



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

**TITULACIÓN DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**Generación eléctrica y monitoreo de un sistema de hidrogenación basada
en vórtice gravitacional.**

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTORES: Ortega Suing, José Ricardo
Romero Añazco, Gissela Estefanía.

DIRECTOR: Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, Ing.

LOJA – ECUADOR

2014

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

Ingeniero.

Jorge Luis Jaramillo Pacheco

DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: Generación eléctrica y monitoreo de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional, realizado por los profesionales en formación: José Ricardo Ortega Suing y Gissela Estefanía Romero Añezco; ha sido orientado y revisado durante su ejecución, y por lo cual se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Febrero de 2014

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Nosotros, Ortega Suing José Ricardo y Romero Añazco Gissela Estefanía, declaramos ser los autores del presente trabajo de fin de titulación: Generación eléctrica y monitoreo de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional, de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo el Ing. Jorge Luis Jaramillo Pacheco director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaramos conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f.....

Autor: Ortega Suing, José Ricardo
Cédula:1104144322

f.....

Autora: Romero Añazco, Gissela Estefanía
Cédula:0705286961

DEDICATORIA

A, María Suing y Martha Suing, para ustedes va esto con todo el amor de un hijo agradecido por todo el apoyo y fortaleza que he recibido de ustedes, mi motivación y mi mano en tiempos de nostalgia. Todo gracias a ustedes y para ustedes.

A, mis tíos y mis primos mayores, pueden sentirse seguros que todos esos buenos consejos hallaron un sentido coherente y provechoso. A mis primos menores, que este pequeño triunfo, sea para ustedes un motivo alcanzable y superable, estoy seguro que así será.

A, Karla Burneo, mi amiga, mi confidente, mi amor; tu bondad y cariño fueron la inspiración en la realización de este trabajo, que con mucho orgullo te lo dedico.

A, mis amigos en general, por darle sentido a la vida, llenándola de risas, y muy buenos momentos.

- *José Ricardo*

Este trabajo va dedicado en primer lugar a mis padres, por el apoyo incondicional que me han brindado todos estos años de mi vida, y los valores y principios que me han inculcado diariamente, sin Uds. no hubiera sido capaz de alcanzar este logro.

De manera muy especial a mi hermana, por estar conmigo siempre cuando la necesitaba, y creer en mis aptitudes incluso antes que mí.

A mi tía Flor Añazco, por sus consejos sabios que me supo dar cuando más los necesitaba, y su ayuda siempre brindada.

A mi mejor amiga que he llegado a considerar como mi hermana, Paulina Pizarro, por su apoyo y ayuda en los momentos fáciles y difíciles que me ha tocado pasar en el transcurso de esta carrera.

A toda mi familia y amigos, por estar siempre dispuestos a brindarme toda su ayuda.

- *Gissela Romero*

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a las que nos gustaría agradecer por haber sido testigos de este logro, y también por su amistad, apoyo, ánimo y compañía en todo el transcurso de nuestras vidas.

Un agradecimiento especial a nuestros padres por habernos formado, por darnos la confianza y consejos necesarios para culminar nuestra formación profesional.

Agradecemos a los docentes de nuestra universidad de manera especial al Ing. Jorge Luis Jaramillo, director de la presente tesis, por ser un gran mentor y consejero en desarrollo de la misma. A nuestro grupo de amigos por hacer de la vida universitaria más fácil con su amistad y camaradería.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	I
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN.....	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABLAS.....	XI
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 1	5
1. PREDISEÑO DEL BLOQUE DE GENERACIÓN DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL.....	5
1.1 Introducción.....	6
1.2 Breve referencia sobre los generadores eléctricos.....	6
1.2.1 Estructura de las máquinas eléctricas rotativas.	7
1.2.2 Generadores eléctricos monofásicos y trifásicos.	8
1.2.3 Principios de funcionamiento de los generadores eléctricos asíncronos.	8
1.2.4 Particularidades del funcionamiento de los generadores eléctricos asíncronos.	10
1.2.5 Generadores eléctricos de corriente directa.	11
1.3 Selección del tipo de generador eléctrico a utilizar en el sistema.....	11
1.3.1 Ventajas y desventajas de los diversos tipos de generadores eléctricos.....	11
1.3.1.1. Ventajas y desventajas del uso de generadores síncronos.....	12
1.3.1.2. Ventajas y desventajas del uso de generadores de inducción o asíncronos.....	12
1.3.1.3. Ventajas y desventajas del uso de generadores de CD.....	13
1.3.2 Selección del generador eléctrico.....	13
1.4 Selección del sistema de regulación de voltaje requerido en el sistema.....	14
CAPÍTULO 2	16
2. TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA PARA LA GENERACIÓN EN SISTEMAS DE VÓRTICE GRAVITACIONAL	16
2.1 Introducción.....	17
2.2 Elementos y tipos de transmisión	17
2.2.1 Tipos de transmisión mecánica.....	17
2.2.2 Elementos de la transmisión mecánica.....	19
2.2.2.1 Correa, banda, o, rueda.	20
2.2.2.2 Polea.	20
2.2.2.3 Tensores.	21

2.3 Velocidad y potencia transmitida.....	21
2.3.1 Velocidad periférica.....	21
2.3.2 Relación de transmisión.....	22
2.3.3 Torque.....	23
2.3.4 Potencia.....	23
2.3.5 Eficiencia.....	23
2.4 Dimensionamiento de la transmisión requerida para el proyecto	24
2.4.1 Diámetro de la polea conducida e impulsadora.....	27
2.4.2 Longitud de la banda.....	28
2.4.3 Distancia entre ejes, conducido e impulsador.....	28
CAPÍTULO 3	29
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL	29
3.1 Introducción.....	30
3.2 Diseño y construcción del generador eléctrico.....	30
3.3 Implementación del bloque de generación eléctrica	33
3.4 Diseño e implementación del panel de control	33
CAPÍTULO 4	39
4. DISEÑO DEL MÓDULO DE MONITOREO DEL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL	39
4.1 Introducción.....	40
4.2 Requerimientos de diseño del módulo de monitoreo	40
4.2.1 Arquitectura propuesta para el módulo de monitoreo.....	40
4.2.2 Paradigma de monitoreo.....	41
4.2.3 Identificación de variables.....	42
4.3 Diseño del módulo de monitoreo	42
4.3.1. Selección de instrumentación.....	42
4.3.2. Registro de voltaje eficaz en los bornes del generador.....	43
4.3.3. Registro de la corriente eficaz en el circuito de carga	45
4.3.4. Registro de la altura del tirante de agua en el canal.....	47
4.3.5. Registro de la velocidad de rotación del eje de la turbina.....	48
4.3.6. Registro del nivel de voltaje en la batería.....	50
4.4 Definición de algoritmos a implementar en el nodo de procesamiento	51
4.4.1. Algoritmo a implementar para calcular el caudal.....	51
4.4.2. Algoritmo a implementar para calcular la potencia eléctrica	51
4.4.3. Algoritmo a implementar para calcular el factor de potencia.....	52
4.4.4. Algoritmo para calcular la potencia mecánica	52
4.4.5. Algoritmo a implementar para calcular la energía eléctrica y mecánica.....	53

4.4.6.	Algoritmo a implementar para calcular la eficiencia	54
4.5	Diseño del nodo de visualización	54
4.6	Diseño del nodo de comunicación	56
4.6.1.	Bloque de storage	56
4.6.2.	Bloque de transmisión de datos	56
4.7	Diseño del nodo de registro	56
CAPÍTULO 5		57
5. IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE MONITOREO PARA EL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL.....		57
5.1	Introducción	58
5.2	Implementación del nodo de adquisición de datos	58
5.2.1	Registro de voltaje eficaz, y, voltaje DC	58
5.2.2	Registro de corriente eficaz	63
5.2.3	Registro del tirante de agua en el canal hidráulico	63
5.2.4	Registro de la velocidad de rotación	64
5.3	Implementación del nodo de procesamiento.....	66
5.3.1	Cálculo del caudal	66
5.3.2	Cálculo de la potencia mecánica	67
5.3.3	Cálculo de la potencia eléctrica.....	69
5.3.4	Cálculo de la eficiencia.....	70
5.4	Implementación del nodo de visualización	70
5.5	Implementación del nodo de comunicación y registro	72
CAPITULO 6		76
6. EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL DESEMPEÑO DEL BLOQUE DE GENERACIÓN DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL		76
6.1	Introducción.....	77
6.2	Evaluación preliminar del desempeño del bloque de generación	77
6.2.1	Metodología de evaluación	77
6.2.1.1	Análisis del desempeño del bloque de generación en vacío	77
6.2.1.2	Análisis del desempeño del bloque de generación operando bajo carga.....	78
6.2.2	Análisis del funcionamiento del generador en vacío.....	78
6.2.3	Análisis del funcionamiento del generador bajo carga	79
CONCLUSIONES.....		81
REFERENCIAS		84
ANEXO 1.....		87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de conexión de un generador eléctrico y de una turbina, en una central hidroeléctrica.....	6
Figura 1.2 Clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas.....	7
Figura 1.3 Principio de funcionamiento de un generador síncrono monofásico.	8
Figura 1.4 Principio de funcionamiento de un generador síncrono trifásico.	8
Figura 1.5 Diagrama de conexión de la excitación de las máquinas de CD.....	11
Figura 1.6 . Mapa de la eficiencia en el suministro de energía: provisión directa y con varias conversiones.....	14
Figura 2.1 . Clasificación de las transmisiones mecánicas.	18
Figura 2.2 Elementos de la transmisión mecánica.	19
Figura 2.3 Partes y tipos de poleas.....	20
Figura 2.4 Tipos de tensores.....	21
Figura 2.5 Medición de voltaje en los bornes del generador eléctrico.....	24
Figura 2.6 Medición de corriente que soporta el generador eléctrico.....	25
Figura 3.1 Esquema de un generador eléctrico asíncrono, monofásico de fase dividida.....	30
Figura 3.2 Diagrama fasorial de las corrientes del estator de un generador AC monofásico de fase dividida.....	31
Figura 3.3 Vista 3D del GAM-FD a construir.	31
Figura 3.4 Máquina eléctrica implementada.	32
Figura 3.5 GAM-FD acoplado a la protección mecánica.	32
Figura 3.6 Bloque de generación eléctrica instalado en el banco hidráulico.	33
Figura 3.7 Diagrama eléctrico del tablero de control.....	34
Figura 3.8 Vista del tablero metálico del panel de control.	34
Figura 3.9 Tablero del panel de control instalado.....	35
Figura 3.10 Batería VRLA de 12V y 12AH.....	35
Figura 3.11 Diseño de la placa de rectificación y filtrado en PCB.....	36
Figura 3.12 Diseño de la placa de rectificación y filtrado en PCB 3D.....	36
Figura 3.13 Construcción de la placa de rectificación y filtrado.....	36
Figura 3.14 Regulador de voltaje CML 15-2.1.....	37
Figura 3.15 Lámparas LED a utilizar como carga resistiva para evaluación del desempeño del bloque de generación.	37
Figura 4.1 Arquitectura propuesta para el módulo de monitoreo.	40
Figura 4.2 Diagrama del circuito para medición de voltaje con la placa Arduino, y, forma de onda esperada para la señal.....	43
Figura 4.3 Medición del voltaje eficaz en los bornes del bloque de generación.	44
Figura 4.4 Diagrama del circuito para medición de la corriente eficaz.	46
Figura 4.5 Esquema de ubicación del sensor ultrasónico en el canal hidráulico. Diseño de los autores. y – altura del canal, h – altura del tirante de agua, H – diferencia entre la altura del canal y la altura del tirante de agua.....	47
Figura 4.6 Vista general del sensor ultrasónico HC-SR04.....	47
Figura 4.7 Esquema de acople del encoder al eje de rodete de la turbina.....	49
Figura 4.8 Vista general del encoder HC-020K.....	49
Figura 4.9 Divisor de tensión utilizado para medir el nivel de voltaje en la batería.....	50
Figura 4.10 Conexión de la pantalla GLCD con la placa Arduino.....	54
Figura 4.11 Esquema del tablero de control a implementar en el sistema de hidrogenación.....	55
Figura 5.1 Arquitectura propuesta para el módulo de monitoreo.....	58
Figura 5.2 Diagrama del circuito de acondicionamiento de voltaje eficaz, construido sobre una placa Arduino.....	59

<i>Figura 5.3 Diagrama del circuito de acondicionamiento de corriente eficaz, construido sobre una placa Arduino.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.4 Diagrama del circuito de acondicionamiento de voltaje DC, construido sobre una placa Arduino.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.5 Diseño de la placa de acondicionamiento de voltaje eficaz y voltaje DC, en PCB.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.6 Diseño 3D de la placa de acondicionamiento de voltaje eficaz y voltaje DC, en PCB.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.7 Placa de acondicionamiento de voltaje eficaz y voltaje DC construida.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.8 Esquema eléctrico montado sobre el panel de control, para registro e voltaje eficaz a la salida del generador, y, de voltaje DC a la salida del bloque de rectificación y filtrado.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.9 Esquema eléctrico de conexiones internas en el panel de control.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.10 Instalación del sensor ultrasónico HC-SR04 en el canal hidráulico.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.11 Instalación del encoder HC-020K en la chumacera de la transmisión mecánica.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.12 Detalle de la instalación del encoder HC-020K en la chumacera de la transmisión mecánica.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.13 Algoritmo de cálculo del caudal, implementado en Arduino Mega 2560.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.14 Código implementado para el cálculo del caudal, en Arduino Mega 2560.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.15 Algoritmo de cálculo de potencia mecánica y velocidad de rotación, implementado en Arduino Mega 2560.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.16 Código implementado para el cálculo de la potencia mecánica, en Arduino Mega 2560.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.17 Bitácora de registro para el cálculo de la potencia eléctrica y de la eficiencia.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.18 Diseño de la placa de acople entre la pantalla GLCD y la placa Arduino.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.19 Vista 3D de las placas diseñadas para acoplar la pantalla GLCD y la placa Arduino.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.20 Implementación de la placa de acople entre la pantalla GLCD y la placa Arduino.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.21 Acoplamiento de la pantalla a la placa Arduino.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.22 Nodo de visualización en operación.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.23 Conexión del módulo Ethernet Shield a la placa Arduino Mega 2560.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.24 Algoritmo de operación implementado en Arduino mega 2560, para adquisición de datos del sistema, storage de data en la microSD, y, transferencia de datos al PC.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.25 Código implementado para la transmisión y registro de data con el modulo Ethernet shield, en la placa Arduino Mega 2560.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.26 Transmisión de datos medidos y calculados a una dirección IP definida.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 6.1 Bornes de conexión de voltaje AC generado por el GAM-FD en el tablero del panel de control.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.2 Bornes de conexión de voltaje DC a las cargas resistivas ubicadas en el tablero del panel de control.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 6.3 Diagrama eléctrico unifilar del tablero de control.....</i>	<i>80</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Criterios de selección del tipo de generador eléctrico en función de la potencia y la naturaleza de la carga, en centrales hidroeléctricas</i>	11
<i>Tabla 1.2 Datos técnicos para el diseño del generador eléctrico requerido para el sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional</i>	14
<i>Tabla 2.1 Características de los tipos de transmisión mecánica por rozamiento.</i>	18
<i>Tabla 2.2 Características de los tipos de transmisión mecánica por rozamiento.</i>	19
<i>Tabla 2.3 Desempeño del generador a implementar en el sistema de vórtice gravitacional, sin restricciones mecánicas.</i>	25
<i>Tabla 2.4 Parámetros eléctricos del sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional.</i>	25
<i>Tabla 2.5 Diámetros y distancia primitiva entre ejes de las poleas.</i>	27
<i>Tabla 2.6 Longitud de la banda y distancia entre ejes de las poleas.</i>	28
<i>Tabla 4.1 Variables identificadas para el monitoreo</i>	42
<i>Tabla 4.2 Instrumentación seleccionada para el registro de las variables a medir.</i>	43
<i>Tabla 4.3 Torque en el eje de la turbina del sistema de hidrogenación, en función del caudal y velocidad de rotación.</i>	53
<i>Tabla 5.1 Análisis comparativo de los registros de voltaje eficaz y voltaje DC.</i>	62
<i>Tabla 5.2 Análisis comparativo de los registros de tirante de agua.</i>	63
<i>Tabla 5.3 Análisis comparativo de los registros de velocidad de rotación.</i>	65
<i>Tabla 6.1 Análisis del funcionamiento del generador en vacío.</i>	79
<i>Tabla 6.2 Análisis del funcionamiento del generador bajo carga.</i>	80

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el diseño, construcción e implementación del bloque de generación eléctrica para un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional, instalado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología, Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL, bajo responsabilidad de la Sección de Energía y Electrónica del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica. Primeramente, se realiza el pre-diseño del bloque de generación, definiendo la máquina eléctrica a utilizar. Seguidamente se selecciona la estructura y los elementos de la transmisión mecánica requerida para acoplar el eje de la turbina y el eje del generador. Instalado el bloque de generación eléctrica, se diseña un módulo de monitoreo constituido por cinco módulos: el módulo de adquisición de datos, módulo de procesamiento, módulo de comunicación, módulo de visualización, y, módulo de registro de data. Finalmente, se evalúa en forma preliminar el desempeño del bloque de generación.

