

DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD
UTILIZANDO MÁQUINA ASÍNCRONA

JUAN SEBASTIAN CUBILLOS OROZCO
LAURA TATIANA VALENZUELA PÉREZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
2018-1

DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD
UTILIZANDO MÁQUINA ASÍNCRONA

JUAN SEBASTIAN CUBILLOS OROZCO
LAURA TATIANA VALENZUELA PÉREZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO

EDWIN FRANCISCO FORERO GARCÍA
DOCENTE TUTOR

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
2018-1

Nota de aceptación:

Firma docente asesor

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., xx de Junio del 2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiéramos agradecer a Dios por permitirnos desarrollar este trabajo tan enriquecedor para nuestra formación profesional e integral. Así mismo, ofrecer nuestras infinitas gracias a nuestras familias por el apoyo que nos brindaron en todo nuestro proceso educativo.

Agradecemos y reconocemos el trabajo arduo que desarrollo nuestro director de grado Edwin Francisco Forero, resaltando su entrega, compromiso y apoyo incondicional en el desarrollo de nuestro trabajo de grado.

De manera atenta, agradecemos a los honorables concejales del municipio de Guaduas, Cundinamarca Guillermo Caicedo y Wilson Diavanera, por su colaboración y apoyo en la realización del trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. ESTADO DEL ARTE.....	14
5. OBJETIVOS.....	18
6. MARCO TEÓRICO.....	19
7. DESARROLLO Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO.....	22
7.1 VIABILIDAD DEL PROTOTIPO MECÁNICO.....	22
7.1.1 SELECCIÓN TURBINA.....	22
7.1.2 SIMULACIÓN SOFTWARE CFX.....	23
7.1.3 DISEÑO AUTOCAD.....	28
7.1.4 IMPRESIÓN 3D.....	29
7.2 EMULACIÓN DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	31
7.2.1 GENERADOR ASÍNCRONO UTILIZADO.....	31
7.2.2 SELECCIÓN DE LAS CAPACITANCIAS UTILIZADAS.....	32
7.2.3 DIAGRAMAS DE CONEXIÓN.....	33
7.2.4 PRUEBAS REALIZADAS A LA MÁQUINA ASÍNCRONA.....	35
7.3 LABORATORIO DE HIDRÁULICA.....	37
7.3.1 PRUEBAS A LA TURBINA.....	37
7.4 PROYECCIÓN DEL PROYECTO PARA EL MUNICIPIO DE GUADUAS, CUND.....	41
7.4.1 IDENTIFICACIÓN DE RÍOS Y CAUDALES EN EL TERRITORIO MUNICIPAL.....	41
7.4.2 RECONOCIMIENTO DE LOS CAUDALES.....	42
7.4.3 PRUEBAS EXPERIMENTALES AL PROTOTIPO EN EL MUNICIPIO.....	43
8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	46
9. IMPACTO SOCIAL.....	49
10. CONCLUSIONES.....	50
11. RECOMENDACIONES.....	51
12. BIBLIOGRAFÍA.....	52
13. ANEXOS.....	56

LISTA DE ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1. Indicadores FES y DES reportados por la empresa de energía de Cundinamarca.....	11
Ilustración 2. Característica mecánica de un motor de inducción.....	19
Ilustración 3. Excitación del generador asíncrono por condensadores.....	21
Ilustración 4. Partes de la turbina.....	22
Ilustración 5. Partes de la turbina Kaplan.....	23
Ilustración 6. Turbina encapsulada en el cilindro.....	24
Ilustración 7. Malla del cilindro.....	25
Ilustración 8. Definición entrada y salida del agua en el sistema.....	25
Ilustración 9. Momento y masa.....	26
Ilustración 10. Transferencia de calor.....	27
Ilustración 11. Turbulencia.....	27
Ilustración 12. Comportamiento del agua respecto a la turbina.....	28
Ilustración 13. Diseño de turbina Kaplan realizado por Mauricio Karsten.....	29
Ilustración 14. Diseño de turbina Kaplan modificado.....	29
Ilustración 15. Interfaz software XYZware.....	30
Ilustración 16. Piezas impresas en ABS.....	30
Ilustración 17. Turbina Kaplan ensamblada.....	31
Ilustración 18. Motor de inducción Jaula de Ardilla.....	32
Ilustración 19. Conexiones para la prueba de selección de capacitancias.....	32
Ilustración 20. Conexión general del sistema.....	33
Ilustración 21. Conexión de máquina de corriente continua para la emulación.....	34
Ilustración 22. Conexión motor asíncrono como generador.....	34
Ilustración 23. Conexión voltímetro y amperímetro.....	35
Ilustración 24. Variación de rpm para una misma tensión con diferentes capacitancias.....	36
Ilustración 25. Banco Hidráulico volumétrico.....	38
Ilustración 26. Fototacómetro.....	38
Ilustración 27. Curva característica turbina Kaplan construida.....	39
Ilustración 28. Análisis radial de velocidad de la turbina kaplan construida.....	41

	Pág.
Ilustración 29. Río San Francisco.....	42
Ilustración 30. Salto de Versalles.....	43
Ilustración 31. Río Guaduro en la Inspección de Guaduro.....	43
Ilustración 32. Lugar turístico Salto de Versalles.....	44
Ilustración 33. Afluente del río seleccionado.....	45

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Signo de la potencia y de par.....	20
Tabla 2. Datos de generación con el banco de capacitancias de la Universidad Santo Tomas.....	33
Tabla 3. Datos adquiridos del sistema variando las capacitancias.....	35
Tabla 4. Datos adquiridos del sistema utilizando una carga resistiva.....	37
Tabla 5. Datos calculados para el funcionamiento del sistema.....	40
Tabla 6. Principales afluentes de Guaduas, Cund.....	42
Tabla 7. Consumo por meses del Municipio de Guaduas (Últimos 14 meses)	46
Tabla 8. Consumo energético anual del Municipio de Guaduas.....	47
Tabla 9. Informe de algunos proyectos a nivel nacional.....	48

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, se ha observado que buscar nuevas fuentes de energía amigables con el medio ambiente se ha vuelto tendencia en la sociedad, debido a que es una alternativa viable para equilibrar el daño ambiental ya generado. La hidrocínética se ha desarrollado con gran facilidad, debido a que es una alternativa viable a la problemática ambiental existe.

Las pch o pequeñas centrales hidroeléctricas no se han desarrollado puntualmente en algún orden cronológico debido a que es un estudio constante y que se puede modificar con diferentes técnicas, es por ello que no existen unas pautas determinadas de cómo hacer dicho estudio.

El presente trabajo de grado trata de la generación de energía eléctrica utilizando generador asíncrono, para ello se elaborará un prototipo a baja escala de una turbina Kaplan, que consiste en un diseño que posee rodets hélices fijas y un eje, ambos montados en una carcasa plástica, simulando de esta manera una carcasa espiral. De este modo, el flujo correrá en paralelo al eje sin ningún cambio en la dirección del afluente, logrando ser adecuado en cuanto al aprovechamiento de la energía gravitacional.

El desarrollo del proyecto de grado tratará de la selección de una turbina adecuada para caudales bajos y de grandes afluentes. Después, se procederá a realizar una simulación de la turbina con el software CFX y determinar el comportamiento del caudal con la turbina seleccionada. Luego se continuará a la impresión del prototipo de la turbina. Así mismo, se realizarán pruebas para buscar una generación de energía eléctrica para el generador de inducción. Posteriormente, se harán pruebas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás. Adicionalmente, se realizarán pruebas experimentales a la turbina para ver su funcionamiento en un lecho del río Guaduro del Salto de Versalles en el municipio de Guaduas, Cundinamarca.

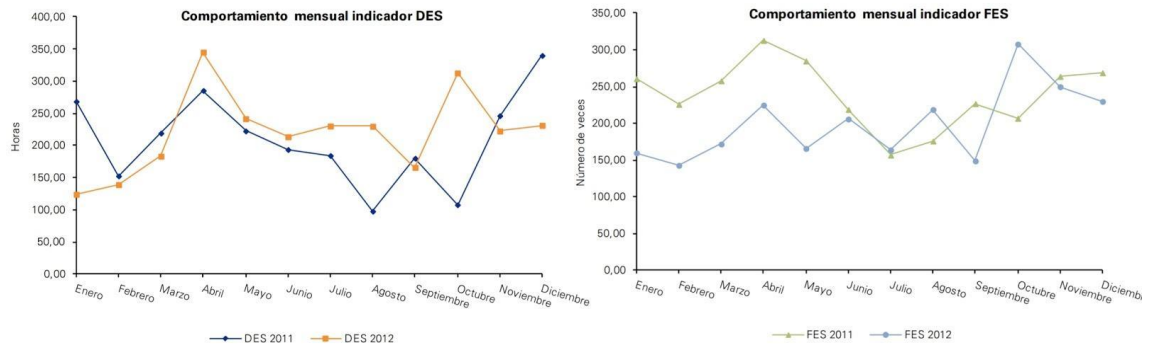
Finalmente, el trabajo de grado contará con una proyección de suministro eléctrico para el municipio de Guaduas, Cundinamarca y comparación con algunos proyectos desarrollados en el país para determinar la viabilidad de nuestro sistema eléctrico. Adicionalmente, se contará con todos los anexos pertinentes para un mejor complemento de la información brindada a lo largo del documento.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La realidad energética actual obliga a desarrollar nuevas posibilidades tecnológicas para transformaciones eléctricas, no solo para aportar en la disminución del impacto ambiental del uso de fuentes convencionales, sino también para considerar mejoras en la calidad del servicio de energía eléctrica. Las fallas de los sistemas eléctricos se presentan en las redes convencionales tanto en grandes ciudades, como en pequeños poblados como la Villa de Guaduas. Estas fallas normalmente se generan cuando se presentan precipitaciones torrenciales junto con descargas atmosféricas, lo cual afecta el normal desarrollo del municipio, estas fallas están normalizadas y reportadas por los indicadores FES (Frecuencia Equivalente de las Interrupciones del Servicio) y DES (Duración Equivalente de las Interrupciones del Servicio), que de acuerdo con la CREG 070, deben ser reportadas por la empresa comercializadora de energía (ver ilustración 1). Al no contar con una energía constante genera que el microempresario deba suspender su producción, lo cual impide que cumpla con la demanda de sus clientes por lo tanto sus ingresos monetarios se ven afectados. Además, en busca de disminuir las emisiones de CO₂ por transporte, (que son alrededor de 0.306 kg de CO₂/KWh, de acuerdo con el Plan Energético Nacional). El Municipio aún no tiene la disposición tecnológica para aprovechar dichas fuentes con el menor impacto ambiental posible. Adicionalmente, el Municipio de Guaduas no cuenta con una fuente de energía renovable que supla el servicio eléctrico como medida alternativa en caso de presentarse un corte o falla en el sistema eléctrico.

Otro inconveniente que se presenta en el servicio energético es la eficiencia de la cadena energética de la electricidad, la eficiencia es esencial en la generación de energía debido a que las pérdidas de energía en el momento de la transmisión del servicio eléctrico son altas. Teniendo en cuenta que en 2012 la proporción de energía útil y pérdidas en la matriz energética nacional fue de 40% y 60% respectivamente, con unos costos estimados de energía desperdiciada cercanos a los 5.200 millones de dólares al año [1], estas pérdidas energéticas se ven reflejadas en el plan energético nacional y es claro que el potencial de Colombia para mejorar la eficiencia energética es significativo. Por esta razón apropiarse del conocimiento para mitigar dicha problemática energética es una tarea natural de la ingeniería electrónica.

Ilustración 1 Indicadores FES y DES reportados por la empresa de energía de Cundinamarca



Tomada de: Informe de Auditoria Externa de Gestión y Resultados 2012 de la Empresa de Energía de Cundinamarca S.A. ESP-EEC.

Se plantea aprovechar los recursos hídricos a pequeña escala como: ríos, riachuelos y demás afluentes, a manera de fuentes locales de electricidad como alternativa viable para suplir la demanda energética.

JUSTIFICACIÓN

En Colombia ya existen normas que promueven la integración de fuentes de energía alternativa, como se puede establecer en la ley 1715 del 2014, capítulo IV, artículo 22: “Desarrollo de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos” [2].

En el plan de desarrollo del departamento de Cundinamarca “Unidos podemos más” 2016-2020, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, plantea en el Artículo 25 el programa esfuerzos unidos, riesgos reducidos [3]. En donde se establecen las estrategias de mitigación, con las cuales se busca evitar el crecimiento acelerado de las emisiones de gas CO₂ y demás hidrocarburos de efecto de invernadero, para este fin se crearon y promovieron planes sectoriales de acción de mitigación en pro del cambio climático y el medio ambiente.

El departamento de Cundinamarca cuenta con diferentes afluentes hídricos. Dichos afluentes cuentan con flujo continuo, lo cual daría como resultado una generación constante de energía. Como caso de estudio se tomó el municipio de Guaduas, Cundinamarca. En este municipio existen zonas de importancia ambiental representadas en sus recursos hídricos (ríos y lagunas), e innumerables microcuencas hidrográficas entre las que se destaca la del río San Francisco [4].

