

**GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR TORNILLO DE ARQUÍMEDES A
BAJA ESCALA, MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO
PARA UNA VIVIENDA RURAL EN GIRARDOTA.**

**STIVEN PÉREZ CANO
JHOSSIMAR PEREZ SALAZAR
SERGIOANDRES TORRES AGUDELO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2021**

**GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR TORNILLO DE ARQUÍMEDES A
BAJA ESCALA, MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO
PARA UNA VIVIENDA RURAL EN GIRARDOTA.**

**STIVEN PÉREZ CANO
JHOSSIMAR PEREZ SALAZAR
SERGIOANDRES TORRES AGUDELO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al
título de Tecnólogo en eléctrica**

**Asesor técnico:
Carlos Mario Moreno Paniagua
Ingeniero eléctrico**

**Asesor metodológico:
Gustavo Adolfo Tobón Pereira
Sicólogo especialista en Docencia universitaria**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2021**

Contenido

Contenido.....	iii
Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tabla.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Glosario.....	viii
Introducción.....	8
1.1 Descripción	17
1.2 Formulación	23
2. Justificación	24
3. Objetivos.....	25
3.1 Objetivo general	25
3.2 Objetivos específicos	25
4. Referentes teóricos	26
5. Metodología.....	33
5.1 Tipo de proyecto	33
5.2 Método	33
5.3 Instrumentos de recolección de información.	34
5.3.1. Fuentes primarias.....	34
5.3.2. Fuentes secundarias	34
6. Resultados.....	35
7. Conclusiones.....	60
8. Recomendaciones	62
9. Referencias bibliográficas	63

Lista de figuras

Figura 1: Distribución de generación de energía eléctrica para el sistema interconectado	11
Figura 2: Estructura de costos para las PCH.	12
Figura 3: Rangos de operación de turbinas	13
Figura 4: Eficiencia de generadores de diferentes tipos	14
Figura 5: Tornillo hidrodinámico	15
Figura 6: Bomba Basada en tornillo de Arquímedes	18
Figura 7: Vista de corte de un tornillo de Arquímedes	19
Figura 8: Terminología principal de los tornillos de Arquímedes	20
Figura 9: Eficiencia del hidrotornillo,	21
Figura 10: Componentes del sistema	23
Figura 11: Tipos de estatores,	23
Figura 12: Tipos de rotor	24
Figura 13: Fuentes de energía en Colombia	33
Figura 14: Bosquejo del tornillo de Arquímedes	36
Figura 15: Vista frontal del tornillo de Arquímedes	36
Figura 16: Medidas del generador.....	37
Figura 17: Características del motor.....	37
Figura 18: Vista del motor.....	38
Figura 19: Vista en paralelo de un tornillo de Arquímedes.	38
Figura 20: Ángulos de derrame y vista en planta del volumen de llenado óptimo	44
Figura 21: Esquema de cabeza de entrada.	45
Figura 22: Simulación de tornillo de Arquímedes	48
Figura 23: Acople mecánica de piezas.	49
Figura 24: Generador de imanes permanentes.	49
Figura 25: Puente rectificador.	49
Figuras 26: Gráficos de operación y rendimiento.	50

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de centrales hidroeléctricas según capacidad instalada	14
Tabla 2. Propiedades del Tornillo de Arquímedes	29
Tabla 3. Clasificación de centrales hidroeléctricas según capacidad instalada	33
Tabla 4. Fuentes de energía	35
Tabla 5: Valores óptimos de parámetros adimensionales. Fuente: Rorres, 2000.	44
Tabla 6: Los parámetros para la construcción del tornillo.	47

Resumen

GENERADOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR TORNILLO DE ARQUÍMEDES A BAJA ESCALA, MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO PARA UNA VIVIENDA RURAL EN GIRARDOTA.

STIVEN PÉREZ CANO
JHOSSIMAR PEREZ SALAZAR
SERGIOANDRES TORRES AGUDELO

El tornillo de Arquímedes, tiene un gran número de aplicaciones como transportador y dosificador, elementos de transmisión usándolo junto a una corina, bomba de tornillo y para generación de energía eléctrica. El uso para la generación de energía eléctrica es reciente. La aplicación del tornillo de Arquímedes para la generación de energía eléctrica se presenta como una alternativa importante para aprovechar los recursos hídricos a pequeña escala, en centrales pico y mini hidroeléctricas, y en recursos hídricos como pequeños ríos o canales de regadío con saltos de agua menores. En este trabajo realizamos un análisis energético de un tornillo de Arquímedes para la generación de energía eléctrica capaz de implementarse en un canal hídrico en una zona rural de Girardota, aprovechando el recurso hídrico presente en el lugar; para realizar el análisis energético se recopiló información acerca de las tecnologías existentes en las centrales hidroeléctricas, se establecieron consideraciones previas, se realizaron cálculos de diseños de los elementos del sistema y se seleccionó los equipos necesarios para fabricación e implementación de un tornillo de Arquímedes en las condiciones mencionadas. Además de aprovechar los recursos hídricos presente el lugar para llevar a cabo el proyecto, se pretende que este tipo de proyectos se lleven a cabo en lugares remotos o en poblaciones sin accesos a la energía eléctrica, o que ayuden a largo plazo para costear los gastos que esta produce. Al finalizar el desarrollo de este trabajo, se obtuvo información que muestra la viabilidad del uso del tornillo de Arquímedes para aprovechar fuentes hídricas de baja escala, bajo las condiciones del caso de estudio se ha obtenido una potencia de 26 kW y una eficiencia total del sistema de 76%.

Palabras claves: generador, tornillo de Arquímedes, energía renovable, fuentes hídricas.

Abstract

The Archimedean screw has a large number of applications such as conveyor and dispenser, transmission elements using it together with a corina, screw pump and for generating electrical energy. The use for the generation of electrical energy is recent. The application of the Archimedean screw for the generation of electrical energy is presented as an important alternative to take advantage of water resources on a small scale, in peak and mini-hydroelectric plants, and in water resources such as small rivers or irrigation canals with smaller waterfalls. . In this work we carry out an energy analysis of an Archimedean screw for the generation of electrical energy capable of being implemented in a water channel in a rural area of Girardota, taking advantage of the water resource present in the place;

To perform the energy analysis, information was collected about the existing technologies in the hydroelectric plants, previous considerations were established, design calculations of the system elements were made and the necessary equipment was selected for the manufacture and implementation of an Archimedean screw in the conditions mentioned. In addition to taking advantage of the water resources present in the place to carry out the project, it is intended that this type of projects be carried out in remote places or in towns without access to electricity, or that they help in the long term to pay for expenses that it produces. At the end of the development of this work, information was obtained that shows the feasibility of using the Archimedean screw to take advantage of low-scale water sources, under the conditions of the case study, a power of 26 kW and total system efficiency have been obtained. of 76%.

Keywords: generator, Archimedean screw, renewable energy, water sources

Glosario

Caudal: Cantidad de agua que lleva una corriente o que fluye de un manantial o fuente.

Central hidroeléctrica: Una central hidroeléctrica es una instalación que permite el aprovechamiento de las masas de agua en movimiento para transformarlas en energía eléctrica.

Corriente eléctrica: es un fenómeno físico causado por el desplazamiento de una carga (ion o electrón).

Eje: Barra cilíndrica que atraviesa un cuerpo giratorio y le sirve como centro para girar.

Energía renovable: Son energías renovables aquellas que se obtienen a partir de fuentes naturales inagotables y generan electricidad sin contribuir al calentamiento global.

Fuerza: presión que se ejerce capaz de modificar la forma de un material

Fuentes de energía: Son aquellas sustancias, materiales y fenómenos que pueden ofrecernos energía en cantidad suficiente para producir distintas formas de energía

Generador eléctrico: Un generador eléctrico es una máquina rotativa capaz de producir energía eléctrica mediante la transformación de energía mecánica.

Hidroenergía: Es la energía que tiene el agua cuando se mueve a través de un cauce o cuando se encuentra embalsada (energía potencial) a cierta altura y se dejar caer para producir energía eléctrica.

Motor: Un motor es una máquina que produce movimiento gracias a otra fuente de energía

Potencia es la cantidad de trabajo (fuerza o energía aplicada a un cuerpo) en una unidad de tiempo.

Tornillo de Arquímedes es una máquina que sirve para elevar líquidos. Accionando la manivela, el tornillo gira sobre su eje haciendo que el líquido suba por el interior del tubo

Transmisión de movimiento: conjunto de mecanismos que comunican el movimiento de un cuerpo a otro, altera generalmente su velocidad, su sentido o su forma.

Turbina: Máquina que consiste en una rueda en el interior de un tambor provista de paletas curvas sobre las cuales actúa la presión de un fluido haciendo que esta gire.

Introducción

La generación de energía eléctrica en Colombia a base de fuentes hídricas ha sido sin duda la base fundamental en su producción, aportando a la fecha un total del 68.3% (95,464 MWh al momento de realizar esta investigación) de la capacidad instalada para el sistema interconectado nacional (SIN). Seguido a este se encuentran las centrales térmicas con una aportación del 30.7% (49,968 MWh) y los medios alternativos como la cogeneración, energía eólica y solar con un 1.1%. (Poco más de (600 MWh). Este balance nos deja como indicador no solo la riqueza hídrica del país sino también la capacidad para aprovechar estos recursos.

Los proyectos comprendidos para el desarrollo de estas cifras, son sin lugar a duda grandes desarrollos de la ingeniería moderna, pero no debemos dejar de lado las micro - centrales eléctricas que operan en el país conocidas como pequeñas centrales hidroeléctricas por sus siglas (PCH's). Actualmente estas PCH's cuentan con 873, 77 MW de potencia instalada en Colombia, encontrándose conectadas igualmente al SIN.

El desarrollo de energía renovables ha dinamizado los sistemas de generación de energía eléctrica tradicionales, en los cuales se implementan turbinas Pelton, Francis y Kaplan; introduciéndose así recientemente el tornillo de Arquímedes para llevar a cabo la generación hidroeléctrica en pequeños saltos de agua como una de varias aplicaciones en las cuales puede ser implementado.

En Colombia se han desarrollado algunos modelos de generador partiendo del principio de operación del tornillo de Arquímedes obteniendo buenos resultados por su bajo costo de fabricación en comparación con otros sistemas, su versatilidad en la operación y no menos importante su capacidad operativa en pequeños afluentes.

Con este prototipo a baja escala se pretende lograr la generación de 50W de energía eléctrica y con ello evaluar la implementación de este sistema en una vivienda rural ubicada en Girardota Antioquia cuyo predio cuenta con un afluente hídrico.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

Actualmente la energía eléctrica se ha vuelto fundamental para el desarrollo del país, ya que de esta dependen muchas de las actividades que desempeña el ser humano en su cotidianidad, hogar, trabajo, recreación, entre otras; y debido a la gran cantidad de dispositivos creados ultimadamente y requieren energía eléctrica para su funcionamiento, es por ello que los esfuerzos están dirigidos en obtener energías limpias y renovables, fuera de las ya convencionales existentes, que en gran medida generan grandes problemas ambientales y desgastes de los recursos de la naturales; existen ventajas a la hora de incentivar la sociedad en el uso de las energías renovables, tales son, que los niveles de contaminación son realmente bajos, también si son bien aprovechados pueden llegar a ser inagotables, entre otras más.

Colombia es un país que cuenta con los recursos naturales suficientes con los cuales puede enfocarse en ampliar e intensificar los proyectos que le apuestan a las energías de fuentes renovables, puesto que estas son de vital importancia para el desarrollo económico del país y principalmente para el desarrollo del ser humano, en especial para las comunidades donde se dificulta tener condiciones de vida digna o el acceso a estas es verdaderamente complicado, ya que por factores económicos, geográficos, políticos o por razones de seguridad; además un factor importante para que estos proyectos tomen fuerza son la gran demanda que la energía eléctrica ultimadamente ha generado, ya que la población a viniendo en crecimiento y esto requiere un mayor uso de la misma, y es así como Colombia un país que tiene en abundancia los recursos naturales para que no solo promocióne y desarrolle estos proyectos que buscan beneficiar a las personas que no cuentan con sistema eléctrico en sus hogares, donde las actividades cotidianas se vuelven más complejas, ya que por ejemplo se les impide utilizar electrodomésticos que permitirían tener condiciones de vida más dignas, incluso ayudar en las funciones de sus trabajos, son pequeños cosas que harían la diferencia para los tiene muy poco, se deben aprovechar estos recursos de manera organizada, segura y de manera transparente donde los beneficiados sean todos, Gracias al gran potencial en recursos naturales presentes en el territorio colombiano las

energías renovables son una alternativa para aumentar la capacidad de generación del sistema eléctrico. (Arango & Londoño, 2017).