PALABRAS CLAVES: generación eléctrica, sistemas de hidrogenación basado en vórtice gravitacional.

ABSTRACT

In the following piece of work we describe the design, construction and implementation of a electric generation block for a hidrogeneration system based on gravitational vortex, which is installed in the Hydraulics Lab of the Geology, Mines, and Civil Engineering Department of UTPL, under responsibility of the Energy and Electronics section of the Science Department of Computer Science and Electronics. First of all, the Pre-Design of the generation block is realized, defining the electric machinery to be utilized for its posterior design and implementation. Following is select the structure and mechanic transmission elements required to build the turbine axis as well as the generator axis. Having installed the electric generation block, a monitoring module of five modules was designed: data acquisition module, processing module, communication module, visualization module, and data register module. Finally, is evaluated preliminarily the performance of block generation.

KEYWORDS:electric generation, hidrogeneration system based on gravitational vortex.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se estructuró en 6 capítulos. En el primer capítulo, se seleccionó la máquina eléctrica a utilizar, y, se definió la estructura y características de la regulación requerida en la máquina eléctrica, en términos de calidad de energía.

En el segundo capítulo, se seleccionó el sistema de transmisión de potencia mecánica, entre la turbina y el bloque de generación eléctrica.

En el tercer capítulo, se describe el diseño, construcción e implementación del bloque de generación, así como la implementación de un tablero de control, que permita valorar el desempeño y monitorear el funcionamiento del sistema.

En el cuarto capítulo se describe el diseño de un módulo de monitoreo del sistema. En el quinto capítulo se explica la implementación de dicho módulo, conformado por submódulos de adquisición de datos, procesamiento, comunicación, visualización, y, registro.

Finalmente, en el capítulo sexto se describe los resultados obtenidos en la etapa de evaluación preliminar del desempeño del bloque de generación del sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Diseñar e implementar un bloque de generación eléctrica para un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional.

Objetivos Específicos

- Diseñar, construir e implementar un bloque de generación eléctrica que permita transformar energía mecánica en el eje de la turbina, en energía eléctrica para alimentar una carga dada.
- Seleccionar el sistema de transmisión de potencia mecánica adecuado, entre el eje de la turbina y el bloque de generación eléctrica.
- Diseñar, construir e implementar un panel de control que permita valorar el desempeño y monitorear el funcionamiento del sistema.
- Diseñar, construir e implementar un módulo de monitoreo que permita evaluar el desempeño del bloque de generación del sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional.

CAPÍTULO 1

1. PREDISEÑO DEL BLOQUE DE GENERACIÓN DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL

1.1 Introducción

Como parte del conjunto de iniciativas para el aprovechamiento de fuentes renovables de energía en el Campus de la UTPL, impulsado por la Sección de Energía y Electrónica SEE del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica DCCE, con el apoyo de la Dirección de Infraestructura y el Rectorado de la Universidad, se incluye el diseño e implementación de una estación de hidrogenación eléctrica, basada en el principio de vórtice gravitacional.

Una vez diseñado e instalado el bloque mecánico del sistema propuesto, se requiere diseñar y construir un bloque de transformación de energía mecánica en el eje de la turbina, en energía eléctrica para alimentar una carga dada

En esta etapa del proyecto, se requiere seleccionar la máquina eléctrica a utilizar, y, definir la estructura y características de la regulación requerida en la máquina en términos de calidad de energía. En este documento, se describe los resultados obtenidos.

1.2 Breve referencia sobre los generadores eléctricos.

En una estación de hidrogenación, se conoce como generador eléctrico, a una máquina rotativa, acoplada directa o indirectamente al eje de la turbina hidráulica, que permite la transformación de la energía mecánica capturada en energía eléctrica (Ver Fig. 1.1).

En términos generales, un generador eléctrico opera bajo los Principios de Lenz y Faraday [1]. De acuerdo a la clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas (Ver Fig. 1.2), los generadores eléctricos pueden ser de CD o CA (síncronos y asíncronos).

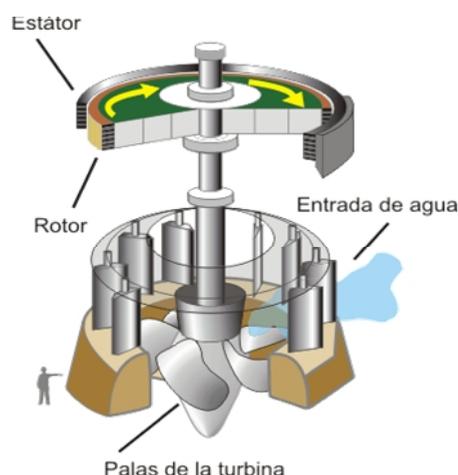


Figura 1.1 Esquema de conexión de un generador eléctrico y de una turbina, en una central hidroeléctrica.

Fuente: <http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/signaturas/fisica/magnet/generador.htm>

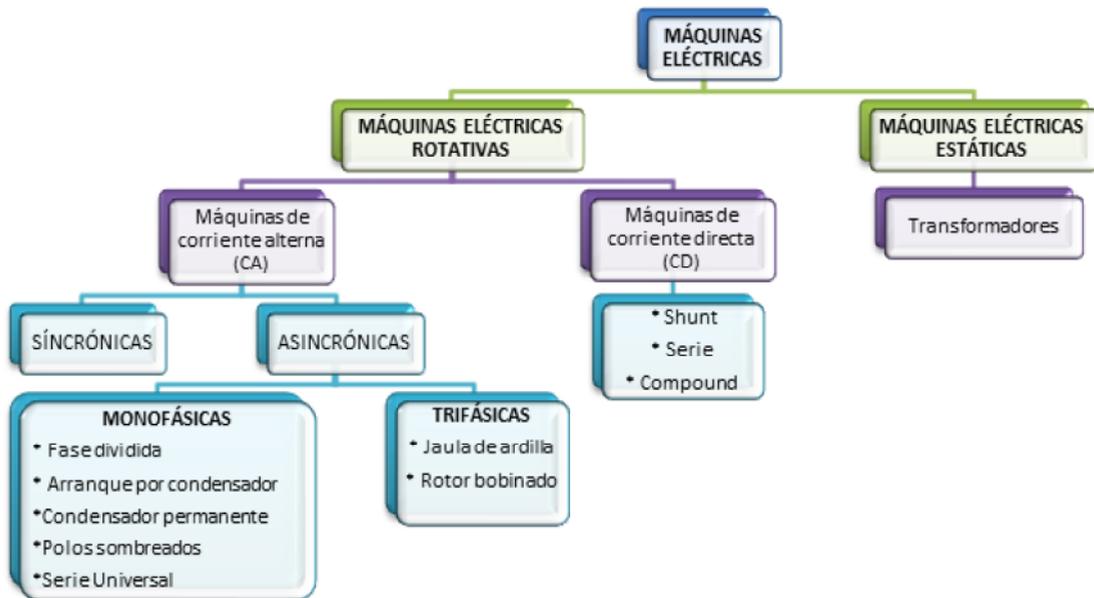


Figura 1.2 Clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas.

Fuente: http://www.infoPLC.net/files/documentacion/motion_control/infoPLC_net_8448127641.pdf

1.2.1 Estructura de las máquinas eléctricas rotativas.

La estructura de las máquinas eléctricas rotativas, es muy similar, independientemente del tipo.

Desde el punto de vista eléctrico, en una máquina eléctrica rotativa se pueden distinguir 2 elementos: el devanado de armadura, y, el devanado de campo. En el devanado de armadura se induce el voltaje alterno, mientras que, el devanado de campo funciona como fuente primaria de flujo magnético.

Desde una perspectiva mecánica, en una máquina eléctrica rotativa existen 2 elementos básicos: rotor y estator. Generalmente, el estator permanece fijo y alberga al devanado de armadura. Por su parte, el rotor es la parte móvil del generador, e, incluye al devanado de campo.

Debido a que el rotor está en movimiento, resulta difícil alimentar al devanado de campo. Por esta razón se requiere de un sistema de anillos rasantes y escobillas, que permiten el ingreso de la alimentación desde una fuente externa.

1.2.2 Generadores eléctricos monofásicos y trifásicos.

En Los generadores eléctricos de CA, pueden ser monofásicos (Ver Fig. 1.3) o trifásicos (Ver Fig. 1.4).

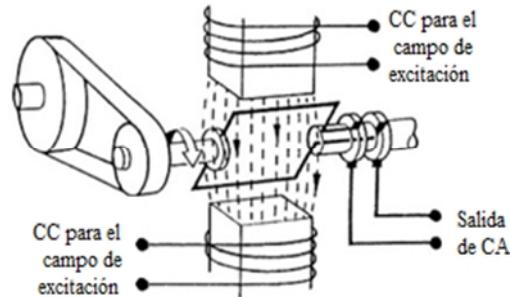


Figura 1.3 Principio de funcionamiento de un generador síncrono monofásico.

Fuente: http://exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/micro_turbinas/apuntemch.pdf

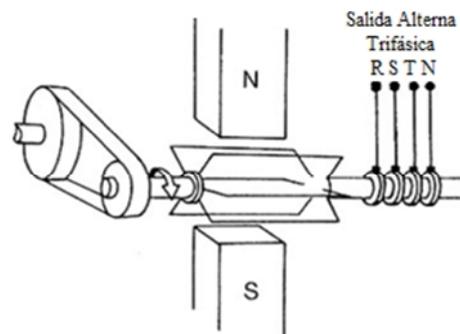


Figura 1.4 Principio de funcionamiento de un generador síncrono trifásico.

Fuente: http://exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/micro_turbinas/apuntemch.pdf

1.2.3 Principios de funcionamiento de los generadores eléctricos asíncronos.

En un generador síncrono, existe una relación directa entre la velocidad de giro del rotor, y, la frecuencia del voltaje y corriente generados.

En un generador síncrono, el devanado de armadura se encuentra ubicado comúnmente en el estator, y, el devanado de campo en el rotor. Este último es excitado por corriente continua.

Cuando el generador síncrono opera sin carga, sólo el flujo magnético proveniente del campo, aparece en el entrehierro y pasa a través de las bobinas ubicadas en el perímetro del estator, induciendo voltaje en cada una de ellas. El flujo en cada fase, es función del flujo

magnético en el entrehierro, y, del ángulo formado entre el eje magnético del rotor y el eje magnético de dicha fase. A medida de que el rotor gira, el ángulo varía. Si el rotor gira a una velocidad constante , la relación entre el flujo de la fase y el flujo del rotor, se define por la expresión (1.1):

$$\varphi_A = \varphi_{rot} \cos(\omega t) \quad (1.1)$$

En dónde,

φ_A , es el flujo magnético de la fase, Wb.

φ_{rot} , es el flujo magnético del rotor, Wb.

ω , es la velocidad angular del rotor, rad/s.

Dado que, las tres fases se encuentran físicamente desplazadas 120° en el espacio, para el caso de un alternador trifásico, los flujos magnéticos de las fases también se encontrarán desplazados 120° entre sí:

$$\varphi_A = \varphi_{rot} \cos(\omega t) \quad (1.2)$$

$$\varphi_B = \varphi_{rot} \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (1.3)$$

$$\varphi_C = \varphi_{rot} \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (1.4)$$

Por su parte, el voltaje inducido en las bobinas, se determina por la expresión (1.5):

$$e = N_b \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.5)$$

En dónde,

e , es la fuerza electromotriz, V.

N_b , es el número de espiras en el devanado, N números pares reales.

d , es el flujo magnético variable en el tiempo que circula a través de la bobina, Wb.

Reemplazando la ecuación (1.5) en (1.2), (1.3), y, (1.4), se obtiene que:

$$e_A = N_A \omega \varphi_{rot} \text{sen}(\omega t) \quad (1.6)$$

$$e_B = N_B \omega \varphi_{rot} \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (1.7)$$

$$e_C = N_C \omega \varphi_{rot} \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (1.8)$$

En dónde,

e_A, e_B, e_C , es la fuerza electromotriz, V.

N_A, N_B, N_C , es el número de espiras en el devanado, N números pares reales.

ϕ_{rot} , es el flujo magnético del rotor, Wb.

ω , es la velocidad angular del rotor, rad/s.

Por cuanto $N_A = N_B = N_C$, es evidente que el voltaje inducido en cada fase, retrasa al flujo que circula por cada una de ellas, en 90° . Entonces, se puede considerar un voltaje interno E , inducido para cada frase, cuya característica principal es que se retrasa al flujo del rotor en 90° :

$$E = N_b \omega \phi_{rot} \quad (1.9)$$

La relación entre la velocidad del rotor y la frecuencia del voltaje generado, se describe a través de la expresión:

$$f = \frac{p}{2} \cdot \frac{\omega}{60} \text{ Hz} \quad (1.10)$$

En dónde,

f , es la frecuencia de generación, Hz.

p , es el número de polos.

ω , es la velocidad angular del rotor, rpm.

1.2.4 Particularidades del funcionamiento de los generadores eléctricos asíncronos.

Este tipo de generador, está compuesto por un inductor a flujo variable, a partir de un devanado generalmente trifásico ubicado en el estator; y, un inducido con devanado cerrado, ubicado en el rotor, en el que se inducen las f.e.m y las corrientes, a partir del flujo generado por el estator.

La excitación de estos generadores puede ser por medio de escobillas (para rotores bobinados), o, autoinducida (para rotores tipo jaula de ardilla).

El funcionamiento de estos generadores, requiere que el deslizamiento sea negativo, es decir, que la velocidad de rotación sea mayor a la velocidad de sincronismo [2].

1.2.5 Generadores eléctricos de corriente directa.

Las máquinas de corriente directa (CD) son reversibles, es decir, la misma máquina puede funcionar como motor o como generador [3].

Los generadores de CD se clasifican de acuerdo al tipo de excitación en el devanado del estator: de excitación en serie, de excitación compuesta, de excitación en derivación o paralelo, y, de excitación independiente [4] (Ver Fig. 1.5).

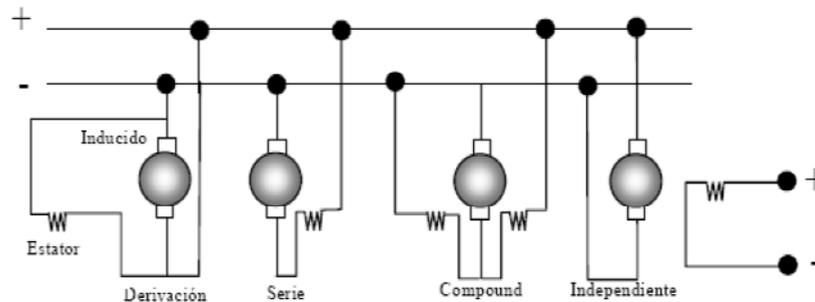


Figura 1.5 Diagrama de conexión de la excitación de las máquinas de CD.

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/30478463/Motores-y-Generadores-de-Corriente-Continua>

1.3 Selección del tipo de generador eléctrico a utilizar en el sistema.

1.3.1 Ventajas y desventajas de los diversos tipos de generadores eléctricos.

La selección de un generador eléctrico se fundamenta en una serie de variables, como la demanda de energía en la carga, el tipo de carga, la distancia de la carga respecto del generador, etc. En centrales de hidrogenación, entre las variables más importantes al seleccionar el generador, se cuenta el requerimiento de energía (potencia) y el tipo de carga, tal como lo muestra la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Criterios de selección del tipo de generador eléctrico en función de la potencia y la naturaleza de la carga, en centrales hidroeléctricas

Sistema de generación	Potencia	Carga
Corriente continua Carga de baterías	Menos de 5kW	Iluminación y comunicaciones
Corriente continua Carga de baterías	Menos de 5kW	Iluminación Comunicaciones

Inversores en la demanda		Computación Conservación de alimentos
Corriente alterna Monofásica Rectificador para carga de baterías Inversores en la demanda	Menos de 5kW	Iluminación Comunicaciones Computación Conservación de alimentos
Corriente alterna Monofásica	Menos de 10kW	Iluminación Comunicaciones Computación Conservación de alimentos Pequeños motores monofásicos
Corriente alterna Trifásica	Más de 10kW	Iluminación Comunicaciones Computación Conservación de alimentos Motores trifásicos

Fuente:

http://www.infopl.net/files/documentacion/motion_control/infoPLC_net_8448127641.pdf

1.3.1.1. Ventajas y desventajas del uso de generadores síncronos.

El generador síncrono es poco convencional, y, se utiliza en grandes industrias para corrección del factor de potencia. El generador sincrónico tiene el bobinado de campo excitado por CD, mientras que la tensión generada en la armadura es alterna, de ahí que también se lo conozca como alternador.

