más pequeños sean los parámetros de impresión mejor es la calidad de la pieza producida, sin embargo el tiempo de impresión aumenta simultáneamente. Además de que la manufactura del sistema es bastante rápida, la impresión de todos los elementos se realizó en un lapso de aproximadamente 34 horas.



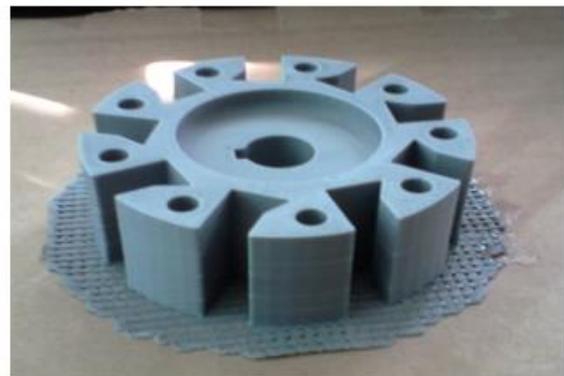
a. Impresión de *bucket* 1



b. Impresión de *bucket* 2



c. Impresión de *bucket* 3



d. Rodete impreso

Figura 5.2 Construcción de la turbina mediante impresión tridimensional.

Debido a la geometría de la turbina, la pieza se dividió en partes para facilitar su manufactura y manejo. La intención es de carácter preventivo, ya que en caso de que algún *cucharón* llegase a fracturarse por el desgaste se tendría que fabricar la pieza completa otra vez, con esta medida se prevé tal situación.

El eje que transmite la potencia de la turbina al generador eléctrico se manufactura de la misma manera. Una alternativa para la transmisión de potencia es mediante el uso de engranes o poleas para incrementar la velocidad angular y aumentar la producción de energía, pero de igual manera se incrementa la fricción y torque necesario para los giros. La primera versión de este dispositivo omite el uso de poleas. Las características geométricas del eje se pueden ver en los planos (Anexos 4.3 y 4.4).

Una vez que contamos con todos los elementos, podemos ensamblar finalmente el sistema como se muestra en la figura 5.3. Un punto importante es que el sistema fue aislado mediante una carcasa para protegerlo de agentes externos que puedan afectar su desempeño.



Figura 5.3 Modelo ensamblado.

5.4. Evaluación del sistema

La etapa 6 evalúa y cuantifica el desempeño del sistema sometido bajo diversas condiciones de operación.

Para la evaluación del sistema con caudal controlado, se planteó la idea de suministrar agua al sistema con un carga hidráulica de 0.43 m con respecto de la boquilla para observar el funcionamiento de la turbina en condiciones controladas mientras el circuito electrónico realizaba las lecturas de voltaje y de revoluciones por minuto. Dicho experimento se desarrolló durante lapsos de 5 y 10 minutos. La tabla 5.7 muestra el registro de datos obtenido durante la realización de las pruebas.

Tabla 5.7 Datos obtenidos de pruebas del sistema con caudal controlado.

Caudal	0.22 l/s			0.27 l/s			0.3 l/s			0.32 l/s			
	Minuto	RPM	Voltaje	Ω_{esp}	RPM	Voltaje	Ω_{esp}	RPM	Voltaje	Ω_{esp}	RPM	Voltaje	Ω_{esp}
	1	71	0.22	0.037	104	0.24	0.061	181	0.44	0.112	196	0.46	0.125
	2	145	0.31	0.077	223	0.47	0.13	170	0.46	0.105	204	0.48	0.13
	3	117	0.33	0.062	189	0.45	0.11	198	0.48	0.122	186	0.47	0.118
	4	179	0.29	0.094	204	0.43	0.119	174	0.43	0.107	-	-	-
	5	160	0.31	0.084	204	0.51	0.119	155	0.39	0.096	-	-	-
	6	123	0.3	0.065	189	0.48	0.11	-	-	-	-	-	-
	7	139	0.32	0.073	184	0.48	0.108	-	-	-	-	-	-
	8	115	0.32	0.061	193	0.48	0.113	-	-	-	-	-	-
	9	112	0.3	0.059	199	0.47	0.116	-	-	-	-	-	-
	10	50	0.29	0.026	190	0.47	0.111	-	-	-	-	-	-
Media		136.25	0.31	-	187.9	0.448	-	175.6	0.44	-	195.33	0.47	-

Elaboración propia.

En cuanto a los valores de velocidades específicas obtenidos, con un caudal de 0.22 l/s el rango de velocidad específica se encuentra entre 0.025 y 0.1. Lo anterior indica un bajo rendimiento debido a la baja acumulación del fluido en la tubería. Con un caudal de 0.27 l/s el rango de velocidades específicas se mantiene en su mayoría entre 0.11 y 0.13 mostrando una mayor estabilidad al aprovechar la carga hidráulica operando a presión por la rápida acumulación de agua. Para los caudales mayores, se observó un pequeño descenso en la velocidad específica, que si bien se mantienen estables, es posible inferir que la carga por posición establecida para estas condiciones fue rebasada por la acumulación del fluido.

A partir de los valores medios, la eficiencia de la turbina fue estimada como la relación entre potencia de la turbina y la potencia teórica, así como la eficiencia del generador como la relación entre la potencia estimada a partir del voltaje medido y la potencia de la turbina (tabla 5.8).

Tabla 5.8 Desempeño de la turbina bajo condiciones controladas.

Caudal [m ³ /s]	Carga hidráulica [m]	Potencia teórica [W]	RPM	Torque [Nm]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia Turbina [W]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Turbina	Eficiencia Generador
0.00022	0.43	0.928	136.25	0.011	0.3	0.5	0.151	0.15	0.163	0.993
0.00027	0.43	1.139	187.9	0.018	0.448	0.5	0.349	0.224	0.306	0.642
0.0003	0.43	1.265	175.6	0.019	0.44	0.5	0.343	0.22	0.271	0.641
0.00032	0.43	1.350	195.33	0.022	0.47	0.5	0.382	0.235	0.283	0.615

Elaboración propia.

Es importante destacar que la turbina alcanzó una eficiencia de 30% con un caudal Q de 0.27 l/s , siendo esta la más alta. Mientras que con un caudal de 0.22 l/s tuvo la más baja con 16%. Sin embargo, a partir de un caudal $Q = 0.27 \text{ l/s}$, la eficiencia de la turbina se mantuvo en un rango de entre 27 y 30%. Por otro lado, el generador mostró una eficiencia constante de un poco más del 60% con caudales mayor a 0.27 l/s .

La segunda evaluación consistió en someter bajo condiciones reales de precipitación al sistema por un periodo de 30 días. En este caso, se asociaron, como lo muestra la tabla 5.9, los valores medios registrados de voltaje y revoluciones por minutos de cada día con la lámina de precipitación diaria registrada por la estación meteorológica más cercana en la zona (por cuestiones ajenas, registros diezminutarios de lámina de precipitación en el laboratorio no estuvieron disponibles). Con dicha relación, se estima la eficiencia generada por parte de la turbina (ecuación 2.4) y la entregada por el generador (ecuación 2.16) de acuerdo con los datos registrados por el circuito electrónico (figura 3.5). La tabla 5.10 muestra el registro de datos obtenido durante el periodo de prueba.

Durante el periodo de prueba de 30 días en el mes de septiembre, se registró el voltaje y las revoluciones por minuto generadas cuando se presentó un evento de precipitación. Sin embargo, no todos los eventos permitieron generar electricidad por no ser lo suficientemente intensos o por disparidad de ocurrencias entre la ubicación de la estación meteorológica y el laboratorio de modelos hidráulicos.

Tabla 5.9 Datos obtenidos durante un periodo de 30 días.

Día	RPM	Voltaje	Lámina de precipitación [mm]
02/09/2016	191.2	2.514	11.0
03/09/2016	0	0	1.7
04/09/2016	0	0	5.5
05/09/2016	84.5	1.75	1.5
06/09/2016	100.4	1.27	1.5
11/09/2016	0	0	19.0
13/09/2016	0	0	3.0
16/09/2016	0	0	6.7
17/09/2016	0	0	19.7
18/09/2016	227.22	7.91	2.5
19/09/2016	588.15	16.97	0.0
21/09/2016	0	0	1.5
23/09/2016	211.07	13.12	11.0
25/09/2016	0	0	4.2
27/09/2016	0	0	2.5
28/09/2016	0	0	6.7
29/09/2016	184.88	2.73	14.3
30/09/2016	0	0	1.0
		46.264	113.3

Elaboración propia con información del Servicio Meteorológico Nacional (2016).

Tabla 5.10 Desempeño de la turbina bajo condiciones reales de precipitación.

Fecha	Lámina [mm]	Caudal [m ³ /s]	Potencia teórica [W]	RPM	Torque [Nm]	Voltaje [V]	Potencia Turbina [W]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Turbina	Eficiencia Generador
02/09/2016	11	0.0055	1079.1	191.2	0.8	0.5028	16.0183	0.2514	0.0148	0.0157
05/09/2016	1.5	0.0008	147.15	84.5	0.0293	0.2975	0.259	0.1487	0.0018	0.5743
06/09/2016	1.5	0.0008	147.15	100.4	0.0332	0.2714	0.3489	0.1357	0.0024	0.3889
18/09/2016	2.5	0.0007	136.25	227.22	0.0591	0.8778	1.4055	0.4389	0.0103	0.3123
23/09/2016	11	0.001	192.69	211.07	0.0826	0.5134	1.8252	0.2567	0.0095	0.1406
29/09/2016	14.3	0.004	779.35	184.88	0.4783	0.3700	9.2608	0.1850	0.0119	0.0200

Elaboración propia.

Sometiendo el sistema a condiciones reales, se obtuvo una eficiencia de la turbina alrededor del 2%. Mientras que el generador alcanzó una eficiencia máxima de 57% con una lámina de 1.5 mm. La notable diferencia en las eficiencias estimadas con

condiciones controladas en relación con las medidas durante el mes de prueba demuestra que el sistema funciona diferente a lo sugerido en el diseño. La causa puede ser atribuida a que el diámetro de 6 pulgadas observado en las instalaciones no permite que el flujo trabaje a presión debido a la poca acumulación (o tubo lleno). Derivado de esto, es posible asumir una diferencia en la carga hidráulica neta con la que trabaja el sistema.

Para estimar la carga hidráulica neta se relacionó el voltaje generado y la eficiencia del sistema, con las revoluciones por minuto generadas y el gasto por medio de una regresión polinómica (figura 5.4). La eficiencia y el voltaje muestran una clara tendencia ascendente en función de las revoluciones por minuto generadas en la turbina (figura 5.4 c y 5.4d). Sin embargo, en función del caudal (figuras 5.4a y 5.4b) el comportamiento de dichas variables cambia de sentido a partir de los 2.7 l/s (atribuido entre otras cosas a la posición de descarga del caudal).

Los valores de carga neta para condiciones reales se pueden apreciar en la tabla 5.11. Se puede observar que a pesar de contar con una altura de 20 metros, el valor real de la carga hidráulica tiene un valor máximo de 0.9 m . Esto debido al amplio diámetro de la tubería que evita la acumulación del agua rápidamente.

Tabla 5.11 Estimación de carga hidráulica neta en el sistema.