En Colombia hay diferentes fuentes de generación de energía están las primarias tales como la del carbón mineral, el petróleo, el gas natural, la hidro-energía y biomasa, las cuales son las mayores productoras de energía en el país, entre estas la principal fuente de energía eléctrica es la proveniente de las centrales eléctricas con tecnología hidráulica, seguida de las centrales térmicas, plantas menores y cogeneradores, los sectores de mayor consumo eléctrico son el residencial, seguido del industrial, continua el comercial y público y finalmente el agropecuario y minero; sin embargo, actualmente cuenta fuentes de energía geotérmica, energía eólica, energía solar y energía de biomasa; Colombia cuenta con un gran potencia de fuentes de energía no convencionales, mostrando mayor desenvolvura con la energía solar, hídricas y de biomasa de las cuales se tienen mayor registros de proyectos de generación eléctrica, a pesar de esto aún falta desarrollo en la implementación de estas fuentes, mayor incentivos y marcos regulatorios. (Castillo, y otros, 2015)

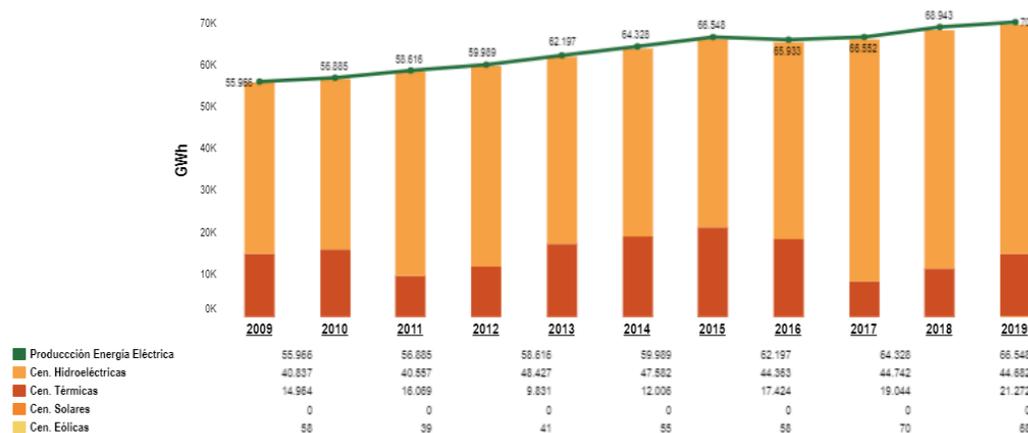


Figura 1: Distribución de generación de energía eléctrica para el sistema interconectado nacional. Fuente UPME

Ahora bien, partiendo de las fuentes de energía ya mencionadas, existen herramienta o métodos que nos permiten aprovechar estas de una manera fácil, económica y segura, en el caso de la generación de energía por medio del tornillo de Arquímedes, un método que consiste en una turbina donde el agua permite el funcionamiento del sistema principalmente por su propio peso, considerada así una maquina gravimétrica; el agua llena las cavidades del tornillo que funcionan

como cajones que se desplazan hacia abajo a la acción de su peso y la superficie helicoidal de la superficie de la hélice, hace girar al tornillo, de esta manera se transforma en energía potencial en energía mecánica, y finalmente se obtiene la energía eléctrica mediante el uso de un generador acoplado de forma directa o indirecta al eje del tornillo; debido a la potencia generada de por este tipo puede usarse para la generación de energía eléctrica para comunidades rurales o para empresas que encuentren próximas a corrientes de agua, permitiendo así suplir parcial o totalmente el consumo eléctrico. (Santa Cruz).

En territorios y sitios donde se cuenta con caídas reducidas y caudales menores, el aprovechamiento hidráulico constituye un reto de ingeniería ya que no se cuenta con las economías de escala que poseen las grandes hidroeléctricas, tal como se observa en la Figura 1, donde hay clara evidencia de la producción energética generada por los sistemas hidroeléctricos en comparación a los demás sistemas de generación.

En la figura 2 se pueden observar los diferentes porcentajes respecto a los costos al construir una PCH (Pequeña central hidroeléctrica) en Colombia.

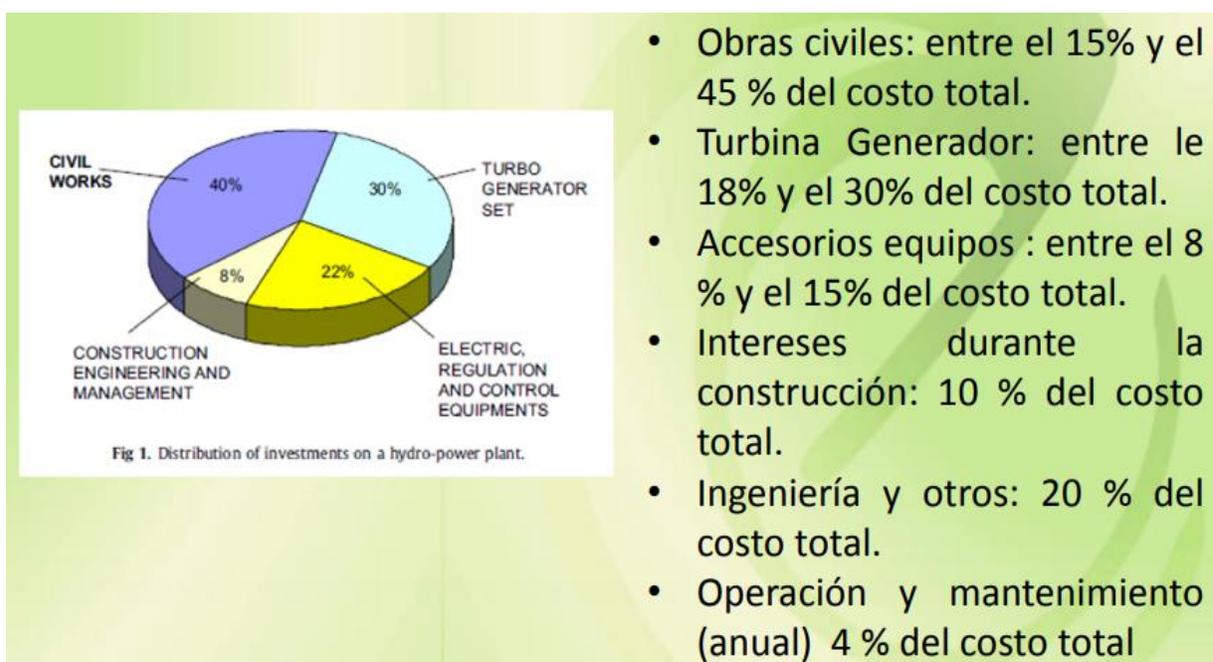


Figura 2: Estructura de costos para las PCH.

Fuente. CREG

Según la Unidad de Planeación Minero-Energética del Ministerio de Minas y Energía colombiano, en su capítulo hidro-energía clasifica los diferentes tipos de hidroeléctricas en función de su capacidad instalada:

Tabla 1. Clasificación de centrales hidroeléctricas según capacidad instalada

NOMBRE	CAPACIDAD INSTALADA	CARACTERISTICAS
PICOCENTRALES	0,5 y 5 kW	Operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas
MICROCENTRALES	5 y 50 kW	Operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas.
MINICENTRALES	50 y 500 kW	Operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas
HIDROELÉCTRICAS (PCH)	500 y 20.000 kW	Operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas y zonas interconectadas (sin posibilidad de participar en el despacho eléctrico, menores a 500 kW, y con posibilidad de hacerlo las mayores a 10.000 kW)
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (CH)	Mayor a 20 MW	Aplicable a zonas interconectadas, con participación obligada en el despacho eléctrico.

La UPME indica entonces lo siguiente:

“Hay tres tipos principales de turbinas hidráulicas: la rueda Pelton, la turbina Francis y la de hélice o turbina Kaplan. El tipo más conveniente dependerá en cada caso del salto de agua y de la potencia de la turbina, en términos generales, la rueda Pelton conviene para saltos grandes, la

turbina Francis para saltos medianos y la turbina de hélice o turbina Kaplan para saltos pequeños. En Colombia, dadas las condiciones topográficas predominan las dos primeras” (Energía, 2005)”.

Con lo anterior se deduce entonces que el potencial hídrico en Colombia ha sido aprovechado principalmente en proyectos de gran escala y aunque los proyectos de picocentrales, micro centrales y mini centrales han venido tomando fuerza en los últimos años, estos se han desarrollado con tecnologías tradicionales de turbinas Pelton, Francis y Kaplan, es decir no se mencionan otro tipo de tecnologías por la entidad gubernamental, como los tornillos hidrodinámicos.

La generación hidroeléctrica con bajos caudales, sin duda no es viable con las tradicionales turbinas, pues estas se sugieren en muchos gráficos de selección de turbinas para capacidades instaladas superiores a los 200 kW, tal como se aprecia en la siguiente figura. Se aprecia entonces como los tornillos hidrodinámicos se ubican como alternativas adecuadas para bajas capacidades de generación instaladas, con caudales sugeridos alrededor de 1 m³/s y caídas entre 1 m y 10 m.

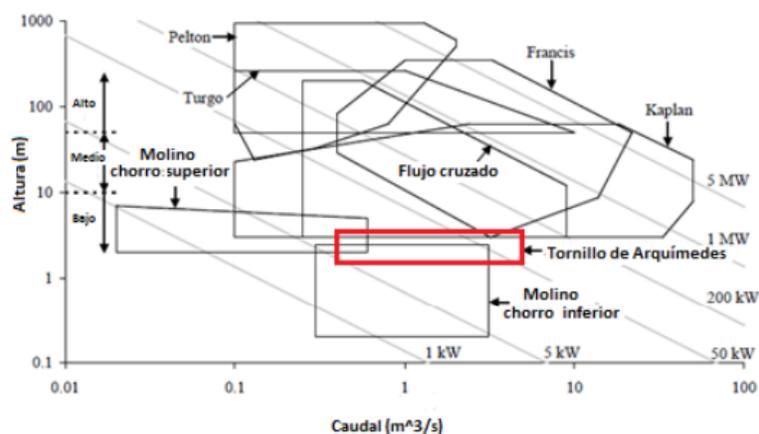


Figura 3: Rangos de operación de turbinas.

Fuente: Toro B. (S.J. Williamson, 2011)

Los tornillos de generación hidrodinámicos son empleados en caídas mínimas de agua en comparación con las requeridas por turbinas convencionales. Esto es posible gracias a su espacio reducido y su bajo impacto en el medio ya que requieren excavaciones y presas de menores dimensiones para operar. Son equipos eficientes llegando a valores mayores de 90% sin tener mayores afectaciones por la variación del caudal (entre el 20 %-100 %).

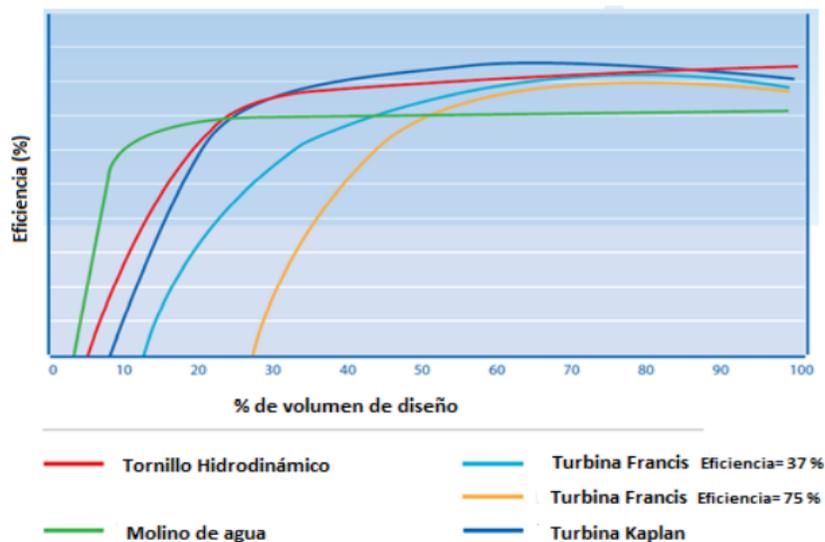


Figura 4: Eficiencia de generadores de diferentes tipos

Fuente: Andritz

Los proyectos hidroeléctricos de generación que ocupan turbinas afectan la dinámica de transporte de partículas sólidas en los afluentes, esto tiene implicaciones, tanto en el impacto ambiental, como en el deterioro sobre las partes móviles en contacto con el agua de los generadores.