Entre las principales ventajas del generador síncrono, resalta el hecho de que ante una velocidad de giro invariable, el generador mantiene una frecuencia síncrona normalizada.

Entre las principales desventajas se anota el hecho de que los generadores de fabricación actual son de un solo cojinete, lo que complica su ensamblaje en grupos de generación; y, que la regulación debe ser mantenida en rangos estrechos, a riesgo de presentar exceso de calentamiento por sobre excitación.

1.3.1.2. Ventajas y desventajas del uso de generadores de inducción o asíncronos

El generador asíncrono se utiliza en una amplia gama de sistemas de generación de emergencia, en sistemas eólicos, y, en sistemas de hidrogenación de pequeña potencia.

Entre las principales ventajas del generador asíncrono, se señala la construcción simple, robusta, y, confiable. Un generador asíncrono es de bajo costo; y, la tensión generada

depende de la magnitud de los condensadores, de la velocidad de giro, de la corriente, y, del factor de potencia.

Entre las principales ventajas del generador asíncrono se puntualiza en la necesidad de protección por sobre tensiones durante el embalamiento.

1.3.1.3. Ventajas y desventajas del uso de generadores de CD

Los generadores de CD se emplean para cargar batería, ya que entregan una mayor corriente para cierto voltaje dado.

Entre las principales ventajas del generador CD se menciona la entrega de corriente libre de rizo y de voltaje fijo, entre cero y los valores nominales.

Entre las principales desventajas del generador CD, se recalca el hecho de que los dispositivos y equipos electrodomésticos utilizan corriente.

1.3.2 Selección del generador eléctrico.

Al analizar las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de generadores eléctricos, y, considerando la premisa de reducir al máximo la pérdida de energía en procesos auxiliares como la rectificación CA CD (Ver Fig.1.6), se preseleccionó un generador de CD.

Lastimosamente, las pruebas preliminares en el eje de la turbina del tanque de vórtice gravitacional, mostraron que el sistema no era capaz de asegurar los parámetros mecánicos exigidos por un generador CD para su funcionamiento, como alta velocidad de rotación y torque significativo en el eje.

En la búsqueda de una nueva opción, que considere las limitaciones mecánicas existentes en el sistema, se identificó un generador de corriente alterna asíncrono, monofásico, de fase dividida, en el que el generador se autoexcita a partir de un arrollamiento auxiliar en el estator, situado a un ángulo de 90° con respecto al arrollamiento principal.

De acuerdo a las pruebas realizadas, la máxima potencia mecánica efectiva en el sistema, se obtiene para la denominada turbina 4 [5]. Los datos experimentales obtenidos, serán entonces utilizados para diseñar el generador requerido (Ver Tabla 1.2). Se prevé que el generador opere con 6 pares de polos, con un campo magnético giratorio de inducción estática.

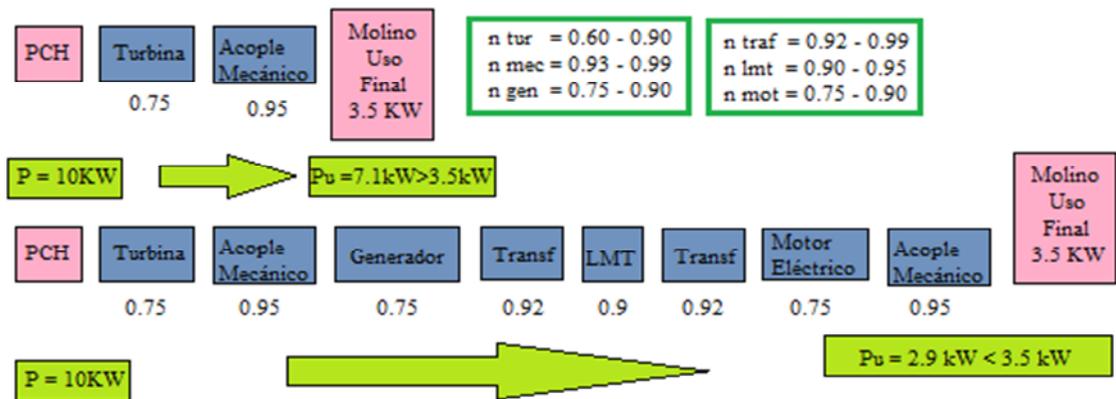


Figura 1.6 . Mapa de la eficiencia en el suministro de energía: provisión directa y con varias conversiones.

Fuente: <http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0629t.pdf>

Tabla 1.2 Datos técnicos para el diseño del generador eléctrico requerido para el sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional

Parámetro	Sistema de hidrogenación instalado en la UTPL	Generador AC de imanes permanentes
Velocidad de rotación	120 rpm, ± 10	115 - 430 rpm
Torque	5 - 69 Nm	-
Potencia	38 - 278 W	60 W
Voltaje	-	20 V AC
Corriente	-	3 A
Polos	-	6 pares

Fuente:

Diseño de los autores.

1.4 Selección del sistema de regulación de voltaje requerido en el sistema.

La energía suministrada por el generador eléctrico, se expresa en función del flujo magnético y de la velocidad angular, a través de la ecuación (1.11):

$$E = f(\varphi, N) \quad (1.11)$$

En dónde,

E, es la energía de generador eléctrico, kWh.

, es el flujo magnético, Wb.

N , es la velocidad de rotación, rpm.

En el generador eléctrico seleccionado, el flujo magnético depende del tipo de imán permanente. Al utilizar magnetos elaborados con metales de tierras raras, como el neodimio, hierro, o, boro, se puede obtener campos magnéticos de 7 a 10 veces mayores a los creados con materiales tradicionales. Estos campos también pueden ser considerados constantes, razón por la cual la única regulación posible en lamáquina es por velocidad de rotación. Esta regulación, se puede conseguir variando la carga alimentada o el caudal turbinado.

La variación de la carga conectada al generador, se logra a través de la inserción o no, de resistencias o disipadores de potencia, sumergidas en agua o en el aire.

La variación del caudal turbinado para regulación de la velocidad del generador, puede ser manual o automática. Aunque en la práctica, este tipo de regulación es costosa y compleja, sobre todo para centrales de picogeneración, en este proyecto se facilita debido a la construcción del sistema de hidrogeneración sobre la base del banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL.

CAPÍTULO 2

2. TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA PARA LA GENERACIÓN EN SISTEMAS DE VÓRTICE GRAVITACIONAL

2.1 Introducción

Este Artículo cubre los requisitos generales para la puesta a tierra y sus puentes de unión en las instalaciones eléctricas y, además, los requisitos específicos que se indican a continuación.

En una central de hidrogenación, se produce una continua conversión de energía hidráulica en energía mecánica (en la turbina), y, de energía mecánica en energía eléctrica (en el generador).

En las grandes hidroeléctricas, la energía mecánica en la turbina se captura en la rotación del rodete, cuya velocidad de giro está relacionada con la caída neta, el caudal, y, las dimensiones del rodete. En estas centrales, las turbinas y los generadores se acoplan en directo.

En el caso de las picocentrales hidroeléctricas (PCH), las turbinas y los generadores se acoplan a través de sistemas de transmisión de movimiento y potencia mecánica [6]. Los sistemas de transmisión pueden ser de correas, ruedas dentadas, cadenas, entre otros.

En el marco de este proyecto, que pretende diseñar y construir un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional, que por sus características corresponde a una PCH, se requiere entonces seleccionar adecuadamente el sistema de transmisión de potencia mecánica, entre la turbina y el bloque de generación eléctrica.

2.2 Elementos y tipos de transmisión

La transmisión mecánica permite que las máquinas eléctricas rotativas acoplen su velocidad de rotación, con la velocidad de giro de las turbinas, ya sea en magnitud como en dirección.

2.2.1 Tipos de transmisión mecánica

La Fig. 2.1, muestra una clasificación general de la transmisión mecánica. Las Tablas 2.1 y 2.2, describen las características más importantes de las transmisiones por rozamiento y con engranajes, respectivamente.

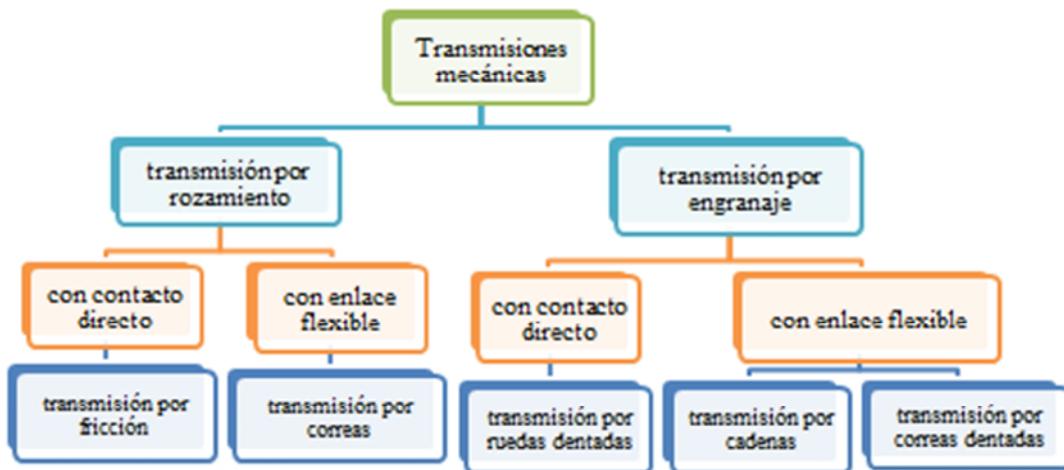


Figura 2.1 . Clasificación de las transmisiones mecánicas.

Fuente: <http://blog.utp.edu.co/ivanegas/files/2011/08/Cap-1-Int-Dis-II.pdf>

Tabla 2.1 Características de los tipos de transmisión mecánica por rozamiento.

Característica	transmisiones por rozamiento		
	Ruedas fricción	Correas planas	Correas trapezoidales
Potencia máx. [kW]	80	200	350
Par máximo [kNm]	5	3	5
Velocidad lineal máx [m/s]	20	100	30
Rendimiento	0.95	0.97	0.97
Potencia limitada por velocidad	Sí	sí	sí
Radio máx. (1etapa)	6 – 18	6 – 8	6 – 10
Tensión requerida	sí	sí	sí
Carga en rodamiento	alta	alta	alta
Precisión	media	baja	baja
Deslizamiento	sí	sí	sí
Ruido	bajo	bajo	bajo
Limitador de carga	sí	sí	sí
Precio	bajo	bajo	medio

Fuente: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_correas1

Tabla 2.2 Características de los tipos de transmisión mecánica por rozamiento.

Característica	transmisiones por engranaje:		
	Ruedas dentadas	Correas dentadas	Cadenas
Potencia máx. [kW]	80000	120	400
Par máximo [kNm]	7000	1	40
Velocidad lineal máx [m/s]	30	60	10
Rendimiento	0.97	0.96	0.95
Potencia limitada por velocidad	no	sí	sí
Radio máx. (1etapa)	6 – 10	6 – 10	6 – 10
Tensión requerida	no	no	no
Carga en rodamiento	baja	baja	baja
Precisión	alta	baja	media
Deslizamiento	no	no	no
Ruido	medio	bajo	alto
Limitador de carga	no	no	no
Precio	alto	medio	medio

Fuente: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_correas1

2.2.2 Elementos de la transmisión mecánica

Como las partes elementales de la transmisión de movimiento y potencia mecánica, se anota un elemento flexible o correa, dos o más elementos portadores o poleas (un conductor o uno o más conducidos), y, elementos tensores. En términos generales, la transmisión mecánica está compuesta por una correa o banda, una rueda impulsora, una rueda conducida, cojinetes de rodamientos o chumaceras, soportes de los ejes, y, acoplamientos (Ver Fig. 2.2).

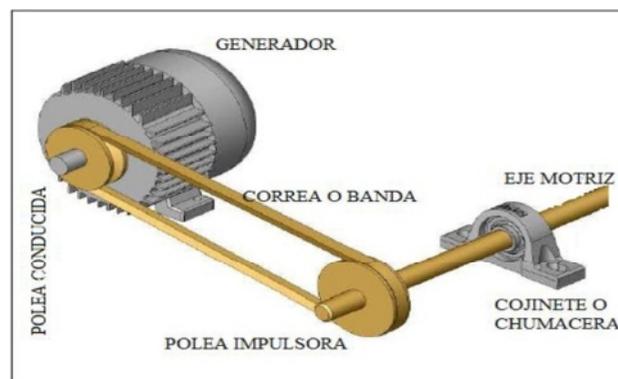


Figura 2.2 Elementos de la transmisión mecánica.

Fuente: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1312/1/T-UTC-2051.pdf>

2.2.2.1 Correa, banda, o, rueda.

La correa determina la capacidad total de trabajo de la transmisión. Una “buena” correa debe tener una elevada capacidad de tracción, una vida útil alta, gran resistencia a la fatiga, y, ser de bajo costo.

Dadas las particularidades de este proyecto, se requiere aprovechar, de manera muy eficiente, la energía entregada por la turbina, garantizando un buen torque y una buena velocidad de rotación en el eje del generador. Entonces, como variables más importantes aparecen el rendimiento y el peso de las poleas.

Considerando los requerimientos, se decidió proponer la utilización de una transmisión por rozamiento, empleando correas planas, opción que garantiza un mayor rendimiento debido a un menor peso.

2.2.2.2 Polea.

Las poleas se clasifican en función del material de construcción, y, de la configuración constructiva de los elementos (Ver Fig.2.3). En general, la polea se selecciona por la forma de la superficie de trabajo de la llanta, determinada por el tipo de correa, y, por las condiciones de trabajo de la transmisión.



Figura 2.3 Partes y tipos de poleas.

Fuente: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenomecanico-1/material_clase/ocw_correas1

2.2.2.3 Tensores.

En las correas, el movimiento se transmite gracias al rozamiento, por lo que es fundamental que la correa este suficientemente tensa, para que la potencia transmitida no disminuya [7]. Para este fin sirven los tensores.

Los tensores pueden ser placas oscilantes, plataformas corredizas, y, rodillos planos o con canales (Ver Fig. 2.4).

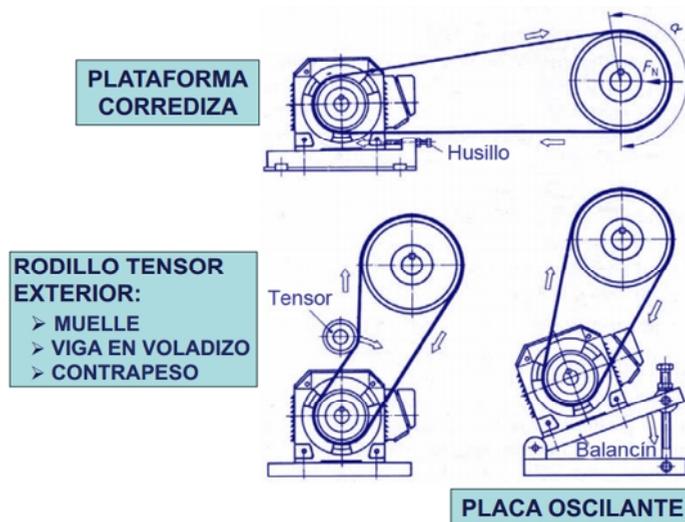


Figura 2.4 Tipos de tensores

Fuente: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_correas1

2.3 Velocidad y potencia transmitida.

La transmisión mecánica se caracteriza por la velocidad periférica, la relación de transmisión, el torque, la potencia, y, la eficiencia del sistema [6].

2.3.1 Velocidad periférica.

También denominada velocidad tangencial, la velocidad periférica se determina de acuerdo a la expresión (2.1):

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} \quad (2.1)$$

En dónde,

V, es la velocidad tangencial, m/s.

D, es el diámetro de la rueda o polea, m.

N_1 , es la velocidad de rotación, rpm.