Desde el punto de vista ambiental, la obtención de electricidad utilizando la hidrocínética es una de las formas más limpias. Las grandes centrales hidroeléctricas rompen la armonía del medio ambiente. En ocasiones, se altera el ciclo del caudal, lo que impacta el ciclo reproductivo de los peces, la deforestación puede llegar a producir posibles escurrimientos de tierras y posible sedimentación. “Los expertos en biodiversidad y protección del medio ambiente señalan la inconveniencia de grandes proyectos hidroeléctricos con embalses por unos impactos difíciles de compensar” [5]. Por esta razón, se considera la hidrocínética, como una alternativa energéticamente no contaminante.

Actualmente, el proyecto busca promover tecnologías amigables con el medio ambiente. Los desarrollos científicos y tecnológicos favorecedores de la transición a la sustentabilidad, son el gran reto que se ha adquirido por parte de la sociedad-para-este momento, en donde la demanda energética aumenta a grandes pasos [6]. Apropiar conocimiento en cuanto al manejo de generadores asíncronos permite a futuro el diseño y la implementación de dichos sistemas en fuentes cinéticas hídricas para la obtención de diferentes magnitudes de potencia. De esta forma se facilitará la obtención de electricidad tanto en regiones pertenecientes al SIN (Sistema Interconectado Nacional) a ZNI (Zonas No Interconectadas), provocando el menor impacto al entorno.

En el semillero de investigación en Eficiencia Energética del grupo MEM (Modelado, Electrónica, Monitoreo) de la Universidad Santo Tomás, en la línea de investigación Sistemas de Energía Eléctrica, se ha venido desarrollando proyectos de investigación referente a la búsqueda de nuevas fuentes de energía, limpias y renovables, en el campo de los piezoeléctricos, PCH's, paneles solares y sistemas eólicos. Por lo tanto, este proyecto enriquece el conocimiento y manejo de una alternativa de captación limpia de energía utilizando máquinas rotativas.

ESTADO DEL ARTE

Las fuentes de energía renovables han representado un aspecto de gran importancia en el desarrollo de la humanidad. Son una alternativa viable y sustentable para el apoyo en el incremento de la demanda energética. La investigación y estudio de la hidrocínética se ha incrementado, debido se busca que sea una alternativa viable, la cual genere menos impacto ambiental y logre suplir con la demanda energética.

La energía potencial hidráulica es generada por la energía cinética que proporciona el movimiento del agua, estos impulsos hacen girar las turbinas acopladas a los generadores. La generación con energía hidráulica tiene el privilegio de que funciona con un recurso renovable y es bastante predecible la capacidad de generación.

La energía no renovable se puede obtener de fuentes que se encuentran en la naturaleza, pero una vez se hayan agotado no se pueden sustituir, como lo puede ser: el carbón, el petróleo, el gas y la nuclear. Por el contrario, las energías alternativas son consideradas como energías sostenibles. Se han catalogado como una manera viable de suplir con la gran demanda energética y ayudan en el deseo de disminuir los gases de efecto invernadero. Teniendo en cuenta lo anterior, se pueden catalogar como: eólica, hidráulica, mareomotriz, entre otros.

A nivel mundial, se han venido desarrollando diversas investigaciones referentes a la hidrocínética. En los diseños de sistemas hidrocínicos, la implementación de un sistema de hélices es una alternativa viable, por ejemplo, en Reino Unido se realizó un diseño y prueba de un generador hidrocínético para pequeños caudales, con la implementación del sistema de hélices buscaron aprovechar cualquier variación en el caudal, debido a que no se realizaron los estudios pertinentes a todas las pérdidas mecánicas que se podrían tener en la implementación física, al momento de comparar los datos obtenidos en el sistema implementado vs los datos obtenidos en la simulación, no se obtuvieron los resultados esperados, ya que solo se consiguió lograr un coeficiente de generación de energía utilizable de 0.25, y logrando aumentar a 0.3 en el momento de despreñar las pérdidas mecánicas [7]. En otro estudio, se presenta una pequeña central hidroeléctrica, donde su sistema se analiza con dos turbinas de hélice, y realizaron la aplicación con diferentes caudales para observar el rango de generación, además en este sistema se aplica un convertidor electrónico el cual permite compensar las pérdidas por el consumo de energía reactiva, finalmente concluyen que la implementación de una pequeña central hidroeléctrica es más estable que una turbina eólica debido a que los caudales de agua son predecibles y estables, mientras que los patrones de viento son erráticos e impredecibles [8].

Por otro lado, se ha desarrollado estudios en donde se implementa un motor de generación de imán permanente. Se han realizado investigaciones para la posible implementación de una PCH para suplir la energía esencial de una parte remota en un área rural de Tailandia, que sea de bajo costo y por ello, decidieron

implementar un motor de generación de imán permanente, el cual lograba alcanzar una generación de 525.6KWh/ año, con un caudal de 0.141 m³/min, lo que causaría un impacto en el medio ambiente, en el cual se vería una reducción de 0.33 ton/ año de CO₂ [9]. De igual manera, se realizó el diseño de una red hidrocínética inteligente con generador de imán permanente, en donde se realiza el almacenamiento y control de la energía generada, este sistema contaba con un total de 16 generadores posicionados en 4 filas independientes, dicho arreglo de generadores producía una totalidad de 20 KWh, para dicha implementación se realizaron estudios previos donde se utilizaba solo un generador para comprobar su capacidad de generación de energía, además se realizaron previos estudios donde consideran las posibles situaciones en las que se podría ver involucrado el arreglo de generadores, gracias a esto finalmente se consiguió realizar una sólida implementación la cual fue apoyada por el Ministerio de Economía del Gobierno Español [10]. De igual manera, se ha estudiado el diseño de dos generadores para ser implementados en una PCH, estos generadores comparten el mismo estrator, pero varían en qué parte tiene fijados los imanes, gracias a este estudio se pudieron analizar diferentes parámetros a tener en cuenta para la selección de un generador, debido a que utilizan dos tipos de generadores, uno es un generador asíncrono y otro es un generador de imanes permanentes, donde para ambos casos se fijaron los mismos parámetros de selección, gracias a esto se pudo realizar una comparación entre ambos generadores donde se logró observar que los generadores de imán permanente tienen un mayor porcentaje de generación aunque su adquisición es más costosos que los generadores asíncronos [11]. Además, Se realiza un estudio en donde se presenta un modelo de control para una turbina hidrocínética la cual utiliza un generador síncrono de imanes permanentes, esto con la finalidad de obtener una generación a un voltaje y frecuencia continuo a pesar de tener variaciones en los caudales de agua, se utiliza una chopper de refuerzo DC-DC para mantener el voltaje constante y se busca optimizar la corriente en el punto de máxima potencia [12].

Por otra parte, una manera en la que se ha generado energía es aplicando un controlador PI con el concepto de plenitud diferencial. Con ello buscaban generar una trayectoria imaginaria la cual mostraba el comportamiento desde el momento inicial del sistema hasta una potencia de salida deseada. El objetivo de la implementación del controlador era producir voltaje y frecuencia constantes con generador síncrono permanente sometido a un flujo de agua variable. Los resultados arrojaron que la salida generada si se ajusta dinámicamente al proceso de regulación de voltaje [13].

Además, se han realizado estudios para el diseño de modelos para la gestión óptima de energía en un sistema híbrido de almacenamiento microhidrocínético, el cual suministra energía a la red comercial, el objetivo de este modelo es minimizar los costos de energía realizando control a las variables de flujo de potencia causadas por el esquema de tarifas en el tiempo de uso, para dicha implementación, se utiliza La herramienta de optimización de Matlab, considerando 216 horas, en las cuales se tiene en cuenta los 7 días de la semana, logrando observar que los días domingos se debe usar todas las

fuentes de generación de manera continua durante todo el horario comercial de la red eléctrica [14].

Dado el gran interés en la energía renovable, una manera de generar energía es por medio de la utilización de las teorías hidrodinámicas, para el estudio realizado se combinaron "Método del elemento de cuchilla" y "teoría del momento axial". En donde, calcularon las cargas hidrodinámicas, estimar el rendimiento energético y determinar los parámetros óptimos de la pala para una turbina. Plantearon que es más viable utilizar la hidrocínética que la energía eólica, debido a que las corrientes son más poderosas y eficientes [15].

Así mismo, otra estrategia en el diseño del sistema de generación es mediante la implementación de turbinas que generan inducción en los generadores, con el propósito de colocar en marcha dos microcentrales, para el control de este sistema se implementó un inversor de tensión relacionado directamente con la carga que tendría el sistema, de esta manera el sistema se redireccionará a un banco de condensadores donde se calcula la capacitancia necesaria para su correcto funcionamiento [16]. Se ha implementado como una solución viable para suplir la escasez energética, en donde plantearon como alternativa una PCH la cual utiliza un motor de inducción como generador, esto pensado con la finalidad de venderlas a los consumidores finales, los cuales podrían potenciar su economía al vender la energía que no consuman a la red eléctrica principal [17].

Por otra parte, se ha utilizado la técnica de vibración creada por Vortex para la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas en pequeñas comunidades para así poder tener una generación sustentable de energía, en sus estudios a partir de un caudal de $3\text{m}^3/\text{s}$ lograron obtener una eficiencia del 26.22% de generación en sus módulos, de esta manera obteniendo una producción de energía de 607 W/h por generador [18]. Así mismo, como un alternativa de generación se ha implementado un control moderno de generación de un río la cual va ligada a un conversor DC-DC para aprovechar el bajo costo de los inversores fotovoltaicos, además para mejorar el transporte eléctrico hasta a red eléctrica se utiliza un conversor Boost, para alimentar las líneas de transmisión con 800 voltios DC, para finalmente implementar un inversor el cual entregaría un voltaje de 480 voltios AC a una frecuencia de 60Hz, lo cual es inyectado a la red principal [19].

Por lo tanto, los estudios que se han realizado a lo largo del desarrollo de la hidrocínética, han consistido por otra parte en brindar un contextualización respecto a la hidrocínética, en cuanto al diseño, estimaciones y evaluación del potencial para el uso de dicha energía, por lo que es necesario tener en cuenta el flujo del caudal y su tamaño debido a que el flujo de agua está relacionado directamente con la potencia generada, además si el afluente hídrico tiene un ancho mayor a 1.5 metros, la velocidad del generador se puede llegar a duplicar [20]. De la misma forma, dar a conocer el funcionamiento de una PCH en terreno montañoso, explicación de los cálculos para el aprovechamiento adecuado del respectivo caudal, el control de la estructura, el almacenamiento y el transporte de la energía obtenida del sistema, ya que si se realizan correctamente dichas

consideraciones, se puede realizar una correcta regulación de la generación de energía dependiendo directamente del caudal del río y del cronograma de consumo por horas de la red eléctrica, para así lograr suplir las necesidades de consumo de la red [21]. De igual manera, se han realizado estudios referentes a métodos de análisis de potencial de un hidrogenerador ubicado en un río, en donde, se realizaron mediciones anuales en el caudal y en complementación se hicieron medidas satelitalmente, esto se realiza con la finalidad de facilitar los estudios previos necesarios para la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas y conocer su posible patrón de generación [22].

La generación de energía mediante la hidrocínética ha sido implementada como una alternativa viable para suplir diversas necesidades, como lo es el caso en el que se implementó una PCH con el fin de suplir la irrigación de agua para diferentes granjas, en este proyecto se utilizó un generador totalmente sumergido, el cual era capaz de proveer una potencia de 750W, los cuales eran suficientes para suplir la potencia consumida por las cargas [23].

A nivel Latinoamérica, se puede observar que la hidrocínética ha tenido gran acogida como una solución sustentable a la gran demanda energética. Las energías limpias como lo es la hidrogenación y otras energías alternativas han sido de gran importancia para el desarrollo de los países Latinoamericanos, donde se demuestra que la implementación de baterías como medio para suplir pérdidas del sistema, afecta directamente el porcentaje de energía entregada al sistema luego de calcular las respectivas pérdidas, podemos observar que el sistema sin baterías tiene una eficiencia del 88% mientras que en un sistema que implementa el uso de baterías se ve una eficiencia del 90%, este 2% de diferencia es la energía que es desechada por sobre generación y no es consumida por las cargas [24].

A nivel nacional, se ha venido creando y desarrollando estrategias para fomentar la implementación de energías limpias en los procesos industriales, hogares, etc. Por ejemplo, se desarrolló el diseño de una PCH para el municipio de Yacopí y Nimamia para el departamento de Cundinamarca, en donde se busca suplir con la cobertura de energía eléctrica de la población de dichos municipios [25]. De igual manera, se planteó la sustitución de la fuente de energía tradicional con una microcentral hidroeléctrica para el municipio de Pipinta, Cundinamarca; en donde se realizaron los cálculos del costo de la implementación del sistema de energía planteado, en donde se plasma la viabilidad en zonas rurales interconectadas de Colombia [26].

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar un prototipo de generación de energía eléctrica utilizando una máquina asíncrona impulsada con una turbina hidrocínética en un escenario basado en afluentes de bajo caudal para realizar pruebas que sustenten una implementación real en el municipio de Guaduas, Cundinamarca.

Objetivos Específicos

- Identificar las variables de entorno que intervienen en la generación de energía eléctrica para determinar los parámetros que se involucran en el sistema.
- Diseñar el sistema de generación apoyados en los parámetros previamente establecidos para dar integración a los factores que inciden en el sistema.
- Implementar un prototipo a baja escala para ensayos en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás para verificar el correcto funcionamiento del sistema propuesto.
- Realizar diversas pruebas al prototipo del sistema de generación de energía diseñado, para determinar la eficiencia y viabilidad del proyecto.