Fecha	Lámina [mm]	Duración de evento [min]	Caudal [m^3/s]	RPM	Torque [Nm]	Potencia Turbina [W]	Eficiencia	Carga hidráulica neta [m]
02/09/2016	11	5	0.0055	191.2	0.8	16.0183	0.3061	0.8914
05/09/2016	1.5	5	0.0008	84.5	0.0293	0.259	0.0655	0.0212
06/09/2016	1.5	5	0.0008	100.4	0.0332	0.3489	0.0927	0.0404
18/09/2016	2.5	9	0.0007	227.22	0.0591	1.4055	0.4181	0.8395
23/09/2016	11	28	0.001	211.07	0.0826	1.8252	0.3659	0.6679
29/09/2016	14.3	9	0.004	184.88	0.4783	9.2608	0.2880	0.6668

Elaboración propia.

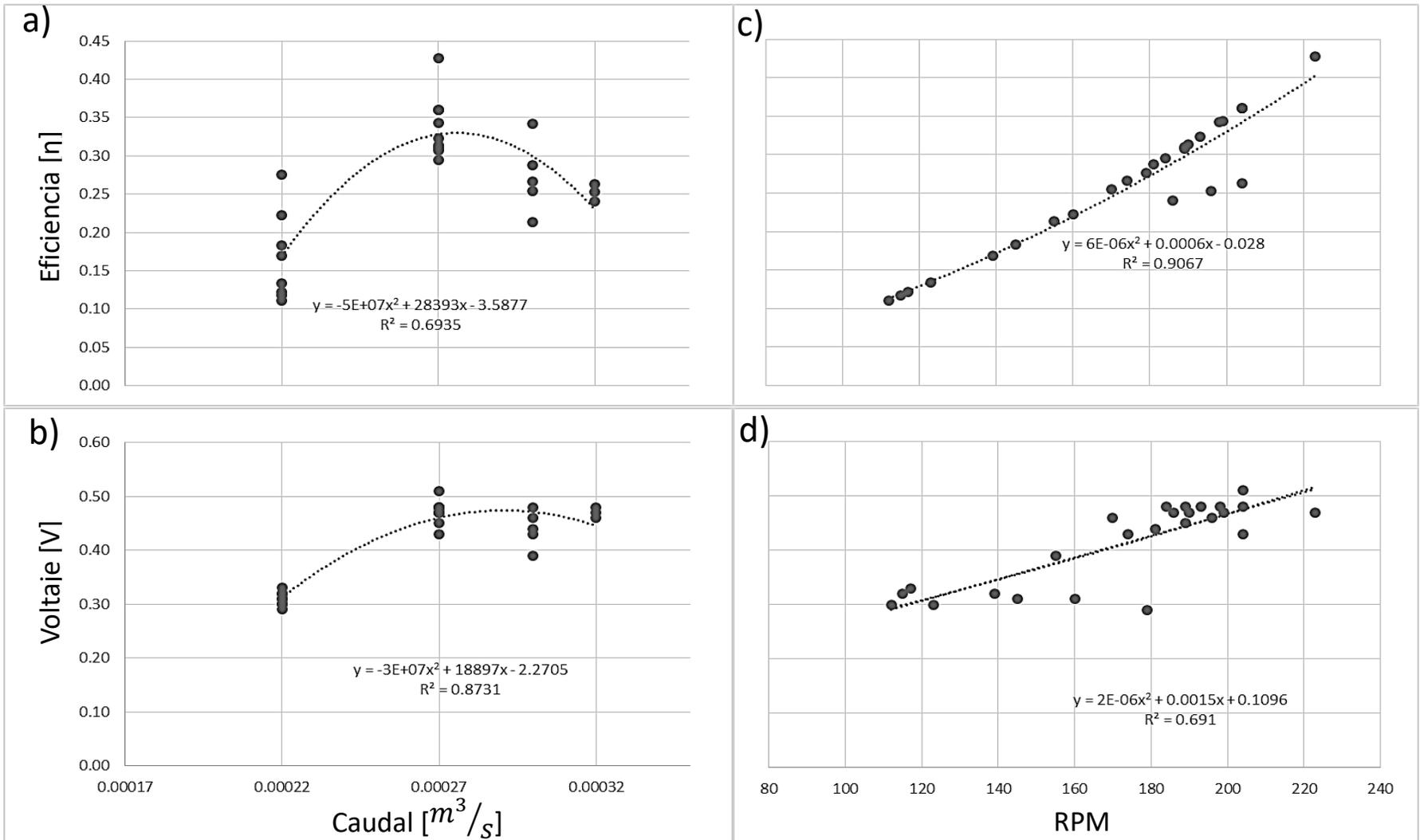


Figura 5.4 Correlación entre eficiencia η , voltaje generado V_{gen} , gasto Q y RPM.

Para el tiempo de almacenamiento de energía (ecuación 3.15), considerando una intensidad nominal de 0.5 A del generador en una hora y una batería con capacidad de almacenamiento de 12 Ah, se estimó una duración de carga media de 24 horas. Sin embargo, la duración media de eventos al día durante septiembre fue de 0.1266 h/día . Por lo que, para lograr almacenar la energía equivalente a la batería sería necesario un lapso de 189.57 días en condiciones similares a las presentadas en septiembre.

Por otro lado, los generadores cuentan con un controlador de carga cuya función es regular la intensidad de carga para alargar la vida útil de la batería, evitando sobrecargas o sobredescargas. Así, el controlador no permite que la batería se descargue a más del 50% o se cargue a más del 90% de su capacidad de almacenamiento (Damia Solar, 2016). Por lo que es posible esperar un lapso menor aproximadamente de 75.82 días. Un ejemplo de uso para esta batería podría ser con lámparas de emergencia, autos eléctricos pequeños y equipo industrial o médico.

El beneficio económico se estimó para conocer el ahorro generado por la utilización de un sistema de este tipo. Para ello se estimó la energía unitaria E_u con un valor estimado de $5.615 \text{ J/mm} \cdot \text{m}$ a partir de los datos registrados en septiembre (tabla 5.12).

Tabla 5.12 Estimación de energía unitaria en el sistema.

Equipo	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Horas al día [h/d]	Energía generada [Wh]	Energía [J]	Energía unitaria E_u [J/mm.m]
Nano central hidroeléctrica	2.8329	0.5	1.41645	0.1266	0.17932	645.56125	23.12676

Elaboración propia.

Suponiendo un comportamiento similar de la eficiencia bajo estas condiciones en el resto del año, es posible inferir un ahorro energético, y a su vez un ahorro monetario, en función de la tarifa eléctrica asignada (Tabla 5.13). Por ejemplo, de acuerdo con la tarifa eléctrica 2 (aplicada a servicios que destinan energía en baja tensión como hospitales, pequeñas industrias, etc.) se produce un ahorro de \$158.35 anual; mientras que con tarifa temporal 7 (valido en servicios que destinan la energía de manera temporal) se genera un ahorro de \$305.16 anual, ambas tarifas establecidas por CFE (CFE, 2016).

El costo de construcción del sistema (incluyendo circuito electrónico de medición de voltaje y rpm pero omitiendo la instalación de la tubería) fue de \$720.00. Por lo que, se podría esperar la recuperación de inversión en 5 años para el caso de tarifa eléctrica 2 y 2 años en el caso de tarifa eléctrica 7.

Tabla 5.13 Beneficio económico esperado.

Beneficio Económico Mensual							
Mes	Energía unitaria [J/mm.m]	Lámina esperada por día [mm]	Carga hidráulica neta [m]	Tarifa Eléctrica 2 [\$/kWh]	Tarifa Eléctrica HM-R [\$/kWh]	Ahorro Tarifa 2 [\\$]	Ahorro Tarifa HM-R [\\$]
Enero	23.13	0.00	20	2.482	4.783	0.00	0.00
Febrero	23.13	0.00	20	2.482	4.783	0.01	0.02
Marzo	23.13	0.02	20	2.482	4.783	0.17	0.33
Abril	23.13	0.11	20	2.482	4.783	1.03	1.99
Mayo	23.13	0.80	20	2.482	4.783	7.94	15.31
Junio	23.13	2.73	20	2.482	4.783	26.07	50.24
Julio	23.13	3.61	20	2.482	4.783	35.64	68.68
Agosto	23.13	4.44	20	2.482	4.783	43.91	84.63
Septiembre	23.13	3.88	20	2.482	4.783	37.14	71.56
Octubre	23.13	0.65	20	2.482	4.783	6.42	12.38
Noviembre	23.13	0.00	20	2.482	4.783	0.01	0.03
Diciembre	23.13	0.00	20	2.482	4.783	0.00	0.00
Total						\$158.35	\$305.16

Elaboración propia con información del SMN y CFE (2016).

Teniendo en cuenta que para reducir el tiempo de recuperación, es necesario incrementar la eficiencia del sistema, la figura 5.5 muestra el tiempo estimado de recuperación de la inversión en función de la eficiencia. Observando que con una eficiencia del 80%, el tiempo se reduce a 1.75 años.

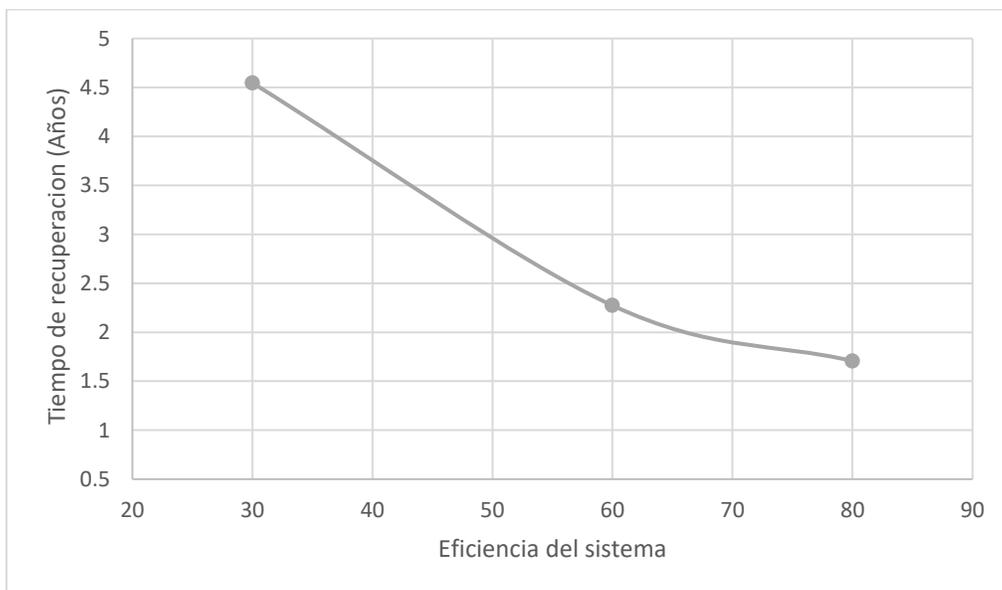


Figura 5.5 Correlación entre eficiencia y tiempo de recuperación.

5.5. Alcances y sugerencias

Cualquier modelo tiene por objetivo el aproximarse lo más cercano posible al fenómeno real que trata de simular. Sin embargo, durante el desarrollo de este trabajo pudieron encontrarse diversas causas o circunstancias que influyen en los resultados que se obtuvieron. Algunos se presentan por omisión en las bases teóricas de los métodos empleados, omisiones durante el proceso de diseño o de construcción o baja precisión en los dispositivos utilizados.

La tabla 5.14 indica algunas causas que llegaron a afectar a algunos elementos del sistema y sugerencias de cambios para mitigar el efecto de dichos factores.

Tabla 5.14 Alcances del sistema de generación de energía eléctrica mediante la cosecha de lluvia.