La velocidad periférica o tangencial, se expresa también en función de la velocidad angular, utilizando la ecuación (2.2):

$$V = \frac{\omega \cdot D}{2} \quad (2.2)$$

En dónde,

V , es la velocidad tangencial, m/s.

ω , es la velocidad angular, rad/s.

D , es el diámetro de la rueda o polea, m.

2.3.2 Relación de transmisión.

Se conoce como relación de transmisión a la razón entre la velocidad de la rueda impulsora, N_1 , y la velocidad de la rueda conducida, determinada a partir de la ecuación (2.3):

$$i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{D_1}{D_2} \quad (2.3)$$

En dónde,

i , es la relación de transmisión

N_1 , es la velocidad de rotación de la rueda impulsora, rpm.

N_2 , es la velocidad de rotación de la rueda conducida, rpm.

D_1 , es el diámetro de la rueda impulsora, m.

D_2 , es el diámetro de la rueda conducida, m.

Al requerir una alta relación de transmisión, se suele utilizar etapas sucesivas. En estos casos, la relación de transmisión se determina a partir de la expresión (2.4):

$$i_t = i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n \quad (2.4)$$

En dónde,

i_n , es la relación de transmisiones de cada etapa

2.3.3 Torque.

El torque indica la capacidad de un eje giratorio, para desarrollar una fuerza tangencial, a una determinada distancia radial del centro del eje, expresado en la ecuación (2.5):

$$T = F \cdot r \quad (2.5)$$

En dónde,

T, es el torque, Kg-m.

F, es la fuerza, Kg.

r, es la distancia, m.

2.3.4 Potencia.

Se denomina potencia a la energía que transmite un eje, por unidad de tiempo, calculada por la ecuación (2.6):

$$P = T \cdot \frac{\omega}{102} = T \cdot \frac{N}{974} \quad (2.6)$$

$$P = F \cdot \frac{\omega}{102} \quad (2.6)$$

En dónde,

P, es la potencia, W.

F, es la fuerza, Kg.

, es la velocidad angular, rad/s.

La potencia es directamente proporcional al producto del torque y de la velocidad angular. Por lo tanto, para un mismo valor de la potencia, el torque y la velocidad son inversamente proporcionales entre sí; si se aumenta la velocidad, se disminuye el torque; y, viceversa

2.3.5 Eficiencia.

En toda transmisión mecánica, existe disipación de energía en forma de calor, generalmente por fricción. En consecuencia, la potencia de salida en el eje conducido es menor a la

potencia de entrada en el eje impulsor. Entonces, la eficiencia mecánica, se define por la ecuación (2.7):

$$\eta = \frac{\text{Pot.de salida}}{\text{Pot.de entrada}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.7)$$

En dónde,

η , es la eficiencia.

P_2 , es la potencia de salida, W.

P_1 , es la potencia de entrada, W.

2.4 Dimensionamiento de la transmisión requerida para el proyecto

La transmisión requerida para este proyecto, se dimensionó en base a la potencia a transmitir (W), las velocidades de entrada y salida (rpm), y, las condiciones de servicio.

De acuerdo a los resultados mostrados en [5], la potencia a transmitir al bloque de generación es de 278 W, mientras que la velocidad en el eje de la turbina alcanza las 115 rpm.

Las pruebas de campo realizadas al generador a utilizar en el proyecto, [8] (Ver Fig. 2.5 y 2.6), determinaron que el rendimiento óptimo de la máquina se registra en la entrega de voltaje AC, entre 7.7 V y 28 V. Estos valores de voltaje, corresponden a velocidades de rotación, entre 115 rpm y 430 rpm. La Tabla 2.3, muestra los resultados del desempeño de la máquina construida, sin restricciones mecánicas.



Figura 2.5 Medición de voltaje en los bornes del generador eléctrico

Fuente: Fotografía de los autores



Figura 2.6 Medición de corriente que soporta el generador eléctrico

Fuente: Fotografía de los autores

Tabla 2.3 Desempeño del generador a implementar en el sistema de vórtice gravitacional, sin restricciones mecánicas.

Velocidad de rotación	Corriente	Voltaje eficaz	Potencia eléctrica
115 rpm	1.2 A	7.70 V	9.24 W
162 rpm	1.8 A	10.80 V	19.44 W
227 rpm	2.5 A	14.93 V	37.33 W
306 rpm	3.1 A	20.09 V	62.28 W
430 rpm	3.8 A	28.00 V	106.40 W

Fuente: Diseño de los autores

La Tabla 2.4, resume los requerimientos técnicos del bloque de generación, a instalar en el sistema.

Tabla 2.4 Parámetros eléctricos del sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional.

Parámetro técnico	Turbina	Generador
velocidad de rotación	120 rpm, ± 10	115 - 430 rpm
torque	5 – 69, Nm	-
potencia	38 – 278, W	106, W

Fuente: Diseño de los autores

Considerando que en este proyecto, la energía aportada por el bloque de generación se almacenará en una batería alimentada a 12 VCD, se decidió que la máquina eléctrica

trabaje en un régimen tal que aporte 15 VCA. Este régimen es posible, para una velocidad en el eje de la máquina, equivalente a 227 rpm. De acuerdo a [5], el valor promedio de la velocidad de rotación de la rueda impulsora es de 81 rpm, entonces la relación de transmisión se calcula en:

$$i = \frac{227 \text{ rpm}}{81 \text{ rpm}}$$

$$i = 2.8 \quad 3$$

Para propósitos prácticos, la selección del sistema de transmisión se basa en la potencia de diseño, definida por la ecuación (2.8):

$$P_{dis} = P_{trans} F_{serv} \quad (2.8)$$

En dónde,

P_{dis} , es la potencia de diseño, W.

P_{trans} , es la potencia transmitida, W.

F_{serv} , es el factor de servicio.

El factor de servicio está relacionado con el tipo de máquina motriz, con el tipo de máquina conducida, con las vibraciones en la transmisión; con las horas de servicio, con las condiciones ambientales, etc. [6]. En una transmisión por fajas, sin sacudidas, con 3 horas diarias de operación, la bibliografía [6] recomienda un factor de servicio de 0.75. Por lo tanto, la potencia de diseño se aproxima a:

$$P_{dis} = 278 \text{ W} \cdot 0.75$$

$$P_{dis} = 208.5 \text{ W}$$

$$P_{dis} = 208.5 \text{ W} / 735$$

$$P_{dis} = 0.28 \text{ CV}$$

La selección de la sección de la correa, se basa en la velocidad de rotación de la polea conducida, y, en la potencia de diseño [6]. Como la polea conducida deberá girar a 227 rpm, y, la potencia de diseño es de 0.28 CV, la sección de la banda seleccionada es de tipo "A".

Conocida la sección de la banda a utilizar, se calcula los otros parámetros de diseño: diámetro de la polea conducida e impulsora, longitud de la banda, y, distancia entre el eje conducido e impulsor.

2.4.1 Diámetro de la polea conducida e impulsadora.

La selección del diámetro de las poleas, considera la relación de velocidad requerida, el diámetro tolerable en las diferentes secciones, la influencia del diámetro de la polea impulsora en la capacidad de transmisión de potencia en las fajas; y, la influencia del diámetro en las tensiones y fuerzas, en ejes y rodamientos.

A partir del diámetro de la polea impulsora, de 15.24 cm que corresponden a la medida estándar de 6 pulgadas tipo A, incluida en la turbina; y, considerando la relación de transmisión calculada, se obtuvo el diámetro de la polea conducida en 5.08 cm, correspondiente a la medida estándar de 2 pulgadas tipo A.

La distancia entre los ejes de las poleas, se determina a través de la ecuación (2.9):

$$C = \frac{D_1 + 3D_2}{2} \quad (2.9)$$

En dónde,

C, es la distancia entre ejes primitiva, cm.

D₁, es el diámetro polea conducida, cm.

D₂, es el diámetro polea impulsora, cm.

$$C = \frac{5.08 \text{ cm} + (3 \cdot 15.24 \text{ cm})}{2}$$

$$C = 25.4 \text{ cm}$$

Esta distancia, se conoce como primitiva ya que, sirva para evaluar la longitud primitiva de la banda, en correspondencia al valor normalizado más cercano.

La Tabla 2.5, resume los parámetros calculados.

Tabla 2.5 Diámetros y distancia primitiva entre ejes de las poleas.

diámetro polea impulsora [D₁]	15.24	cm
diámetro polea conducida [D₂]	5.08	cm
distancia entre ejes primitiva [C]	25.40	cm

Fuente: Diseño de los autores

2.4.2 Longitud de la banda.

Para una transmisión por banda abierta, la longitud primitiva de la banda se calcula por la expresión (2.10):

$$L = 2C + \frac{\pi(D_1+D_2)}{2} + \frac{(D_1-D_2)^2}{4C} \quad (2.10)$$

En dónde,

L, es la longitud primitiva de la banda, cm.

C, es la distancia entre ejes primitivo, cm.

D₁, es el diámetro polea conducida, cm.

D₂, es el diámetro polea impulsora, cm.

La longitud primitiva de la banda, para los valores ya calculados, se determinó en 83.73 cm. Considerando los valores normalizados de correas, y, las constantes de potencia (Tabla VI-5 de [10], se aproximó la longitud de la banda (L') a 88.9cm.

2.4.3 Distancia entre ejes, conducido e impulsador.

La distancia entre ejes correspondientes, se calcula a partir de la ecuación (2.11):

$$C' = C + \frac{L'-L}{2} \quad (2.11)$$

En dónde,

C', es la distancia entre ejes, cm.

C, es la distancia entre ejes primitivo, cm.

L', es la longitud de la banda, cm.

L, es la longitud primitiva de la banda, cm.

La Tabla 2.6, resumen los parámetros de la banda y distancia entre los ejes.

Tabla 2.6 Longitud de la banda y distancia entre ejes de las poleas.

longitud primitiva de la banda, [L]	83.73	cm
longitud de la banda normalizada A35 [L']	88.9	cm
distancia entre ejes [C']	27,98	cm

Fuente: Diseño de los autores

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL

3.1 Introducción

En este trabajo, se describe el diseño, construcción e implementación del bloque de generación eléctrica prediseñado en [8] para el sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional instalado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil, bajo responsabilidad de la Sección de Energía y Electrónica SEE del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica DCCE de la UTPL.

3.2 Diseño y construcción del generador eléctrico

En [8] se explicó las razones para seleccionar en este proyecto, un generador eléctrico tipo asíncrono monofásico de fase dividida (GAM-FD), cuyo funcionamiento se explica en [11] al referirse a transformadores rotatorios (Ver Fig. 3.1). Este tipo de máquinas eléctricas, permite generar voltajes senoidales, con errores de no más de 0.01% respecto a la senoide perfecta; mientras que la autoexcitación se logra a partir de un devanado auxiliar en el estator, situado a un ángulo eléctrico de 90° respecto al devanado principal.

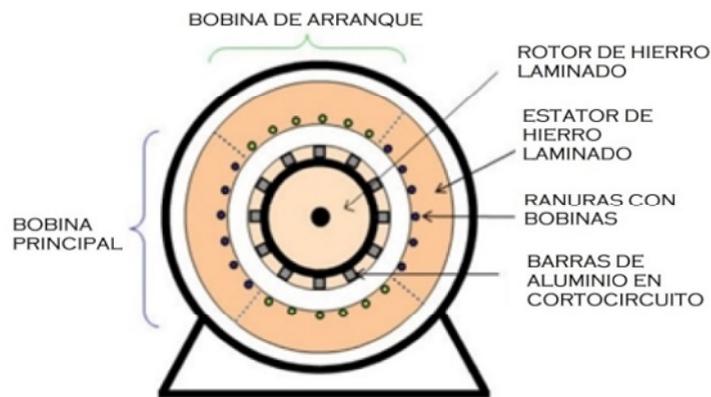


Figura 3.1 Esquema de un generador eléctrico asíncrono, monofásico de fase dividida.

Fuente:
http://www1.frm.utn.edu.ar/mielectricas/docs/APUNTES_MAQUINAS_ELECTRICAS-_U_3_v1.1.pdf

Para lograr que las corrientes que circulan por los devanados de un GAM-FD, estén desfasadas entre sí en un ángulo (ver Fig. 3.2), el devanado principal debe poseer gran reactancia y baja resistencia, mientras que el devanado auxiliar tiene gran resistencia y baja reactancia.

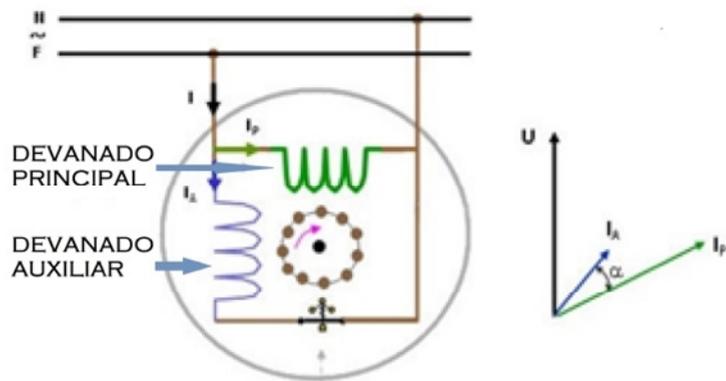


Figura 3.2 Diagrama fasorial de las corrientes del estator de un generador AC monofásico de fase dividida.

Fuente:
<http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/asincronas%20caminos.pdf>

La bibliografía explica que en un GAM-FD, el campo magnético entre el estator y el rotor debe ser lo más senoidal posible. Esto se logra seleccionando el número adecuado de polos y la sección correcta del conductor del devanado. Por otra parte, los GAM-FD deben arrancar en un régimen de vacío, para lograr estabilizar el voltaje, el flujo magnético, y, la fuerza electromotriz [11]. En el marco de este proyecto, considerando el objetivo general planteado, y, las limitaciones económicas, se decidió construir un GAM-FD con 6 polos en el rotor (Ver Fig.3.3), sin incluir el diseño del circuito de arranque.

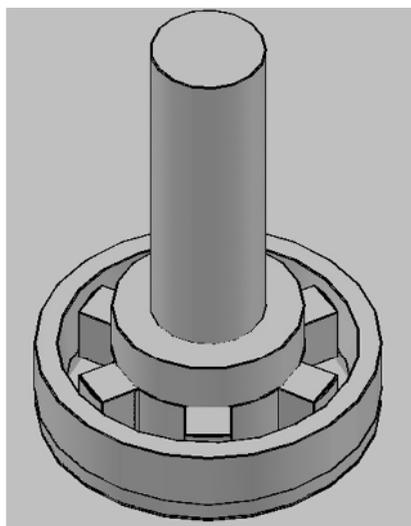


Figura 3.3 Vista 3D del GAM-FD a construir.

Fuente: Diseño de los autores

El rotor del GAM-FD se construyó con un rotor de hierro de 6 núcleos, con embobinados de conductor esmaltado AWG24, conectados en un esquema monofásico que facilita la rectificación del voltaje entregado y el posterior storage de energía en una batería [12]. La Fig.3.4 muestra una vista panorámica del GAM-FD implementado.



Figura 3.4 Máquina eléctrica implementada.

Fuente: Fotografía de los autores

Para salvaguardar la integridad del GAM-FD, la máquina se colocó dentro de una protección mecánica, tal como lo muestra la Fig. 3.5

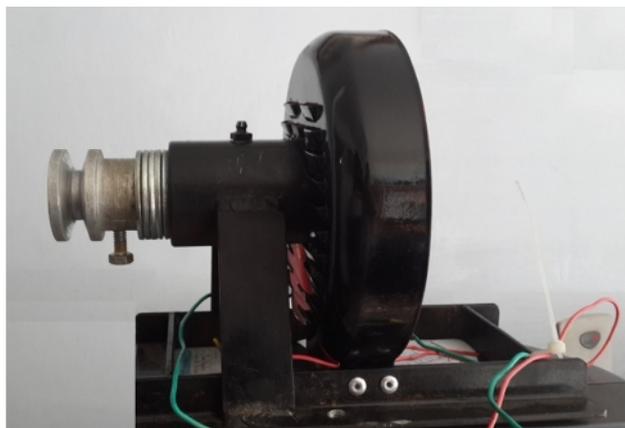


Figura 3.5 GAM-FD acoplado a la protección mecánica

Fuente: Fotografía de los autores

3.3 Implementación del bloque de generación eléctrica

Diseñado y construido el generador, este se instaló en la parte superior derecha del soporte mecánico del módulo de turbinas. Esta ubicación permitió instalar en forma directa, la transmisión mecánica entre el eje del rodete de la turbina y el eje del generador. En esta etapa del proyecto, se decidió reemplazar el volante diseñado y construido en [5], por una polea tipo A de 6 pulgadas. La Fig.3.6 muestra una vista panorámica del bloque instalado.