El uso de tornillos hidrodinámicos resuelve esta situación en gran medida, ya que permite el paso de partículas sólidas de tamaños considerables y el impacto de desgaste del equipo es reducido.

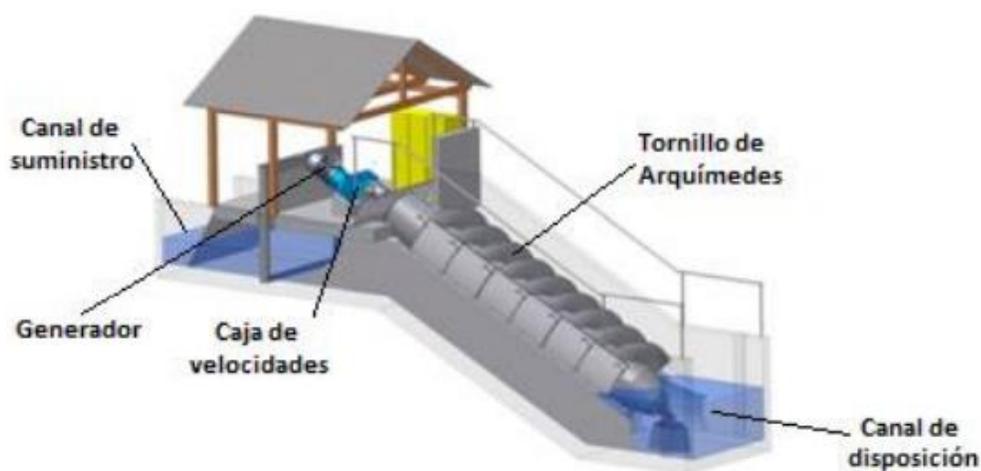


Figura 5: Tornillo hidrodinámico.

Fuente: Andritz.

Los tornillos hidrodinámicos se adaptan a las condiciones de flujo existente y a las frecuencias del mismo, lo que indica facilidad de operación. Derivado de las ventajas descritas, estos tipos de generadores son equipos que no requieren mantenimiento constante y su vida útil es más prolongada en el tiempo, principalmente por las bajas revoluciones a las que operan, pues se reduce sustancialmente el desgaste.

1.2 Formulación

¿Cómo generar eficientemente energía eléctrica a partir de pequeños caudales superficiales, en las fincas de los municipios de Antioquia?

2. Justificación

Teniendo en cuenta que es una necesidad básica el uso de la energía eléctrica para el desarrollo de muchas de las actividades del ser humano en su día a día, con la investigación en curso se pretende evidenciar y destacar la implantación del uso de las energías renovables disponibles, aprovechándolas de manera responsable, segura y asegurado que las mismas se lleven a cabo de forma óptima y eficiente. Es así, como se busca aprovechar el gran potencial hidroeléctrico con el que se cuenta en nuestro país, y en la zona en investigación se estudia la factibilidad de utilizar el tornillo de Arquímedes a pequeña escala, para lograr contribuir en la independencia y desarrollo de energía para la vivienda objetivo del proyecto.

Este proyecto no solo busca beneficiar a la vivienda para que pueda ejecutar las actividades esenciales que requieren del uso de la energía eléctrica, sino que la mayor contribución que este puede generar, es el cuidado y protección del medio ambiente, al ser una fuente de energía limpia y segura, además, este no requiere el represamiento del flujo del caudal, y se puede poner en funcionamiento en caudales relativamente bajos, por ende para el desarrollar del mismo sus gastos económicos sería respectivamente bajos e igual que su manteniendo.

Además, un resultado muy importante que se busca a través de este trabajo es concientizar a la sociedad en general, exponiendo que, mediante estos proyectos donde las principales fuentes de energías son renovables, se va lograr contribuir en el desarrollo del país, en especial en aquellas regiones que disponen de los recursos naturales y vitales y que son de fácil acceso, y así no depender de terceros para el desarrollo de sus actividades, por eso se enfoca este proyecto en una zona rural.

La apuesta va dirigida a las energías renovables y limpias, que puedan generar independencia económica, ya que son de vital importancia para el desarrollo del país; Colombia cuenta con las condiciones naturales idóneas que se requieren para realizar proyectos de este calibre.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Implementar un generador de energía eléctrica por tornillo de Arquímedes a baja escala, mediante el aprovechamiento del recurso hídrico para una vivienda rural en Girardota.

3.2 Objetivos específicos

Diseñar el conjunto comprendido entre el eje rotativo y la hélice garantizando su operación eficiente, para la generación del movimiento del eje del generador.

Combinar mediante un acople mecánico el eje rotativo y el generador empleando un conjunto de rodamientos con los cuales se realiza la conversión de energía mecánica en energía eléctrica.

Adaptar un circuito de control con inversor para proveer una salida de 110 VAC

4. Referentes teóricos

Para llevar a cabo la construcción de un generador de energía por tornillo de Arquímedes, en esta investigación se pretende definir y aclarar algunos de los conceptos para importante dentro de la misma y los temas relacionados con esta.

A continuación, se profundiza un poco en lo mencionado

El tornillo de Arquímedes es un dispositivo que ha sido utilizado desde la antigüedad, fue principalmente utilizado como bomba para la elevación de agua, harina o cualquier otro tipo de líquido o sólido granulado, y fue inventado en el siglo III a.C. por Arquímedes, del cual recibe el nombre, desde entonces hasta ahora se utiliza para el bombeo (Fig. 3) en cuanto al uso para la generación de electricidad data del año 1992, cuando fue propuesto para ser usado en el sentido inverso y dejar caer agua a través de él generando que este gire; la primera instalación de este tipo data del año 1998 (Santa Cruz, citado en Rorres,2000).

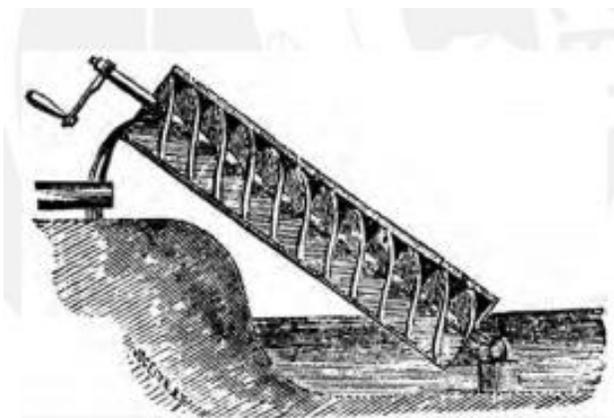


Figura 6. Bomba Basada en tornillo de Arquímedes.

Fuente: (Santa Cruz) citado en Rorres, 2000.

La turbina de Arquímedes es una máquina gravimétrica la cual posee una superficie con hélices helicoidales dentro del cilindro cuyo eje está inclinado de modo tal que su extrema inferior este sumergido dentro del agua; así como el cilindro y la hélice helicoidal forman una serie de celdas en las cuales el agua descende o asciende de acuerdo a la posición en que se haya colocado el tornillo.

El funcionamiento de una turbina basada en un tornillo de Arquímedes, es mediante el propio peso del agua, debido que la maquina es considerada gravimétrica, el agua llena las cavidades del mismo, que a su vez funcionan como cubetas o cajones que se desplazan hacia abajo debido a la acción de su propio peso y la superficie helicoidal de la superficie de la hélice, hacen girar al tornillo. Es de esta manera que se transforma energía potencial en energía mecánica, posteriormente, se obtiene energía eléctrica mediante el uso de un generador acoplado de forma directa o indirecta al eje del tornillo. Esta energía mecánica formada va de acuerdo a la altura del salto H en metros y el caudal Q que ingresa al tornillo; este caudal se distribuye en el tornillo de Arquímedes como se demuestra en la figura 4.

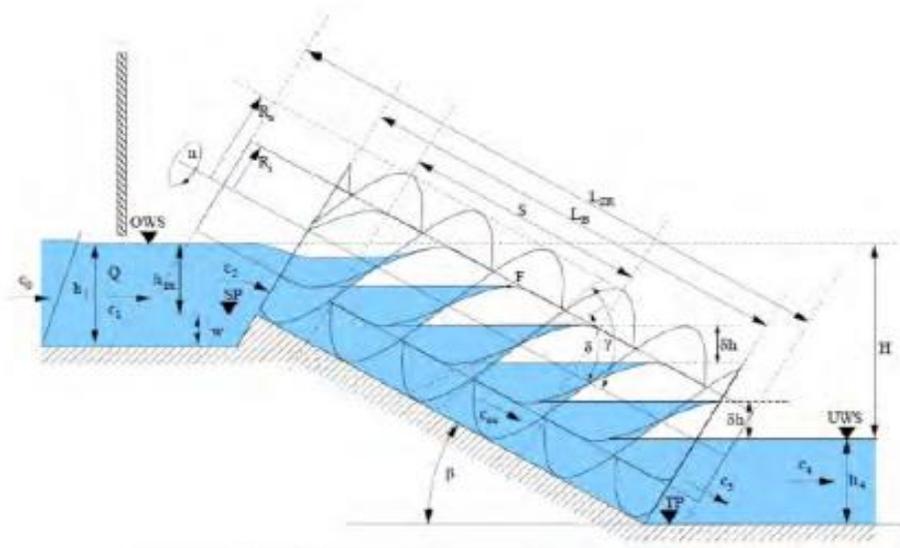


Figura 7: Vista de corte de un tornillo de Arquímedes

Fuente: Ali Raza & Seleem Mian, 2013

En la figura 5 se puede observar las definiciones principales de los tornillos de Arquímedes

D = diámetro

L = longitud del tornillo

J = cantidad de espirales

H = altura de elevación

S = paso

F = fuerzas

L = longitud del tornillo

β = inclinación

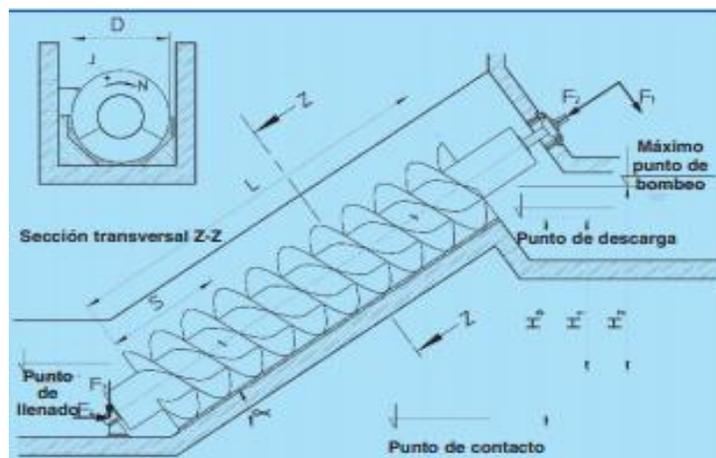


Figura 8: Terminología principal de los tornillos de Arquímedes

Fuente: (Landustrie, 2008)

Adicional a esto las ventajas que tienen los hidrotornillos son; alta eficiencia (hasta el 86%), i instalación simple, fácil implementación en instalaciones ya existentes, respetuosos con la vida acuática, no se obstruyen, bajo coste de mantenimiento, duraderos, mejoran la calidad del agua, aprovechamiento 24 horas al día, control del flujo sin pérdidas, posibilidad de uso para bombeo, auto regulable.