MARCO TEÓRICO

Un motor asíncrono es una máquina que no simplemente tiene los devanados de amortiguación esto debido a que el voltaje del rotor el cual es el que produce corriente y el campo magnético del rotor, es inducido sobre el rotor, por lo que no necesita estar conectado directamente, otra característica distintiva de este tipo de motores es que no es necesario la utilización de una tensión DC para la operación de la máquina. El funcionamiento de los motores asíncronos no es tan diferente al de los motores síncronos, debido a que la operación de estos motores es igual que la de los devanados de amortiguación en los motores síncronos [27].

La ecuación 1 representa la velocidad de rotación del campo magnético, en esta ecuación P es el número de polos que tiene la máquina y f_c es la frecuencia del sistema en Hz.

Ecuación 1 Cálculo de velocidad de rotación [27].

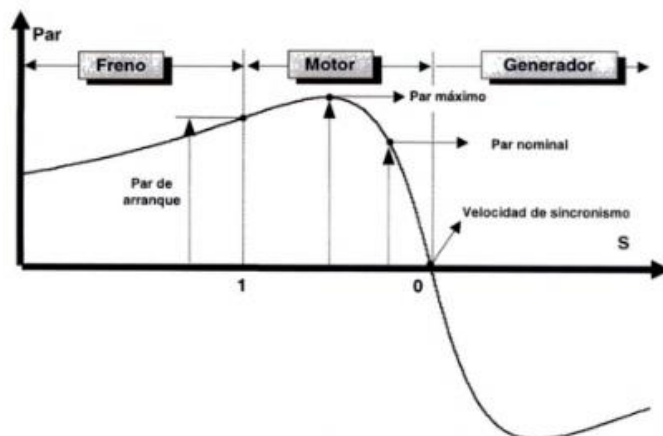
$$n_{sinc} = \frac{120 f_c}{P}$$

Fuente: Libro Máquinas eléctricas

La ilustración 2 representa la curva par-velocidad, cuando la máquina está alimentada a su frecuencia y tensión nominal. En ella se puede observar los puntos de mayor predominio como:

- Par de arranque: par que desarrolla el motor con velocidad nula.
- Par máximo: el mayor que podrá desarrollar el motor.
- Par nominal: el desarrollado a la velocidad nominal.

Ilustración 2 Característica mecánica de un motor de inducción



Fuente: Libro Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas

Cuando la máquina asíncrona trabaja en las proximidades del punto de funcionamiento nominal lo está haciendo como motor. Pero cuando se trabaja a

velocidades superiores, la máquina se encuentra en funcionamiento como generador. La máquina asíncrona necesita una aportación de energía reactiva externa para poder trabajar como generador, es por esto que se suele utilizar la red eléctrica o un banco de condensadores con función de batería [28].

El generador no es autoexcitable, es decir, para que la máquina de inducción pueda funcionar como generador precisa que, sobre la misma red a la que está conectada, se hallen otros generadores capaces de facilitarle la corriente magnetizante.

Mecánicamente, son máquinas muy robustas y relativamente económicas, justifican en determinadas aplicaciones su adopción, como: en centrales eléctricas de punta, accionadas por turbinas hidráulicas y en centrales hidráulicas de agua fluyente automáticas, controladas desde una central base [29].

Teniendo en cuenta únicamente el signo de la potencia y de par, se puede establecer la tabla 1. Para establecer este cuadro se tiene presente: 1° La velocidad angular se considera positiva cuando el rotor gira en sentido contrario al de las agujas del reloj, 2° El par electromagnético se considera positivo cuando tiende a originar el movimiento del rotor en sentido positivo y 3° La potencia mecánica es positiva cuando es consecuencia de un flujo de energía que sale del sistema.

Tabla 1 Signo de la potencia y de par

S	< 0	0	0 ... 1	1	> 1
ω_m	$> \omega_{1/P}$	$> \omega_{1/P}$	$> \omega_{1/P}$	0	< 0
P_{mec}	< 0	0	> 0	0	< 0
C_{elec}	< 0	0	> 0	> 0	> 0
Funcionamiento	<i>Generador</i>	<i>Motor en vacío</i>	<i>Motor</i>	<i>Motor Parado</i>	<i>Freno</i>

Fuente: Libro Convertidores electromecánicos de energía

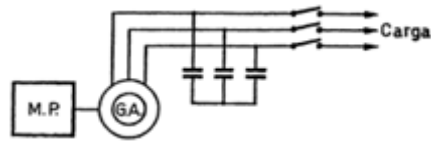
La máquina asíncrona puede trabajar como generador, cuando la velocidad del rotor es positiva y mayor que la de sincronismo $\omega_{1/P}(s < 0)$ vemos que el par se hace negativo lo mismo que la potencia convertida. El significado de ello es que la máquina absorbe potencia mecánica de una fuente exterior a través del eje devolviéndola en forma de energía eléctrica por los terminales del estator [30].

El condensador eléctrico, sin pérdidas, sobre una red alterna, se puede considerar como un generador de corriente decalada en retraso de 90°, respecto a la tensión de la red, es factible sustituir, total o parcialmente, el suministro de corriente reactiva que precisa el generador de inducción para la excitación de su circuito magnético [29], véase la ilustración 3.

Este principio de funcionamiento es similar al de la autoexcitación de las máquinas de corriente continua, es decir, "Si toda la corriente reactiva del motor

procede de los condensadores el funcionamiento del generador de inducción se dice que es autónomo, o autoexcitado” [29].

Ilustración 3 Excitación del generador asíncrono por condensadores



Fuente: Libro Máquina de corriente alterna asíncrona

DESARROLLO Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO

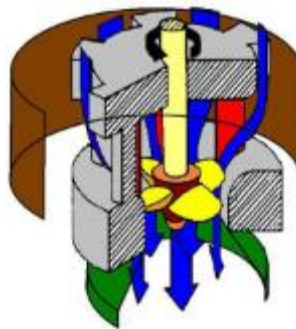
7.1 VIABILIDAD DEL PROTOTIPO MECÁNICO 7.1.1 SELECCIÓN TURBINA

Después de interpretar toda la información que se logró encontrar y analizar referente a diferentes tipos de turbinas, se definió que para el proyecto era adecuado utilizar la turbina Kaplan ya que se acoplaba a nuestro sistema de emulación para lograr cumplir el propósito del proyecto. Además, la construcción de dicha turbina es sencilla [31].

Turbina Kaplan: Fue desarrollada por el ingeniero austriaco Victor Kaplan entre 1910 y 1918. Es un tipo de turbina similar a la hélice pero con los álabes del rotor orientables, con lo que se inclinación se puede hacer coincidir siempre con la dirección del flujo a la entrada del rotor, de modo que se adapta bastante bien a cualquier carga, Son adecuadas para trabajar en situaciones de grandes caudales y pequeñas alturas [32].

Partes de la turbina Kaplan:

Ilustración 4 Partes de la Turbina

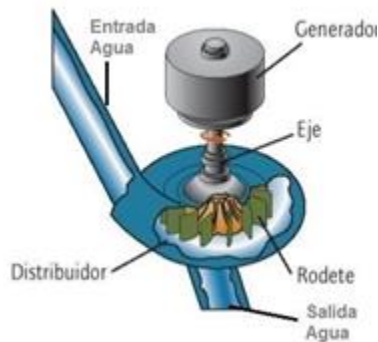


Fuente: <http://slideplayer.es/slide/1075837/>

- La parte gris, es el distribuidor.
- La parte café la cámara de alimentación.
- La parte roja los álabes móviles del distribuidor.
- La parte azul es el flujo del agua o fluido.
- La parte amarilla es la turbina, donde están los álabes y su eje.
- La parte verde es el difusor o tubo de aspiración.

La turbina Kaplan es de reacción pura, radial-axial, y normalmente de eje vertical [32].

Ilustración 5 Partes de la turbina Kaplan



Fuente: <http://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>

El principio de funcionamiento de la turbina Kaplan es muy sencillo, es decir: “El agua se recoge por una tubería de entrada y es distribuida por varios puntos de salida mediante el distribuidor. Los puntos por donde sale el agua se llaman toberas, hacen que el agua golpee los álabes del rodete que hace girar el eje de la turbina también llamado rotor. El rodete consta esencialmente de un disco provisto de un sistema de álabes, paletas o cucharas (dependiendo tipo de turbina) sobre las que golpea el agua. El agua sale por la tubería de desagüe o difusor hacia el cauce del río” [33].

Sus características principales son: dimensiones reducidas, velocidades relativamente altas, rendimiento elevado con carga variable y notable capacidad para sobrecargas [34].

7.1.2 SIMULACIÓN SOFTWARE CFX

Para esta etapa, se procedió a seleccionar un software adecuado el cual brindara una mayor información respecto al comportamiento del agua en la turbina.

ANSYS CFX es una herramienta de software de dinámica de fluidos computacional (CFD) de alto rendimiento que ofrece soluciones confiables y precisas de manera rápida y sólida en una amplia gama de aplicaciones CFD y multi físicas. CFX es reconocido por su excelente precisión, robustez y velocidad con maquinaria rotativa como bombas, ventiladores, compresores y turbinas de gas e hidráulicas [35], para lograr realizar las simulaciones, se utilizó una licencia de prueba de 15 días (periodo en el cual se realizaron las pruebas en el software).

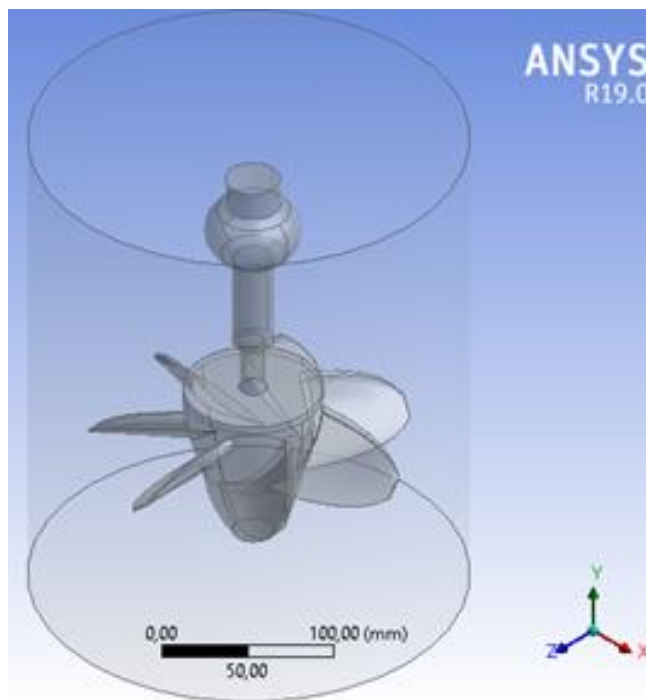
ANSYS con el complemento ANSYS Workbench, permite crear un proyecto para observar el comportamiento del agua en la turbina. El software cuenta con Toolbox, en donde se encuentra una gama de herramientas útiles para el desarrollo del sistema. Para el proyecto se seleccionó del Toolbox Sistemas de análisis, y posteriormente se utilizó la herramienta Fluid Flow (CFX), la cual permite simular un caudal de agua y así poder analizar su comportamiento. En el momento de utilizar Fluid Flow se deben realizar 5 pasos, los cuales se deben

realizarse consecutivamente para poder obtener la respuesta del sistema creado.

El primer paso se llama Geometry, en donde, inicialmente se cargó la turbina seleccionada para el sistema. Después con ayuda de la herramienta enclosure se logró encapsular la turbina en un cilindro por donde va pasar el flujo de agua.

Dimensiones de la turbina en la simulación: Diámetro 160 mm y alto 220 mm tamaño para acoplarlo a una caneca de basura, estas dimensiones se escogieron con la finalidad de lograr adaptar la turbina a una caneca de tamaño mediano (diámetro 300mm y alto 500mm).

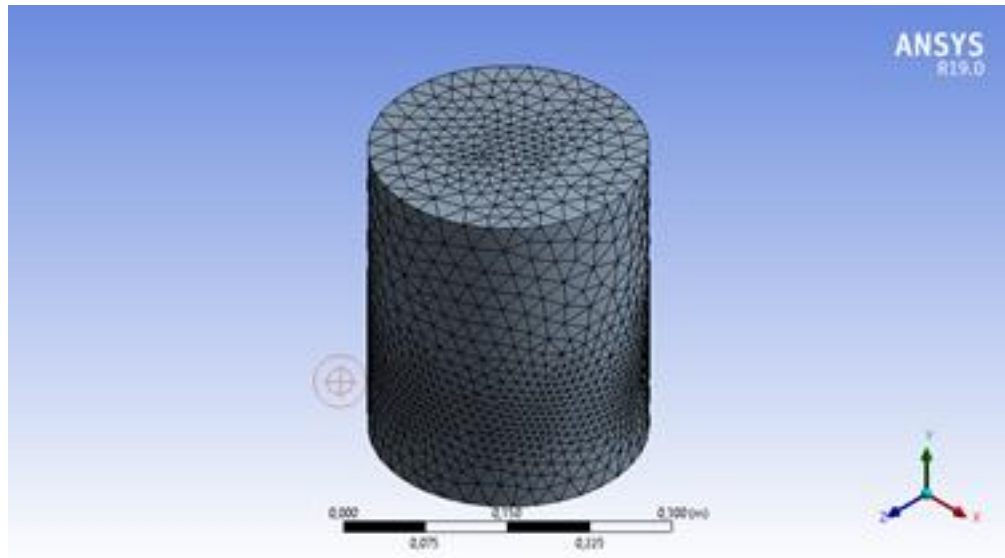
Ilustración 6 Turbina encapsulada en el cilindro



Fuente: Autores realizada en software CFX

La segunda etapa es Mesh, en donde se crea una malla, la cual rodea el cilindro y se sobrepone a la turbina, permitiendo que el software identifique las partes que conforman al sistema y las partes que estarán involucradas con el flujo de agua.