Figura 3.6 Bloque de generación eléctrica instalado en el banco hidráulico.

Fuente: Fotografía de los autores

3.4 Diseño e implementación del panel de control

En este proyecto, se decidió complementar el bloque de generación eléctrica, con un panel de control, con los recursos suficientes para permitir valorar el desempeño y monitorear el funcionamiento del sistema. La Fig. 3.7 muestra el diagrama eléctrico propuesto para el panel requerido.

Los elementos requeridos en el diagrama eléctrico, se ubican dentro de un armario metálico diseñado con 3 secciones (Ver Fig. 3.8). En la primera, se incluye la batería, la placa de rectificación y filtrado, y, el regulador de voltaje. En la segunda, se ubica la placa de adquisición de datos, la placa de procesamiento de información (montada sobre un Arduino Mega 2560), y, la placa de comunicación y registro (Arduino Ethernet Shield). En la tercera

sección, se coloca un ventilador para mantenimiento de temperatura en el panel. La Fig. 3.9, muestra el tablero completo

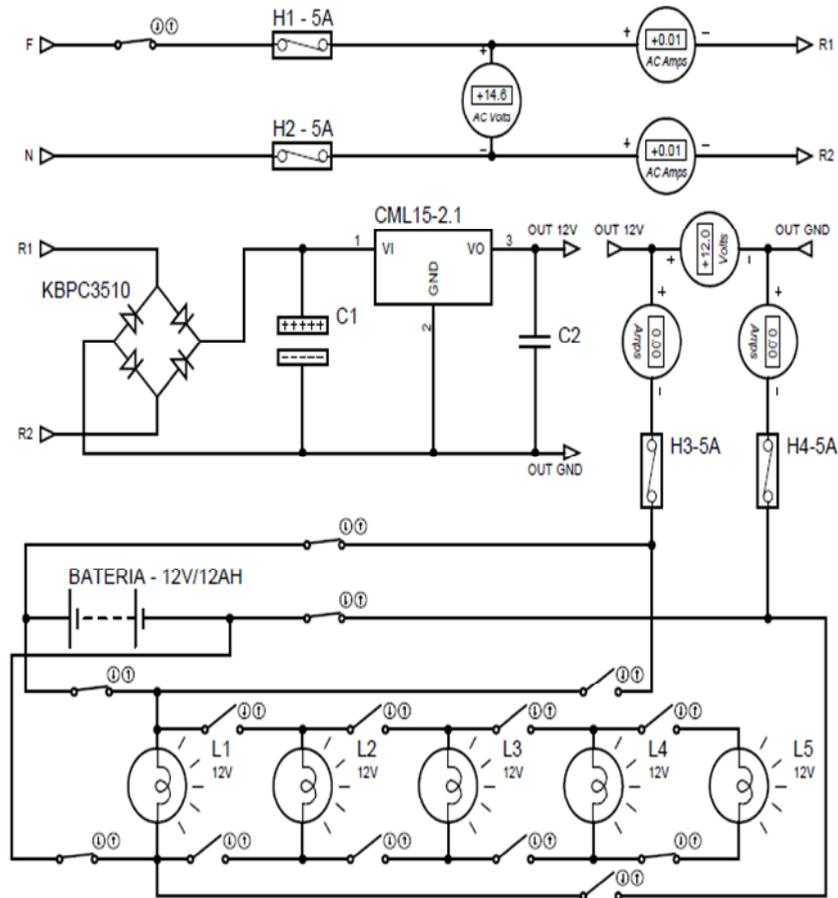


Figura 3.7 Diagrama eléctrico del tablero de control.

Fuente: Diseño de los autores

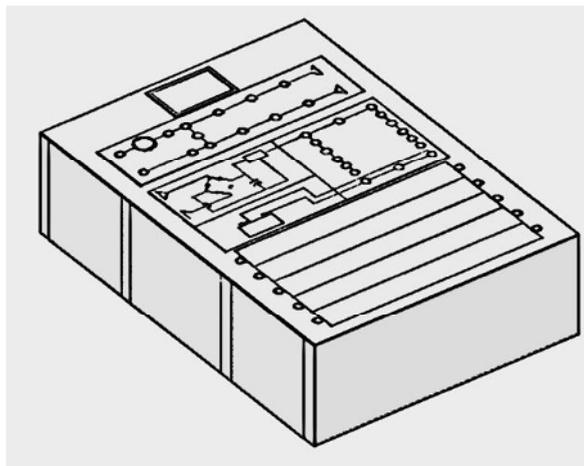


Figura 3.8 Vista del tablero metálico del panel de control.

Fuente: Diseño de los autores



Figura 3.9 Tablero del panel de control instalado

Fuente: Fotografía de los autores

Como batería se seleccionó el modelo VRLA de 12 V y 12AH [13] (Ver Fig. 3.10), cuyo tiempo de carga se calcula a través de la expresión (3.1). Para una corriente nominal del generador de 2A, el tiempo de carga de la batería es de 6h.

$$t_c = \frac{I_B}{I_G} (3.1)$$

En dónde,

t_c , es el tiempo de carga de la batería, h.

I_B , es la carga eléctrica de la batería, mAh.

I_G , es la corriente que soporta el generador, mA.



Figura 3.10 Batería VRLA de 12V y 12AH.

Fuente: Fotografía de los autores

Para la rectificación y filtrado, se utilizó un rectificador de onda completa KBPC3510, conectado a un arreglo de capacitores. Las Fig. 3.11 y 3.12 muestran el diseño de la placa de rectificación y filtrado, mientras que la Fig. 3.13 muestra la implementación física en fibra de vidrio.

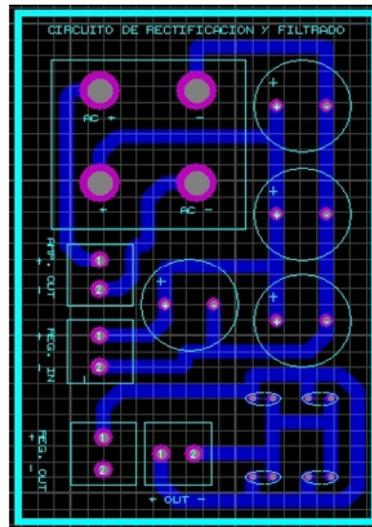


Figura 3.11 Diseño de la placa de rectificación y filtrado en PCB.

Fuente: Diseño de los autores

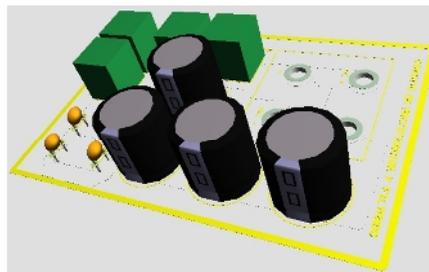


Figura 3.12 Diseño de la placa de rectificación y filtrado en PCB 3D.

Fuente: Diseño de los autores



Figura 3.13 Construcción de la placa de rectificación y filtrado.

Fuente: Fotografía de los autores

Para la etapa de regulación de voltaje se utilizó un regulador CML15-2.1, con regulación tipo PWM. Este regulador trabaja entre 12V y 24V, soportando corrientes de carga de hasta 15A [14] (Ver Fig.3.14).



Figura 3.14 Regulador de voltaje CML15-2.1.

Fuente: Fotografía de los autores

Para evaluar el desempeño del sistema, se decidió utilizar una carga tipo resistiva. Se seleccionó entonces lámparas LED, alimentadas a 12VDC y con un consumo de corriente de 0.4A (Ver Fig. 3.15).



Figura 3.15 Lámparas LED a utilizar como carga resistiva para evaluación del desempeño del bloque de generación.

Fuente: Fotografía de los autores

El diseño de los componentes del nodo de monitoreo, se explica en un trabajo posterior.

Para la climatización de los componentes electrónicos en el tablero, se utilizó un ventilador común de 12 VCD.

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO DEL MÓDULO DE MONITOREO DEL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL

4.1 Introducción

En un sistema de hidrogenación, especial atención merece el monitoreo de los parámetros que caracterizan el funcionamiento, como condición básica para una gestión eficiente del sistema.

En este trabajo se describe el diseño de un módulo de monitoreo del funcionamiento del bloque de generación eléctrica de un sistema de hidrogenación basada en el aprovechamiento de un vórtice gravitacional, que fuera implementado con el carácter de experimental en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil, bajo responsabilidad de la Sección de Energía y Electrónica SEE del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica DCCE de la UTPL.

4.2 Requerimientos de diseño del módulo de monitoreo

4.2.1 Arquitectura propuesta para el módulo de monitoreo

La Fig. 4.1, muestra la arquitectura propuesta para el módulo de monitoreo a diseñar. Las variables medibles, identificadas en el proyecto, se adquieren y acondicionan a través del nodo de adquisición de datos. La información recopilada, sirve de base para el cálculo de otras variables en el nodo de procesamiento. La data resultante, se almacena temporalmente, previo su transmisión, desde el nodo de comunicación al nodo de registro. Simultáneamente, la información relevante, se muestra en el nodo de visualización, ubicado en las cercanías del sistema de hidrogenación. Finalmente, la data se registra permanentemente en el nodo de registro.

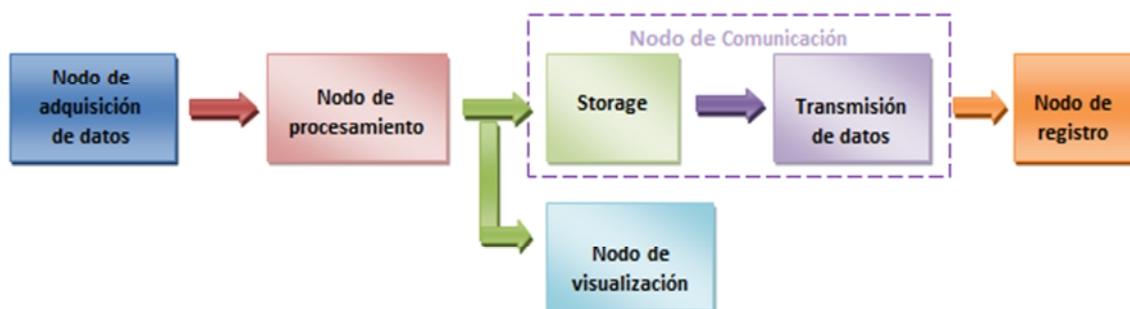


Figura 4.1 Arquitectura propuesta para el módulo de monitoreo.

Fuente: Diseño de los autores

4.2.2 Paradigma de monitoreo

En el marco de este proyecto, se definió la necesidad de aproximar la energía generada en el bloque de hidrogenación, y, calcular la eficiencia de conversión de energía mecánica en energía eléctrica en el bloque de generación.

Dadas las características del sistema, se decidió aproximar la energía eléctrica generada por el bloque de generación, en función al caudal en el vórtice, tal como lo muestra la expresión (4.1):

$$E = f(Q) \quad (4.1)$$

En dónde,

E, es la energía eléctrica generada, Wh.

Q, es el caudal del banco hidráulico, l/s.

La energía eléctrica generada puede ser expresada a través de la potencia eléctrica desarrollada en un intervalo de tiempo. Esta potencia eléctrica, a su vez, se determina aproximadamente como el producto entre los valores eficaces de voltaje y corriente.

Entonces, se planteó expresar el voltaje entre los bornes del bloque de generación, como función del caudal en el vórtice, y, de la velocidad de rotación del eje del rodete acoplado a la turbina, tal como lo expresa la ecuación (4.2):

$$V = f(Q, N) \quad (4.2)$$

En dónde,

V, es el voltaje en los bornes del generador, V.

Q, es el caudal del banco hidráulico, l/s.

N, es la velocidad de rotación del eje del rodete acoplado a la turbina, rpm.

Por su parte, la eficiencia de conversión de energía en el bloque de generación, se calcula a través de la expresión (4.3):

$$\eta = \frac{P_e}{P_m} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

En dónde,

, es la eficiencia del bloque de generación.

P_e , es la potencia eléctrica entregada por el generador, W.

P_m , es la potencia mecánica entregada por la turbina acoplada al banco hidráulico, W.

4.2.3 Identificación de variables

La Tabla 4.1 resume las variables identificadas para el monitoreo. Un grupo de estas variables, las denominadas a medir, serán registradas por sensores debidamente seleccionados. El otro grupo, las variables a calcular, se obtendrán como resultado del procesamiento de las variables medidas, de acuerdo a algoritmos predefinidos.

Tabla 4.1 Variables identificadas para el monitoreo

Variable	Símbolo	Unidad	Rango de variación
Variables a medir			
Voltaje eficaz	VAC	V	0 a 20
Corriente eficaz	IAC	A	0 a 5
Tirante de agua	h	cm	2 a 40
Velocidad de rotación	n	rpm	0 a 300
Voltaje en la batería	VDC	V	0 a 12
Variables a calcular			
Potencia eléctrica	P_e	W	0 a 100
Potencia mecánica	P_m	W	0 a 300
Eficiencia		-	0 - 100
Factor de potencia	F_p	-	0 a 1
Energía eléctrica	E_e	Wh	0 a 100
Energía mecánica	E_m	Wh	0 a 300
Caudal	Q	l/s	50

Fuente: Diseño de los autores

4.3 Diseño del módulo de monitoreo

4.3.1 Selección de instrumentación

Para el registro de las 5 variables a medir, se decidió utilizar la instrumentación que se detalla en la Tabla 4.2.

Para montar el nodo de procesamiento, se optó por emplear los recursos de Arduino, una plataforma de creación de prototipos electrónicos de bajo costo, de código abierto basado en flexibilidad, con hardware y software fácil de usar, y, de amplios recursos de conectividad [15].

Tabla 4.2 Instrumentación seleccionada para el registro de las variables a medir.

Variable a medir	Instrumento de medición
voltaje eficaz	divisor de voltaje para tensión AC
corriente eficaz	amperímetro con resistor shunt
tirante de agua	sensor ultrasónico HC-SR04
velocidad de rotación	sensor de velocidad HC-020K
voltaje en la batería	divisor de voltaje para tensión DC

Fuente: Diseño de los autores

En el marco de este proyecto, se decidió usar una placa Arduino Mega 2560. Las variables a medir ingresarán a la placa en forma de voltajes discretos, acondicionados de acuerdo a las especificaciones descritas en la bibliografía [16].

4.3.2. Registro de voltaje eficaz en los bornes del generador

De acuerdo a la bibliografía [17], para la medición de voltaje en placas Arduino, se requiere reducir la amplitud de onda, y, desplazar la señal a lo largo del eje y para desplazar valores negativos. La amplitud de la onda se reduce en un divisor de tensión conectado entre los terminales del generador; y, el desplazamiento se logra usando una fuente de tensión creada por otro divisor, conectado a través de la alimentación de la placa (Ver Fig. 4.2).

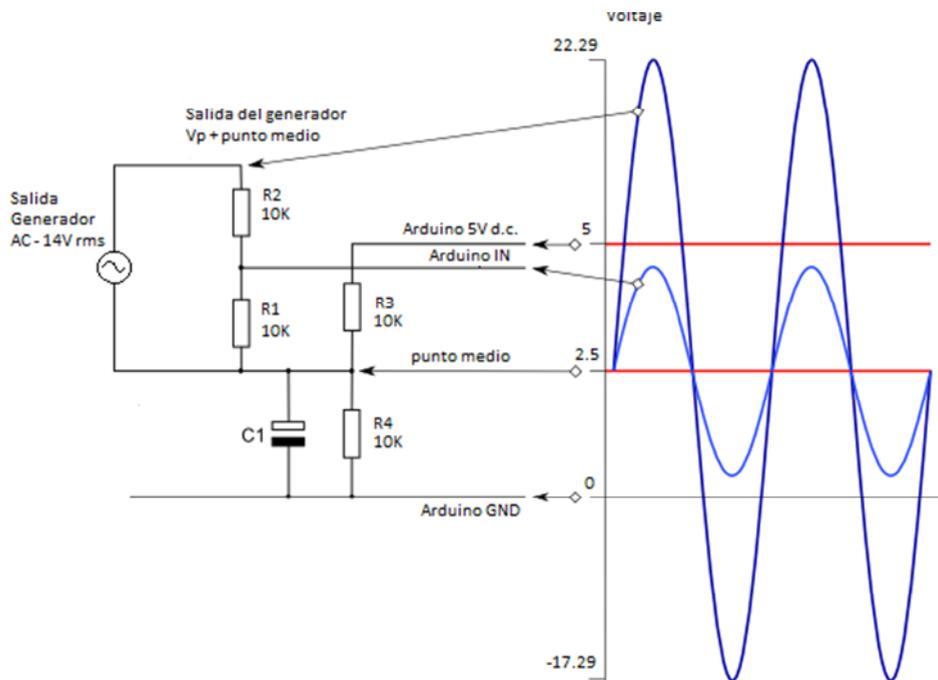


Figura 4.2 Diagrama del circuito para medición de voltaje con la placa Arduino, y, forma de onda esperada para la señal

Fuente: Diseño de los autores [4]

Las pruebas efectuadas en el bloque de generación, mostraron que el voltaje eficaz AC variaba entre 13.5V y 14.5V (Ver Fig. 4.3). Para el cálculo de los componentes de los divisores de tensión, se decidió emplear el voltaje eficaz promediado equivalente a 14 VCA, con un voltaje pico de 19,79VCA.