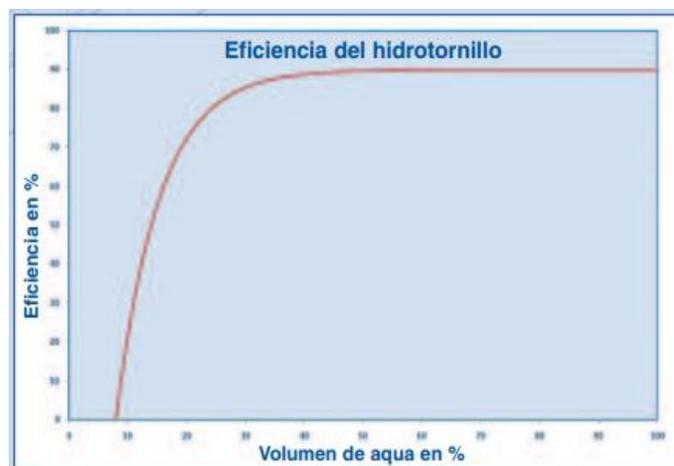


Figura 9: eficiencia del hidrotornillo.

Fuente: (Landustrie, 2008)

Componentes del sistema

Un sistema de generación de energía eléctrica mediante un Tornillo de Arquímedes está compuesto por:

Tornillo de Arquímedes: como ya se expuso, esta es la maquina gravimétrica encargada de realizar el aprovechamiento de la energía potencial en energía mecánica.

Rodamiento superior: esta parte del sistema es la encargada de absorber parte de las fuerzas radiales, por cual este debe ser un rodamiento radial y debe estar adecuadamente protegido de las posibles filtraciones de agua hacia su lubricación.

Rodamiento inferior y soporte: parte del sistema que se encarga de absorber parte de las fuerzas radiales y axiales generadas por el tornillo, por lo que este debe ser un rodamiento de contacto angular, además, este rodamiento al igual que el rodamiento superior debe estar adecuadamente protegido de la filtración del agua hacia la lubricación.

Eje de transmisión: elemento encargado de transmitir la energía mecánica generada mediante el giro del tornillo de Arquímedes por la energía potencial hasta el generador, el cual está instalado en la parte superior de este

Generador: es el elemento encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, para así ser utilizada o almacenarla en baterías

Cama del tornillo: sirve como guía del tornillo de Arquímedes

Válvula de regulación del caudal: elemento que no es fundamental para el funcionamiento del sistema y en caso de ser requerido sirve para regular la potencia que genere el tornillo mediante la regulación del caudal que ingresa a él.

Rejilla de gruesos: funciona como filtro, evitando el ingreso de solidos de gran tamaño al mismo, y que este se pueda dañar

Panel de control: su uso es opcional, ya que se encargaría de su apago y encendido.

Canal de alimentación: es por el cual llega el flujo del agua hacia el tornillo de Arquímedes.

By – pass: canal paralelo al canal de alimentación, utilizado en casos de mantenimiento o reparación del tornillo o cualquier otro elemento del sistema, para que el flujo del agua pase por medio de este para que el agua siga su curso.



Figura 10: componentes del sistema.

Fuente: (Landustrie, 2008)

Motores de corriente directa: denominado también motores de corriente continua, motores CC o motor DC, es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción que se genera del campo magnético. Las partes fundamentales de un motor de corriente continua son el estator y el rotor.

Estator constituye la parte fija del motor, es el elemento que opera como base, permitiendo que desde ese punto se lleve a cabo la rotación del motor, este no se mueve mecánicamente, pero si magnéticamente, y existen dos tipos de estatores, el estator de polos salientes y estator de ranurado.

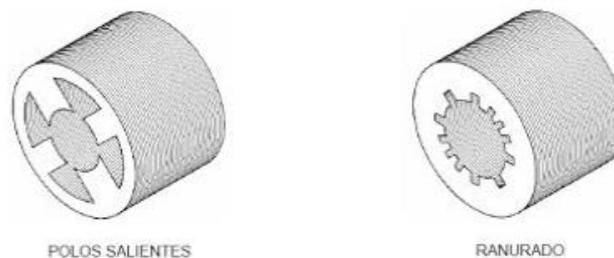


Figura 11: tipos de estatores.

Fuente: (Rega, 2011)

Rotor constituye la parte móvil del motor, es el elemento de transformación mecánica, ya que depende de la conversión de energía eléctrica a mecánica, los rotores, son un conjunto de láminas de acero al silicio que forman un paquete y pueden ser básicamente de tres tipos: rotor ranurado, rotor de polos salientes y rotor jaula de ardilla.



Figura 12: Tipos de rotor.

Fuente: (Rega, 2011)

Sistema de transmisión de movimiento: permite transferir energía mecánica de un objeto a otro sin cambiar la naturaleza del movimiento, el tipo de movimiento que tiene el elemento de entrada del mecanismo, elemento motriz, coincide con el tipo de movimiento que tiene el elemento de salida elemento conducido; los mecanismos de transmisión pueden ser, a su vez, agrupados en dos grandes grupos, el primero en mecanismos de transmisión circular, en este caso el elemento de entrada y el elemento de salida tienen movimiento circular, como por ejemplo los sistemas de engranajes, las ruedas de fricción, los sistemas de poleas y el tornillo sin fin; y el segundo son los mecanismos de transmisión lineal, en este caso, tanto el elemento de entrada como el de salida tienen movimiento lineal y como ejemplo tenemos la palanca.

Adicional a esto es importante mencionar y dar claridad acerca de una de las fuentes renovables más relevantes dentro de este proyecto que es la fuente hídrica, primero que todas las fuentes renovables son aquellas fuentes primarias que son inagotables o que tienen la capacidad de regeneración en un periodo de tiempo inferior al de su uso, entre estas resaltan las que se utilizan los recursos como el viento, el agua o el sol, estos tienen un alto potencial de explotación pero su disposición solo depende de la disponibilidad geográfica, lo que implica un obstáculo para su transporte, a diferencia de los combustibles fósiles que se pueden transportar de manera

más fácil. Considerando también que el país cuenta con un alto potencial hídrico, tiene gas y carbón, cuenta con recursos eólicos, solares y con potencial para la utilización de la biomasa.

Colombia tiene una ubicación privilegiada, la cual le ha permitido la explotación de los recursos hídricos para la generación de electricidad. Ya que desde sus inicios la producción de electricidad se ha aprovechado debido a la presencia de cuencas hídricas y el pronunciado relieve del país, las cuales son los escenarios perfectos para poder aprovechar este recurso.

La energía hidráulica es aquella mediante la cual utiliza la fuerza del agua ya sea proveniente de los ríos, lagos o mareas, se transforma mediante el paso de agua por una turbina hidráulica, la cual transmite la energía a un alternador que la convierte en energía eléctrica; la forma de obtener energía resulta altamente eficiente en cuanto a la generación de electricidad y no contamina, no obstante, produce un gran impacto ambiental puesto que la construcción de las presas, pueden inundar grandes superficies de terreno y transforman del caudal o la calidad del agua. (Aburra, s.f)

Entre los usos de la energía hidráulica están generación de electricidad, generación eléctrica usando las corrientes marinas, inventos como frenos hidráulicos, elevadores, el martillo hidráulico y el taladro en la odontología, la red de agua por turbinas, entre otros usos más.

Algunas de las ventajas y desventajas de esta energía son: que es una fuente de energía renovable e inagotable, es autóctona, flexible y segura, produce mayor rendimiento energético, en su funcionamiento no hay emisiones tóxicas, almacenamiento de agua para satisfacer necesidades básicas, regulan los caudales de los ríos aguas abajo, entre muchas más y por otro lado esta depende las condiciones geográficas, meteorológicas y ambientales, las grandes construcciones de presas y embalses conlleva a la alteración de los entornos naturales y ecosistemas. (Pineda, s.f.)

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

Este proyecto es de tipo experimental ya que se va a implementar un generador de energía eléctrica por tornillo de Arquímedes a baja escala, mediante el aprovechamiento del recurso hídrico para una vivienda rural en Girardota

5.2 Método

En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica de artículos documentos e informes que dieron a conocer algunas de las propiedades del arte del tornillo de Arquímedes, y que dan a conocer los diferentes procedimientos y metodologías de dicho sistema. Además, se revisó bibliografía sobre las diferentes fuentes de energía en Colombia y de la clasificación de centrales hidroeléctricas a nivel nacional.

Realizados los estudios pertinentes y con la información recopilada procedemos al desarrollo del dispositivo, realizando pruebas de operatividad para optimizar de ser necesario el dispositivo. En esta etapa también tendremos en cuenta el factor costo-beneficio del proyecto analizando el ahorro energético que se tiene.

Continuaremos con pruebas de operatividad donde analizamos en comportamiento del prototipo, sometiéndolo al trabajo y a la carga energética para la cual fue diseñada, se evalúa que tan factible fue el desarrollo que se hizo en la etapa anterior y los resultados arrojados con las pruebas hechas durante un tiempo determinado.

Analizados los resultados encontrados por las pruebas realizadas se concluyen los valores de éxito que puede llegar a tener el dispositivo y lo importante que resulta la instalación de este tipo de generación eléctrica. Los resultados obtenidos y el análisis de los mismos pueden ser

negativos por los cuales se realiza un análisis más a fondo de que proceso se debe mejorar para afianzar los resultados.

5.3 Instrumentos de recolección de información.

5.3.1. Fuentes primarias.

Libros, proyectos de investigación, tesis de grado, documentos de fabricación.

5.3.2. Fuentes secundarias.

Conocimiento empírico, artículos de interpretación de resultados y artículos de revistas.

6. Resultados

Se realiza una revisión bibliográfica de artículos, documentos e informes que dan a conocer algunas de las propiedades del tornillo de Arquímedes y donde se observan diferentes procedimientos y metodologías del sistema.

Tabla 2. Propiedades del Tornillo de Arquímedes

INICIOS	Tuvo sus inicios en el siglo III A.C atribuido al Filósofo griego Arquímedes de Siracusa
USOS Y APLICACIONES	<p>Se emplea inicialmente para sacar agua de las sentinas de los barcos y posteriormente como sistema de elevación de agua desde un punto a otro a través de un plano inclinado.</p> <p>Con el pasar del tiempo se emplea para el desplazamiento no solo de fluidos sino también de sólidos.</p> <p>En la época actual y con el auge de las energías alternativas se utiliza como generador de energía acoplado al tornillo sinfín un generador cuyo funcionamiento es accionado por el giro del sistema al paso del agua en un plano inclinado, aprovechando así el recurso hídrico sin generar alto impacto en el habitat.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Generación de energía. • Aguas residuales. • Excavación o transporte de granos. • Extracción de caudales de agua. <p>En una PCH, una vez se turбина el agua en casa de máquinas esta se convierte en un residuo sin aparente valor para esta industria y es un “desecho” que debe ser reintegrado por medio de un canal al cauce principal, es decir, no tiene ningún uso productivo.</p> <p>El tornillo hidrodinámico puede ser una tecnología capaz de producir energía adicional en un proyecto existente. Es atractivo evaluarla</p>

como una adición a una PCH, debido a que hay unidades con capacidades de hasta 500 kW. Es decir, pueden producir 4,38 GW/año lo cual no es una cifra que pase desapercibida y menos en pequeñas PCH que son las más habituales en el país. Si se compara lo anterior con una PCH con capacidad instalada de 10 MW, la cual es capaz de generar unos 87,6 GW/año, se puede concluir que, con la instalación de uno de estos tornillos para el aprovechamiento de los caudales turbinados, se puede aumentar la producción de energía aproximadamente en un 5 % por cada unidad instalada en el proyecto.

AVANCES

Teniendo como precedente la energía hidráulica que se lleva a cabo en las grandes centrales de generación, se ha hecho necesario implementar nuevos sistemas que no solo suplan parte de la demanda sino también que su aporte al impacto ambiental, social, sus costos de construcción, uso reducido del espacio entre otros sea cada vez menor.

Este tipo de sistemas se ha venido implementando no solo por entidades de naturaleza pública sino también por pequeñas entidades, asociaciones y familias de común para satisfacer la demanda energética de su vivienda o sistema de producción.