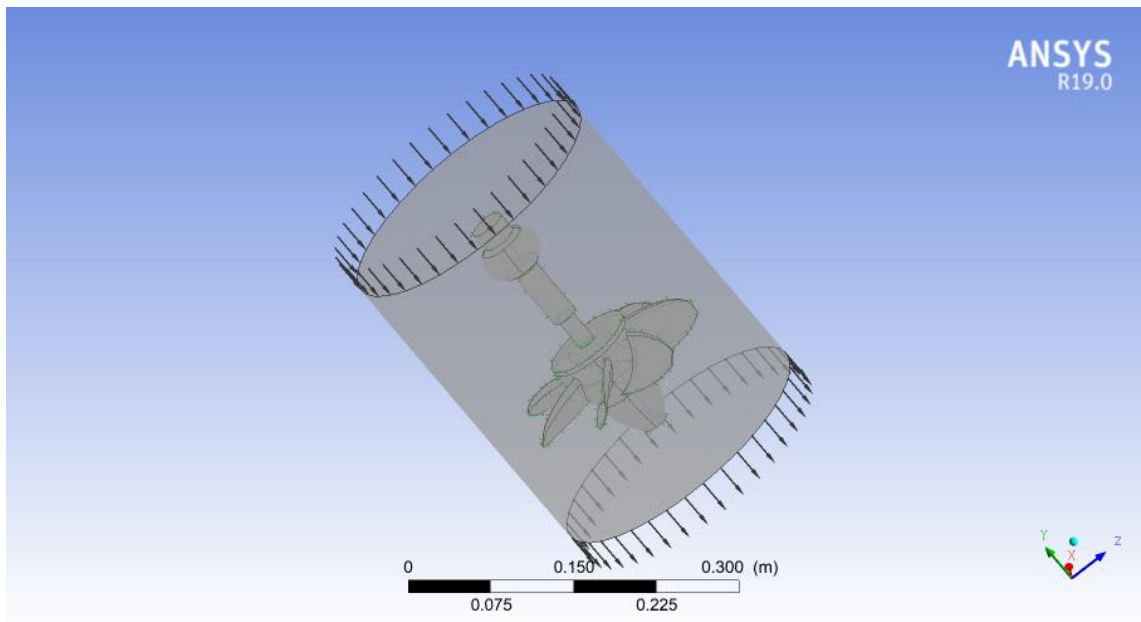
Ilustración 7 Malla del cilindro



Fuente: Autores realizada en software CFX

El tercer paso es Setup, en esta parte del proceso se define: el tipo de flujo (agua), el material de la turbina (plástico) y la velocidad del agua. Así mismo, se define cual va a ser la entrada y salida del agua. Como se puede observar en la ilustración 8, las flechas entrando al cilindro definen la entrada del fluido y las flechas saliendo de la parte inferior del cilindro determinan la salida del agua.

Ilustración 8 Definición entrada y salida del agua en el sistema

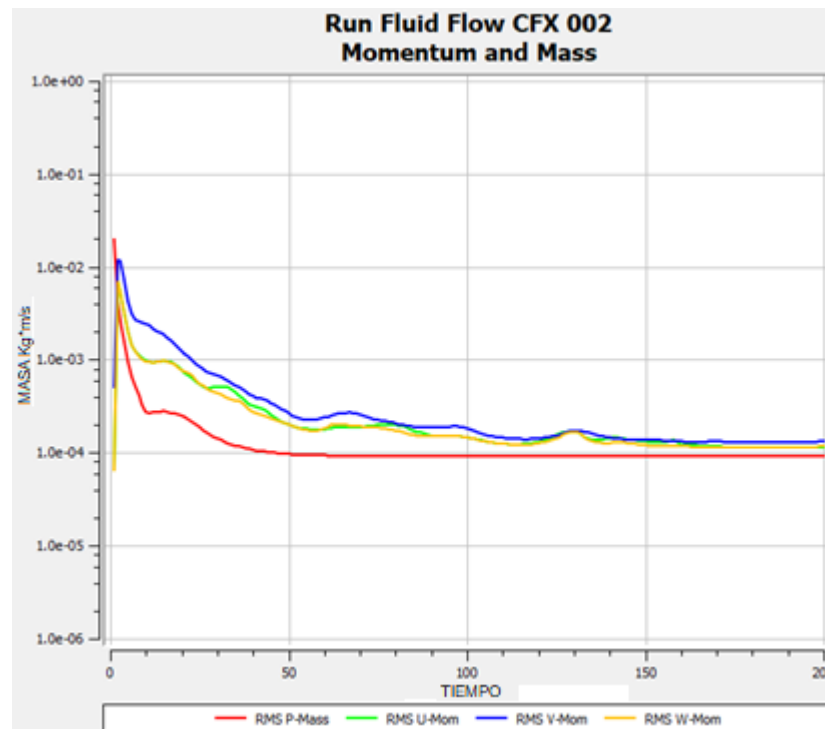


Fuente: Autores realizada en software CFX

La cuarta parte del proceso se llama Solution, en donde el sistema autónomamente genera una solución al sistema planteado Anexo 1, es decir interpreta el comportamiento del agua con la turbina; lo cual permite analizar con mayor eficiencia el sistema. El software genera un archivo de texto (.txt) en donde se puede observar todo el proceso que llevó a cabo el software para poder realizar las gráficas que describen el comportamiento del agua y la turbina.

En la ilustración 9, se puede observar el comportamiento que tiene la turbina en cuanto a su movimiento en relación con la masa, lo cual es más conocido como momento, respectivamente en color verde se logra observar el comportamiento en el eje x, en azul el comportamiento en el eje y, en amarillo el comportamiento en el eje z y finalmente en rojo se evidencia el comportamiento general de la turbina en donde se puede observar que al momento de ingresar agua tiene cambio de velocidad el cual se ve reflejado en el pico de la gráfica, para luego de unos segundos estabilizarse.

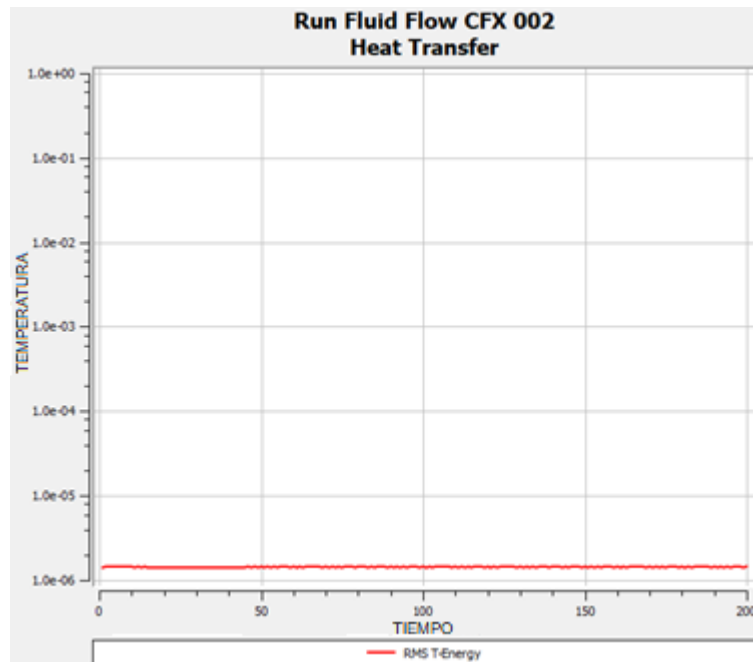
Ilustración 9 Momento y masa Kg * m/s VS Tiempo



Fuente: Autores realizada en software CFX

En la ilustración 10, se puede evidenciar la transferencia de calor por parte de la turbina hacia el flujo de agua que se genera dentro del cilindro de agua.

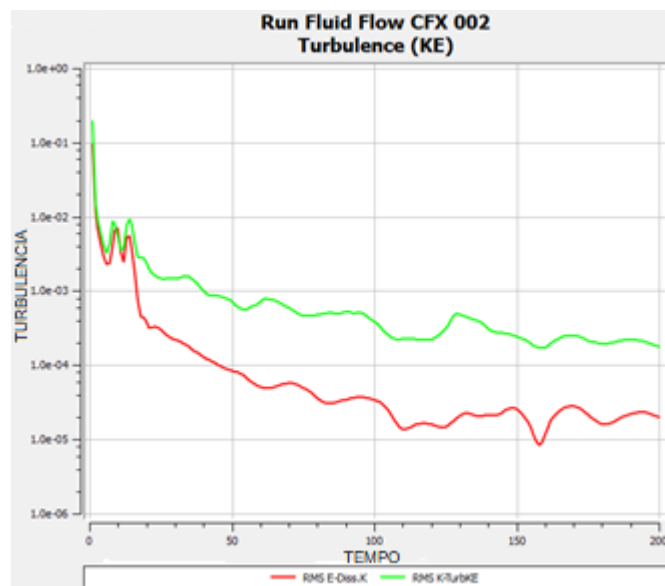
Ilustración 10 Transferencia de calor Temperatura VS Velocidad



Fuente: Autores realizada en software CFX

La turbulencia puede ser observada en la ilustración 11, en donde se puede evidenciar el comportamiento de los cálculos relacionados con la turbulencia, en verde se puede observar la respuesta de energía cinética de turbulencia, mientras que en color rojo se puede visualizar la disipación de energía cinética turbulenta por parte de la turbina.

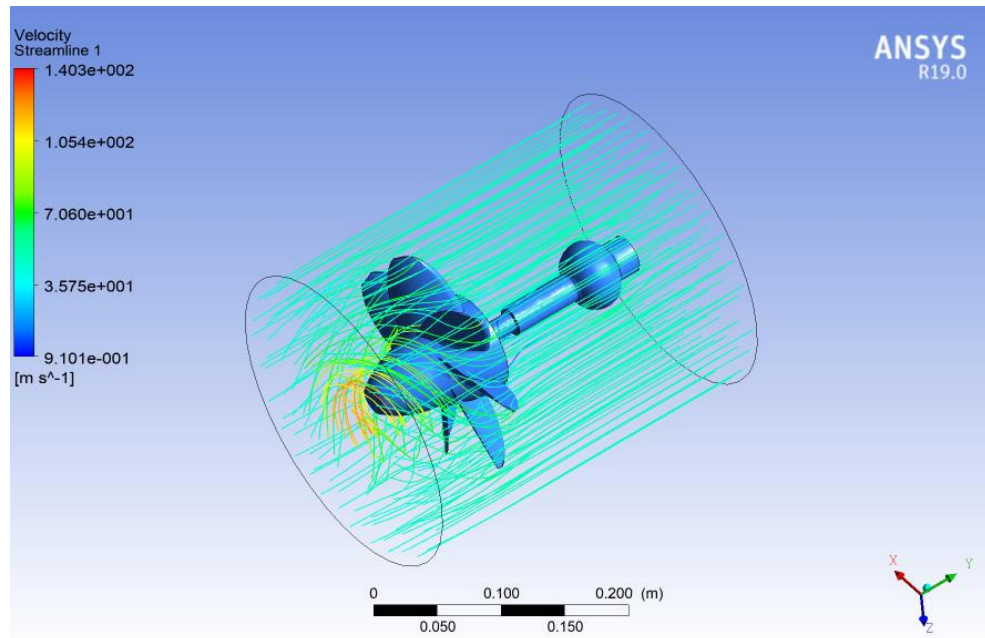
Ilustración 11 Turbulencia VS Tiempo



Fuente: Autores realizada en software CFX

En la última etapa del proceso se presentan los resultados obtenidos en cuanto al comportamiento del agua dentro del cilindro. En la ilustración 12, se puede observar como es el movimiento del agua respecto al movimiento que genera la turbina en funcionamiento.

Ilustración 12 Comportamiento del agua respecto a la turbina



Fuente: Autores realizada en software CFX

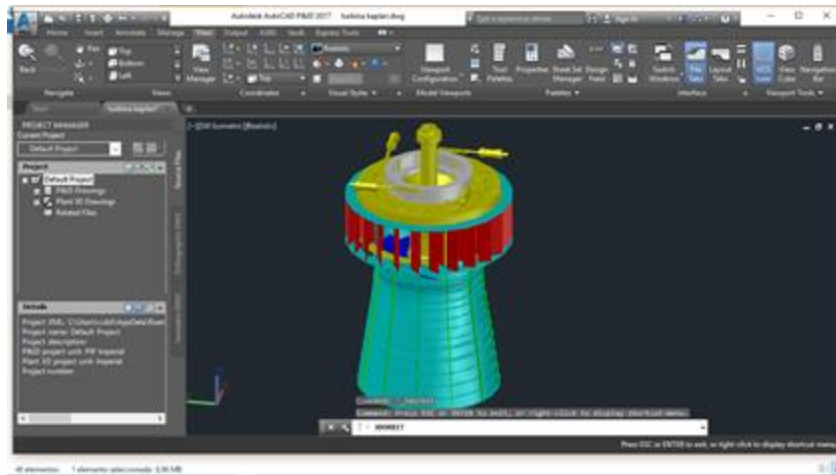
De igual manera, en este último paso permite crear una animación del funcionamiento del sistema Anexo 2.