Etapa	Alcance/Limitación	Sugerencia
Selección de turbina	Incertidumbre en eficiencia con otra turbina. Evaluando las características de operación de los principales tipos de turbinas, se optó por la selección de una turbina de tipo Pelton. Sin embargo, la turbina de tipo Francis parece otra opción viable debido a sus características de funcionamiento como operar en rangos de velocidad específica menor a 1, un bajo riesgo de erosión en los álabes, además de ser un tipo de turbina muy utilizada para la generación de energía eléctrica.	Desarrollar un proyecto alternativo con una turbina tipo Francis con el mismo fin de generar energía eléctrica mediante la cosecha de lluvia. El mayor obstáculo será la modificación de la instalación para emplear este tipo de turbina.
Condiciones de operación	Inferencia de eventos con pocos registros. Debido a la poca información sobre eventos, los valores de láminas y duraciones estimados desde las funciones de densidad de probabilidad podrían variar con muestras mayores.	Obtener base de datos con mayor número de registros y detallados sobre los eventos ocurridos en la zona de estudio.
Selección de generador eléctrico	Generador orientado para otro fin. Para este proyecto se empleó un dínamo comercial de 12V, sin embargo, este generador está orientado para otras aplicaciones bajo diferentes condiciones de operación.	Elaboración propia del generador para ajustar las condiciones de operación a un valor reducido del torque mínimo.

Diseño de la turbina	Desconocimiento de la influencia de dimensiones en la eficiencia. Durante la fase de diseño se emplearon ecuaciones empíricas definidas por diferentes autores. Sin embargo, un análisis más detallado de las variables podría beneficiar en el proceso de diseño.	Realizar un análisis de sensibilidad de variables para estimar su efecto en la eficiencia. Elaborar una relación de la eficiencia alcanzada para cada cambio en la geometría de la turbina. Mediante similitud dinámica, diseñar experimentos para someter al modelo bajo diferentes escenarios (mínimos y máximos).
Construcción de la turbina	Desconocimiento de la influencia de emplear un material de manufactura distinto. Analizando las opciones disponibles en el mercado para impresoras tridimensionales.	Utilizar un material distinto en la manufactura del prototipo. Realizando la comparación del rendimiento de la turbina en ambos casos.
Evaluación del sistema	Pequeño número de experimentos con caudal controlado. Si bien se realizaron pruebas bajo diferentes condiciones, queda aún indefinido el verdadero alcance de un sistema de estas características.	Realizar experimentos con alta variación de la carga hidráulica H y caudal Q empleando similitud dinámica para extender el rango de operación y observar el comportamiento del sistema.
	Sin registros en tiempo real de precipitación. Debido a situaciones ajenas, no se contó con registros detallados de los eventos ocurridos durante la realización de pruebas.	Realizar registro de datos manera frecuente y periódica. Procurando almacenar todos los datos necesarios para el análisis estadístico.
	Suposición de entrada tangencial. Donde cualquier variación de la entrada genera un choque y por ende pérdidas de energía y disminuye el rendimiento del sistema.	Simulación mediante <i>Computational Fluids Simulation (CFD)</i> o velocimetría de partículas para el diseño de la entrada del chorro para diferentes valores de Q.
	Operación del sistema a tubo lleno. La infraestructura disponible en la zona de estudio fue utilizada para dirigir el agua de lluvia hacia la turbina y hacer funcionar el sistema. Sin embargo, el diámetro de la tubería tiene un valor muy alto (6 in) para la aplicación que se pretende utilizar ya que la acumulación de agua se gesta de manera muy lenta y eso evita que la presión y la velocidad del chorro de agua aumenten.	Reducir el diámetro de la tubería. Por lo que se aumenta la presión y velocidad del chorro de agua a la entrada de la turbina. O bien, implementar una válvula que permita el almacenamiento temporal del agua a lo largo del tubo de conducción.

Elaboración propia.

6. Conclusiones

Por medio de esta investigación fue posible la generación de energía eléctrica por medio de una nano turbina que operó en un sistema urbano de cosecha de lluvia, aceptando la hipótesis planteada. Sin embargo, la producción de energía eléctrica del sistema ha sido menor al 40% de la potencia esperada. Por ello, atendiendo a las sugerencias y comentarios del capítulo anterior, aún debe mejorarse las características de diseño, utilizar un generador más apto, el método de construcción y la instalación de infraestructura adecuada y con ello aumentar la productividad y eficiencia del sistema.

De los objetivos específicos planteados, primero, la definición de condiciones de operación según las condiciones climatológicas de la zona de estudio, los valores obtenidos permitieron obtener el caudal de diseño. El análisis estadístico permitió apreciar la cantidad de precipitación que podía presentarse a lo largo del año. Por ejemplo, los meses de junio, julio y agosto presenta una mayor lámina de precipitación, mientras que los valores de duración de eventos de septiembre y octubre podrían permitir la operación del sistema incluso con bajas láminas de precipitación diaria.

Es importante destacar que debido a la distancia que separa a la estación meteorológica considerada para medición de la precipitación y la ubicación del sistema (7 km.), se originó una incertidumbre entre la relación del gasto por precipitación del mes de septiembre y el voltaje generado por el sistema. Lo anterior debido a la disparidad de eventos entre un lugar y otro. Lo cual, como se mencionó anteriormente, se requiere de un registro más completo sobre los eventos de precipitación ocurridos en la zona de estudio.

La selección del generador fue de suma importancia para el diseño de la turbina, principalmente por el torque mínimo para su operación. Fue utilizado uno de los generadores comerciales de menor rango (0.5 A), sin embargo, es planteado para posteriores estudios la elaboración de un generador propio.

El material de manufactura para la nano turbina fue seleccionado tomando en cuenta los materiales más comunes para impresoras tridimensionales y sus propiedades mecánicas. Se optó por utilizar ABS, sobre el PLA, que es el polímero más común del mercado. La selección fue de mucha utilidad por la cualidad del material a soportar procesos de mecanizado posterior a la impresión, esto debido a la necesidad de adaptar el sistema de monitoreo para contabilizar revoluciones por minuto.

El proceso del diseño geométrico de la turbina encaro la escasa información sobre métodos o procesos en la literatura. Por ello, con base en las ecuaciones fundamentales del movimiento de fluidos (ecuaciones de continuidad, energía y cantidad de movimiento angular) fueron definidas las principales variables geométricas: diámetro del rotor, número de *cucharones*, diámetro del chorro, longitud del *cucharón*, entre otros.

La medición de energía eléctrica generada mostró diferentes valores para cada una de las situaciones a las que el modelo fue sometido. Bajo condiciones controladas, el sistema fue probado con 4 valores de caudales, de los cuales se observó una eficiencia de hasta del 30%. Además, este proceso permitió identificar e inferir una operación diferente a la diseñada bajo condiciones reales. Por ello, fue posible estimar las cargas hidráulicas netas con las que trabajó el sistema, que fueron menores a lo esperado debido a la poca acumulación de agua en el sistema de conducción. A partir de esto es posible sugerir cambios en la infraestructura de conducción y conexión entre la captación de agua de lluvia y la nano turbina.

Finalmente, el uso de sistemas de este tipo para la generación de energía eléctrica, puede parecer aun poco llamativo en términos económicos debido a la baja eficiencia obtenida y la cantidad de energía eléctrica producida. Sin embargo, este proyecto, orientado al desarrollo de tecnología propia, establece las bases y el conocimiento para sugerir cambios de análisis, dimensionamiento, operación e implementación de accesorios para hacer de este sistema, una alternativa sustentable a la generación de energía eléctrica a bajo costo.

Referencias

- 3D ALCHEMY. Material Properties. Disponible en: <https://www.3d-alchemy.co.uk/3d-printing-material-properties.html#ABS>. [Fecha de consulta: 24 de Febrero de 2016].
- 3DImpresoras3D. (2016). Qué es una impresora 3D. Disponible en: <http://www.3dimpresoras3d.com/que-es-una-impresora-3d/>. [Fecha de consulta: 30 de Septiembre de 2016].
- Atthanayake, I. U. (2009). Analytical study on flow through a Pelton turbine cucharón using boundary layer theory. *International Journal of Engineering and Technology*, 9 (9), 11-15.
- Autodesk Inc. (2016). AutoCad. Descripción general. Disponible en: <http://www.autodesk.mx/products/autocad/overview>. [Fecha de consulta: 6 de Noviembre de 2016].
- Autodesk Sustainability Workshop (2015). Rainwater Harvesting. Disponible en: <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/rainwater-harvesting>. [Fecha de consulta: 13 de Septiembre de 2016].
- Bustamante, I. y Sanz-García, J.M. (2006). Las precipitaciones y su medida, en: Díaz-Delgado, C., Esteller, M.V. & López-Vera, F. (eds.), Recursos hídricos. Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica, 2º Edición, RIPDA-CYTED/ CIRA-UAEM/Piriguazu Ediciones, Uruguay/México, 747 p.
- Cârsteanu, A.A., Bã, K.M. & Díaz-Delgado, C. (2006). Nociones de hidrología estocástica, en: Díaz-Delgado, C., Esteller, M.V. & López-Vera, F. (eds.), Recursos hídricos. Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica, 2º Edición, RIPDA-CYTED/ CIRA-UAEM/Piriguazu Ediciones, Uruguay/México, 747 p.
- CAT. (2016). Generación de potencia eléctrica. Disponible en: http://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/electric-power-generation/diesel-generator-sets/1000001060.html. [Fecha de consulta: 26 de Septiembre de 2016].
- CFE. (2016). Tarifas de consumo. Disponible en: http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=2&Anio+2017&mes=1. [Fecha de consulta: 30 de Noviembre de 2016].
- CIRA. (2016). Centro Interamericano de Recursos del Agua. Disponible en: <http://cira.uaemex.mx/>. [Fecha de consulta: 30 de Noviembre de 2016].
- CONAGUA. (2014). Estadísticas del Agua en México. SEMARNAT, México, 239 p.
- Damia Solar. (2016). Para que sirve y Como se utiliza un regulador de carga. Disponible en: http://www.damiasolar.com/actualidad/prova/prova-8-cas_8_3. [Fecha de consulta: 30 de Noviembre de 2016].
- Dagerthy, R. L. (1920). Hydraulic turbines. 3º Edition, Mc Graw Hill, United States, 281 p.
- Dixon, S. (2005). Fluid mechanics, thermodynamics of turbomachinery. 5º Edición, Ed. Elsevier Butterworth–Heinemann, United Kingdom. 381 p.