VENTAJAS

- Capacidad para elevar aguas sucias y con residuos.
 - Elevar cualquier tipo de materia sólida que pueda entrar en el sistema de hélices, tales como caña, envases, bolsas de plástico, piedras, arena, material de playa, ramas, latas, etc.
 - Trabajo óptimo a diferentes caudales.
 - Bajo costo en consumo y mantenimiento por su simplicidad en comparación con otros sistemas.
 - No presenta cavitación.
 - No requiere una gran inversión en infraestructura civil.
 - Alta eficiencia en bajas cotas.
-

-
- El tornillo se regula por sí mismo, lo que hace que el control de la operación sea muy fácil.
 - Versatilidad de operación, pues puede generar con bajos caudales, hasta el 15 % del flujo máximo.
 - Su desgaste es casi nulo debido a su baja velocidad de operación que esta entre 25 y 30 rpm.

DESVENTAJAS

- Solo puede ser implementado en bajas profundidades.
- Tiene unas fuertes limitantes en cuanto a salto aprovechable, máximo 10 metros.
- Por ser una tecnología no muy explorada en Colombia, no se cuenta con una gran variedad de proveedores ni con una adecuada asistencia técnica.
- altos costos de instalación

PANORAMA EN COLOMBIA	AÑO	UBICACIÓN	CAPACIDAD INSTALADA	DESARROLLADO POR
	2018	San Vicente del Caguán, vereda Miravalle	220.000V – 50 Viviendas	Habitantes y excombatientes de las FARC

CARACTERISTICAS

- El sistema cuenta con un tornillo de superficie geométrica helicoidal que rodea a un cilindro que al girar realiza una trayectoria oscilatoria.
 - Gracias al caudal del fluido y el ángulo de inclinación del tornillo se genera el movimiento que a su vez desencadena la generación de energía gracias al acople entre eje y generador.
 - Este sistema es amigable con los peces debido a la forma en que se fabrican los alabes y de esta manera permite su recorrido sin sufrir lesiones. Adicionalmente se instala un mecanismo de filtrado para evitar el ingreso de elementos que puedan afectar la operación.
-

-
- Las turbinas Hidrodinámicas son diseñadas para generar energía mediante el aprovechamiento del recurso hídrico disponible, con posibilidades de captar saltos hídricos de hasta 10 metros. Las turbinas suelen estar construidas en metal y se componen de entre 2 y 5 aspas, su ángulo de inclinación debe estar cercano al 22% con el fin de garantizar la máxima eficiencia del equipo.
 - En la generación de energía se deben considerar dos factores básicos que afectan la cantidad y confiabilidad, como lo son el caudal y el salto aprovechables. En cuanto al caudal se cuenta con una capacidad de generación que va desde 0.065 m^3/s hasta un máximo de 7 m^3/s , con un aliciente adicional ya que se cuenta con la posibilidad de instalar varios tornillos en paralelo aumentando la capacidad tope de caudal aprovechable. Por otro lado, si se analiza el rango de operación para los saltos disponibles encontramos que el limitante está en torno a los 10 metros, pero nuevamente se cuenta con la ventaja de poder disponer de varias unidades, que en este caso se dispondrían en serie para permitir ampliar este rango.

DISEÑO

Se deben definir estos parámetros al momento de diseñar un generador tipo tornillo:

- Caudal Disponible: es el caudal medio que presenta el cauce a intervenir de este depende directamente la cantidad de energía que se puede generar, y con base a este, se escoge el tornillo más adecuado.
 - Caída disponible: al igual que el caudal disponible es un parámetro importante en la determinación del potencial hidroeléctrico del cauce intervenido, pues dependido de la diferencia de alturas entre el punto de captación y el punto de descarga, se puede definir la energía potencial disponible.
-

-
- Diámetro exterior del tornillo: es importante ya que de él depende el torque que será capaz de producir el tornillo.
 - Eficiencia del tornillo: es el indicador que muestra qué tanto del potencial energético del cauce se podrá aprovechar.
 - Angulo de caída: el ángulo de caída es un factor que afecta la eficiencia de la turbina, por lo tanto, es necesario buscar el ángulo óptimo es decir aquel en el cual el tornillo logre su mayor eficiencia.
 - Número de hilos a utilizar.
-

Además, se revisó bibliografía sobre las diferentes fuentes de energía en Colombia y de la clasificación de centrales hidroeléctricas a nivel nacional.

Tabla 3. Clasificación de centrales hidroeléctricas según capacidad instalada

NOMBRE	CAPACIDAD INSTALADA	CARACTERISTICAS
PICOCENTRALES	0,5 y 5 kW	Operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas
MICROCENTRALES	5 y 50 kW	Operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas.
MINICENTRALES	50 y 500 kW	Operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas
HIDROELÉCTRICAS (PCH)	500 y 20.000 kW	Operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas y zonas interconectadas (sin posibilidad de participar en el despacho eléctrico, menores a 500 kW, y con

		posibilidad de hacerlo las mayores a 10.000 kW)
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (CH)	Mayor a 20 MW	Aplicable a zonas interconectadas, con participación obligada en el despacho eléctrico.

Fuentes de energía en Colombia

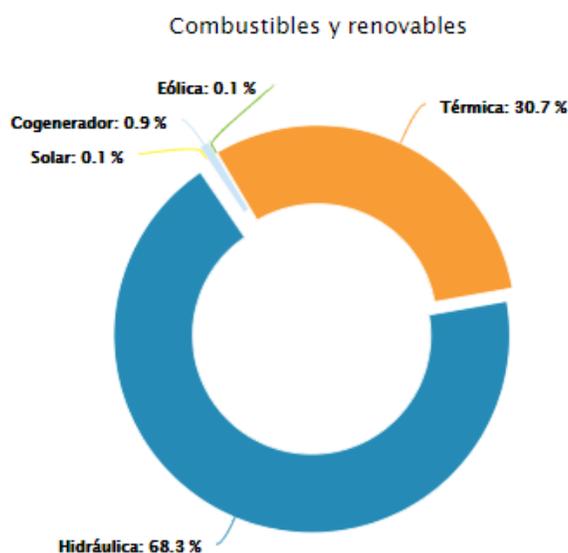


Figura 13: Fuentes de energía en Colombia.

Fuente: ACOLGEN

Capacidad instalada en Colombia

La matriz de generación eléctrica colombiana, es la sexta matriz más limpia del mundo, el 68% de la capacidad instalada es de fuentes renovables de energía eléctrica. Las empresas Asociadas a ACOLGEN, representan el 70% de la capacidad instalada del país, de la cual el 85% son plantas de fuentes renovables.

Cada una de ellas implica diferentes tipos de tecnologías con las cuales se obtiene la energía ya sea de forma de electricidad, fuerza motriz, calor o combustibles, se clasifican en los siguientes grupos principales:

Tabla 4. Fuentes de energía

TIPO DE ENERGIA	DESCRIPCIÓN
ENERGIA SOLAR	<p>Es un tipo de energía renovable o limpia que proporciona el sol debido a su radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) generando calor y electricidad, la cual no genera emisiones, adicional su tecnología puede ser integrada al paisaje urbana y es útil en zonas rurales de difícil acceso.</p> <p>Colombia aumentara 50 veces su capacidad instalada para la generación de energía solar y eólica, al pasar de 50 megavatios en 2018 a más 2.500 megavatios en 2022</p>
ENERGIA BIOMASA	<p>La biomasa se conoce como la energía verde del planeta, mediante el uso de materiales orgánicos que pueden utilizarse como combustible, tales como residuos forestales y agrícolas.</p> <p>La biomasa en Colombia representa alrededor del 17% de las fuentes disponibles para producir energía.</p>
ENERGIA HIDRÁULICA	<p>Es la fuente que usa la fuerza del agua de rios, lagos o mareas, se transforma mediante el paso de agua por una turbina hidráulica, la cual transmite la energía a un alternador que la convierte en energía eléctrica.</p> <p>Cerca del 70% de la energía del país proviene de fuentes hídricas.</p>
ENERGÍA EÓLICA	<p>Energía renovable que utiliza la fuerza del viento para generar energía, puede transformarse principalmente por medio de aerogeneradores o en fuerza motriz empleando molinos de viento.</p> <p>Colombia cuenta con un parque eólico ubicado en la Guajira con 15 aerogeneradores y genera 19,5 MW de potencia.</p>

ENERGIA TERMICA	<p>Es un tipo de energía no renovable obtenida por fuentes fósiles como los líquidos (fuel-oíl, ACPM, jet A1). Estos combustibles al pasar por un proceso termoquímico y termoeléctrico son convertidos a energía eléctrica.</p>
ENERGIA NUCLEAR	<p>Es la energía producida con el calor en los reactores que vaporiza el agua que mueve las turbinas.</p> <p>La primer central nuclear en el mundo fue soviética en obninsk y entro en funcionamiento el 25 de julio de 1954</p>
ENERGIA MAREOMOTRIZ	<p>Es la energía que se produce gracias al movimiento generado por las mareas y esta energía es aprovechada por las turbinas las cuales a su vez mueven el alternador que genera energía eléctrica.</p> <p>La primera planta de moderna de energía de las mareas fue construida en 1966 en Francia cerca de Saint-Malo y es actualmente la planta de las mareas más grandes del mundo.</p>
ENERGÍA GEOTÉRMICA	<p>Proviene del calor procedente del centro de la tierra, se transforma mediante perforaciones muy profundas para usar la fuerza calórica bajo la superficie de la tierra y producir energía.</p> <p>Se inauguró la primera planta de energía geotérmica en el país en el 2021 a pequeña escala de 100 kW, capaz de generar hasta 72.000 kWh / mes.</p>

Realizados los estudios pertinentes y con la información recopilada procedemos al desarrollo del dispositivo. Diseño.

Un bosquejo del tornillo de Arquímedes se presenta en la figura 14.

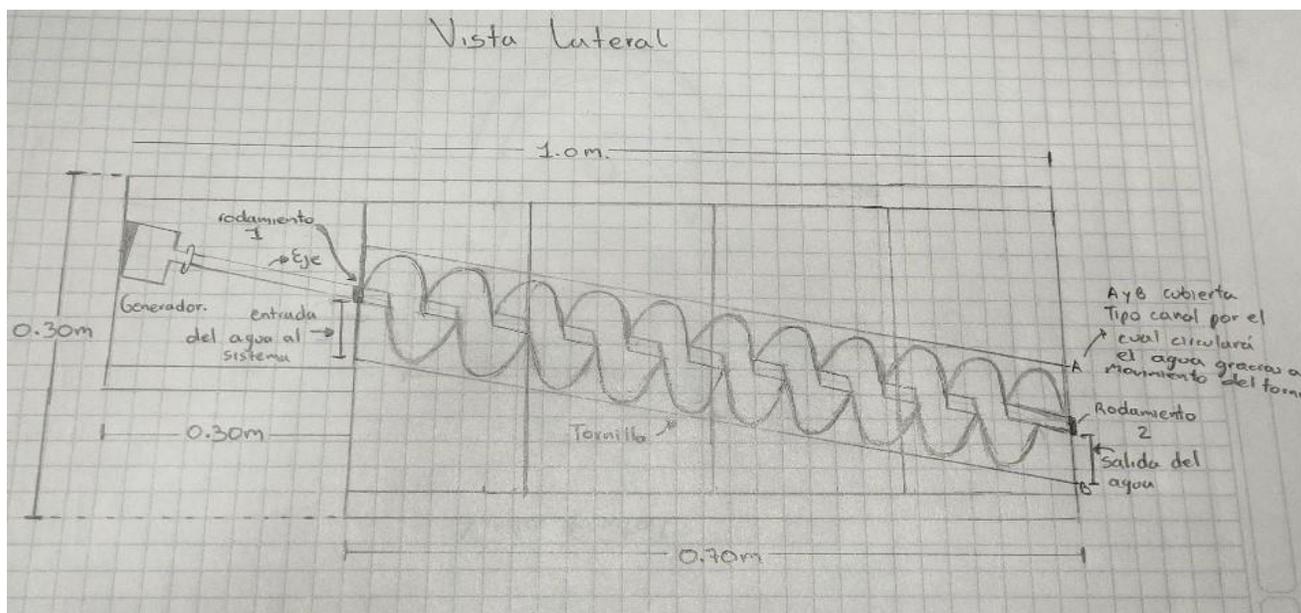


Figura 14: Bosquejo del tornillo de Arquímedes.

Fuente: Elaboración propia

La vista frontal del tornillo se muestra en la figura 15.