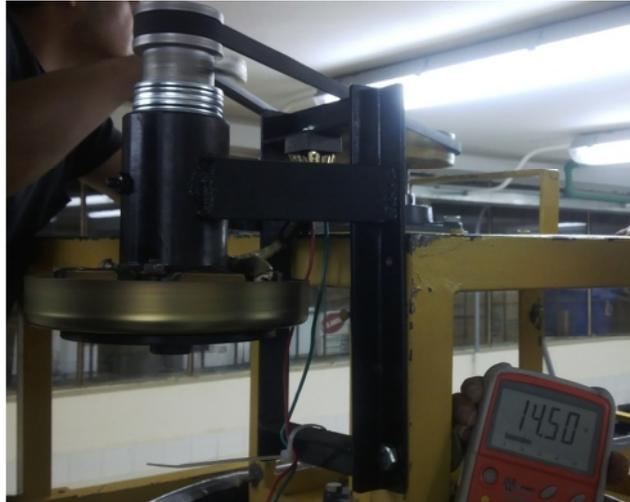


Figura 4.3 Medición del voltaje eficaz en los bornes del bloque de generación.

Fuente: Fotografía de los autores

El voltaje de desplazamiento de la señal, se determina de acuerdo a la expresión (4.4):

$$V = \frac{R_4}{R_3+R_4} V_{ard} \quad (4.4)$$

En dónde,

V , es el voltaje de desplazamiento, V.

R_3, R_4 , son las resistencias del divisor, Ω .

V_{ard} , es el voltaje de alimentación de la placa, V.

De acuerdo a la bibliografía [17], el voltaje de desplazamiento debe ser igual a la mitad de la tensión de la alimentación de la placa, razón por la cual R_3 y R_4 deben ser iguales. En este proyecto, el voltaje de desplazamiento será de 2,5 V, y, se emplearán resistores con resistencias equivalentes a 10 k Ω . El uso de resistores de alta resistencia, pretende reducir el consumo de energía en la placa.

Según la bibliografía [17], para R1 se asigna un valor de 10 k . De acuerdo al esquema mostrado en la Fig. 4.2, a través de R1 y R2, fluye una corriente eléctrica de 2,5 mA. Entonces, el valor de R2 se puede aproximar utilizando la expresión (4.5), considerando que la caída de tensión en R2 es de 19.79 Vp:

$$R_2 = \frac{V}{I} \quad (4.5)$$

En dónde,

R_2 , es el valor del resistor, .

V , es el voltaje pico de salida del generador, V.

I , es la corriente que circula por R1 y R2, A.

Con estas consideraciones, el valor de R2 se calcula en 10 K .

De esta manera, el voltaje eficaz del generador, a través de las medidas en la placa, se expresa como (4.6):

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} v^2(n)}{N}} \quad (4.6)$$

En dónde,

V_{rms} , es el voltaje eficaz medido en el generador, V.

$v(n)$, es el voltaje instantáneo en la entrada de la placa, V.

N , es el número de muestras.

4.3.3. Registro de la corriente eficaz en el circuito de carga

La Fig.4.4 muestra el esquema de medición de la corriente eficaz. Un transformador de corriente (sensor CT o SCT), se conecta en paralelo con un resistor de carga (resistor Burden) que entrega una tensión proporcional a la cantidad de corriente que circula a través de la carga.

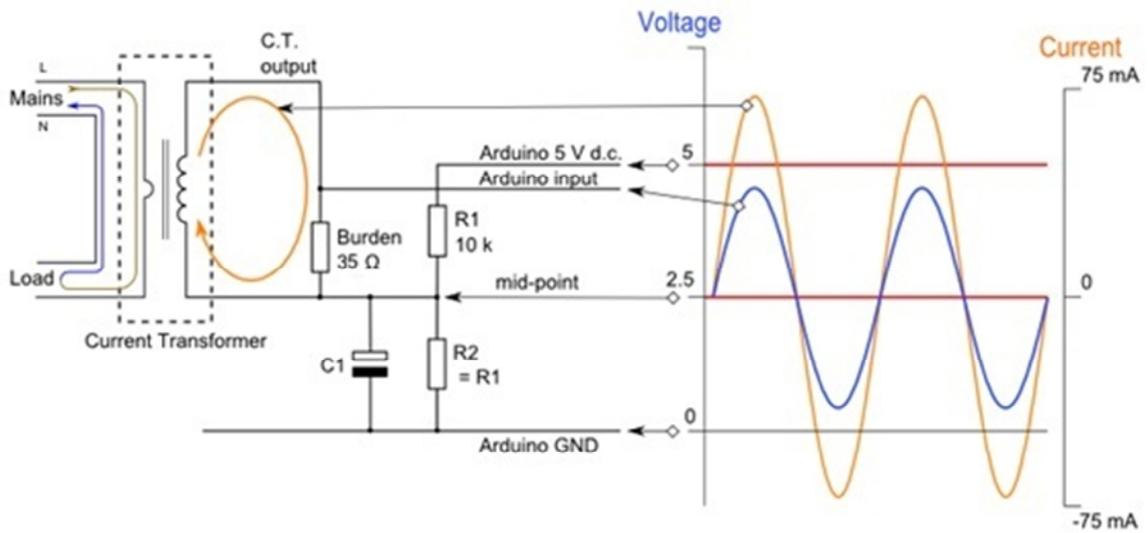


Figura 4.4 Diagrama del circuito para medición de la corriente eficaz.

Fuente: Diseño de los autores [4]

De acuerdo a la bibliografía [18], el cálculo del resistor Burden se realiza a través de la expresión (4.7):

$$R_{Burden} = \frac{V_{ref} N}{2 I_p} \quad (4.7)$$

En dónde,

R_{Burden} , es el valor del resistor Burden, Ω .

V_{ref} , es el voltaje de referencia de la placa Arduino, V.

N_b , es el número de espiras del bobinado secundario del transformador.

I_p , es la corriente pico del sensor, A.

Dada su disponibilidad en el mercado, se decidió utilizar un SCT tipo SCT-013-000, que posee un rango de corriente entre 0 y 100A, con una corriente pico máxima de 141.4 A. En su embobinado secundario tiene 2000 espiras, con una resistencia de 35,4 Ω .

Entonces, la corriente eficaz se define de acuerdo a la expresión (4.8):

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} i^2(n)}{N}} \quad (4.8)$$

En dónde,

I_{rms} , es la corriente eficaz, A.

$i(n)$, es la corriente instantánea, A.

m , es el número de muestras.

4.3.4. Registro de la altura del tirante de agua en el canal

Con la intención de determinar el caudal en el vórtice gravitacional, se decidió instalar, en el canal del banco hidráulico (Ver Fig. 4.5), un sensor de ultrasonido tipo HC- SR04 (Ver Fig. 4.6), capaz de medir el tirante de agua en esa sección del canal.

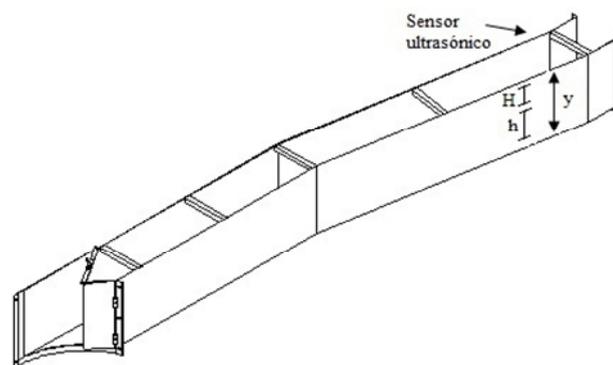


Figura 4.5 Esquema de ubicación del sensor ultrasónico en el canal hidráulico. Diseño de los autores. y – altura del canal, h – altura del tirante de agua, H – diferencia entre la altura del canal y la altura del tirante de agua.

Fuente: Diseño de los autores



Figura 4.6 Vista general del sensor ultrasónico HC-SR04

Fuente: users.ece.utexas.edu/.../Datasheets/HCSR04b.pdf

El sistema ultrasónico de medición de nivel, se basa en la emisión de un impulso ultrasónico hacia una superficie reflectante, y, la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco, dependerá entonces del nivel del tanque. A la salida del sensor

seleccionado, se obtiene un tren de pulsos, cuyo número es proporcional al tiempo transcurrido. Al multiplicar el número de pulsos por la duración de los mismos, se aproxima el tiempo de tránsito del sonido

Conocido el tiempo de tránsito del sonido, el nivel del líquido en el tanque, se obtiene a través de la expresión (4.9) [19]:

$$H = \frac{v \cdot t}{2} \quad (4.9)$$

En dónde,

H, es la altura desde la película de agua hasta la ubicación del sensor, cm.

v, es la velocidad del sonido en el aire, 34000 cm/s.

t, es el tiempo de tránsito del sonido, s.

En la lectura del sensor, pueden influir varios factores, como la presencia de espuma en la superficie del líquido que absorbe el sonido, la turbulencia extrema en el seno del líquido, el movimiento de la superficie del líquido; así como también el material y el estado de las paredes del tanque. Todos estos factores pueden compensarse con circuitos amortiguadores o temporizadores[19].

La altura del tirante de agua se calcula a través de la expresión (4.10):

$$h = y - H \quad (4.10)$$

En dónde,

h, es la altura del tirante de agua, cm.

y, es la altura total, cm.

H, es la altura medida por el sensor, cm.

4.3.5. Registro de la velocidad de rotación del eje de la turbina

Para el registro de la velocidad de rotación del eje de la turbina, se decidió instalar un encoder en el bloque de hidrogenación, tal como lo muestra la Fig.4.7.

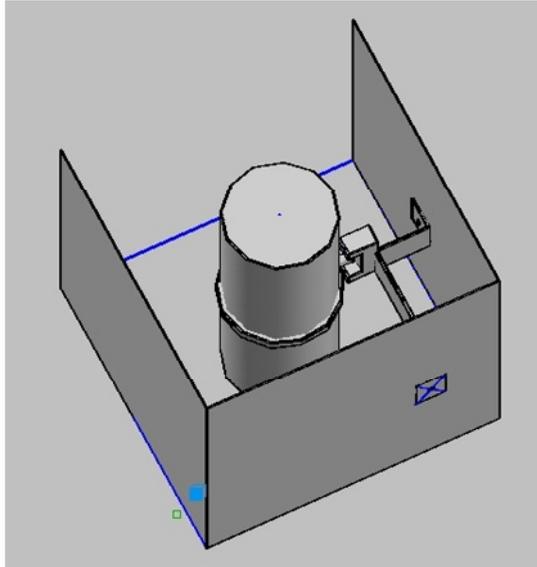


Figura 4.7 Esquema de acople del encoder al eje de rodete de la turbina

Fuente: Diseño de los autores

En el marco de este proyecto, se decidió emplear un encoder HC-020K (Ver Fig. 4.8). Este transductor rotativo, transforma el movimiento angular en una serie de impulsos digitales, con una resolución de 20 pulsos por cada revolución. La velocidad de rotación se calcula a través de una interrupción programada, que cuenta los pulsos generados en un determinado intervalo de tiempo, considerando la sensibilidad del encoder, tal como lo muestra la expresión (4.11) [20]:



Figura 4.8 Vista general del encoder HC-020K

Fuente: <http://www.godeal.com.ar/p/hc-020k-velocidade-dupla-modulo-de-medicao-w-encoders-fotoeletricos-preto-verde-2-pcs-21941>

$$N = \frac{n \cdot 60}{t \cdot S} \quad (4.11)$$

En dónde,

N , es la velocidad de rotación, rpm.

n , es el número de pulsos generados.

t , es el tiempo de generación de los pulsos en una revolución, s.

S , es la resolución del encoder, pulsos/revolución

4.3.6. Registro del nivel de voltaje en la batería

Para medir el nivel de voltaje en la batería con ayuda de la placa Arduino, se acordó emplear un divisor de tensión (Ver Fig. 9), capaz de acondicionar la señal de voltaje de 12V a 5 V. Los componentes del divisor de tensión, se calculan a través de la expresión (4.12):

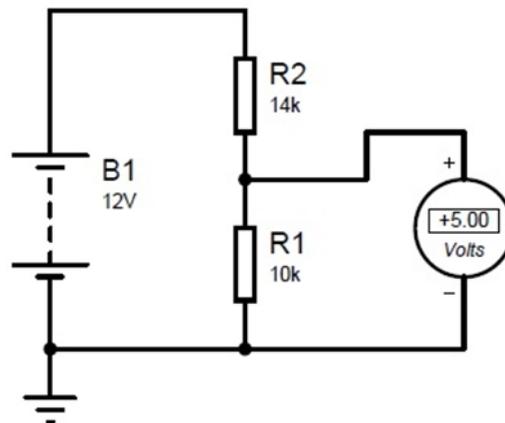


Figura 4.9 Divisor de tensión utilizado para medir el nivel de voltaje en la batería

Fuente: Diseño de los autores

$$V_{ard} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V \quad (4.12)$$

En dónde,

V , es el voltaje en la batería, V.

R_1, R_2 , son las resistencias del divisor, .

V_{ard} , es la tensión de que ingresa al Arduino, V.

Para un valor de R1 de 10 K , se obtiene un valor de R2 de 14 K .

4.4 Definición de algoritmos a implementar en el nodo de procesamiento

4.4.1. Algoritmo a implementar para calcular el caudal

Obtenido el valor de la altura del tirante de agua en el canal, el caudal en el vórtice se obtendrá a través de la expresión (4.13) [21]:

$$Q = C A \sqrt{2 * g * h} \quad (4.13)$$

En dónde,

Q, es el caudal del banco hidráulico, m³/s.

C, es el coeficiente de descarga para un canal hidráulico rectangular, 0.9.

A, es el área del canal rectangular, m².

g, es la aceleración de la gravedad, m/s².

h, es la altura del tirante de agua, m.

4.4.2. Algoritmo a implementar para calcular la potencia eléctrica

Al sistema de hidrogenación, como cargas experimentales, se conectará cargas resistivas (lámparas LED). Estas cargas consumirán potencia activa, cuyo valor numérico se determinará con la ecuación (4.14) [22]:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v(n) i(n) \quad (4.14)$$

En dónde,

P, es la potencia activa, W.

v(n), es el voltaje instantáneo, V.

i(n), es la corriente instantánea, A.

4.4.3. Algoritmo a implementar para calcular el factor de potencia

Para determinar el factor de potencia, se utilizará las potencias activa y aparente.

La potencia aparente, se define de acuerdo a la ecuación (4.15):

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (4.15)$$

En dónde,

S , es la potencia aparente, VA.

V_{rms} , es el voltaje eficaz, V.

I_{rms} , es la corriente eficaz, A.

Entonces, el factor de potencia se define a través de la expresión (4.16):

$$\cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (4.16)$$

En dónde,

ϕ , es el factor de potencia.

P , es la potencia activa, W.

S , es la potencia aparente, VA.

4.4.4. Algoritmo para calcular la potencia mecánica

En[23], se estableció la relación existente entre el torque en el eje de la turbina, el caudal en el vórtice, y, la velocidad de rotación del eje (Ver Tabla 4.3).

La información obtenida sobre el valor del torque en el eje, servirá de base para calcular la potencia mecánica a través de la expresión (4.17):

$$P_m = T N \quad (4.17)$$

En dónde,

P_m , es la potencia mecánica o par motor, W.

T , es el torque o momento de torsión, Nm.

N , es la velocidad de rotación, rpm.