7.1.3 DISEÑO AUTOCAD

Luego de seleccionar la turbina, se prosiguió a realizar una búsqueda de un modelo existente en algún software de diseño CAD, finalmente en la página www.grabcad.com se encontró una turbina la cual estaba diseñada por Mauricio Karsten sobre el software AutoCAD (este software se escogió debido a que la Universidad Santo Tomás cuenta con la licencia para su uso), posteriormente se descargó el diseño y se unieron todas las partes en AutoCAD [36].

Dimensiones de la turbina: Diámetro 16.3 cm y alto 22 cm.

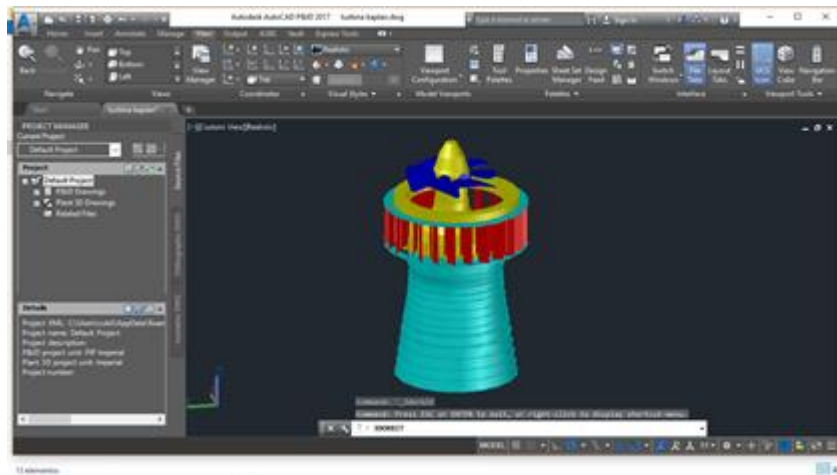
Ilustración 13 Diseño de turbina Kaplan realizado por Mauricio Karsten



Fuente: Mauricio Karsten

Ya ensamblado el diseño se prosiguió a realizar las modificaciones pertinentes, retirando las piezas de control de los álabes guías, invirtiendo el eje central de la turbina y escalando el tamaño de esta.

Ilustración 14 Diseño de turbina Kaplan modificado



Fuente: Autores realizada en AutoCAD

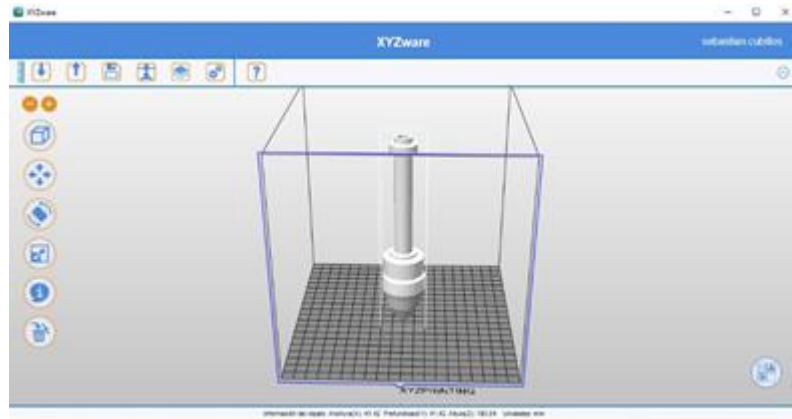
7.1.4 IMPRESIÓN 3D

Para la fabricación del prototipo de la turbina se decidió utilizar una impresora 3D, la cual utiliza ABS que es un tipo de plástico, en este caso se hizo uso de la impresora Da Vinci 1.0.

En el proceso de fabricación inicialmente se realizó la calibración de la impresora para así obtener el mejor resultado posible al inicio de cada impresión, posteriormente se utilizó laca para el cabello sobre la plataforma de impresión

para lograr tener una adherencia adecuada de la primera capa para que de esta manera se tuviera una base de impresión adecuada para las diferentes piezas. Luego de finalizar las preparaciones físicas para la impresión, se prosigue a preparar la parte a imprimir en el software proporcionado por el fabricante de la impresora (XYZware).

Ilustración 15 Interfaz software XYZware



Fuente: Autores realizada en software XYZware

Inicialmente se debe abrir el archivo con formato .STL, seguido de realizar su ubicación y localización dentro de la plataforma, para la impresión de la turbina se utilizó una escala del 700% y una ubicación centrada dentro de la base, una vez ubicada y configurada la parte se prosigue a imprimir, para ello el programa despliega una serie de configuración entre las cuales se escogió un grosor de impresión de 0.1mm, relleno del 30%, base normal y velocidad normal. Seguido a esto la impresora inicia el proceso de impresión, por lo cual se debe esperar de 10 minutos a 12 horas que puede tardar en finalizar la pieza escogida, finalmente se retira la parte de la impresora.

Ilustración 16 Piezas impresas en ABS



Fuente: Autores

Una vez finalizada la impresión de todas las piezas se prosigue a unir las a través de pegamento y resina epoxica y con la finalidad de endurecer la turbina se utilizó fibra de vidrio.

Dichos materiales se utilizaron debido a que la mezcla entre ellos genera un material que se acopla a diferentes formas antes de secarse (en este caso se moldeó sobre la turbina), luego de que la mezcla finalice su proceso de secado, el resultado es un material rígido y fuerte. Por otra parte, se escogieron debido a que estos materiales se habían utilizado previamente y se conocía su uso y su resultado.

Dimensiones de la turbina física: Diámetro 16.3 cm y alto 22 cm.

Ilustración 17 Turbina Kaplan ensamblada



Fuente: Autores

7.2 EMULACIÓN DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

7.2.1 GENERADOR ASÍNCRONO UTILIZADO

Para este proyecto se utilizó el motor de jaula de ardilla que se encontraba en la universidad, este motor es de marca Lab-Volt y cuenta con una potencia de 175W, una velocidad nominal de 1670 rpm, una alimentación trifásica de 208v, una corriente de 1,2A a pleno funcionamiento y una frecuencia de trabajo de 60 Hz.

Inicialmente, se pensó en utilizar un motor asíncrono marca Siemens trifásico de 0,4 caballos de fuerza, pero al realizar pruebas con los condensadores y observar que este no realizaba ningún tipo de generación, se decidió utilizar en motor asíncrono de Lab-Volt.

Ilustración 18 Motor de inducción Jaula de Ardilla

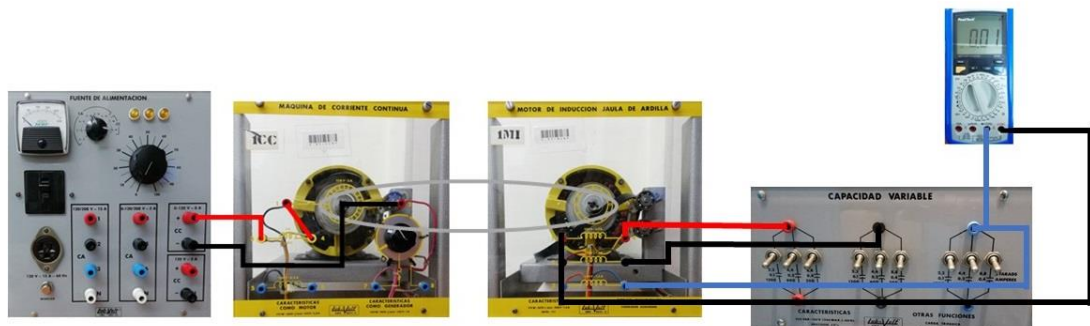


Fuente: Autores

7.2.2 SELECCIÓN DE LAS CAPACITANCIAS UTILIZADAS

Para la selección de las capacitancias, inicialmente se realizó una prueba con las capacitancias que se encuentran en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás.

Ilustración 19 Conexiones para la prueba de selección de capacitancias



Fuente: Autores

En esta prueba se utilizó la fuente variable, un motor DC, la maquina asíncrona, banco de capacitancias y un multímetro, esta se realizó con la finalidad de verificar si el banco de condensadores con el que cuenta la universidad Santo Tomas, era suficiente para lograr generar energía, para esto, se realizaron las respectivas pruebas con las tres capacitancias que cuenta el banco de condensadores, estas son respectivamente 2,2uF, 4,4uF, 8,8uF, todas las pruebas se realizaron a la velocidad máxima de la maquina DC, la cual es de 1800 rpm, a esta velocidad se lograron obtener los resultados de la tabla x

Tabla 2 Datos de generación con el banco de capacitancias de la Universidad Santo Tomás

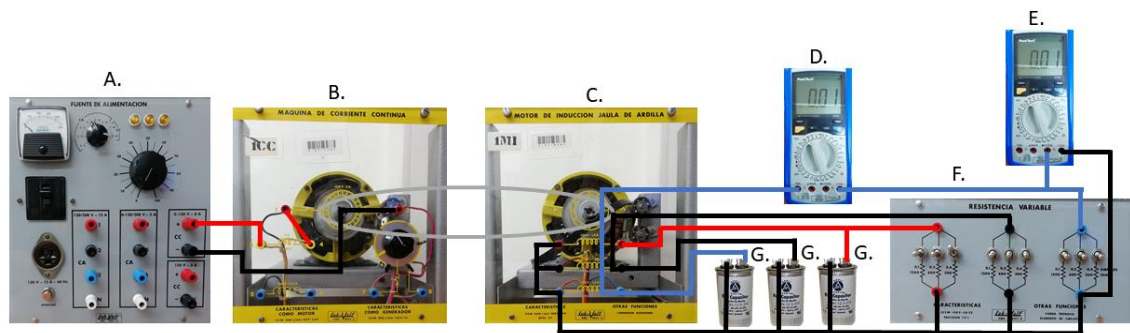
CAPACITANCIA	RPM	TENSION
2,2 uF	1800	0,5
4,4 Uf	1800	1
8,8 uF	1800	5,7

Fuente: Autores

Al no lograr realizar una generación de más de 10v utilizando las capacitancias de 2.2uF a 8,8uF, por lo que se adquirieron 6 capacitancias de este valor para obtener una capacitancia variable de 5 uF a 20 uF por fase, luego de realizar pruebas y notar que ya se lograba generar con estas capacitancias se decidió aumentar la misma adquiriendo 3 condensadores de 24 uF, para así obtener una capacitancia total de 44 uF con la cual realizamos las pruebas finales.

7.2.3 DIAGRAMAS DE CONEXIÓN

Ilustración 20 Conexión general del sistema



Fuente: Autores

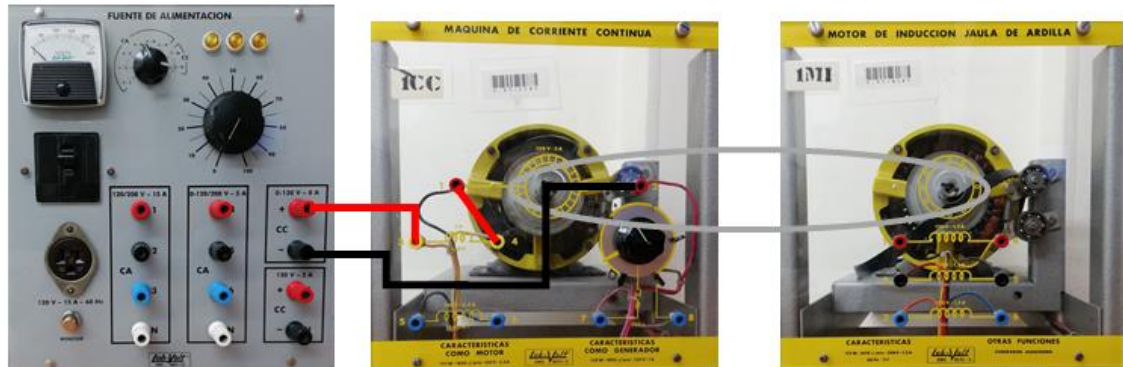
- A. Fuente de alimentación variable.
- B. Máquina de corriente continua.
- C. Motor de inducción jaula de ardilla.
- D. Multímetro configurado para medir corriente.
- E. Multímetro configurado para medir tensión.
- F. Resistencia variable.
- G. Capacitancia variable.

En las pruebas realizadas dentro de la emulación se utilizaron varios equipos de Lab-Volt los cuales fueron: una fuente de alimentación variable, una máquina de corriente continua, un motor de inducción de jaula de ardilla y un banco de resistencias variables; además se utilizaron condensadores de arranque, multímetros y cables de conexión.

La fuente de alimentación variable se utilizó para variar la tensión de entrada de la máquina de corriente continua entre 0 y 120 voltios Ac, esta variación se realizaba con el fin de emular las diferentes revoluciones que se obtuvieron con la turbina, la conexión entre la máquina de corriente continua y el motor de

inducción jaula de ardilla se realizó mediante una correa dentada con la cual se realizó la transferencia de energía cinética de una máquina a otra.