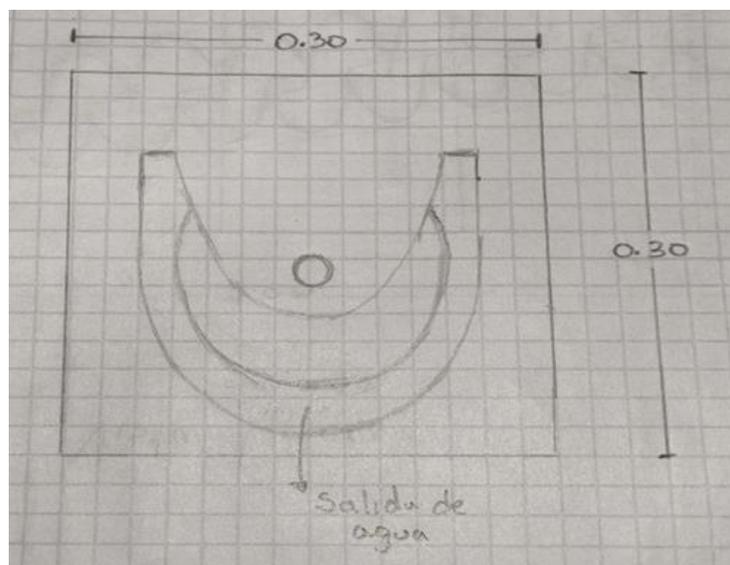


Figura 15: Vista frontal del tornillo de Arquímedes.

Fuente: Elaboración propia

En calidad de generador se utiliza un motor Eléctrico de imán permanente 350w 24v, presentado en la figura 17.

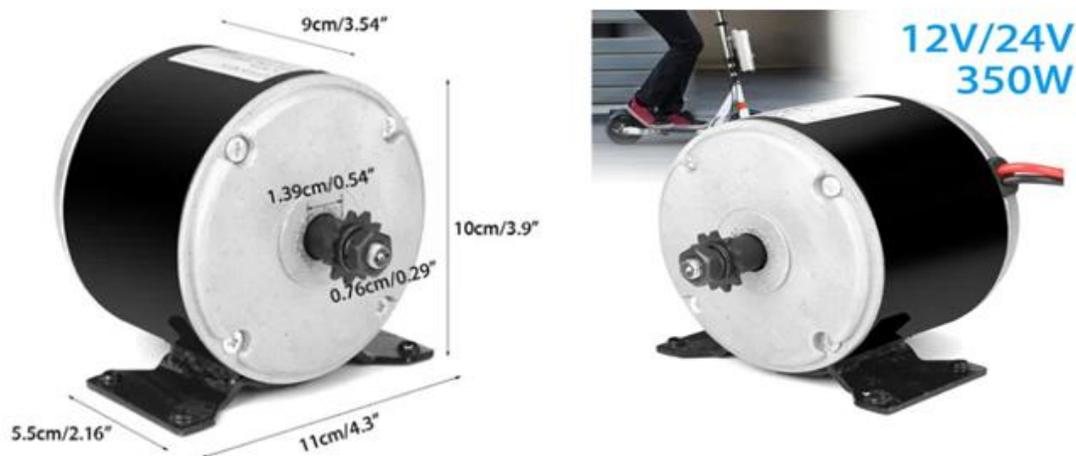


Figura 17: Características del motor

En la figura 18 se presentan otras vistas del motor eléctrico, que se utilizará en calidad de generador de energía acoplado al tornillo de Arquímedes.



Figura 18: Vista del motor

El diseño de un tornillo de Arquímedes se realiza a partir del diagrama presentado en la figura 19, en la cual se pueden observar los principales parámetros dimensionales.

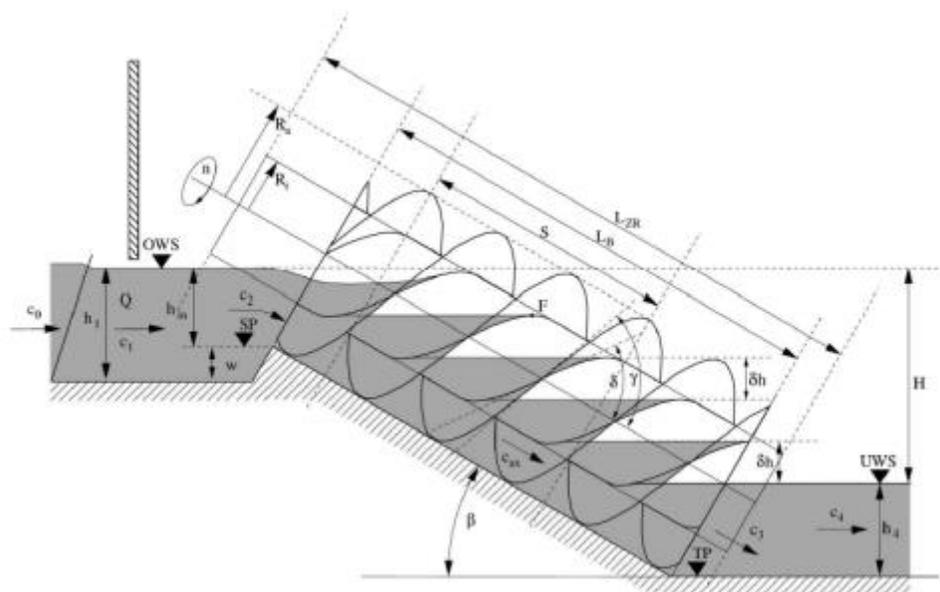


Figura 19: Vista en paralelo de un tornillo de Arquímedes.

Fuente: Nuernbergk y Rorres, 2013.

Construcción de la parte mecánica del generador de tornillo

El diseño del tornillo consiste en primer lugar en el radio interno R_i , el cual corresponde a la sección del tubo o eje central, y un radio externo R_a que abarca el ancho de las hojas instaladas sobre el eje. La región que se encuentra entre dos hojas sucesivas del tornillo, el radio interno y radio externo se conoce como un “balde” (Nuernbergk y Rorres, 2013). Un tornillo con N número de hojas tendrá una cantidad N de baldes, en donde existe un espacio S que corresponde a la distancia que se describe cuando la punta de cada hoja completa un revolución o rotación.

Esta distancia se conoce como un periodo (Nuernbergk y Rorres, 2013). Cada balde corresponde a una región del tornillo que se llena al máximo de agua que llega al punto de llenado óptimo F , de manera que el volumen de llenado óptimo que fluye dentro y fuera del tornillo con cada rotación del sistema corresponde a V_u la cual se describe en la siguiente ecuación:

$$V_u = \pi(R_a^2 - R_i^2)S \quad (1)$$

Para el prototipo propuesto se tiene que su eje será de 4 pulgadas ASTM con su equivalente en milímetros de 114,10mm. Por lo tanto, tenemos las siguientes características:

Ra (mm)	Ra (m)	Ri (mm)	Ri (m)
114,1	0,1141	57,05	0,057

El Angulo de inclinación (β) para este tipo de generadores es de 30 grados ya que con esta inclinación se obtiene el mejor rendimiento para el tornillo.

Se calcula la relación del periodo (λ) según la tabla de valores óptimos de parámetros adimensionales:

Para una cantidad de hojas igual a $N = 5$

$$(\lambda) = 0,263$$

Se calcula el periodo S

$$S = \frac{\lambda 2\pi R_a}{\tan \beta} \quad (2)$$

$$S = \frac{(0,263) * 2 * \pi * 114,10}{\tan 30}$$

$$S = 326,57 \text{ mm} \longrightarrow 0,33\text{m}$$

Se calcula el volumen de llenado optimo del balde según la fórmula 1:

$$Vu = \pi * ((0,1141)^2 - (0,0570)^2) * 0,33$$

$$Vu = 0,010$$

El caudal que puede llevar cada balde al punto de llenado óptimo F es el único en el flujo que puede generar efectivamente un torque, por lo cual se puede inferir que la suma de cada volumen de llenado en los baldes VU es la única energía hidráulica en el sistema que puede ser transformada directamente en energía rotacional (Nuernbergk y Rorres, 2013).

A partir de la definición anterior se puede establecer que este caudal, conocido como QW se puede describir con la Ecuación 3, en m^3/s .

$$Q_w = \frac{n}{60} V_U \quad (3)$$

$$Q_w = \frac{138}{60} * 0,010$$

$$Q_w = 0,023 \text{ m}^3/\text{s}$$

La variable n corresponde a la velocidad rotacional del tornillo expresada en min^{-1} , y la magnitud máxima que puede alcanzar este valor se describe por la ecuación realizada por Muysken (1932).

$$n \leq \frac{50}{(2R_d)^{2/3}} \quad (4)$$

$$n = \frac{50}{(2*0,1141)^{2/3}}$$

$$n = 138 \text{ min}^{-1}$$

Para establecer el volumen óptimo de llenado VU se deben determinar cuatro parámetros adimensionales, que corresponden a la relación entre el radio interno y el externo ρ , la relación del periodo con respecto al radio externo y pendiente λ , la tasa entre cada volumen de balde vU , y la tasa de volumen descrito por cada rotación λvU (Nuernbergk y Rorres, 2013).

Relación de radio

$$\rho = \frac{R_i}{R_a} \quad (5)$$

$$\rho = \frac{0,0570}{0,1141}$$

$$\rho = 0,499$$

Relación de periodo, tasa entre cada volumen de balde, tasa de volumen descrito por cada rotación

$$\lambda = \frac{S(\tan\beta)}{2\pi R_a}$$

$$v_U = \frac{V_U}{\pi R_a^2 S}$$

$$\lambda v_U = \frac{V_U(\tan\beta)}{2\pi^2 R_a^3} \quad (6), (7) (8)$$

(λ) Hallado en tabla Valores óptimos de parámetros adimensionales es igual a 0,263

$$v_U = \frac{0,010}{(\pi * 0,1141^2 * 0,33)}$$

$$v_U = 0,741$$

$$\lambda v = \frac{0,741 * \tan 30}{2 * (\pi^2) * 0,1141^3}$$

$$\lambda v = 14,590$$

En el diseño de un tornillo de Arquímedes el número N de hojas que se instalen en el sistema determina el valor óptimo de cada uno de los parámetros adimensionales. En la siguiente tabla se puede observar cual es el valor de cada parámetro que corresponde al óptimo que se genera según el número de hojas (Rorres, 2000). Para el caso del prototipo propuesto N=5

La tabla 5 muestra los valores óptimos de los parámetros dimensionales del tornillo de Arquímedes para la generación de energía eléctrica en el municipio de Girardota.

Tabla 5: Valores óptimos de parámetros adimensionales.
Fuente: Rorres, 2000.

N	TASA ÓPTIMA ENTRE RADIOS	TASA ÓPTIMA ENTRE PERIODOS	TASA ÓPTIMA ENTRE CADA VOLUMEN POR ROTACIÓN	TASA ÓPTIMA ENTRE VOLUMENES
1	0,5358	0,1285	0,0361	0,2811
2	0,5369	0,1863	0,0512	0,2747
3	0,5357	0,2217	0,0598	0,2697
4	0,5353	0,2456	0,0655	0,2667
5	0,5352	0,263	0,0696	0,2647
6	0,5353	0,2763	0,0727	0,2631
7	0,5354	0,2869	0,0752	0,2619
8	0,5354	0,2957	0,0771	0,2609
9	0,5356	0,3029	0,0788	0,2601
10	0,5356	0,3092	0,0802	0,2592
11	0,5358	0,4145	0,0813	0,2586
12	0,536	0,3193	0,0824	0,258
13	0,536	0,3234	0,0833	0,2574
14	0,536	0,327	0,0841	0,2571
15	0,5364	0,3303	0,0848	0,2567
16	0,5362	0,3333	0,0854	0,2562
17	0,5362	0,3364	0,086	0,2556
18	0,5368	0,338	0,0865	0,2559
19	0,5364	0,3404	0,087	0,2555
20	0,5365	0,3436	0,0874	0,2551
21	0,537	0,344	0,0878	0,2553
22	0,5365	0,3465	0,0882	0,2544
23	0,5369	0,3481	0,0885	0,2543
24	0,5367	0,35	0,0888	0,2538
25	0,5371	0,3507	0,0891	0,2542

Aparte del caudal de torque se debe también tener en cuenta el caudal de derrame que consiste en el agua o flujo que se puede perder entre el espacio descrito por el borde circular del tornillo y el recubrimiento que lo contiene. El caudal de derrame Q_G .

$$Q_G = \mu_A s_{sp} R_a \left(1 + \frac{s_{sp}}{2R_a}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{s}{2\pi R_a}\right)^2} \left(\frac{2}{3}\alpha_3 + \alpha_4 + \frac{2}{3}\alpha_5\right) \sqrt{2g(\delta h)} \quad (9)$$

El valor S_{sp} se refiere al máximo espacio que puede haber entre el recubrimiento y las hojas, y depende del peso total del tornillo y el grosor de los materiales. El valor de μA se refiere al factor del coeficiente de descarga en la zona a evaluar, y generalmente se encuentra entre 0.65 y 1.00.