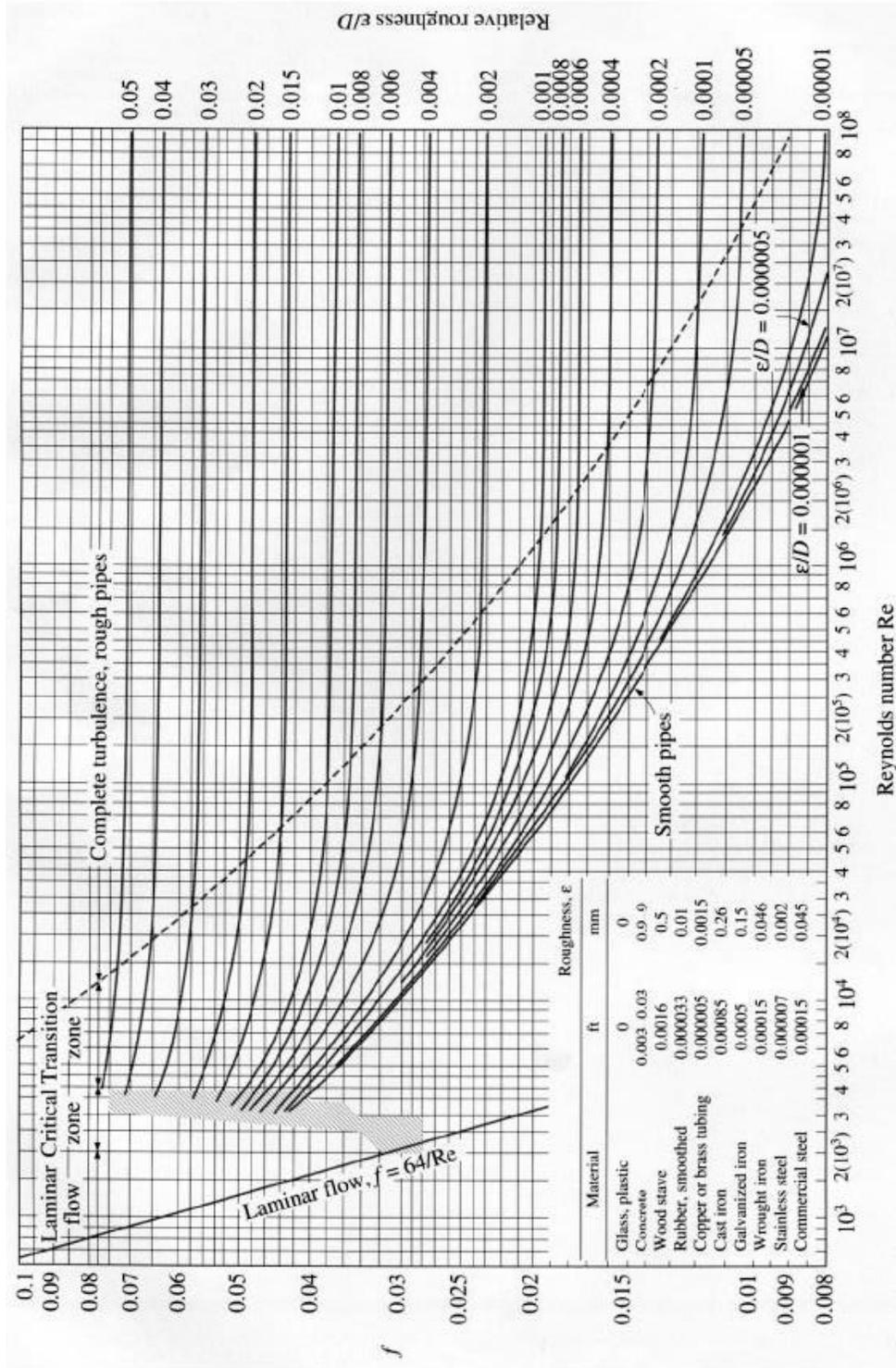
- Escalante, C. A., Reyes, L. (2005). Análisis de sequias, Volumen 1. UNAM, México, 1110 p.
- Exatecno (2016). Turbina Francis. Disponible en: <http://www.exatecno.net/ampliacion/energia/TurbinaFrancis.htm>. [Fecha de consulta: 2 de septiembre de 2016].
- Fonseca, C. R. (2014). Sistemas de modelos termohidrológicos de evaluación de eficiencia y optimación en asignación en recursos hídricos (Tesis de doctorado). CIRA-UAEMex, México.
- Fox, R.W. & McDonald, A.T. (1995). Introducción a la mecánica de fluidos. 4º Edición, Mc Graw-Hill, México, 916 p.
- Fox, R., McDonald, A. & Pritchard, P. (2002). Introduction in Fluid Mechanics. 6º Edición, John Wiley & Sons, EE. UU. 489 p.
- Giafa (2014). Energía hidráulica. Disponible en: <http://www.giafa.com.ar/content/energ%C3%AD-hidr%C3%A1ulica>. [Fecha de consulta: 9 de Septiembre de 2016].
- Hydro Power (2016). International Network for Sustainable Energy. Disponible en: <http://www.inforse.org/europe/dieret/Hydro/hydro.html#TOP>. [Fecha de consulta: 2 de Septiembre de 2016].
- H. Ayuntamiento de Toluca. (2014). Plan municipal de desarrollo urbano de Toluca. Gaceta de Gobierno Estatal del 12 de Septiembre de 2014 México. 550 p.
- H. Ayuntamiento de Toluca. (2008). Reglamento de Imagen Urbana del Municipio de Toluca. Gaceta Especial Municipal. México, 29 p.
- Ideaz 3D. (2016) Manufactura e impresión 3D. Disponible en: http://www.ideaz3d.com/?page_id=3477. [Fecha de consulta: 30 de septiembre de 2016].
- Ikeda, T., Lio, S., & Tatsuno, K. (2010). Performance-of-nanohydraulic-turbine-utilizing-waterfalls. *Renewable Energy*, 35(1), 293-300.
- INECC. (2012). Características generales de la zona metropolitana del Valle de Toluca. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/folleto/299/carac.html>. [Fecha de consulta: 10 de Octubre de 2016]
- JICA. (2015). Guía técnica para cosechar el agua de lluvia. Ministerio del Ambiente, Ecuador, 23 p.
- Kostenko, M.P., Piotrovski, L.M. (1975). Máquinas eléctricas. Tomo I, Ed. MIR, Rusia, 599 p.
- Llamas, J. (1989). Hidrología General. Principios y aplicaciones. 1º Edición, UAEM, México, 627 p.
- Li, Z., Boyle, F., & Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination*, 260, 1-8.
- Mataix, C. (1986). Turbo maquinas hidráulicas, en: Mataix, C., Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas. Ed. del Castillo, 2º Edición, España, 660 p.

- Mbot 3D. (2016). 3D Printer. Disponible en: <http://www.mbot3d.com/product/list#printers>. [Fecha de consulta: 10 de Octubre de 2016].
- Mekdaschi Studer, R. & Liniger, H. 2013. Water Harvesting: Guidelines to Good Practice. Center for Development and Environment (CDE), Bern; Rainwater Harvesting Implementation Network (RAIN), Amsterdam; MetaMeta, Wageningen; The International Fund for Agricultural Development (IFAD), Rome.
- Nasir, B. A. (2013). Design of Micro-Hydro- Electric Power Station. *International Journal of Engineering and Advance Technology*. 2(5), 39-47.
- Navidi, W. (2006). Estadística para Ingenieros. 1º Edición, Mc Graw-Hill, México, 868 p.
- Oocities (2009). Distribuciones de probabilidad. Disponible en: <http://www.oocities.org/ar/vetterworld/estadistica/distribuciones.htm>. [Fecha de consulta: 22 de Septiembre de 2016].
- Orenge International Ltd (2016). Kaplan turbines. Disponible en: <http://www.orengine.com/en/orengine-international-hydro-turbines-kaplan.php>. [Fecha de consulta: 2 de Septiembre de 2016].
- Potter, M. & Wiggert, D. (2002). Turbomaquinaria. En Mecánica de Fluidos. 3º Edición, Ed. Thomson, México, 769 p.
- Prestolite. (2005). Manual de taller. Alternadores. Prestolite. 42 p.
- Prospector. (2016). Ácido Poli láctico (PLA) Propiedades típicas. Disponible en: <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/34/c/t/acido-polilactico-pla-properties-processing>. [Fecha de consulta: 30 de Septiembre de 2016].
- Rao, A. R., Hamed, K.H. (2000) Flood frequency analysis, CRC Press LLC, EUA. 350 p.
- Secretaría de Energía. (2013). Indicadores Nacionales, en: Secretaría de Energía, Balance Nacional de Energía 2012. Secretaria de Energía, 1º Edición, México, 148 p.
- SMN. (2016). Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's). Disponible en: <http://smn.conagua.gob.mx/es/emas>. [Fecha de consulta: 20 de Abril de 2016].
- SolidWorks Corporation. (2011). Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks. SolidWorks Corporation, EE. UU, 152 p.
- Sotelo, G. (2002). Hidráulica General. Volumen 1. Ed. Limusa, Mexico, 561 p.
- Steren S.A. de C.V. (2016). Batería recargable sellada, de ácido-plomo. Disponible en: <http://www.steren.com.mx/bateria-recargable-sellada-de-acido-plomo-de-12-volts-12-ah.html>. [Fecha de consulta: 30 de Noviembre de 2016].
- Stratasys. (2016). Impresoras 3D. Disponible en: <http://www.stratasys.com/mx/impresoras-3d/production-series/objet1000-plus>. [Fecha de consulta: 30 de septiembre de 2016].

- Thomas, R., Kirisits, M., Lye, D., & Kinney, K. (2014). Rainwater harvesting in the United States: a survey of common system practices. *Journal of cleaner production*, 75(1), 166-173.
- Ultra Print 3D. (2016). Qué es la impresión en 3D? Disponible en: <http://www.impresion3dmexico.com.mx/que-es-la-impresion-en-3d.php>. [Fecha de consulta: 30 de septiembre de 2016].
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. (1999). Probabilidad y estadística para ingenieros. 6º Edición, Prentice Hall, México, 752 p.
- White, F. (1998). Fluid mechanics. 4º Edition, Mc Graw-Hill, EE. UU., 826 p.
- Wildi, T. (2007). Maquinas eléctricas y sistemas de potencia. 6º Edición. Pearson Educación, México, 960 p.
- Your Hydro Ltd (2015). Pelton turbines. Disponible en: <http://www.yourhydrouk.com/products/pelton-turbines/>. [Fecha de consulta: 2 de Septiembre de 2016].

Anexos

Anexo 1. Diagrama universal de Moody



Fuente: Sotelo, G. Hidráulica General. 2002.

Anexo 2. Registros de lámina de precipitación diaria del mes de Septiembre 2016 (Estación 0994200-Calixtlahuaca, ESIME - México)

Station CALMX Calixtlahuaca, Méx. 0994200 192000	Lluvia(mm)
Fecha	
01-sep-16	0.0
02-sep-16	11.0
03-sep-16	1.7
04-sep-16	5.5
05-sep-16	1.5
06-sep-16	1.5
07-sep-16	0.4
08-sep-16	0.0
09-sep-16	0.0
10-sep-16	0.0
11-sep-16	19.0
12-sep-16	0.5
13-sep-16	3.0
14-sep-16	0.0
15-sep-16	0.0
16-sep-16	6.7
17-sep-16	19.7
18-sep-16	2.5
19-sep-16	0.0
20-sep-16	0.0
21-sep-16	1.5
22-sep-16	0.7
23-sep-16	11.0
24-sep-16	0.0
25-sep-16	4.2
26-sep-16	0.5
27-sep-16	2.5
28-sep-16	6.7
29-sep-16	14.3
30-sep-16	1.0
Lámina Total	115.4

Fuente: Comisión Nacional del Agua. 2016

Anexo 3. Láminas acumuladas de precipitación y duraciones asociadas a partir de registros en la Estación 0994200-Calixtlahuaca, ESIME - México)