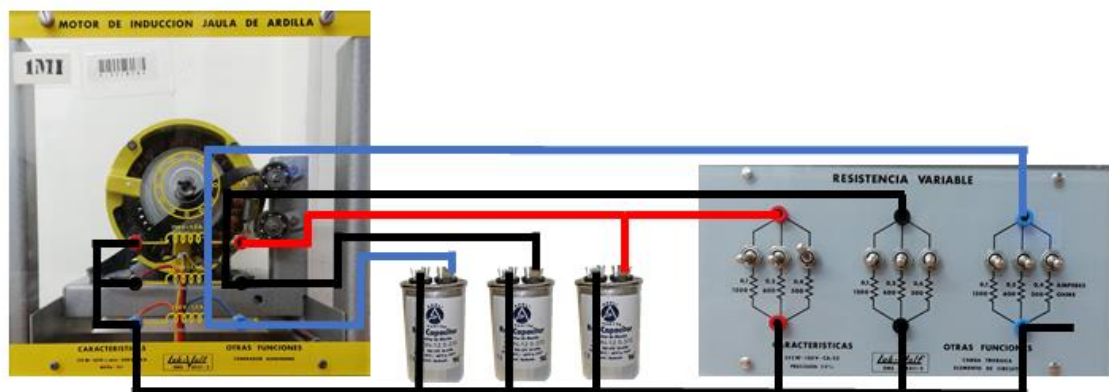
Ilustración 21 Conexión de máquina de corriente continua para la emulación



Fuente: Autores

A partir del motor de inducción jaula de ardilla el cual se utilizó como generador en esta emulación, se realizaron las conexiones de cada una de las fases del motor con un conjunto de condensadores variables. además, de este mismo punto de conexión se conectó el banco de resistencias para simular una carga, por otra parte se cortocircuitan los terminales de entrada de las tres bobinas de la máquina para así crear un neutro, al cual se conectó el mismo de las capacitancias y el banco de resistencias.

Ilustración 22 Conexión motor asíncrono como generador



Fuente: Autores

Finalmente se conectaron los dos multímetros con la finalidad de medir la tensión y la corriente que se generaba en una fase, para esto se conectó en paralelo un multímetro configurado para medir tensiones AC a una de las fases, así mismo se realizó la conexión en serie de un multímetro configurado para realizar mediciones de corriente de hasta 10A en AC en la misma fase para así luego poder calcular la potencia generada.

Ilustración 23 Conexión voltímetro y amperímetro



Fuente: Autores

7.2.4 PRUEBAS REALIZADAS A LA MÁQUINA ASÍNCRONA

Inicialmente se realizaron pruebas con una capacitancia de 24 μF donde, se midieron las revoluciones por minuto del motor asíncrono y la tensión de las fases de este. A través de estas medidas, se obtuvieron 10 variaciones en las cuales se relaciona la tensión y la velocidad.

Posteriormente, se prosiguió a realizar las mismas 10 mediciones, pero en este caso también variando la capacitancia de excitación del motor asíncrono, respectivamente se utilizaron condensadores de 24 μF , 29 μF , 34 μF y 44 μF .

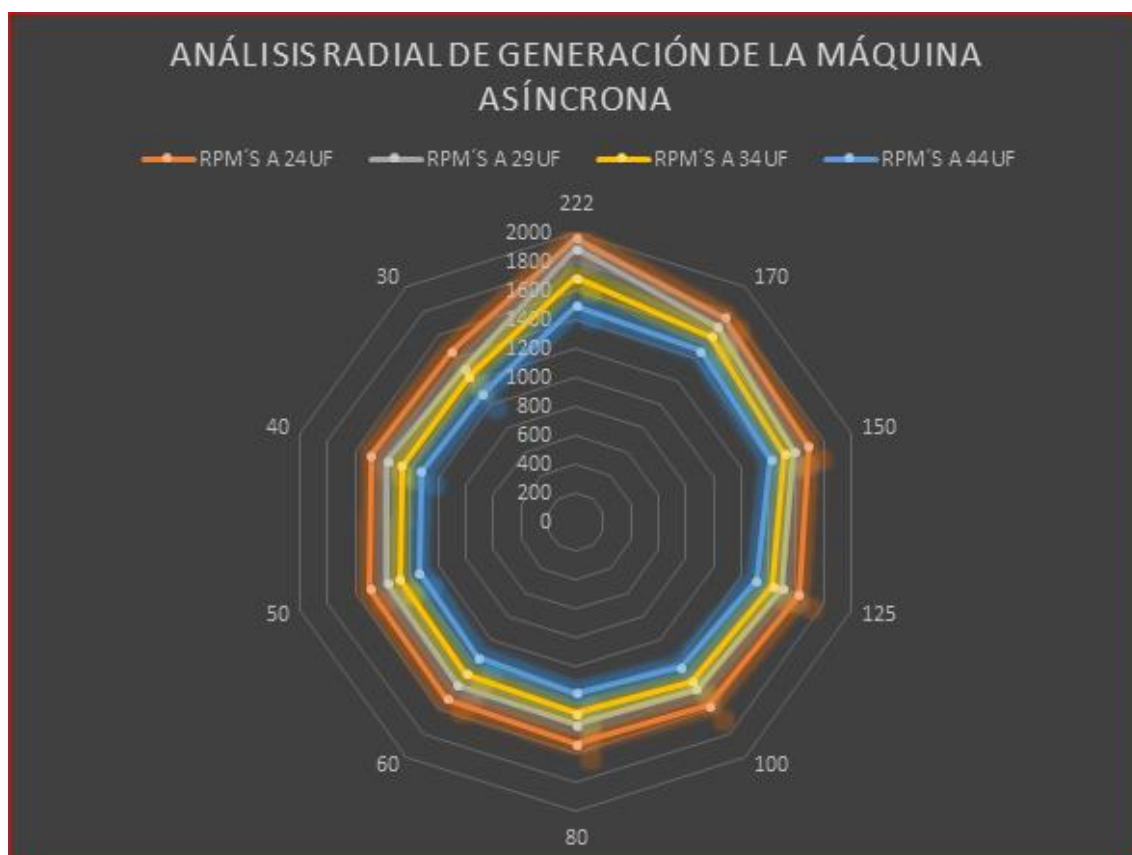
Tabla 3 Datos adquiridos del sistema variando las capacitancias

CAPACITANCIA 24 μF		CAPACITANCIA 29 μF		CAPACITANCIA 34 μF		CAPACITANCIA 44 μF	
RPM	TENSIÓN	RPM	TENSIÓN	RPM	TENSIÓN	RPM	TENSIÓN
1959	222	1889	223	1686	199	1497	170
1750	196	1665	171	1584	173	1458	161
1691	151	1538	150	1510	151	1414	150
1620	125	1500	125	1429	126	1311	125
1564	100	1422	101	1359	103	1238	102
1534	81	1400	76	1321	82	1182	81
1510	62	1387	62	1291	63	1151	63
1495	50	1370	51	1276	51	1138	50
1490	43	1368	39	1265	42	1123	42
1460	30	1310	31	1249	31	1099	30

Fuente: Autores

Una vez finalizada la toma de datos se prosiguió a realizar la graficación de los mismos, en donde se realizó la ilustración 23, una en la cual se graficaron rpm vs tensión y en la otra tensión vs rpm.

Ilustración 24 Variación de rpm para una misma tensión con diferentes capacitancias



Fuente: Autores

Como se puede observar en la ilustración 24 al aumentar la capacitancia de excitación del motor asíncrono se lograban disminuir los rpm necesarios para generar una misma tensión, es por esto por lo que entre más capacitancia se le indujera al sistema este mantendría la tensión en el momento en el que la energía cinética que se le suministraba al motor disminuyera. Sin embargo, si esta capacitancia de excitación se aumentaba demasiado, el sistema ya no la vería como una batería de excitación sino como una carga, causando que el motor asíncrono se frenará.

Seguido a esto se prosiguió a realizar una prueba conectando cargas para así observar el comportamiento de la tensión y corriente del sistema, de esta manera se realizaron 4 pruebas variando la capacitancia de excitación, todas las pruebas se realizaron a la velocidad síncrona del motor utilizado para emular la energía cinética, una vez medido los datos de tensión y corriente para cada una de las pruebas se calcularon las potencias generadas por cada una de las variaciones de los capacitores. En el caso específico de la prueba realizada con la capacitancia de 44 uF se decidió no implementar una carga resistiva debido a que la corriente sin carga ya se encontraba muy cerca del límite de la corriente máxima del motor asíncrono.

Tabla 4 Datos adquiridos del sistema utilizando una carga resistiva

CAPACITANCIA	RESISTENCIA	TENSIÓN	CORRIENTE	POTENCIA
24	600	156	0,25	39
29	600	165	0,41	67,65
34	600	174	0,67	116,58
44	0	167	1,1	183,7

Fuente: Autores

Gracias a la comparación de los datos de la tabla 3 y de la tabla 4 se pudo observar que al introducir carga al sistema este genera una resistencia cinética, motivo por el cual es necesario implementar más torque para que este siga en movimiento, motivo por el cual las revoluciones del motor que emulaba el caudal disminuyeron, sin embargo a pesar de que se vio afectado el voltaje por una disminución en la velocidad de cerca del 6,11% sin embargo se logró observar un incremento notable en la corriente, de manera que se aumentó el potencial generado por el sistema.

A continuación, se presenta la ecuación utilizada para el cálculo de disminución porcentual de velocidad.

Ecuación 2 Regla de tres utilizada para cálculo porcentual

$$\frac{110 \times 100}{1800} = 6,11$$

Fuente: Autores

Como se puede observar en la ecuación 2 se utilizaron como datos para la solución de la misma, la diferencia de rpm en la tabla 3 teniendo en cuenta el voltaje obtenido en la tabla 4, en promedio, las 3 mediciones tuvieron una diferencia de 110 rpm, así mismo se utilizó la velocidad síncrona del motor implementado como emulador de caudal la cual es 1800 rpm y como último valor se utilizó 100, lo cual es el porcentaje equivalente en la comparación a 1800 rpm. En el caso de las mediciones realizadas con la capacitancia de 44 uF se lograron observar los mismos resultados en la tabla 3 y la tabla 4.

7.3 LABORATORIO DE HIDRAÚLICA

7.3.1 PRUEBAS A LA TURBINA

Inicialmente, se realizó un reconocimiento pertinente al laboratorio de hidráulica de nuestra universidad, para poder identificar los instrumentos que podrían ser útiles en el momento de realizar pruebas a nuestro prototipo.

- Banco hidráulico volumétrico:

El banco hidráulico volumétrico TecEquipment suministra un flujo controlado de agua a una amplia variedad de experimentos de laboratorio (disponibles por

separado). El banco consiste en un tanque de sumidero con una bomba sumergible, sistema de pesaje volumétrico y superficie de trabajo.

Proporciona un suministro controlado de agua de recirculación y un sistema preciso de medición volumétrica para experimentos de mecánica hidráulica y de fluidos.

Ilustración 25 Banco Hidráulico volumétrico



Fuente: https://www.aidex.com/wp-content/uploads/2017/07/H1D_1015.pdf

- Fototacómetro de láser/contacto combinados:

El tacómetro digital es un medidor para determinar las revoluciones, la velocidad y la distancia. El tacómetro de mano puede medir de dos maneras: o bien de forma óptica y por tanto sin contacto, o de forma mecánica mediante diferentes adaptadores [37]. Utiliza un láser para mediciones sin contacto de mayor distancia de hasta 6.5 ft (2 m).

Ilustración 26 Fototacómetro



Fuente: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-revolucion/tacometro-pce-dt100.htm>.

En el laboratorio de hidráulica se realizaron pruebas (Ver el video en el Anexo 3) para así lograr caracterizar la turbina Kaplan que se construyó, para realizar esta caracterización se utilizó un banco hidráulico volumétrico, un tacómetro y un cronómetro, a través de estos implementos se tomaron datos de tiempo, velocidad y volumen.

A partir de la relación del volumen medido en el banco hidráulico volumétrico y el tiempo transcurrido, se buscó realizar la conversión de volumen a caudal, de esta manera a través de la ecuación 3, la cual nos permite realizar la conversión de volumen (V) a litros por minuto (Q) basándonos en el tiempo de llenado (T), se construyó la ilustración 27.