Finalmente, el valor δh corresponde a la diferencia en cabeza hidráulica que existe entre cada balde (Rorres, 2000).

$$s_{sp} = 0.0045 \sqrt{2R_a} \quad (10)$$

$$S_{sp} = 0,0045 * \sqrt{2 * 0,1141}$$

$$S_{sp} = 0,00214$$

$$\delta h = \frac{s}{N} \sin \beta \quad (11)$$

$$\Delta h = \frac{0,33}{5} * \sin 30$$

$$\Delta h = 0,033$$

Los ángulos α_3 , α_4 , y α_5 definen la corriente de derrame de QG, y fueron determinados por Rorres (2000). Sus valores son respectivamente 0.478 rad, 2.338 rad, y 0.358 rad.

Aceleración gravitacional de la tierra (g): 9,81m/s²

Calculamos el caudal de derrame QG

$$QG = 0,70 * 0,00214 * 0,1141 * \left(1 + \frac{0,00214}{2 * 0,1141}\right) * \sqrt{1 + \left(\frac{0,33}{2 * \pi * 0,1141}\right)^2} * \left(\frac{2}{3} * 0,478 + 2,338 + \frac{2}{3} * 0,358\right) * \sqrt{2 * 9,807 * 0,033}$$

$$QG = 0,000172 * 1.100 * 1.191 * 0,804 \quad QG = 0,000181 \text{ m}^3/\text{S}$$

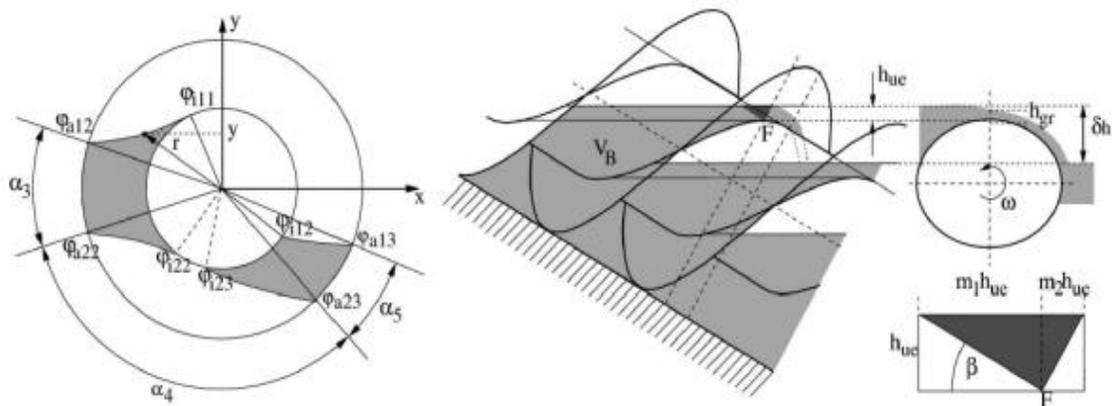


Figura 20: Ángulos de derrame y vista en planta del volumen de llenado óptimo.
Fuente: Rorres, 2000

La suma del caudal de derrame junto con el caudal de torque determina el caudal total que debe entrar al tornillo, y se debe regular en el sistema.

$$Q_T = Q_W + Q_G \quad (11)$$

$$Q_t = 0,023 + 0,000181$$

$$Q_t = 0,02318 \text{ m}^3/\text{s}$$

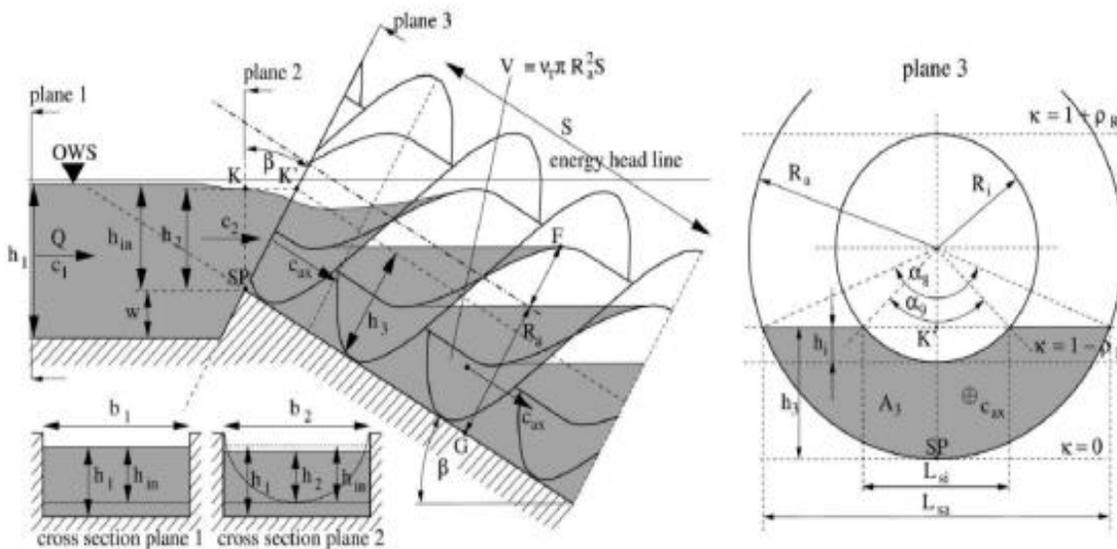


Figura 21: Esquema de cabeza de entrada.
Fuente: Nuernbergk y Rorres, 2013

Según estudios de optimización para los tornillos de Arquímedes las hélices deben tener cierto grado de inclinación en el punto donde el torque es máximo, este valor corresponde a $\alpha=41.81^\circ \approx 42^\circ$.

Cálculo del salto

$$H = L * \text{Sen} (\emptyset)$$

$$H = 1m * \text{Sen} (30^\circ)$$

$$H = 0,5m$$

Cálculo de la potencia teórica

$$POTteorica = \rho * g * H * Q$$

$$POTteorica = 1000 \frac{Kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 0,5m * 0,02318 \frac{m^3}{s}$$

$$POTteorica = 113,69W$$

Tabla 6: Los parámetros para la construcción del tornillo serian:

Parámetro	valor	Unidad	Descripción
Ra	0,1141	m	Radio externo
Ri	0,057	m	Radio interno
S	0,33	m	Periodo
N	5	-	Número de hojas
L	1	m	Longitud del tornillo
β	30	°	Angulo de inclinación
n	1,38	1/min	Velocidad rotacional

ρ	0,499	-	Relación radio
λ	0,263	-	Relación de periodo
vU	0,741	-	Relación de volumen
λv	14,590	-	Volumen normalizado por rotación
Qt	0,02318	M3/s	Caudal total
α	42	°	Angulo de inclinación de la Hélice
H	0,5	m	Salto

Para la construcción de la parte mecánica del generador de tornillo se tienen en cuenta los siguientes elementos:

Tubo de PVC de 4 “de diámetro por 0.7 m de longitud

Tubo de PVC ½ “por 1 m de longitud que se utilizar como eje

Lamina de 4 metros de longitud y 9 cm de ancho

Rodamientos de ½ “diámetro interior por 4” de diámetro exterior

Estructura metálica para sostener tornillo de Arquímedes

Piñón de acoplamiento a motor

Silicona

Para el ensamble se toma la lámina de 4 metros de longitud y la envuelvo en el tubo o eje de ½ “formando un espiral de 3 ½ “ de diámetro obteniendo 4” de diámetro final, separadas a 10 cm una de la otra y cortando el restante de espiral al final del eje, finalmente fijamos este espiral al eje con silicona.

Tomamos el tubo de 4” y lo cortamos a la mitad en forma de canal, en los extremos del eje le acoplamos los rodamientos a cada extremo.

Continuamos ajustando el tonillo dentro de la canal de PVC dejándola fija en los rodamientos y se toma el canal acoplado al tornillo y lo adaptamos a la estructura metálica y finalmente instalamos piñón de acoplamiento para motor.

Para la construcción de la parte eléctrica del generador de tornillo se tienen en cuenta los siguientes elementos:

Motor generador con eje

Piñón

Polea o cadena

Estructura de soporte de generador

Cableado de salida y cinta aislante

Tornillos de $\frac{1}{2}$ “

Para el ensamble se toma el generador y se acopla a soporte metálico fijándolo con tornillería, procedemos a instalar piñón en el eje del generador, posterior mente acoplamos por medio de cadena los dos piñones para que por ultimo nos quede la conexión del cableado de salida y podamos recibir una energía eléctrica derivada del movimiento realizado por el tornillo de Arquímedes

Este proyecto se desarrolla a partir del principio de funcionamiento del tornillo de Arquímedes empleado como generador de energía cuando ya que a su vez este acoplado a un generador de energía que aprovecha el movimiento mecánico ejercido por el movimiento comprendido entre el conjunto (eje y hélices) al contacto con una corriente hídrica.

La fase de diseño está comprendida por la simulación y cálculo del hidrotornillo teniendo presente características como:

- Características del punto de instalación (Caudal medio “Q”, caudal útil “Q0”, caudal de pérdidas “Qp” y altura “H”)
- Potencia hidráulica (Phidr).
- Numero de filetes helicoidales (N).
- Angulo de inclinación.
- Velocidad de rotación.
- Angulo del nivel de agua.
- Altura adimensional (Factor K).
- Rendimiento.
- Potencia mecánica
- Par generado, entre otros.

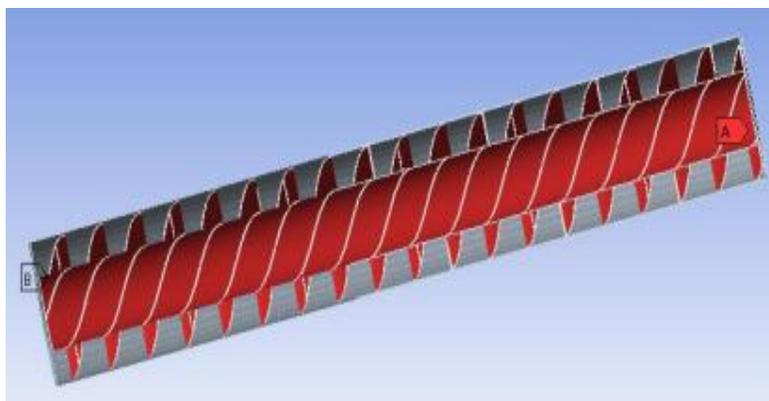


Figura 22: Simulación de tornillo de Arquímedes

Fuente: Universidad Jaume

En la fase mecánica, se acoplan las diferentes piezas mecánicas como el eje, los rodamientos, estructura de soporte y sistema de generación, con el fin de darle funcionalidad al hidrotornillo.



Figura 23: Acople mecánica de piezas

Fuente: Universidad Jaume

La fase de generación se define el sistema por el cual se convierte la energía mecánica producto del movimiento del tornillo a energía eléctrica por medio de un generador, cuya salida será transformada de una magnitud de corriente directa en una de corriente alterna gracias a un sistema de control con inversor.

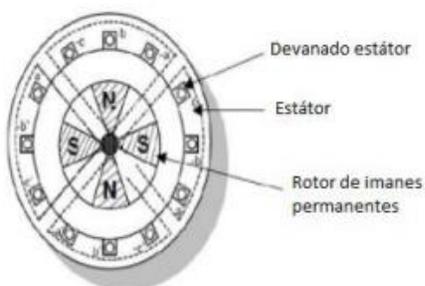


Figura 24.: Generador de imanes permanentes

Fuente: Universidad Jaume

Se utiliza un puente rectificador trifásico para conectar uno o múltiples generadores de corriente alterna o directa.