Día	Enero					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	0.08599603	0.05040802	0	0	0	0
2	0.09024447	0.01653882	0	0	0	0
3	0.01868693	0.01897655	0	0	0	0
4	0.00903449	0.00193926	0.00233531	0	0	0
5	0.00336585	0.00244483	0	10	0	0
6	0.00930446	0.05760477	0.0006004	0	0	0
7	0.00703985	0.11380921	0.00119305	0	0	0
8	0.00561071	0.01258992	0.00149131	20	0	0
9	0.00856783	0.0023897	0.00232715	10	0	0
10	0.00196451	0.00455448	0	0	0	0
11	0.02158104	0.00161733	0.00643861	0	0	0
12	0.00335111	0.00375948	0.2131727	0	0	0
13	0.00972798	0.00135896	0.22534187	0	10	0
14	0.00336643	0.00628753	0.27298868	0	0	0
15	0.00446815	0.00189129	2.59539652	0	0	0
16	0.02881284	0.00415735	9.49552441	0	0	0
17	0.01981027	0.00204749	3.00289774	0	0	0
18	0.00447469	0.05466824	0.01656572	0	0	0
19	0.00335602	0.11616439	0	0	0	0
20	0.00755646	0.20126247	0.08634357	0	0	0
21	0.01894377	0.16416065	0.00131244	10	0	0
22	0.0149525	0.00128889	0	30	0	0
23	0.05783669	0.00938754	0	10	0	0
24	0.25307691	0.12284956	0.00231883	0	0	0
25	0.28152433	0.20483854	0.00200615	0	0	0
26	2.68276262	0.05568644	0.01443852	0	0	0
27	2.20891356	0.00051661	0	0	0	0
28	0.18231691	0.00057672	0.00609908	0	0	0
29	0.20180458	0.00051368	0	0	0	0
30	0.06866059	0.00035868	0.00333119	0	0	0
31	0.01828329	0.00180166	0	0	0	0

Día	Febrero					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	0.01649689	0.00074314	0	0	0	0
2	0.02801686	0.07029247	0.00228585	0	0	0
3	2.03020096	0	0.11442681	0	0	0
4	3.26553965	0.00975549	0.01141465	0	0	0
5	3.09147835	0.254987	0.56943697	0	0	0
6	3.20748258	0.13298838	0	0	0	0
7	0.00011978	0.05415224	0	40	50	0
8	0.0409867	0.03678174	0.00576331	0	60	0
9	0.63163096	0.67927712	0.00118785	0	50	0
10	0.32332656	0.31559733	0.00118785	0	0	0
11	0.07170548	0.47672191	0.04587283	0	10	0
12	0	0.17896923	0.00089089	0	0	0
13	0	0.01501058	0	0	0	0
14	0.01986675	0.00226191	0	0	0	0
15	0	0.01544499	0.00313609	0	0	0
16	0.01167514	0	0.00375725	0	0	0
17	0.01064085	0.01084764	0.01546473	0	0	0
18	0.01734656	0.00384634	0.44911551	0	0	0
19	0.14818971	0.06186444	0.35442129	0	0	0
20	0.20107165	0.0122902	0.45649019	20	0	0
21	0.07993958	0.00047349	3.37265062	0	0	0
22	0	0.00325217	0.9809891	0	0	0
23	0.06414769	0.0112564	0	0	0	0
24	0	0.10919066	0	0	0	0
25	0.14805387	0.0003583	0	0	0	0
26	0.02551555	0.00204913	0	0	0	0
27	0.01067748	0.03057562	0	0	0	0
28	0.02746149	0.00889509	0.00254314	0	0	0

	Marzo					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
Día	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	0	0.03865409	0	0	0	0
2	0	0.50436693	0.00578371	20	0	0
3	0.01199446	0.32470775	0.00120979	0	0	0
4	0.03437748	0.06393845	0	0	0	0
5	0.03234348	0.32481694	0	0	0	0
6	0.00171229	0.27479115	0	0	0	0
7	0.00470881	0.02075493	0.06996466	0	0	0
8	0.00343262	0	2.59023166	0	0	0
9	0.8339349	0.0013491	0.11558815	0	0	0
10	1.05123508	0.00951061	0.00526972	0	0	0
11	2.37049007	0.00092426	0.03283581	0	0	0
12	3.0591259	0.21717247	1.32627463	0	0	0
13	1.22163689	0.16257279	0.1290732	60	0	0
14	0.3477641	0.10838185	0.01496714	0	0	0
15	0.00580998	0.0721916	0.00087137	60	0	0
16	0.00358407	0.05419093	0.27019393	40	0	0
17	0.01717718	0	0.18586466	40	0	0
18	0	0	4.83885574	0	0	0
19	0.00507517	0.10914109	0.26280445	0	0	0
20	1.03508174	0	2.23320985	0	0	0
21	0.15481536	0.21830139	0.13504602	0	0	0
22	0.01341193	0.05920173	0.00596755	0	0	0
23	0.03174971	0.05768093	0.00508159	0	0	0
24	0.06907418	0.04251018	1.47962761	0	0	0
25	0.03657553	0.06117717	2.10334158	0	10	0
26	0.05210248	0.09202222	0.05361843	0	10	0
27	1.7386018	0.00387058	0	0	0	0
28	0.27703109	0.0296489	0	0	0	0
29	0.14963536	1.86677766	0.01503553	0	0	0
30	0.28768453	4.89178181	0	0	0	0
31	0.30412534	0.7710014	0.00247478	0	0	0

	Abril					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
Día	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	1.16261375	0.0349909	0	0	130	0
2	0.47928342	0.00196302	0.00504089	0	10	0
3	3.89986253	0	0	0	0	0
4	4.17788887	0.00583321	0	0	0	0
5	1.3579011	0	0.00530416	0	0	0
6	0.11099888	0.00323898	0.0068016	0	0	0
7	0.04363065	0.00049048	0.00091108	0	0	0
8	0.00248987	0.00014961	0.03011561	0	0	0
9	0.00549733	0.01128309	0.01946825	0	0	0
10	0	0.71680552	0.01082275	0	0	0
11	0	0.02110137	0.18615556	0	10	0
12	0.02925215	0.10001307	0.09115776	0	0	0
13	0.01605597	0.90655386	0.05111395	0	0	0
14	0	0.94678771	0.01510012	0	0	0
15	0.00617892	0.58153486	0.04477261	0	0	0
16	0.00466324	5.82204676	0.04709755	0	0	0
17	0.03588293	1.24558365	0.00553328	0	0	0
18	0.09594282	1.92298484	0.0040545	0	50	0
19	1.06552136	1.86637092	1.40378034	0	70	0
20	0.11236259	0.22766878	0.49145669	0	10	0
21	0.13185449	1.13507104	8.21988678	0	10	0
22	0.57118934	1.93774116	1.5490427	0	20	0
23	0.6425941	0.46806815	0.10542807	0	100	0
24	1.51096523	0.96869719	0.08990031	0	10	0
25	2.70959568	8.69658756	0.1245073	0	10	0
26	0.5542739	2.95050836	0.41398558	0	0	0
27	4.31076097	1.30826402	0.15745571	0	0	0
28	0.70911676	2.77505159	0.11117453	0	0	0
29	1.38530934	2.15087867	0.0287661	0	60	0
30	2.48619723	4.90396309	0.11152472	0	40	0

	Mayo					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
Día	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	5.98570013	5.47518587	0.30288678	0	0	0
2	0.98357224	0.73803037	0.01623272	0	0	0
3	0.41779691	0.03737498	0.00281798	0	0	0
4	0.36554104	0.03281585	0.37916887	0	20	0
5	4.05620766	0.28193936	0.0580751	0	0	0
6	0.47977349	0.53897661	0.02743312	0	0	0
7	0.21547326	0.19035767	0	0	140	0
8	1.19778073	0.51544946	0	0	80	0
9	5.79196119	1.94627404	0.08137555	0	10	0
10	0.86171275	1.23868597	0.71732533	0	50	0
11	0.38141897	3.49324894	3.35275006	0	30	0
12	2.00998855	0.25922787	1.00605524	0	0	90
13	15.331439	0.9689073	4.32749796	40	0	50
14	10.5985889	1.76556754	7.87781668	120	20	70
15	3.12581134	2.23747158	11.0316515	60	10	0
16	0.1055026	2.9675324	6.22095013	20	0	50
17	0.51530486	4.01490307	3.31991267	20	0	50
18	2.29942966	2.78356099	1.4466784	10	0	10
19	11.2337008	0.98710382	4.2421174	10	0	20
20	5.7849803	1.50465882	8.71252823	20	0	20
21	1.49028111	2.06991887	8.51015949	20	10	20
22	0.38348913	1.17249215	5.21838284	50	0	90
23	1.92186558	0.6599859	1.03400576	90	20	20
24	2.14325142	0.36532456	0.47779295	30	60	40
25	10.9048367	0.12295973	0.10081585	10	120	0
26	6.21481466	0.37605321	0.18811281	10	10	10
27	3.07662559	1.97836804	0.1489819	10	80	30
28	1.21074939	0.74174106	0.86963063	20	120	100
29	1.26177788	0.51381171	3.91722322	10	290	10
30	0.910128	0.05708683	2.39671254	0	20	70
31	0.29991496	0.17256458	3.49517894	0	110	90

	Junio					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
Día	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	0.04045926	1.23791671	3.42056394	0	10	50
2	0.08982683	5.41416311	1.52333415	30	0	40
3	0.09306281	0.10036973	0.85100251	30	0	10
4	0.1304245	0.23241395	0.12088808	0	70	0
5	1.96638262	1.93472838	0.25991893	0	100	30
6	1.42206156	5.21118498	0.00893396	0	50	0
7	3.76122522	10.5336189	0.20453934	0	0	10
8	10.0489531	13.1296597	0.66374904	0	0	10
9	6.10386705	10.9253511	2.70869398	270	0	10
10	2.06171703	23.4319096	0.58742648	20	0	10
11	1.22546959	9.44638252	0.20533204	110	120	0
12	0.69284964	5.46846008	0.02234572	30	0	0
13	0.09669804	10.6414595	0.40135822	20	20	10
14	2.56323528	2.76884031	2.23416305	10	0	10
15	2.07610202	6.44986153	5.91870356	60	10	10
16	2.79890299	8.78240776	9.34809875	10	0	50
17	8.1352911	5.44351244	4.46744204	0	90	10
18	6.98368979	9.1561327	11.8423576	0	60	90
19	9.47477627	7.02511263	11.2186785	30	0	10
20	11.0361347	2.03472161	7.341043	150	50	70
21	5.20823431	0.54017198	8.54594421	20	20	0
22	1.64731216	1.39226127	9.31192875	30	0	40
23	2.97439981	2.70145583	2.09510183	20	30	90
24	4.11243296	5.65728569	9.43899727	20	150	0
25	5.30130196	4.99432087	13.4649611	0	330	60
26	6.13139009	3.56780648	10.2194538	0	370	10
27	3.13243985	4.31235123	4.95707417	70	140	40
28	4.82911539	2.59396768	6.3268013	40	10	60
29	3.05720997	2.52871847	5.54539633	90	80	30
30	2.77043247	3.29399133	14.4459944	50	110	10

Día	Julio					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	3.77825069	12.7483778	19.3969536	70	30	60
2	4.21388769	12.2618437	11.9612303	100	50	40
3	11.1007414	12.2182846	5.56766653	70	20	0
4	4.13384151	10.123662	5.7684474	10	50	20
5	2.56827831	12.4093332	0.76211762	130	0	40
6	2.98606825	5.20844555	2.28971386	0	60	140
7	4.24589872	11.8019667	5.77793646	0	20	50
8	2.85791445	13.6666603	1.35699129	0	10	0
9	1.54122996	22.6919117	1.83476555	0	20	0
10	1.83185732	14.7818518	7.58046389	0	20	0
11	0.64666098	4.89791965	1.37283397	140	10	0
12	6.87472439	2.69335914	2.72189951	60	0	0
13	0.85386813	2.75603533	2.62856531	60	20	0
14	0.49844503	8.78340435	7.16414547	40	110	0
15	3.51952386	5.2614522	2.84381008	0	90	0
16	13.3652201	3.31608295	4.06302071	10	50	0
17	11.2985888	3.26264024	2.21865582	10	100	0
18	10.4749126	11.4820824	2.65589452	0	20	0
19	6.00591469	4.54782677	1.50855982	50	70	0
20	4.7339921	1.17830074	0.66214567	0	70	0
21	7.94513226	1.37419426	1.95049691	60	20	0
22	6.77283525	1.33922315	6.28923988	0	10	0
23	3.49999833	1.50655222	1.44963062	0	10	0
24	10.7675076	3.52385068	5.54144382	10	10	0
25	3.78560138	4.90400648	5.86900139	60	0	0
26	3.36952043	6.05092144	4.95230389	60	0	0
27	7.17330265	7.92417479	3.37288141	10	0	0
28	8.22837448	2.43420482	4.09739017	20	40	0
29	6.11750555	4.81695795	0.77245182	20	140	0
30	3.85352468	10.050787	2.72769094	0	50	0
31	6.32633781	3.54191279	1.93735552	0	50	0