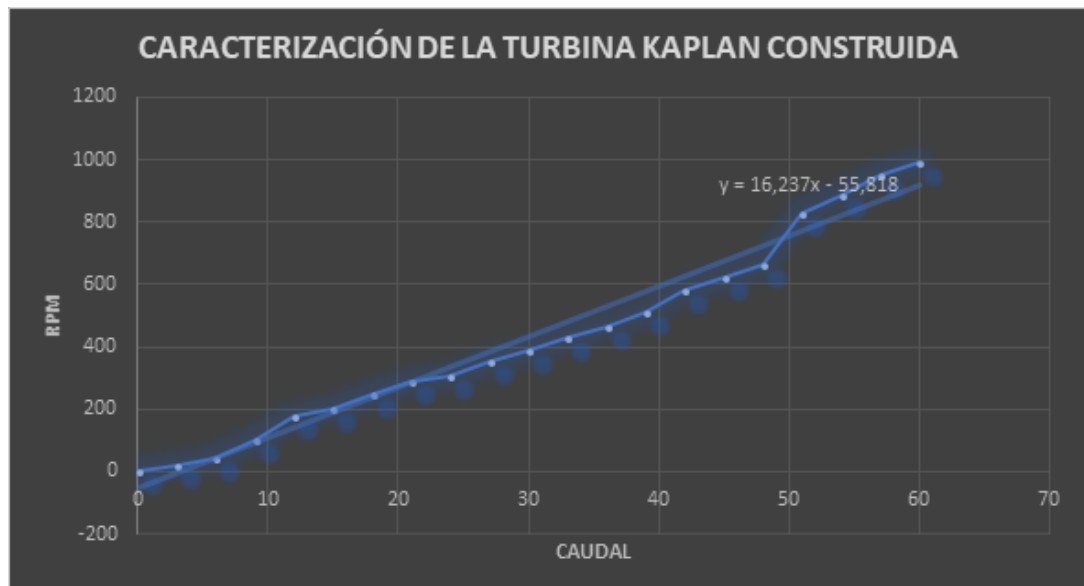
Ecuación 3 Ecuación para cálculo de caudal a partir de volumen y tiempo

$$Q = 60 \frac{V}{T}$$

Fuente: Libro mecánica de los fluidos e hidráulica

Una vez se calcularon los caudales, se prosiguió a realizar la respectiva graficación de los datos, como se puede observar en la ilustración 27, la turbina se comporta de una manera lineal respecto a las variaciones de caudal que le son introducidas. Por otra parte, se incluye en dicha gráfica la línea de tendencia, para así encontrar la ecuación respectiva de la curva característica de la turbina Kaplan. La ecuación resultante es $y = 16.237x - 55.818$ de los datos medidos, la cual también se puede observar en el contenido de la misma gráfica.

Ilustración 27 Curva característica turbina Kaplan construida



Fuente: Autores

Luego de realizar la emulación, se logró determinar que el motor asíncrono necesita obtener mínimo 1000 rpm para lograr generar, es por esto que se vio necesario calcular a partir de la ecuación obtenida en la ilustración 27, los valores necesarios para que el sistema funcione correctamente.

Tabla 5 Datos calculados para el funcionamiento del sistema

CAUDAL	RPM
63	967,113
66	1015,824
69	1064,535
72	1113,246
75	1161,957
78	1210,668
81	1259,379
84	1308,09
87	1356,801
90	1405,512
93	1454,223
96	1502,934
99	1551,645
102	1600,356
105	1649,067
108	1697,778
111	1746,489
114	1795,2
117	1843,911
120	1892,622

Fuente: Autores

Una vez calculados todos los datos hasta llegar a un valor de 1800 rpm (este valor es fijado debido a que la maquina asíncrona tiene su velocidad de sincronismo en estas rpm y al fijar este parámetro en ese valor, se garantiza que el sistema trabajara por debajo de la velocidad de sincronismo). Se pudo observar que es necesario un caudal de alrededor de 120 litros por minuto para que el sistema se comporte de la misma manera de la que se comportó en la emulación. Posteriormente se realizó la graficación de los datos obtenidos en la tabla 5 en la ilustración 28.

Ilustración 28 Análisis radial de velocidad de la turbina kaplan construida



Fuente: Autores

En la ilustración 28, se puede observar el comportamiento esperado de la turbina kaplan para caudales mayores de los posibles simulables en el laboratorio de hidráulica (0 a 60 litros por minuto).

7.4 PROYECCIÓN DEL PROYECTO PARA EL MUNICIPIO DE GUADUAS, CUND.

7.4.1 IDENTIFICACIÓN DE RÍOS Y CAUDALES EN EL TERRITORIO MUNICIPAL

El departamento de Cundinamarca cuenta con abundantes recursos hídricos. Es decir, cuenta con diversas cuencas hídricas (ríos), tales como: Bogotá, Guavio, Humea, Magdalena, Negro, Seco y Sumapaz. Además, posee lagunas y represas: Guatavita, Chingaza, Fúquene, Neusa, Sisga, Chisacá, La Regadera y el Hato.

La riqueza hídrica del departamento se puede observar en el Anexo 4.

Guaduas es un municipio que pertenece al departamento de Cundinamarca, por ende cuenta con gran cantidad de afluentes hídricos, los cuales podrían llegar a ser una fuente viable para el suministro eléctrico de las familias guaduences. En el municipio de Guaduas existen zonas de importancia ambiental representadas en sus recursos hídricos (ríos y lagunas), e innumerables microcuencas hidrográficas entre las que se destaca el río San Francisco [38].

En los Anexo 5 y Anexo 6, se puede observar toda la riqueza hídrica perteneciente al municipio de Guaduas, Cundinamarca. En el primer mapa se puede observar el mapa de las cuencas hidrográficas del Río Magdalena y en siguiente anexo se ve el mapa de las subcuencas hidrográficas.

7.4.2 RECONOCIMIENTO DE LOS CAUDALES

El territorio municipal cuenta con un gran número de afluentes hídricos y riachuelos. En la tabla 6, se pueden observar las tres cuencas más importantes en el municipio, las cuales suplen a riachuelos, afluentes en el territorio.

Tabla 6 Principales afluentes de Guaduas, Cund.

CODIGO EST	NOMBRE EST	TIPO	CATEGORIA	EST	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	CUENCA	CORRIENTE	MPIO	DEPTO
2306716	PUENTE GRANADA	CONV	LM	ACT	5,071361	-74,559722	1530	R. GUADUERO	R. San Francisco	Guaduas	Cundinamarca
2306737	PUENTE GUADUERO	CONV	LM	ACT	5,080972	-74,609389	992	R. NEGRO	R. Guaduoero	Guaduas	Cundinamarca
2306517	GUADUAS	CONV	CP	ACT	5,0565	-74,597972	1052	R. NEGRO	R. Guaduoero	Guaduas	Cundinamarca

Fuente: Oficina de la CAR

El río San Francisco es un afluente de vital importancia debido a que hace parte esencial de los recursos hídricos del municipio. En la ilustración 29, se puede observar la piscina municipal.

Ilustración 29 Río San Francisco



Fuente: Página oficial de la Alcaldía de Guaduas en Facebook

El Salto de Versalles es un lugar popular en el municipio, debido a que cuenta con una cascada de 40 m aprox. de altura. El río Guaduoero suple a esta cascada con afluente hídrico constante, como se puede observar en la ilustración 30.

Ilustración 30 Salto de Versalles



Fuente: Guaduassitiosturisticos.blogspot.com

El territorio de Guaduas cuenta con tres inspecciones municipales, las cuales son: Inspección de La Paz, Inspección de Guaduro e Inspección de Puerto Bogotá. La inspección de Guaduro (ilustración 31) está a 20 min aprox. de la cabeza municipal de Guaduas, por dicha parte del territorio pasa el río Guaduro.

Ilustración 31 Río Guaduro en la Inspección de Guaduro



Fuente: guaduasfm.com

7.4.3 PRUEBAS EXPERIMENTALES AL PROTOTIPO EN EL MUNICIPIO

Inicialmente, se realizó el desplazamiento hacia el Salto de Versailles, el cual es un lugar muy turístico y conocido en el municipio por su maravilloso paisaje con un ambiente rodeado de naturaleza y tranquilidad.

Ilustración 32 Lugar turístico Salto de Versailles



Fuente: Autores

Como se logra observar en la ilustración 32, dicha cascada cuenta con un afluente muy grande y constante. Por ende, se consideró pertinente no realizar las pruebas directamente en dicho caudal ya que podría haber dañado la turbina diseñada, debido a que está elaborado en plástico y fue construida bajo el ideal de ser un prototipo a baja escala que permitiera desarrollar nuestro proyecto.

El riachuelo que se seleccionó hace parte del afluente principal del Salto de Versailles Ilustración 33, se puede ver que es un afluente de menor caudal, pero es constante, lo cual es ideal para lograr que la turbina gire y por ende se podrá considerar como una fuente viable de energía eléctrica alternativa al suministro convencional.

Ilustración 33 Afluente del río seleccionado



Fuente: Autores

Una vez realizadas las pruebas experimentales al prototipo, se logró observar que la turbina giro con gran facilidad y con poco afluente. Es decir, la eficiencia del prototipo se consideró adecuado para los resultados que se esperaban, debido a que desde poco caudal la turbina genera movimiento y con mayor caudal la turbina gira con mayor intensidad y rapidez.

Para lograr verificar el funcionamiento de la turbina, se realizaron 7 pruebas en donde, se varió el caudal para observar el movimiento que se generaba en el eje por el golpe que daba el agua en las hélices. Para ver el funcionamiento del prototipo en el río, se puede observar en el video del Anexo 7, en donde se hace la recopilación de cómo se comportó la turbina con el paso del agua del afluente dentro de ella.

ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

1. Consumo energético del municipio

Para observar el consumo promedio mensual del municipio de Guaduas, se realizó la tabla 7 basándose en datos consultados en la UPME, en la cual se registraron los consumos de los últimos 14 meses y posteriormente se promediaron dichas mediciones para así obtener que en el municipio de Guaduas Cundinamarca mensualmente se tiene un promedio de demanda comercial de 159,16MWh, un promedio de demanda real de 156,80MWh y un promedio de pérdidas de energía 2,35MWh.

Tabla 7 Consumo por meses del Municipio de Guaduas (Últimos 14 meses)

FECHA	DEMANDA COMERCIAL	DEMANDA REAL	PERDIDAS DE ENERGÍA
2017-01	159,04	156,74	2,3
2017-02	153,6	151,38	2,22
2017-03	162,18	159,89	2,29
2017-04	152,99	150,57	2,43
2017-05	159,31	157,18	2,13
2017-06	155,26	152,87	2,39
2017-07	158,18	155,76	2,42
2017-08	170,41	167,9	2,51
2017-09	160,03	157,71	2,32
2017-10	160,11	157,63	2,48
2017-11	155,73	153,61	2,12
2017-12	162,94	160,55	2,39
2018-01	160,56	158,14	2,42
2018-02	157,96	155,4	2,56
PROMEDIO DEMANDA COMERCIAL			159,1642857
PROMEDIO DEMANDA REAL			156,8092857
PROMEDIO PERDIDAS DE ENERGÍA			2,355714286

Fuente: Autores.

Información tomada de:

[http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fDemanda%2fDemanda+Hist%u00f3rica+\(SIN\)](http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%2fSIEL+UPME%2fDemanda%2fDemanda+Hist%u00f3rica+(SIN))

Así mismo, se decidió consultar los consumos anuales de los últimos 6 años (tabla 8), para así lograr observar con mayor claridad el consumo energético que tiene el municipio de Guaduas.

Tabla 8 Consumo energético anual del Municipio de Guaduas

Año	Demanda Comercial (GWh)	Demanda Real (GWh)	Perdidas De Energia (GWh)	Demanda Máxima de Potencia (MW)
2013	2.419,34	2.384,12	35,22	9.383,00
2014	2.686,09	2.646,06	40,04	9.551,00
2015	2.351,12	2.317,29	33,84	10.095,00
2016	1.934,92	1.909,13	25,79	9.904,00
2017	1.909,78	1.881,78	28,00	9.996,00
2018	766,31	755,29	11,02	9.822,00

Fuente: Autores.

2. Escalación del proyecto

A partir de los datos obtenidos en la emulación, se pudo observar que con un caudal de $0,120 \text{ m}^3$ por minuto (120 litros por minuto) se logran obtener las revoluciones necesarias para el correcto funcionamiento de nuestra turbina, en ese caso, con estas revoluciones y con la capacitancia máxima, se logra alcanzar una generación de 183,7 watts hora, de esta manera si se tuvieran 50 postes de alumbrado público en el municipio de Guaduas los cuales individualmente consumieran 200 watts hora, se tendría que suplir una potencia de 10 Kw, de la misma manera, si se tienen 3 hogares promedio en el municipio en donde cada uno consume un promedio de 3,33 Kw/hora, se tendría que alcanzar la misma generación que si quisiéramos iluminar los 50 postes de alumbrado público.

De esta manera, sabiendo que por turbina se tiene una generación de 183,7W, y se quiere alcanzar una generación de 10Kw, se podrían implementar 55 micro generadores a lo largo del río para así lograr suplir la generación requerida. Por otra parte, se debe considerar que el material en el cual está implementada la turbina no es el adecuado para este tipo de construcciones, debido a que está construida en plástico y normalmente este tipo de turbinas son implementadas en aluminio por su robustez y su ligero peso en las hélices. Así mismo, se debe considerar que en el momento de unir todas las piezas de la turbina, estas no quedaron perfectamente alineadas por ende puede afectar el funcionamiento de la turbina.

3. Comparación viabilidad del proyecto

Para determinar la viabilidad de nuestro sistema, se procedió a revisar algunos artículos de investigación en donde realizaban estudios de investigación o implementaciones de pch's en el territorio nacional. A continuación, se pueden observar los datos que se extrajeron de los documentos.

Tabla 9 Información de algunos proyectos a nivel nacional

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	GENERACIÓN	AFLUENTE	CAUDAL
Cundinamarca	Yacopi y Nimaima	5MW	Río Negro	102,24m ³ /s
Antioquia	Pipinta	35KW	Quebrada La Palmichala	0,1 m ³ /s
Nariño	Ricaurte	2000KW	Río Imbí	3 m ³ /s

Fuente: Autores. Información tomada de los proyectos que están respectivamente referenciados [25], [26] y [39].