Tabla 4.3 Torque en el eje de la turbina del sistema de hidrogenación, en función del caudal y velocidad de rotación.

rpm	caudal			
	15l/s	25l/s	40l/s	50l/s
0	25.63	44.42	54.37	69.75
10	22.73	41.13	49.60	65.85
20	19.77	37.77	44.95	61.72
30	16.75	34.33	40.42	57.34
40	13.67	30.80	36.01	52.72
50	10.53	27.20	31.72	47.86
60	7.33	23.51	27.55	42.76
70	4.07	19.75	23.50	37.43
80	0.75	15.91	19.57	31.85
90	-	11.98	15.76	26.03
100	-	7.98	12.07	19.97
110	-	3.89	8.50	13.67
120	-	-	5.05	7.14
130	-	-	1.72	0.36
140	-	-	-	-
Torque (Nm)				

Fuente: Diseño de los autores

4.4.5. Algoritmo a implementar para calcular la energía eléctrica y mecánica

La energía eléctrica aportada por el bloque de generación, se calculará a través de la ecuación (4.18):

$$E_e = P \cdot t \quad (4.18)$$

En dónde,

E_e , es la energía eléctrica aportada, Wh.

P , es la potencia eléctrica demandada por una carga resistiva, W.

t , es el tiempo de consumo, h.

La energía mecánica en el eje de la turbina, se calculará a través de la ecuación (4.19):

$$E_m = P_m \cdot t \quad (4.19)$$

En dónde,

E_m , es la energía mecánica en el eje de la turbina, Wh.

P_m , es la potencia mecánica en el eje de la turbina, W.

t , es el tiempo de observación, h

4.4.6. Algoritmo a implementar para calcular la eficiencia

La eficiencia del sistema de hidrogenación, se calcula utilizando la ecuación (4.3).

4.5 Diseño del nodo de visualización

Las variables medidas y calculadas, serán mostradas a través de un pantalla tipo GLCD, conectada a la placa Arduino, tal como muestra la Fig. 4.10. La pantalla GLCD se ubicará en la parte superior central de un tablero de control a implementar en las inmediaciones del sistema de hidrogenación (Ver Fig.4.11). Este tablero incluirá nodos de rectificación, filtrado, y, storage, cuyo diseño e implementación se explicará en el siguiente capítulo.

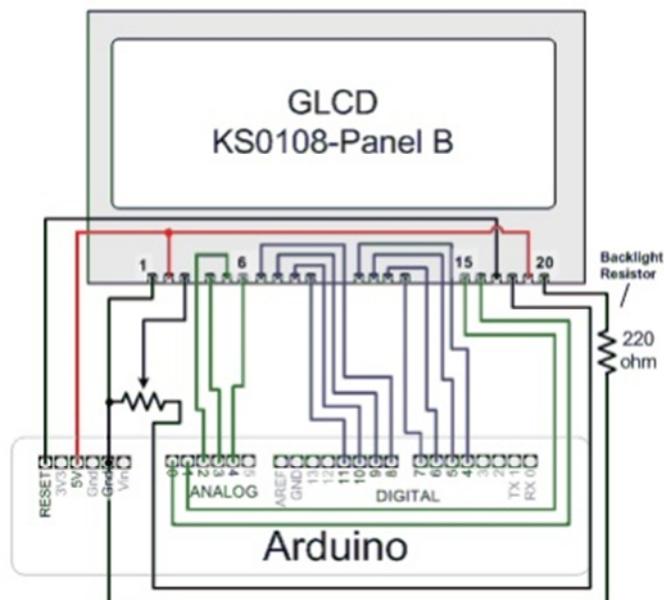


Figura 4.10 Conexión de la pantalla GLCD con la placa Arduino

Fuente:

http://playground.arduino.cc/uploads/Code/GLCD_Documentation.pdf

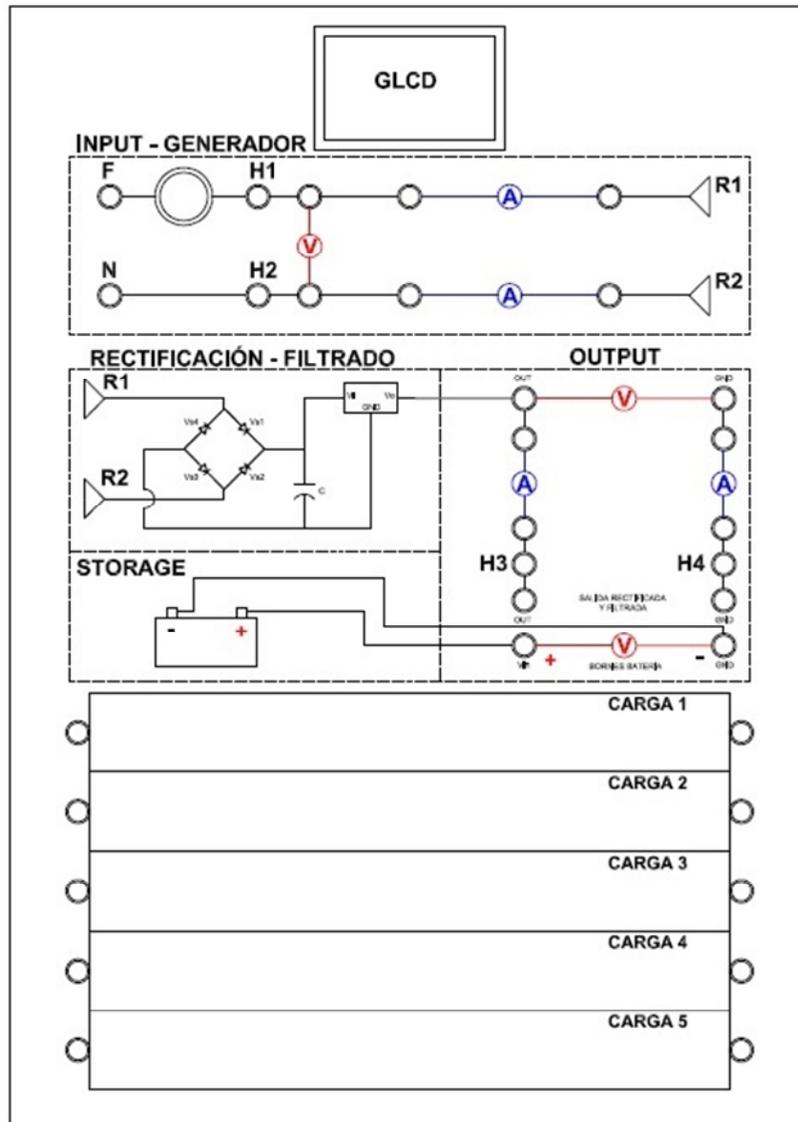


Figura 4.11 Esquema del tablero de control a implementar en el sistema de hidrogenación

Fuente: Diseño de los autores

4.6 Diseño del nodo de comunicación

Este nodo consta de dos subnodos: storage y transmisión de datos.

4.6.1. Bloque de storage

El subnodo de storage se propuso como un almacenamiento temporal, que permita recibir la información medida y calculada, previo su transmisión al nodo de registro, y, su presentación en el nodo de visualización.

Considerando la cantidad de información que se requiere almacenar en el subnodo de storage, este se construirá sobre una placa Arduino Ethernet Shield [24], que dispone de un zócalo para tarjetas de memoria micro-SD, que permite almacenar hasta 4GB de información.

4.6.2. Bloque de transmisión de datos

Para la transmisión de data entre el subnodo de storage y el nodo de registro, se utilizará los recursos de comunicación Ethernet a través de la misma placa Arduino Ethernet Shield [25].

4.7 Diseño del nodo de registro

El nodo de registro deberá garantizar la correcta recepción de la información emitida desde el nodo de comunicación.

En la SEE del DCCE UTPL, se mantiene una línea de trabajo relacionada al diseño e implementación de soluciones de telemetría de bajo costo. Para este proyecto, se decidió utilizar una herramienta desarrollada con anterioridad, que utiliza recursos de Arduino, LabVIEW, y, Microsoft Access [24].

CAPÍTULO 5

5. IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE MONITOREO PARA EL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL

5.1 Introducción

La adquisición de datos relevantes sobre el desempeño, es parte fundamental en el estudio de los sistemas de hidrogenación basadas en vórtice gravitacional. En este sentido, dentro de este proyecto, se decidió diseñar e implementar un módulo de monitoreo, conformado por nodos de adquisición de datos, procesamiento, comunicación, visualización, y registro. Recordamos la Fig.5.1, la cual muestra la arquitectura propuesta para el módulo requerido. [26]

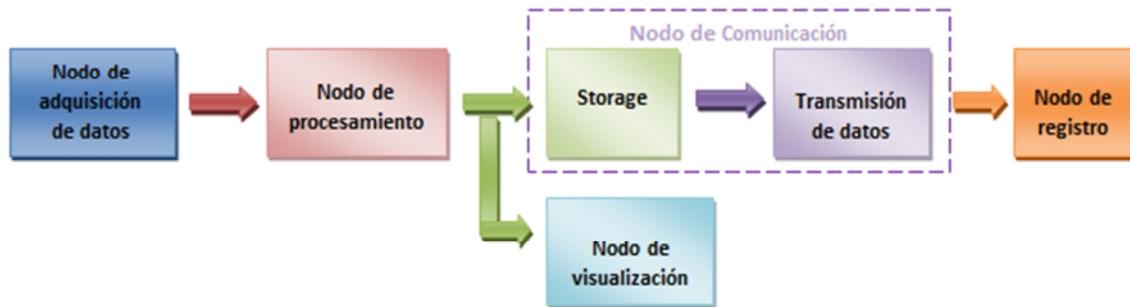


Figura 5.1 Arquitectura propuesta para el módulo de monitoreo.

Fuente: Diseño de los autores

En este trabajo se describe los resultados obtenidos en las fases de implementación, y, evaluación del desempeño del módulo.

5.2 Implementación del nodo de adquisición de datos

El nodo de adquisición de datos del módulo diseñado, permite obtener información sobre el voltaje eficaz a la salida del generador, de la corriente eficaz en el circuito de carga, del voltaje DC en los bornes de la batería, del tirante de agua en el canal hidráulico, y, de la velocidad de rotación del eje de la turbina.

5.2.1 Registro de voltaje eficaz, y, voltaje DC

En un trabajo anterior [26], se definió el diseño del circuito de acondicionamiento de señal para la adquisición de voltaje eficaz, corriente eficaz, y, voltaje DC (Ver Fig. 5.2, 5.3, y, 5.4).

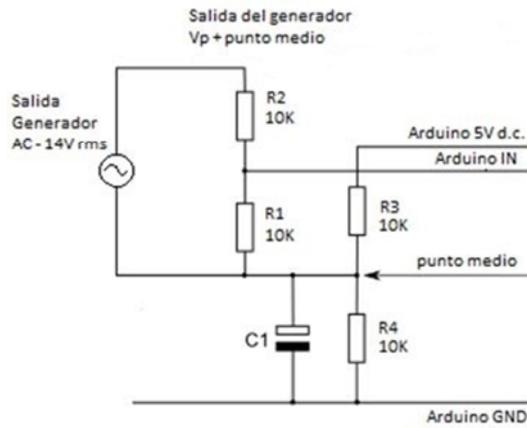


Figura 5.2 Diagrama del circuito de acondicionamiento de voltaje eficaz, construido sobre una placa Arduino

Fuente:

<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/measuring-voltage-with-an-acac-power-adapter>

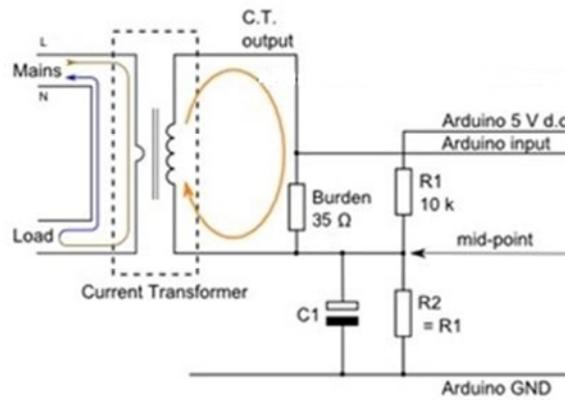


Figura 5.3 Diagrama del circuito de acondicionamiento de corriente eficaz, construido sobre una placa Arduino

Fuente: <http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/ct-sensors-interface>

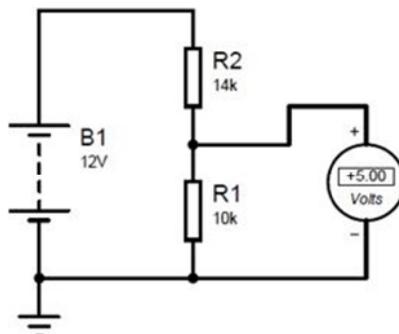


Figura 5.4 Diagrama del circuito de acondicionamiento de voltaje DC, construido sobre una placa Arduino

Fuente: Diseño de los autores

Las Fig. 5.5, 5.6, y 5.7, muestran el proceso de implementación de la placa electrónica para acondicionar las señales de voltaje eficaz y voltaje DC. La placa se diseñó en PCB, y se construyó en fibra de vidrio, utilizando elementos electrónicos disponibles en el mercado local, de acuerdo a las especificaciones técnicas descritas en [26].

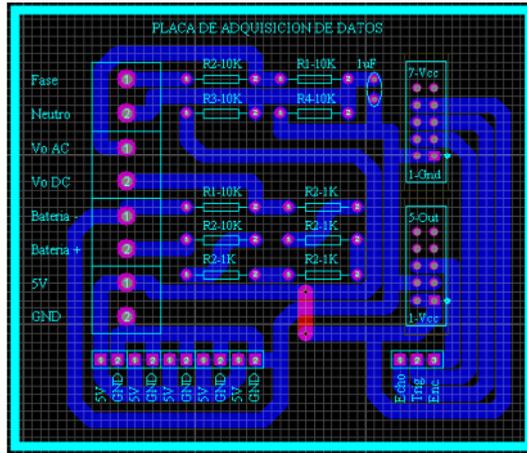


Figura 5.5 Diseño de la placa de acondicionamiento de voltaje eficaz y voltaje DC, en PCB.

Fuente: Diseño de los autores

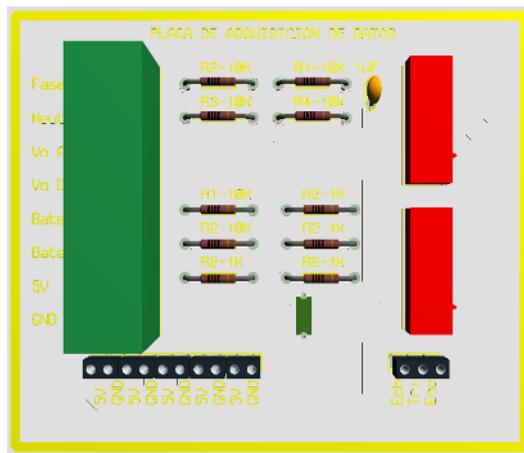


Figura 5.6 Diseño 3D de la placa de acondicionamiento de voltaje eficaz y voltaje DC, en PCB.

Fuente: Diseño de los autores

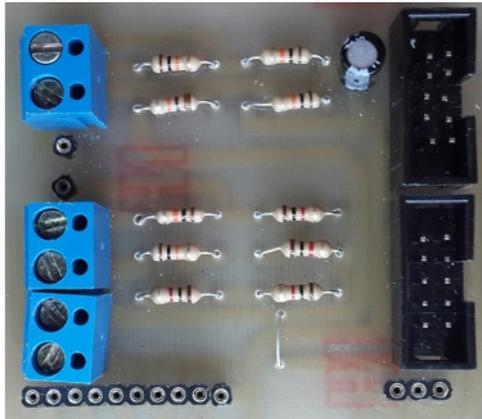


Figura 5.7 Placa de acondicionamiento de voltaje eficaz y voltaje DC construida.

Fuente: Diseño de los autores

En la Fig.5.8 se muestra el esquema eléctrico requerido para registrar los valores del voltaje eficaz (entre los terminales fase y neutro del panel de control), y, voltaje DC (entre los terminales out y GND del panel de control). Una vez configurado el esquema en el panel de control, conexiones internas alimentan las entradas respectivas en la placa de acondicionamiento (Ver Fig.5.9). Esta a su vez, se conecta a la placa Arduino.