	Agosto					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
Día	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	3.77825069	12.7483778	19.3969536	70	30	60
2	4.21388769	12.2618437	11.9612303	100	50	40
3	11.1007414	12.2182846	5.56766653	70	20	0
4	4.13384151	10.123662	5.7684474	10	50	20
5	2.56827831	12.4093332	0.76211762	130	0	40
6	2.98606825	5.20844555	2.28971386	0	60	140
7	4.24589872	11.8019667	5.77793646	0	20	50
8	2.85791445	13.6666603	1.35699129	0	10	0
9	1.54122996	22.6919117	1.83476555	0	20	0
10	1.83185732	14.7818518	7.58046389	0	20	0
11	0.64666098	4.89791965	1.37283397	140	10	0
12	6.87472439	2.69335914	2.72189951	60	0	0
13	0.85386813	2.75603533	2.62856531	60	20	0
14	0.49844503	8.78340435	7.16414547	40	110	0
15	3.51952386	5.2614522	2.84381008	0	90	0
16	13.3652201	3.31608295	4.06302071	10	50	0
17	11.2985888	3.26264024	2.21865582	10	100	0
18	10.4749126	11.4820824	2.65589452	0	20	0
19	6.00591469	4.54782677	1.50855982	50	70	0
20	4.7339921	1.17830074	0.66214567	0	70	0
21	7.94513226	1.37419426	1.95049691	60	20	0
22	6.77283525	1.33922315	6.28923988	0	10	0
23	3.49999833	1.50655222	1.44963062	0	10	0
24	10.7675076	3.52385068	5.54144382	10	10	0
25	3.78560138	4.90400648	5.86900139	60	0	0
26	3.36952043	6.05092144	4.95230389	60	0	0
27	7.17330265	7.92417479	3.37288141	10	0	0
28	8.22837448	2.43420482	4.09739017	20	40	0
29	6.11750555	4.81695795	0.77245182	20	140	0
30	3.85352468	10.050787	2.72769094	0	50	0
31	6.32633781	3.54191279	1.93735552	0	50	0

	Septiembre					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
Día	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	11.6755457	14.1220331	3.67045951	20	50	50
2	7.58548737	5.1934762	1.30666351	0	180	120
3	3.72492814	5.83650875	10.8160076	70	50	70
4	3.16571879	3.33998942	9.6152668	20	50	10
5	4.61932659	3.58985496	8.18439293	180	60	370
6	4.30980825	1.87238085	7.83995056	50	0	10
7	11.6243763	2.90075827	8.67299747	30	10	10
8	5.72952795	4.0838809	8.58751202	80	30	0
9	6.61771679	4.93815136	13.7012663	50	0	0
10	11.119833	14.4573345	13.4540596	10	110	30
11	10.4749851	6.39041996	13.1216021	30	10	0
12	3.95234847	16.7280922	6.62349701	0	10	0
13	8.48108482	6.85429907	16.5423203	20	0	10
14	1.92603755	10.8309107	16.3081532	60	0	200
15	1.11869419	12.0866022	16.5501175	20	50	300
16	1.20946133	5.47887373	6.60714006	40	0	80
17	1.88839948	10.9811373	6.33368015	10	0	330
18	2.28097272	2.7038064	2.56468272	10	0	300
19	6.74467993	3.1610775	1.37004292	40	60	70
20	1.68978059	4.06719923	5.66373062	50	10	20
21	0.36436507	4.08091831	8.39976692	110	40	20
22	0.35914934	2.57767701	4.7069025	10	50	10
23	0.09350458	2.31681895	5.89540195	50	30	0
24	0.2163574	6.69371319	1.85790241	110	0	0
25	0.14081641	4.39658642	3.18568063	10	120	130
26	0.77878004	2.68881488	9.10135746	60	0	150
27	7.03317165	1.51227641	14.8377504	60	0	90
28	3.60777974	1.2069577	2.07810998	10	20	50
29	4.48207045	4.81110096	2.88912272	40	30	120
30	1.04572415	0.88136733	1.56642234	20	140	10

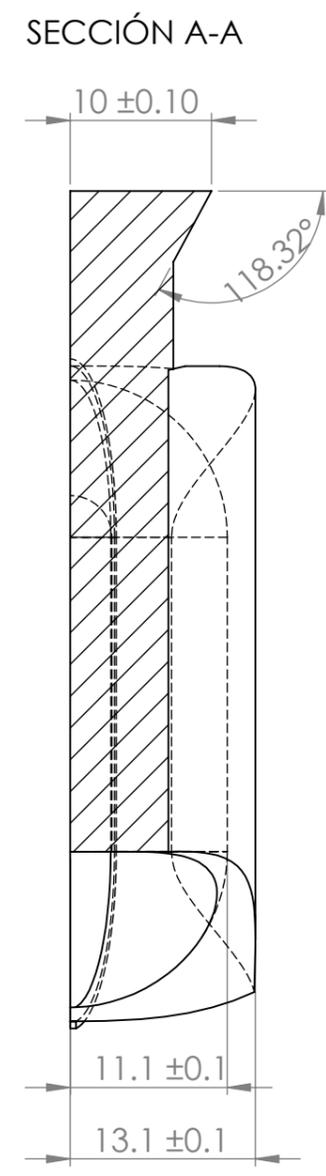
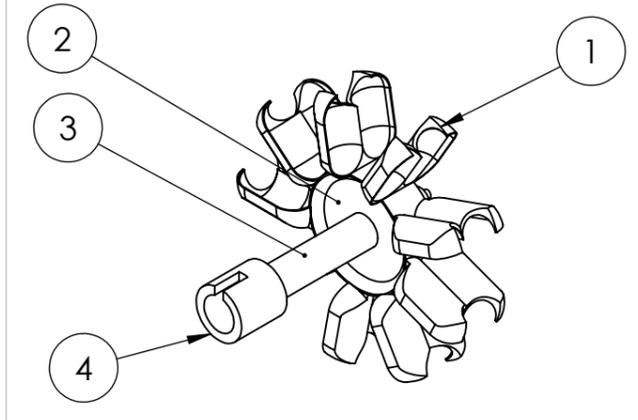
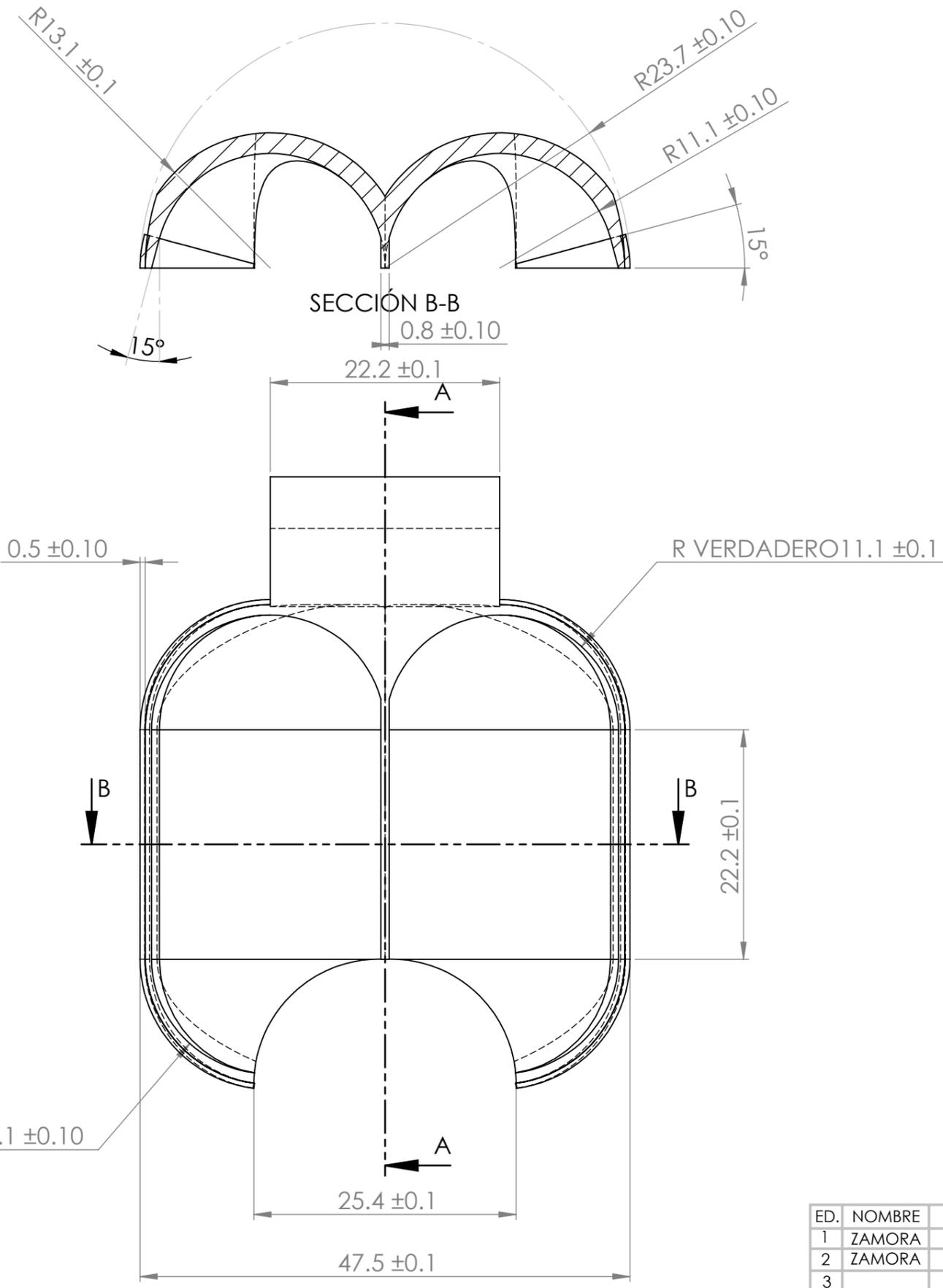
	Octubre					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
Día	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	0.30091339	0.27717316	0.14322515	0	0	0
2	0.37902394	0.04834418	0.69286197	0	0	0
3	0.64175546	0.33251178	2.2028966	0	320	0
4	0.29021403	0.1894173	3.52693152	0	90	0
5	3.82489657	0.77428377	3.410712	30	50	30
6	8.14869308	1.65551543	0.06856187	10	10	0
7	2.149966	2.73814964	2.80592775	10	0	0
8	3.54457521	4.87260485	5.82642603	0	0	60
9	1.33538926	5.84383345	11.3085032	100	0	10
10	0.9034611	2.26245975	7.25930595	40	50	0
11	0.32411057	1.66037941	5.05477285	40	30	0
12	0.19372301	3.51335955	14.572794	10	20	0
13	0.11470488	1.34909177	1.08050716	10	10	0
14	0.04064278	6.3017416	0.65490252	0	0	0
15	0.07331347	0.72825181	0.61784661	0	20	0
16	0.14170483	2.99189234	4.75368834	0	40	0
17	0.39363962	1.41317952	4.35839748	0	60	0
18	3.05901217	1.45841157	0.82996017	0	10	0
19	10.9126091	0.47849908	0.59924173	0	10	0
20	1.57009602	0.35864562	0.75875509	70	10	0
21	3.49107671	0.51756406	0.39013717	0	10	0
22	10.8057241	0.34658891	1.50939572	60	10	50
23	15.6456184	0.73850238	5.56451082	30	10	0
24	0.88374394	0.59243143	18.923975	10	0	20
25	0.08987753	0.10781173	2.48295498	0	0	20
26	0.02912341	0.13600762	7.09538031	0	0	10
27	0.11793838	0.14670977	2.95025778	0	0	40
28	0.06383098	0.18711092	1.23244333	40	10	40
29	0.13550639	0.34883696	1.09252191	0	0	20
30	0.03228245	0.01325969	7.50135899	0	0	30
31	0.181468	0.01945135	2.49063659	50	0	120