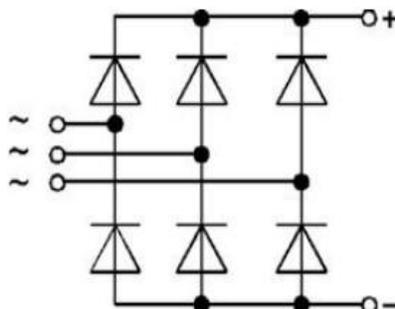
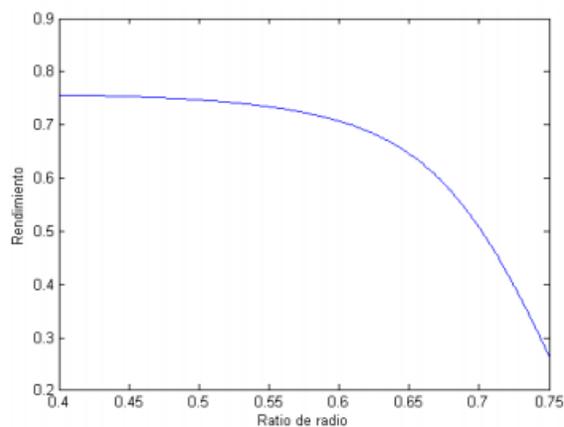
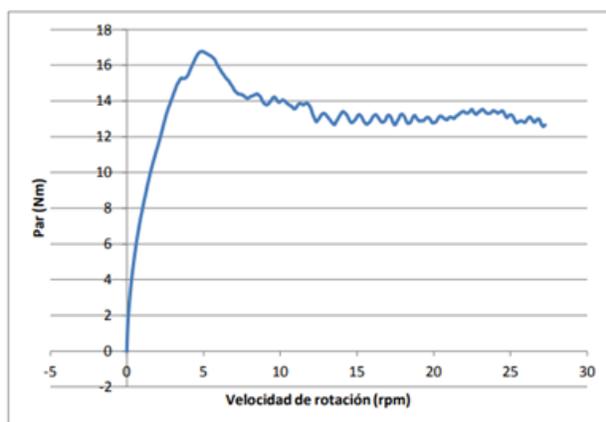


Figura 25: Puente rectificador
Fuente: Universidad Jaume

En la fase de pruebas y operatividad se obtienen los resultados en operación del prototipo y se contrastan dichos valores con los calculados inicialmente, logrando de esta manera caracterizar el equipo para su puesta en servicio a mayor escala, en este caso, una vivienda rural en el municipio de Girardota Antioquia.

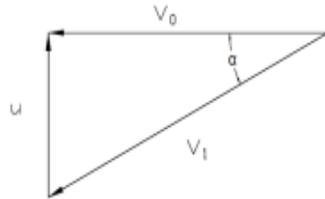


Figuras 26: Gráficos de operación y rendimiento.
Fuente: Universidad Jaume

Realizando pruebas de operatividad para optimizar de ser necesario el dispositivo.

Para dichas pruebas se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

-Velocidad de giro del Tornillo. El Tornillo gira con velocidad tangencial (u), la cual está determinada por la velocidad a la que ingresa el agua al Tornillo (V_0) y el ángulo exterior de la hélice (α). La Fig. muestra el análisis de velocidades.



-La potencia teórica se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$POT_{teorica} = \rho * g * H * Q$$

-Para la eficacia se tiene en cuenta que la potencia máxima que se puede dar es cuando la eficiencia es 100%, dado por la siguiente formula:

$$P_{100\%} = \rho * g * Q * H$$

-La potencia del sistema debe incluir las perdidas en los sistemas de transmisión y del generador. Por lo que se obtendrá la potencia de todo el sistema mediante la Ecuación

$$P = P_{teo} * \eta_m * \eta_g$$

-El Ángulo de inclinación (θ) de un Tornillo de Arquímedes varía entre los valores de 20°, 22°, 26° y 30°, de acuerdo a los valores típicos usados por los fabricantes, de acuerdo con el prototipo que se lleva acabo, se realiza en un ángulo de 30° para garantizar la mayor efectividad posible.

- El número de hilos de un Tornillo de Arquímedes puede variar teóricamente hasta el infinito y con esto se obtendría una eficiencia (η) de 99%. El valor del número de hilos también se encuentra directamente relacionado con la capacidad de fluido que se transporta por vuelta, para un Tornillo de igual diámetro. Sin embargo, por motivos constructivos se usa un número de hilos de 1, 2, 3 y 4, siendo más compleja la fabricación a mayor valor de número de hilos. De esta manera, se opta por un Tornillo de Arquímedes de 3 hilos con el que se obtiene una adecuada eficiencia (86%) y que no sea complicada su fabricación

Se tiene como principales valores energéticos determinados: Torque de 5213 N.m, velocidad de giro de 62 RPM y una potencia en el árbol hueco del Tornillo de Arquímedes de 29 kW. Se cuenta con una eficiencia del 86% en la transformación de la energía hidráulica a energía mecánica en el Tornillo de Arquímedes y una eficiencia total del sistema (incluyendo la eficiencia de la caja multiplicadora y el motor de inducción como generador) del 76%. De esta manera, se obtiene una potencia eléctrica generada de 26 kW.

Adicional las variables que inciden directamente en el diseño de un proyecto de este tipo son principalmente la aceleración de la gravedad y la densidad del agua pueden considerarse como valores constantes, toman importancia en la determinación del diseño, las variables: cabeza de agua, caudal y eficiencia.

En esta etapa también tendremos en cuenta el factor costo-beneficio del proyecto analizando si es viable su realización.

Primero se tendrá en cuenta los gastos que requiere la realización del proyecto, ya que es un factor importante pues de este depende la viabilidad económica y además de indicar la viabilidad, da una idea de lo atractivo que puede ser la inversión.

En la inversión inicial se validarán los precios de los materiales que necesitan para llevar a cabo el desarrollo del proyecto:

-El tornillo se enumera teniendo en cuenta que pocas empresas se dedican a la fabricación de este elemento, por lo cual fue necesario enviar el diseño a la empresa “Universo 3d”, para que realizara el tornillo mediante impresión 3D, su costo promedio fue de 300.000.

-Generador eléctrico: es una de las partes más importantes del proyecto, en promedio se estima un valor del mismo en 357.288 + 67.885 por gastos de importación, se realiza compra por internet. Algunas de sus características son: material hierro fundido y de tamaño 10x10x9, cm/3.9x3.54; número de polos 4, potencia nominal 350 W, Voltaje 24V, número de corriente de carga 16.4A, Velocidad nominal 2700 RMP.

-Elementos adicionales como cableado, tubería de hierro, tornillos, eje, cinta, entre otros se valoran aproximadamente en 250.000 ,6

A continuación, se expone la información detallada de los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto:

Cantidad	Descripción
1	Runner
1	Eje
1	Estructura
1	Rodamientos
1	Freno
1	Etapa multiplicadora
1	Generador
1	Puente rectificador
1	Regulador de carga
1	Sistema de almacenamiento
1	Pelacables
1	Corta frío

7. Conclusiones

El proyecto realizado ha contribuido de manera muy significativa al poder identificar y resaltar la importancia de apostar por proyectos de este calibre, aprovechando la cantidad de fuentes hídricas que posee el país, lo cual aporta al desarrollo del mismo y ayuda a las poblaciones que no tiene acceso a la electricidad o en poblaciones de bajos recursos a cubrir los gastos que esta genera.

Además, consideramos que lo más importante dentro de proyecto es la contribución del mismo al medio ambiente, ya que la apuesta siempre ha sido al cuidado y mantenimiento de este, y Colombia es privilegiada por su ubicación, lo cual le permite la explotación de recursos hídricos para la generación de electricidad, el país ha aprovechado la abundancia de la presencia de cuencas hídricas, lo cual ha contribuido a generar energía limpia.

El diseño energético del tornillo de Arquímedes se realizó teniendo como base el flujo del agua del área, de esta manera el agua ejerce la fuerza en el centroide del área de este y permite determinar el momento torsor en el tornillo; por otro lado, la velocidad de rotación se determina con la misma consideración y asumiendo que entre la velocidad de entrada y la de salida de la hélice se tiene al ángulo exterior de la hélice. Ambos vectores de velocidad, permiten obtener el valor de la velocidad tangencial con la que finalmente se determina la velocidad rotacional del tornillo.

Se tiene como principales valores energéticos determinados: Torque de 5213 N.m, velocidad de giro de 62 RPM y una potencia en el árbol hueco del Tornillo de Arquímedes de 29 kW. Se cuenta con una eficiencia del 86% en la transformación de la energía hidráulica a energía mecánica en el Tornillo de Arquímedes y una eficiencia total del sistema (incluyendo la eficiencia de la caja multiplicadora y el motor de inducción como generador) del 76%. De esta manera, se obtiene una potencia eléctrica generada de 26 kW.

Para la transformación de energía mecánica a eléctrica, se escogió usar un motor de inducción como generador, debido a ser una opción de bajo costo, sin embargo, la disponibilidad del mismo es compleja.

8. Recomendaciones

De implementarse el Tornillo de Arquímedes en una localidad donde el caudal no pueda mantenerse constante mediante métodos de regulación manual, por falta de personal que se encargue de esto o se requiera regulación muy precisa de los valores de caudal, se recomienda la colocación de un sistema regulador de carga automático que evite una carga mayor a la de diseño, la cual podría influenciar en el correcto funcionamiento.

Es necesaria la realización de un análisis económico que determine la viabilidad económica de un proyecto de este tipo en diferentes localidades, en el que se consideren factores como el valor de construcción, diseño, equipos necesarios, costos del mantenimiento, costos de las obras civiles necesarias y el tiempo de retorno de la inversión.

Debido a la potencia generada por un sistema de este tipo puede usarse para la generación de energía eléctrica para comunidades rurales y también para el auto consumo eléctrico en empresas que se encuentren próximas a corrientes de agua, permitiéndoles suplir parcial o totalmente su consumo eléctrico

9. Referencias bibliográficas

- Aburra, A. M. (s.f). *Area Metropolitana Valle de Aburra* . Obtenido de Area Metropolitana Valle de Aburra : <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/Energias-Renovables.aspx>
- Arango, S., & Londoño, A. (2017). Energias Renovables en Colombia: una aproximacion desde la economia. *Revista Ciencias Estrategicas*, 375-390.
- Castillo, Y., Castrillon, M., Vanegas, M., Valencia, G., Villicaña, & Eunice. (2015). Rol de las fuentes no convencionales de energia en el sector electrico colombiano. *Prospectiva*, 39-51.
- Fitzgerald, A. K. (2003). *Electric Machinery*. Mc.Graw Hill, Internationa.
- García-Peñalvo, F. J. (2019). nteligencia Artificial. Una perspectiva desde la ficción a la realidad. <https://bit.ly/2Q0jap0>. doi: 10.5281/zenodo.2818903.
- Landustrie*. (2008). Obtenido de Landustrie:
<https://www.landustrie.nl/es/productos/bombas/tornillos-de-arquimedes.html?L=0>
- Pineda, J. (s.f.). *encolombia* . Obtenido de encolombia: <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/energia-hidraulica/>
- Rega, P. (2011). *Sites google*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/279motoreselectricos/partes-fundamentales-de-un-motor-electrico/2-1-estator>
- Santa Cruz, J. (s.f.). Análisis energético de un Tornillo de Arquímedes para canales de regadío. (*tesis de grado*). Ponteficia universidad catolica del peru, Lima.
- <https://prezi.com/jxretryvpsve/el-tornillo-de-arquimedes/>
- <https://www.larazon.es/atusalud/medioambiente/lista-la-primera-central-de-tornillo-de-arquimedes-OB21464596/>
- <http://gexiq.com/el-tornillo-de-arquimedes-o-la-magia-de-la-espiral/>

<https://blog.uchceu.es/eponimos-cientificos/principio-de-arquimedes-espiral-de-arquimedes-tornillo-de-arquimedes-crater-de-arquimedes-montes-de-arquimedes-rima-o-fisura-de-arquimedes/>

<https://safer-tech.com/curiosidades-el-tornillo-de-arquimedes/>

https://es.wikipedia.org/wiki/Tornillo_de_Arqu%C3%ADmedes

<https://www.acolgen.org.co/>