En el sistema diseñado, se realiza una estimación en la cual se lograría producir una generación de 10Kw con un caudal de $0,002m^3/s$, de esta manera se podría decir que es una opción viable debido a que se logró disminuir el caudal de entrada de la turbina.

Así mismo, si se realizara una comparación con los datos obtenidos en Antioquia tendríamos que, con un caudal de $0,008m^3/s$ y un total de 220 mini turbinas a lo largo del afluente hídrico, se podría suplir la misma potencia que ellos generan con $0,1m^3/s$.

IMPACTO SOCIAL

Este proyecto es una alternativa viable para poder brindar energía a las zonas no interconectadas (ZNI) del país, debido a que se aprovecharán todos los recursos hídricos con los que cuenta nuestro país, como: ríos, riachuelos, entre otros. Además, es importante resaltar que en el territorio colombiano se cuenta con la presencia del mar Caribe y el océano Pacífico, los cuales complementan de manera significativa todo el sistema hídrico de Colombia.

Es una propuesta innovadora y con gran compromiso social, debido a que se lograría mejorar sustancialmente la calidad de vida de los colombianos que aún no cuentan con un servicio de energía o se convertiría en un punto central y eficaz en cuanto a mejorar y/o complementar el sistema actual de energía eléctrica. Desde este punto de vista, se brindaría un servicio básico con eficiencia, en donde, se mejoraría la calidad de vida de las personas con integridad y generando bienestar.

Además, podría llegar a convertirse en una pieza clave y fundamental en la prevención del calentamiento global, debido a que no genera un impacto ambiental significativo como lo puede generar una central hidroeléctrica.

Con la investigación desarrollada se puede evidenciar una forma adecuada de beneficiar al municipio de Guaduas en cuanto a un sistema alternativo de energía para suplir la demanda eléctrica, debido a que, si se llega a realizar una implementación de turbinas Kaplan, se podría garantizar un servicio de energía constante a todo el municipio. De esta manera, se podría generar un suministro eléctrico constante para los habitantes de dicho municipio. Por otra parte, se beneficiaría a todas las microempresas, tiendas comerciales y turismo, ya que podría desempeñar sus actividades con total normalidad y frecuencia. Este proyecto, brinda una posibilidad viable a la gran demanda eléctrica que actualmente se vive en el país y el mundo.

CONCLUSIONES

- Se logró identificar los principales ríos del municipio de Guaduas, Cund, en donde se pudo evidenciar que dicho territorio municipal cuenta con una gran cantidad de recursos hídricos. Además, con la información recolectada se logró determinar las variables que intervienen en el sistema y definir los parámetros necesarios para el diseño del sistema de generación y del prototipo de la turbina kaplan.
- Con una identificación adecuada y pertinente de los parámetros, se pudo diseñar un sistema de generación eléctrica adecuado. Así mismo, se logró dar integración a los diversos factores que intervienen e inciden en el sistema como: el generador de inducción y las capacitancias.
- En el laboratorio de hidráulica, se pudo evidenciar que el diseño seleccionado logró cumplir satisfactoriamente con el sistema que deseábamos realizar, debido a que se logró generar rpm con un caudal bajo. Por ende, el prototipo jugó un papel importante debido a que permitió la verificación del funcionamiento con un caudal. De la misma manera, a pesar de que se trabajó con un prototipo a baja escala, se obtuvieron muy buenos resultados, debido a que se lograron generar 183w.
- El sistema logró ser adecuado en cuanto a la generación de energía eléctrica respecto a otros documentos de investigaciones revisadas, ya que se realizaron predicciones de generación en las cuales a través de pequeños caudales logramos igualar la generación de otros sistemas.
- La máquina asíncrona funciona adecuadamente como generador, en cuanto se tenga en cuenta la capacitancia de excitación, debido a que esta es necesaria para que el motor asíncrono se autoexcite para así generar un campo electromagnético y de esta manera llegar a comportarse como un generador.

RECOMENDACIONES

En un proyecto tan ambicioso como lo fue este, siempre se tiene el deseo de que se continúe con el desarrollo del mismo; por lo tanto se recomienda a futuros estudiantes que deseen continuar con la investigación, realizar la fabricación de la turbina en aluminio, para así poder mejorar el rendimiento de la misma y disminuir las turbulencias, y aún más recomendable sería la utilización de un motor asíncrono que soporte mayores corrientes, con la finalidad de lograr obtener una generación mayor.

Por otra parte se sugiere la implementación de los álabes guía, para que de esta manera se logre tener un control sobre el ingreso del caudal que le es suministrado a la turbina. De la misma manera, se recomienda la utilización de un sistema de control para las capacitancias de excitación, para poder garantizar una generación constante.

Así mismo es recomendable, implementar un sistema de generación de pulso de arranque a través de un banco de baterías y un inversor, para así lograr utilizar el generador desde bajas revoluciones sin necesidad de iniciar la generación desde la velocidad nominal del motor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] U. d. p. m. energética, «Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050,» Republica de Colombia, Bogotá D.C., 2015
- [2] C. d. I. R. d. Colombia, «Ley 1715 de 2014,» Congreso de la República, Bogotá D.C. , 2014
- [3] J. E. R. Ángel, «Plan de desarrollo de Cundinamarca,» Bogotá D.C., 2017.
- [4] Alcaldía de Guaduas, Cundinamarca, «guaduas-cundinamarca,» 28 Septiembre 2012. [En línea]. Available: http://www.guaduas-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml. [Último acceso: 28 Agosto 2017].
- [5] J. F. ROJAS, «Se represan las futuras grandes hidroeléctricas en el país,» *El Colombiano*, pp. 1-1, 16 Agosto 2017.
- [6] A. Vilches, O. Macías y D. Gil, «iberenciaoei.org/documentoiberencia1.pdf,» 2005-2014. [En línea]. Available: [documentoiberencia1.pdf](http://iberenciaoei.org/documentoiberencia1.pdf). [Último acceso: 28 Agosto 2017].
- [7] R. van Arkel *et al.*, "Design and preliminary testing of a novel concept low depth hydropower device," *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA*, Waikoloa, HI, 2011, pp. 1-10.
- [8] D. Borkowski, "Small Hydropower Plant as a supplier for the primary energy consumer," *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Kouty nad Desnou, 2015, pp. 148-151.
- [9] B. Hongpeechar, W. Krueasuk, A. Pongching-ngam, P. Bhasaputra and W. Pattaraprakorn, "Feasibility study of micro hydro power plant for rural electrification in Thailand by using axial flux permanent magnet," *2011 International Conference & Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues and Prospects for Asia (ICUE)*, Pattaya City, 2011, pp. 1-4.
- [10] E. Alvarez-Alvarez, E. L. Corominas, M. Rico-Secades, N. Huerta-Medina, J. Aitor-Fernández and J. Fernández-Francos, "A proposal of a modular hydroKinetic smart grid," *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, Guanajuato, 2016, pp. 271-276.
- [11] Z. Goryca, S. Różowicz, K. Dąbała and Z. Krzemień, "Design and tests of generators for micro hydro plants," *2017 International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Naleczow, 2017, pp.
- [12] P. B. Ngancha, K. Kusakana and E. Markus, "Modelling and simulation of a power converter for variable speed hydrokinetic systems," *2017 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*, Cape Town, 2017, pp. 227-232.
- [13] P. B. Ngancha, K. Kusakana and E. Markus, "Flatness based control of a variable speed micro hydrokinetic generation system," *2017 International*

Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), Cape Town, South Africa, 2017, pp. 1-6.

[14] S. P. Koko, K. Kusakana and H. J. Vermaak, "Energy flow modeling between grid and micro-hydrokinetic-pumped hydro storage hybrid system," *2017 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE)*, Cape Town, South Africa, 2017, pp. 1-7.

[15] S. Hazim, A. EL Ouatuati and M. T. Janan, "Modeling approach for hydrokinetic turbine," *2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Marrakech, 2016, pp. 585-589.

[16] C. P. Ion and C. Marinescu, "Autonomous micro-grid based on micro hydro power plants," *2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Brasov, 2012, pp. 941-946.

[17] B. V. Nair *et al.*, "Design of Micro-Hydro power plant using an induction motor as a generator," *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, Coimbatore, 2014, pp. 1-5.

[18] B. Mukherjee, S. Das and A. Mazumdar, "Sustainable electrical energy generation technique in shallow water channels," *2016 IEEE Students' Technology Symposium (TechSym)*, Kharagpur, 2016, pp. 147-151.

[19] E. Muljadi, V. Gevorgian, A. Wright, J. Donegan, C. Marnagh and J. McEntee, "Electrical power conversion of river and tidal power generator," *2016 North American Power Symposium (NAPS)*, Denver, CO, 2016, pp. 1-6.

[20] A. Mutule and A. Kalnacs, "Hydro energy potential estimation for hydrokinetic power plants," *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Brno, 2014, pp. 297-300.

[21] R. V. Klyuev and I. I. Bosikov, "Research of water-power parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories," *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Chelyabinsk, 2016, pp. 1-5.

[22] D. E. Gogoșe Nistoran, D. Abdelal, C. S. Ionescu, I. Opreș and S. Costinaș, "A simple method to assess theoretical hydropower potential of a river," *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, 2017, pp. 764-767.

[23] L. Wang, S. J. Chen, S. R. Jen and H. W. Li, "Design and implementation of a prototype underwater turbine generator system for renewable micro hydro power energy," *2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Las Vegas, NV, 2012, pp. 1-7.

[24] R. Moreno, R. Ferreira, L. Barroso, "Facilitating the integration of renewables in latin america: the role of hydropower generation and other energy storage technologies", *2017 IEEE Power and Energy Magazine*, vol 15, 2017.

- [25] H. Lozada, "Diseño de una PCH para los municipios de Yacopí y Nimamia estimando costos del proyecto, con posibilidad de venta a la red.", 2014 proyecto de grado Universidad de los Andes, Bogota D.C., 2014, pp. 1-38
- [26] J. Gomez, L. Hincapie, E. Woodcock, A. Arregoces, "Sustitución de fuente de energía con microcentral hidroeléctrica. Caso micro central – pipinta", 2006 revista energética, vol. 35, 2005, pp.39-47.
- [27] C. Stephen, Máquinas eléctricas, México: McGraw-Hill Companies, 2005.
- [28] A. O. Gonzalo, F. C. Manés, G. M. Manuel, C. Jose y S. S. Juan, «Curvas características del comportamiento de las máquinas asíncronas,» de Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas, España, marcombo, 1998, pp. 60-61.
- [29] C. C. Manuel, «La máquina de inducción como generador,» de Máquinas de corriente alterna asíncronas, España, Reverté, S. A., 2003, pp. 187-189.
- [30] H. A. Guillermo, «Modos de funcionamiento de la máquina asíncrona,» de Convertidores electromecánicos de energía, España, Marcombo, 1994, pp. 232-233.
- [31] G. Jasmin, A. Leroux and D. Mukhedkar, "Electronic Simulation of a Hydro-turbine with its Penstock, Speed Regulator and Damping Unit," in *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-3, no. 9, pp. 35-36, Sept. 1983.
- [32] S. D. Urbano, «Turbina Kaplan,» de Máquinas hidráulicas, España, Club Universitario, 2012, pp. 267-268.
- [33] «Tecnolog,» [En línea]. Available: <http://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>. [Último acceso: 6 Mayo 2018].
- [34] M. Romero, G. William, Q. Gonzalez, M. Ismael, J. Maximo, S. Portillo, C. Alfredo y A. Marvin, «Scribd,» 20 Julio 2009. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/34499653/TURBINAS-KAPLAN>. [Último acceso: 6 Mayo 2018].
- [35] «ANSYS,» [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>. [Último acceso: 6 Mayo 2018].
- [36] M. Karsten, «Grabcad community,» 9 Julio 2013. [En línea]. Available: <https://grabcad.com/library/turbina-kaplan-1>. . [Último acceso: 10 Mayo 2018].
- [37] «PCE Inst.,» [En línea]. Available: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-revolucion/tacometro-pce-dt100.htm>. [Último acceso: 7 Mayo 2018].

[38] «Alcaldía de Guaduas - Cundinamarca,» [En línea]. Available: http://www.guaduas-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml#geografia. [Último acceso: 7 Mayo 2018].

[39] U. d. Nariño, «UPME-SGI&C-FNCER, » 8 Agosto 2014. [En línea]. Available: <http://www.upme.gov.co:81/sgic/?q=content/dise%C3%B1o-de-una-peque%C3%B1a-central-hidroel%C3%A9ctrica-en-el-municipio-de-ricaurte-nari%C3%B1o>. [Último acceso: 1 Junio 2018].

ANEXOS

Anexo1 Video de la animación generado por la simulación en CFX

Anexo 2 Código generado por el software para la graficación del sistema

Anexo 3 Video de las pruebas realizadas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomas

Anexo 4 Mapa de las cuencas hidrográficas del departamento de Cundinamarca

Anexo 5 Mapa de la cuenca hidrográfica del rio Magdalena

Anexo 6 Mapa subcuencas hidrográficas

Anexo 7 Video funcionamiento del prototipo en el rio

Anexo 8 Artículos relacionados