	Noviembre					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
Día	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	0.00779558	0.00786382	1.00153518	0	0	0
2	0.04225715	0.01496131	1.58273733	20	0	0
3	0.1352675	0.08269402	0.06797823	30	0	0
4	0.35501474	0.13062499	0.52945614	0	0	0
5	0.03692964	0.07127853	0.22884405	30	0	30
6	0.02600236	0.06281015	0.10361309	10	0	0
7	0.00742327	0.07297789	0.003543	0	0	0
8	0	0.00512542	0.02462491	50	0	0
9	0.01822972	0.04684501	0.08208304	30	0	0
10	0.0046995	0.003384	0.10930229	10	0	0
11	0.12364995	0	0.11498089	0	0	0
12	0.00665489	0	0.01641661	0	0	10
13	0.01330979	0	0.00920208	0	0	30
14	0.01456342	0.002256	0.03612751	0	10	10
15	0.04512744	0	0	0	0	0
16	0.14180225	0.00833493	0.03495871	0	0	0
17	2.43215466	0.00090115	0	0	0	0
18	0.59434587	0.14733587	0	50	0	0
19	0.17667641	0.01141215	0	10	10	0
20	0.16265531	0.00427525	0	10	90	0
21	0.89348561	0.01381331	0	40	30	0
22	2.5987134	0.0119311	0.003543	10	30	0
23	0.45082092	0.0062286	0.05171811	0	0	0
24	0.59085113	0	0.06800117	0	0	80
25	0.4007006	0.01994815	0.01995961	10	0	0
26	0.00181511	0.00121071	0.01558444	0	0	0
27	0.01413938	0	0.00591826	0	0	0
28	0.48188472	7.82E-05	0.00829351	0	0	0
29	0.10728165	0.11594296	0	0	0	0
30	0.10770056	0	0.0125441	0	0	0

	Diciembre					
	Lámina de precipitación [mm]			Duración máxima de evento [min]		
Día	2013	2014	2015	2013	2014	2015
1	0.03288496	0.00160513	1.51958692	0	0	0
2	0.00119514	0	0.02127255	0	0	0
3	0.0669491	0	0.32514998	0	0	0
4	0.65614015	0.01063094	0.68778533	0	0	20
5	2.55727911	0	0.15521722	0	0	0
6	0.12061438	0.01293385	0	0	0	0
7	0.00266082	0.02682307	0.01368789	0	0	0
8	0.11320031	0.00973419	0	0	0	0
9	0.13439187	0.18886848	0.00808852	0	0	0
10	0	0.02959696	0	0	0	0
11	0	0.00147801	0.01222814	0	0	0
12	0	0.01427677	0	0	0	0
13	0.00437663	0.01032432	0	0	0	0
14	0.11573752	0.00073745	0.04189518	0	0	10
15	0.03194897	0	1.06389666	0	0	0
16	0.00147643	0.29663149	1.59350312	40	0	10
17	0.00612205	0.02600694	0.03852411	0	0	0
18	0	0	0	0	10	0
19	0.00409721	0.00472961	0.21477745	30	0	0
20	0.01555272	0.0220715	0.52764797	0	0	0
21	0.00485049	0.00135139	0.00570471	0	0	0
22	0.00664127	0.00452239	0	0	0	0
23	0.08057564	0.01808714	0	0	0	0
24	0.00272394	0.0160422	0	0	110	0
25	0.1173014	0.00326852	0	100	200	10
26	0.2272841	0.06938007	0	70	0	0
27	0.2282436	0.00044571	0	30	10	0
28	0.00030157	0.01188552	0	10	0	0
29	0.11715705	0	0	0	0	0
30	0.1142446	0.0225348	0	0	0	0
31	0.00763337	0.01871878	0.11112659	0	0	0

Anexo 4. Planos de manufactura

4.1 Cucharón

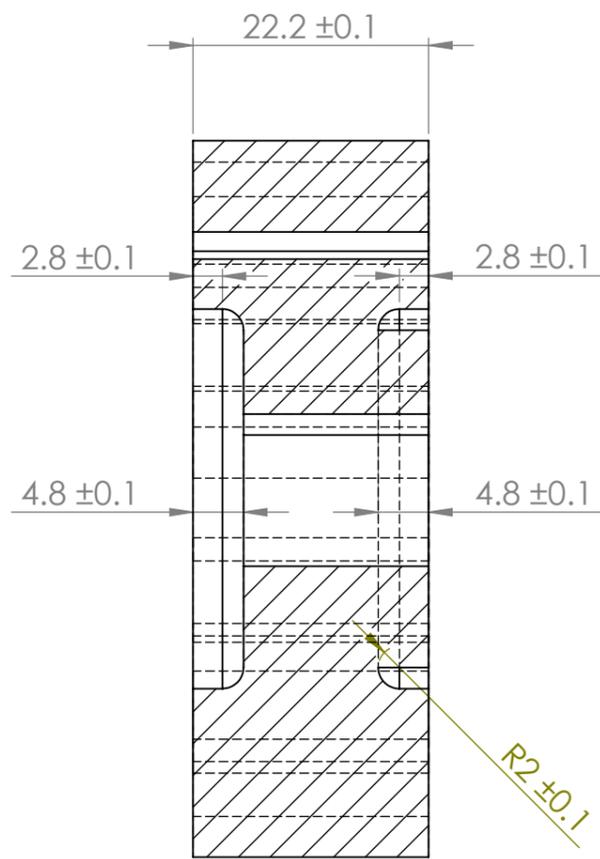
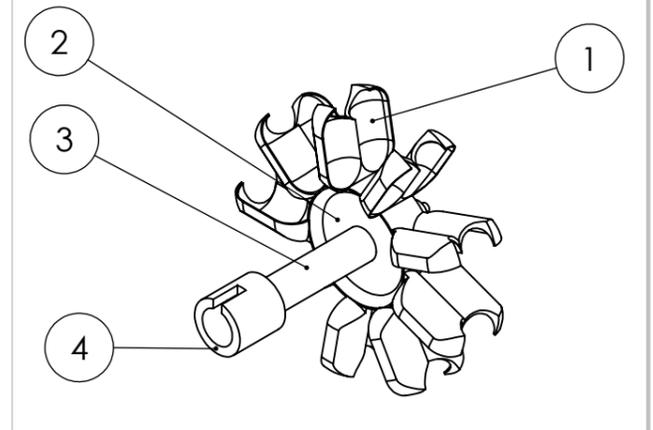


ED.	NOMBRE	FECHA	M.P.
1	ZAMORA	161206	ABS
2	ZAMORA	170131	
3			
ACAB.			S/N

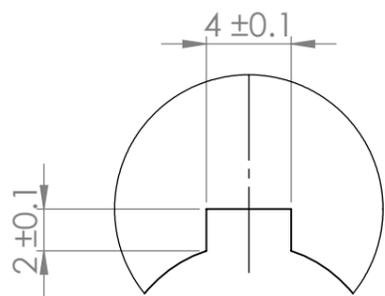
COTAS	mm.
ESC.	1:2
TOL.	± 0.1

<h1>Cucharón</h1>	
ZAJM920811:01	$1/4$

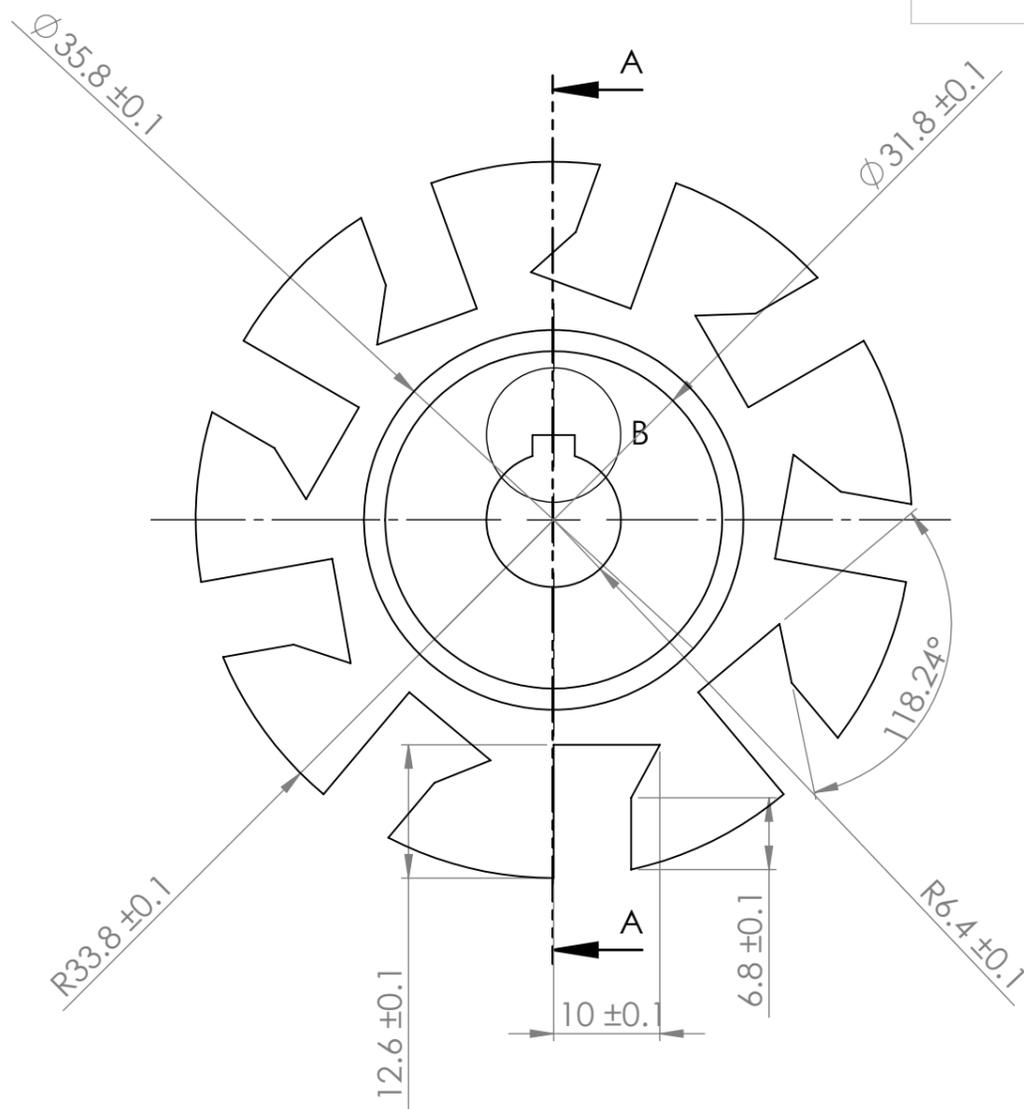
4.2 Rodete



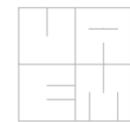
CORTE "AA"



DETALLE B
ESCALA 3 : 1



ED.	NOMBRE	FECHA	M.P.
1	ZAMORA	161206	ABS
2	ZAMORA	170131	
3			
ACAB.			S/N



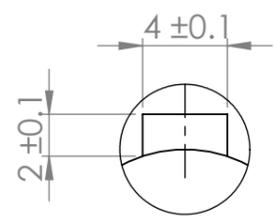
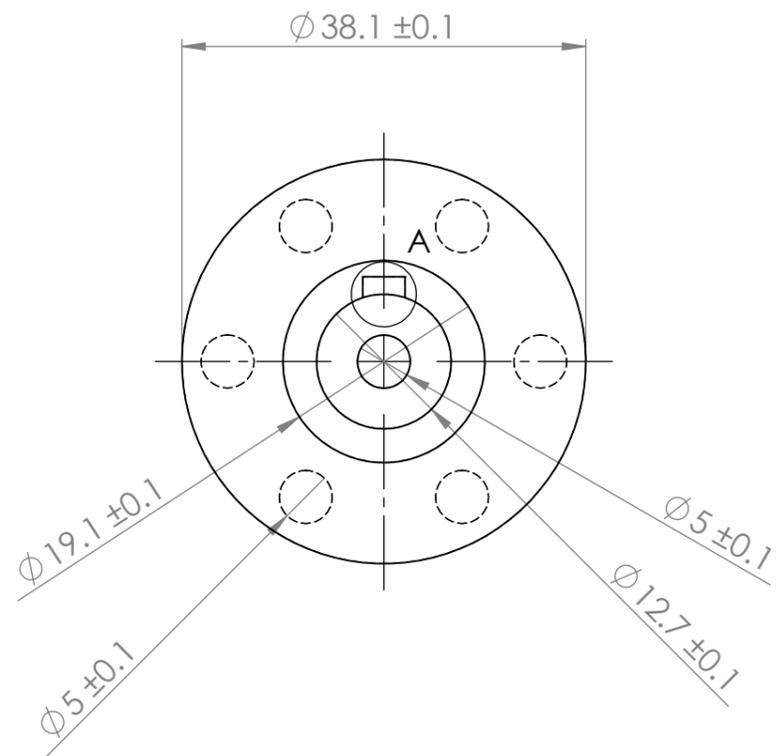
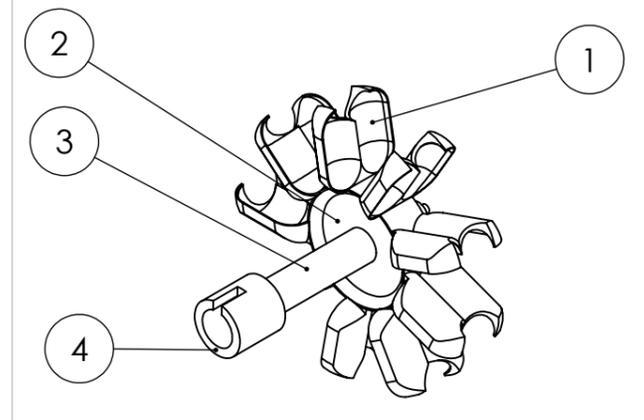
COTAS
mm.
ESC.
1.5:1
TOL.
±0.1

Rodete

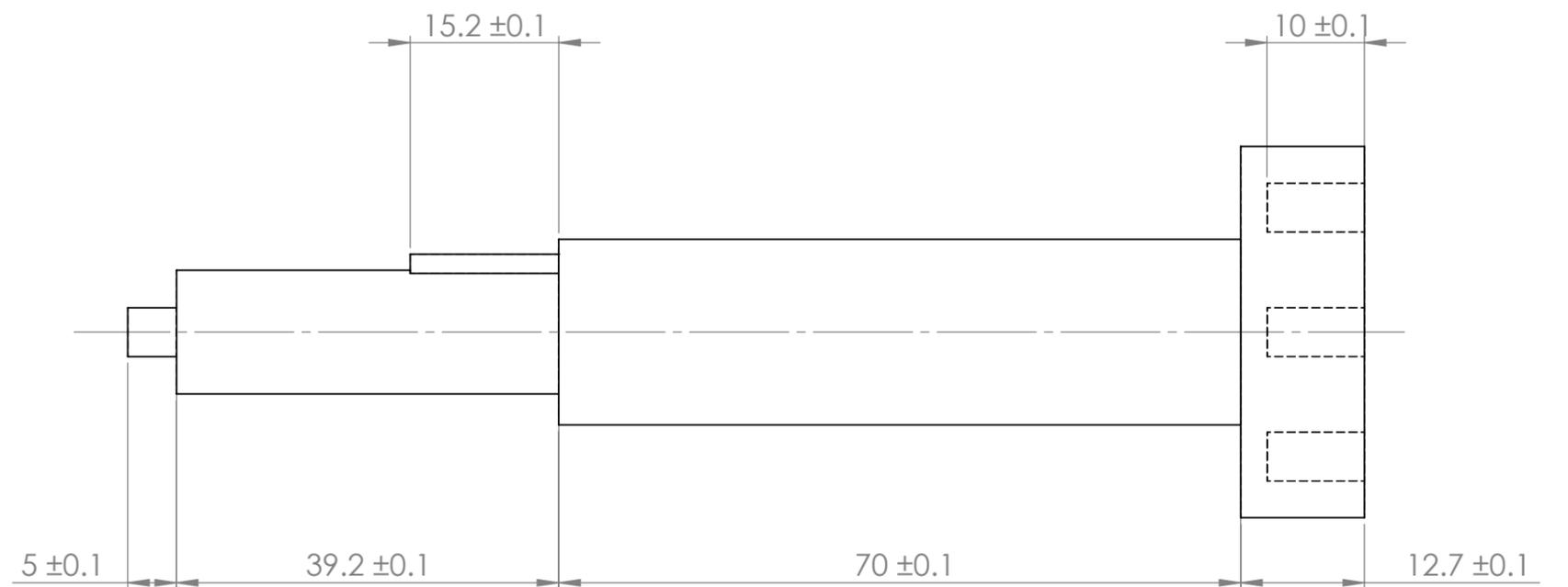
ZAJM920811:01

2/4

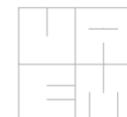
4.3 Eje



DETALLE A
ESCALA 3 : 1



ED.	NOMBRE	FECHA	M.P.
1	ZAMORA	161206	ABS
2	ZAMORA	170131	
3			
ACAB.			S/N



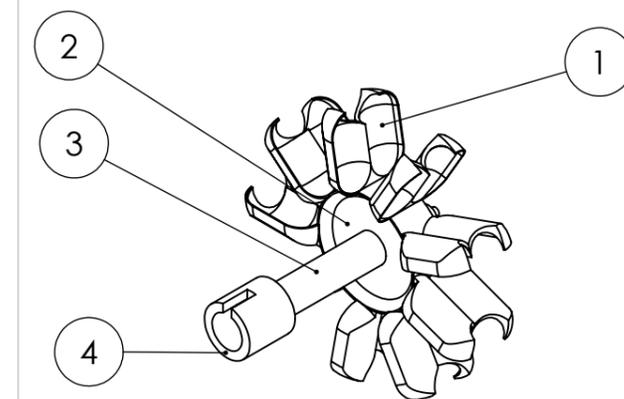
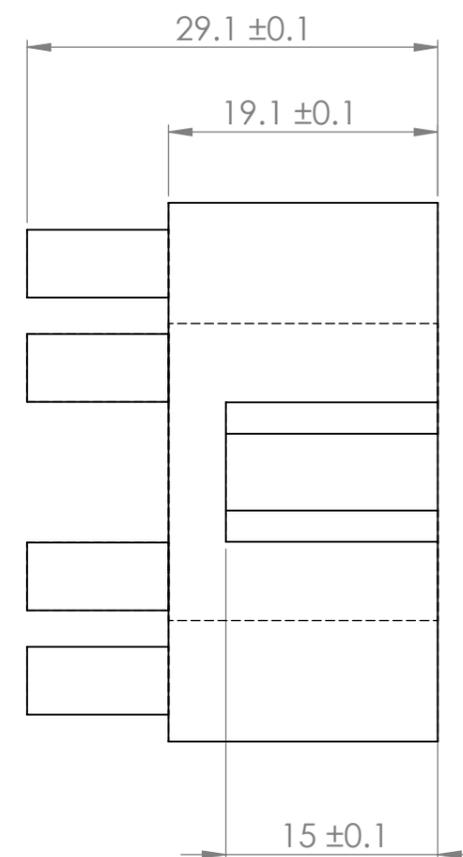
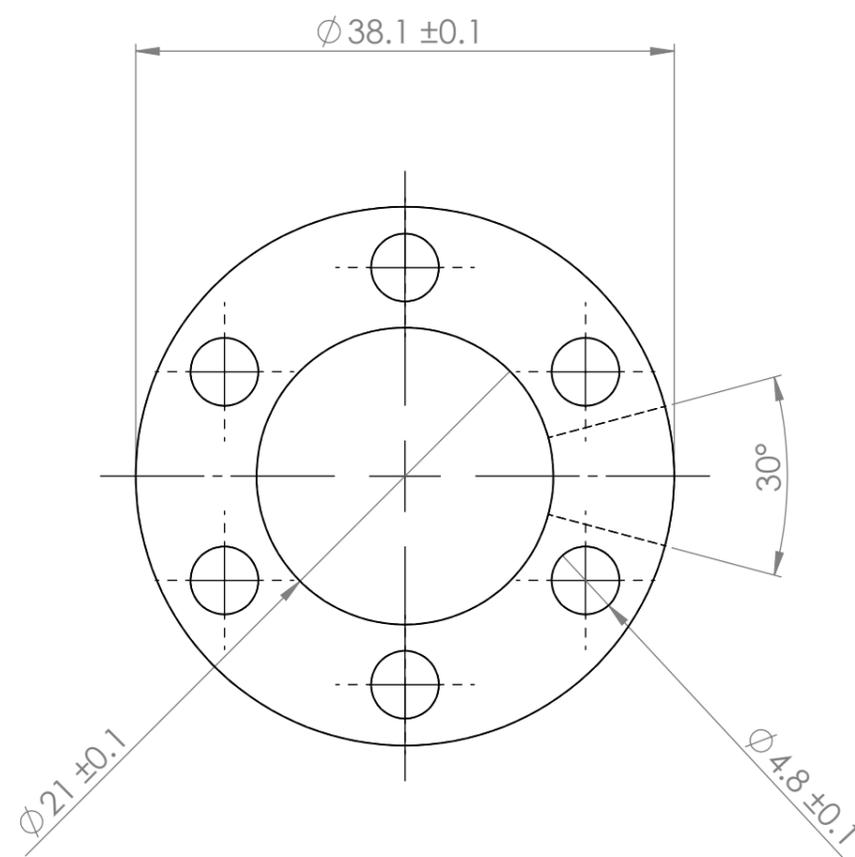
COTAS	mm.
ESC.	1.5:1
TOL.	±0.1

Eje

ZAJM920811:01

3/4

4.4 Conexión de eje



A3

ED.	NOMBRE	FECHA	M.P.
1	ZAMORA	161206	ABS
2	ZAMORA	170201	
3			
ACAB.			S/N



COTAS	mm.
ESC.	2:1
TOL.	± 0.1

Conexión de eje

ZAJM920811:01

4/4