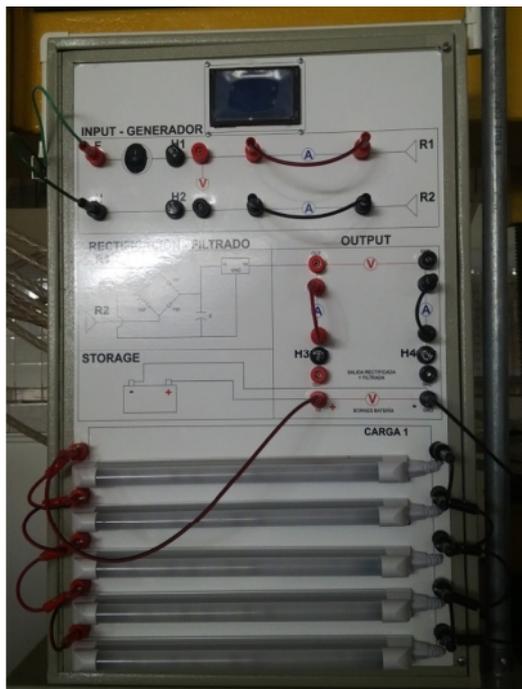


Figura 5.8 Esquema eléctrico montado sobre el panel de control, para registro e voltaje eficaz a la salida del generador, y, de voltaje DC a la salida del bloque de rectificación y filtrado

Fuente: Fotografía de los autores



Figura 5.9 Esquema eléctrico de conexiones internas en el panel de control.

Fuente: Fotografía de los autores

Para valorar el funcionamiento de la placa de acondicionamiento, se decidió comparar el voltaje eficaz y el voltaje DC registrados utilizando un voltímetro, y los valores correspondientes mostrados en el display del panel de control. La Tabla 5.1 muestra los resultados obtenidos, estableciendo un error relativo máximo de 0,7 % en la medición de voltaje eficaz, y, un error relativo máximo de 0.89% en la medición de voltaje DC.

Tabla 5.1 Análisis comparativo de los registros de voltaje eficaz y voltaje DC.

Nº de lámparas	Caudal (l/s)	Velocidad (rpm)	Voltaje eficaz (V)		Voltaje DC (V)	
			Mult.	Ard.	Mult.	Ard.
1	54	101	13.60	13.24	12.42	12.32
2	54	101	13.06	13.04	12.35	12.29
3	54	101	12.98	12.99	12.32	12.16
4	54	101	12.86	12.94	12.30	12.07
5	54	101	12.58	12.96	12.32	12.05

Fuente: Diseño de los autores

5.2.2 Registro de corriente eficaz

No fue posible implementar físicamente el diseño descrito en [26] para la medición de corriente eficaz en el circuito de carga, debido a la imposibilidad de ubicar en el mercado local, un par de elementos electrónicos requeridos.

Ante esta situación, se decidió registrar el valor de la corriente en el circuito de carga, de manera manual, utilizando un amperímetro común, aprovechando las facilidades para experimentación del panel de control.

5.2.3 Registro del tirante de agua en el canal hidráulico

Para registrar la altura del tirante de agua en el canal, el sensor de ultrasonido se ubicó en el segmento de ingreso al tanque de vórtice (Ver Fig.5.10). El sensor se unió a la placa Arduino, a través de un bus de datos.

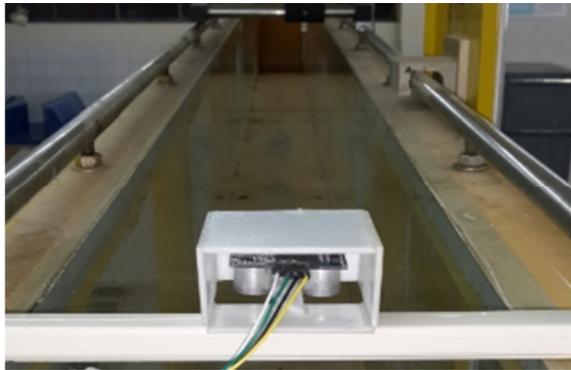


Figura 5.10 Instalación del sensor ultrasónico HC-SR04 en el canal hidráulico.

Fuente: Fotografía de los autores

Para validar el funcionamiento del circuito sensor, se decidió comparar las mediciones efectuadas por el sensor y mostradas en el display, con las establecidas utilizando una regla calibrada. La Tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos, estableciendo un error relativo máximo de 4,17 %.

Tabla 5.2 Análisis comparativo de los registros de tirante de agua.

Tirante de agua (h)				
N (rpm)	Caudal (l/s)	Regla (cm)	Sensor ultrasónico (cm)	Error relativo
101,7	54,32	20,5	20,65	0,73 %
99,1	53,12	19,3	19,75	2,33 %
97,3	51,76	18,6	18,75	0,81 %
97	51,76	18,6	18,75	0,81 %

95,7	53,12	19,4	19,75	1,80 %
95,4	51,06	18	18,25	1,39 %
94,6	52,30	19,1	19,14	0,21 %
93,1	51,41	17,9	18,5	3,35 %
92,3	51,76	18,5	18,75	1,35 %
90,7	51,76	18	18,75	4,17 %
90,4	51,76	18,1	18,75	3,59 %
89,5	51,18	18,1	18,33	1,27 %
89,2	51,02	18	18,22	1,22 %
89,2	50,19	17,3	17,63	1,91 %
88,9	49,65	17,5	17,25	1,43 %
87,5	48,55	16,1	16,5	2,48 %
87,2	50,36	17,5	17,75	1,43 %
81,5	48,19	16,1	16,25	0,93 %
80,1	48,92	16,5	16,75	1,52 %
77	47,81	16,1	16	0,62 %
76,8	50,15	17,3	17,6	1,73 %
74,1	48,92	16,5	16,75	1,52 %
63,8	48,92	16,3	16,75	2,76 %
47,5	48,55	16,4	16,5	0,61 %
30,1	48,19	16	16,25	1,56 %

Fuente: Diseño de los autores

5.2.4 Registro de la velocidad de rotación

Para el registro de la velocidad de rotación del eje de la turbina, se utilizó un encoder HC-020K capaz de detectar el movimiento de una punta adaptada al prisionero situado en la chumacera de la transmisión mecánica (Ver Fig. 5.11 y 5.12). El sensor se unió a la placa Arduino, a través de un bus de datos.



Figura 5.11 Instalación del encoder HC-020K en la chumacera de la transmisión mecánica.

Fuente: Fotografía de los autores

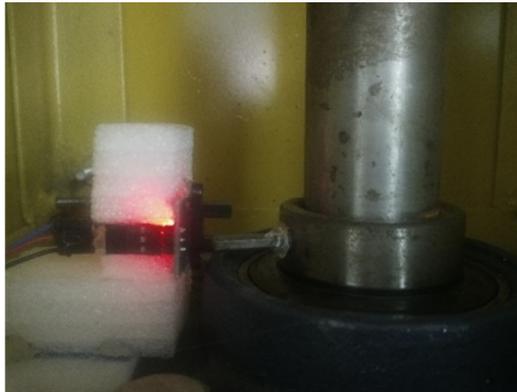


Figura 5.12 Detalle de la instalación del encoder HC-020K en la chumacera de la transmisión mecánica.

Fuente: Fotografía de los autores

Para validar el funcionamiento del circuito sensor, se decidió comparar las mediciones efectuadas por el sensor y mostradas en el display, con las establecidas utilizando un tacómetro digital. La Tabla 5.3 muestra los resultados obtenidos, estableciendo un error relativo máximo de 7,50 %.

Tabla 5.3 Análisis comparativo de los registros de velocidad de rotación.

Caudal (Q) l/s	Velocidad de rotación (N)		
	Tacómetro (rpm)	Encoder (rpm)	Error relativo
54,32	101,7	102	0,29 %
53,12	99,1	99	0,10 %
51,76	97,3	97	0,31 %
51,76	97	96	1,04 %
53,12	95,7	94	1,81 %
51,06	95,4	95	0,42 %
52,30	94,6	93	1,72 %
51,41	93,1	96	3,02 %
51,76	92,3	91	1,43 %
51,76	90,7	90	0,78 %
51,76	90,4	92	1,74 %
51,18	89,5	89	0,56 %
51,02	89,2	89	0,22 %
50,19	89,2	90	0,89 %
49,65	88,9	89	0,11 %
48,55	87,5	87	0,57 %
50,36	87,2	88	0,91 %
48,19	81,5	81	0,62 %
48,92	80,1	86	6,86 %
47,81	77	78	1,28 %
50,15	76,8	79	2,78 %
48,92	74,1	73	1,51 %
48,92	63,8	63	1,27 %
48,55	47,5	50	5,00 %
48,19	30,1	28	7,50 %

Fuente: Diseño de los autores

5.3 Implementación del nodo de procesamiento

Adquiridas las variables medibles, se procedió a programar en Arduino los algoritmos descritos en un trabajo anterior para el cálculo de variables requeridas [26]. Arduino utiliza un lenguaje basado en C/C++.

5.3.1 Cálculo del caudal

El flujograma del algoritmo utilizado para el cálculo del caudal, está representado en la Fig. 5.13. El flujograma permite obtener el tiempo de tránsito del sonido a través del sensor ultrasónico, determinando la distancia entre la altura del canal y la altura del tirante de agua representada por la variable H, restada de la altura total del canal hidráulico ($y=31.75$ cm), con la cual se calcula el caudal.

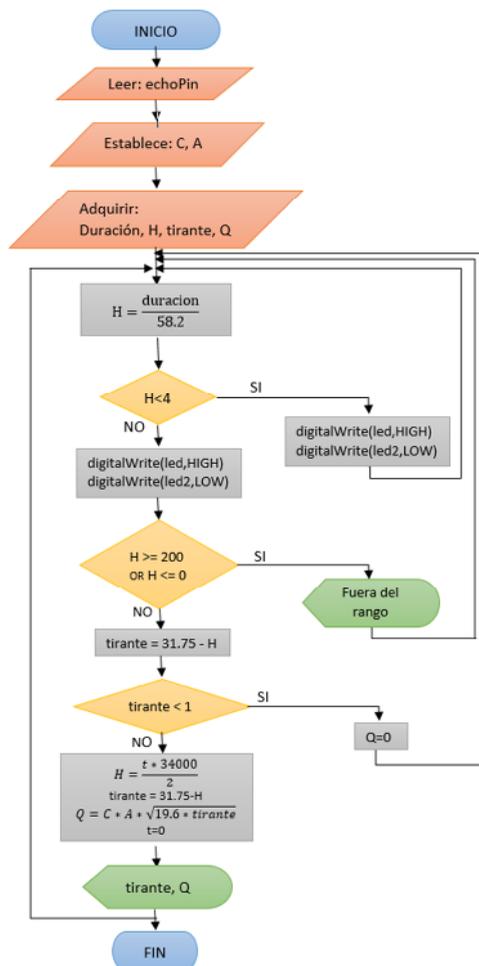


Figura 5.13 Algoritmo de cálculo del caudal, implementado en Arduino Mega 2560.

Fuente: Diseño de los autores

En el marco de este proyecto, se utilizó el banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica de UTPL, en el que el área del canal rectangular es de 0.0635 m^2 , y, el coeficiente de descarga corresponde al de un canal hidráulico rectangular, igual a 0.9 [27]. El código de implementación se muestra en la Fig.5.14.

```
#include <glcd.h>
#include <fonts/allFonts.h>
#define trigPin 13
#define echoPin 12
float duration, H, tirante, Q;
void setup() {pinMode(trigPin, OUTPUT);
pinMode(echoPin, INPUT);
pinMode(led, OUTPUT);
pinMode(led2, OUTPUT); }
void loop () {
digitalWrite(trigPin, LOW);
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(trigPin, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trigPin, LOW);
duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
H = (duration/2) / 29.1;
if (H < 4) { digitalWrite(led,HIGH);
digitalWrite(led2,LOW);}
else { digitalWrite(led,LOW);
digitalWrite(led2,HIGH);}
if (H >= 200 || H <= 0){
Serial.println("Fuera del rango"); }
else { tirante = 31.75 - H;
if(tirante<1){ Q = 0;}
else{ Q= sqrt(19.6*tirante);
Q= Q * 0.027;
Q = Q * 100;}
delay(1000);}
```

Figura 5.14 Código implementado para el cálculo del caudal, en Arduino Mega 2560.

Fuente: Diseño de los autores

5.3.2 Cálculo de la potencia mecánica

Para el cálculo de la potencia mecánica se utilizó la información obtenida en [5], sobre el valor del torque en el eje del rodete de la turbina en función de la velocidad de rotación, por lo tanto las pruebas realizadas son a partir del caudal máximo (50 l/s). El flujograma del algoritmo utilizado para el cálculo de la potencia mecánica se muestra en la Fig. 5.15, mientras que el código de implementación se detalla en la Fig. 5.16.

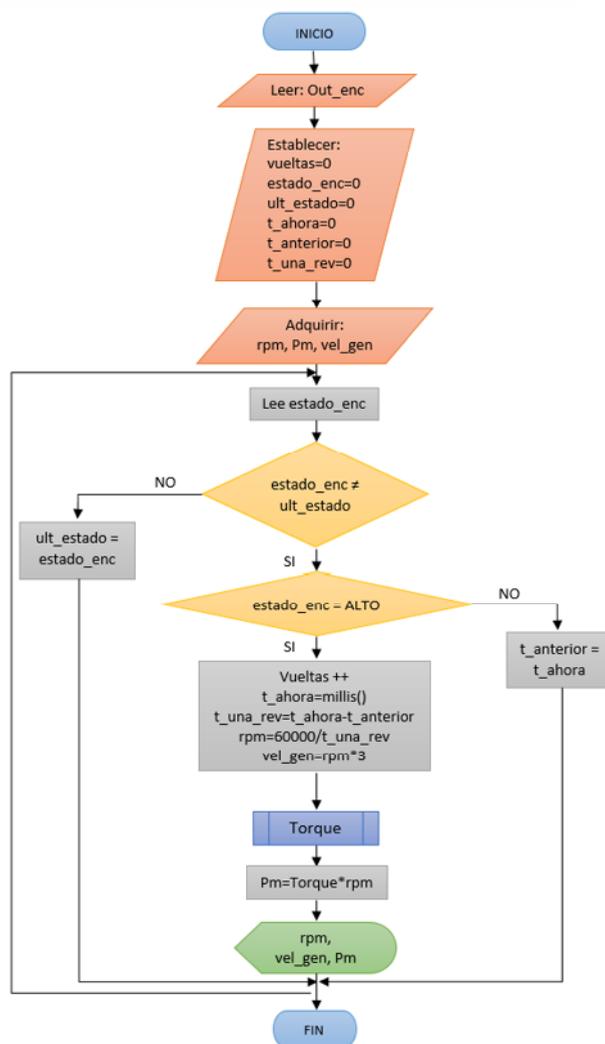


Figura 5.15 Algoritmo de cálculo de potencia mecánica y velocidad de rotación, implementado en Arduino Mega 2560

Fuente: Diseño de los autores

```

#include <glcd.h>
#include <fonts/allFonts.h>

const int releReedPin = 9;
int vueltas = 0;
int estadoRele = 0;
int ultimoEstadoRele = 0;
long tiempo_anterior = 0;
long tiempo_una_rev = 0;
unsigned long tiempo_ahora;
long rpm;
float gen, pm, gen;

void setup()
{
  GLCD.Init();
  GLCD.SelectFont(System5x7); //selecciona el tipo de letra
  pinMode(releReedPin, INPUT);
}

void torque()
{
  if((rpm >= 0 && rpm < 10) && (caudal <= 15 )) {
    torque = 25.63;
    pm = torque*rpm; // comparación con todos los caudales y
    velocidades de rotación
  }
}
  
```

```

GLCD.println(pm);
}

void loop() {
estadoRele = digitalRead(releReedPin);
if (estadoRele != ultimoEstadoRele) {
if (estadoRele == HIGH)
{
vueltas++;
tiempo_ahora =millis();
tiempo_una_rev = tiempo_ahora - tiempo_anterior;
rpm = 60000 / tiempo_una_rev;
gen=rpm*3;
GLCD.println(rpm);
GLCD.println(gen);
}
else {
tiempo_anterior = tiempo_ahora;
}
}
ultimoEstadoRele = estadoRele;
}

```

Figura 5.16 Código implementado para el cálculo de la potencia mecánica, en Arduino Mega 2560.

Fuente: Diseño de los autores

5.3.3 Cálculo de la potencia eléctrica

Para el cálculo de la potencia eléctrica, se necesita el valor de voltaje eficaz y corriente eficaz.

Debido a que no fue posible implementar físicamente la placa de acondicionamiento para la adquisición del valor de corriente eficaz; se decidió que el cálculo de potencia eléctrica sea manual. Para este fin, se formalizó el uso de una bitácora de registro, tal como se muestra en la Fig. 5.17.




Universidad Técnica Particular de Loja
 Titulación de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones
BITÁCORA DE REGISTRO
 Responsable:

Fecha	Hora	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W) $Pe = V \cdot I$	Eficiencia $n = Pe / Pm$

Figura 5.17 Bitácora de registro para el cálculo de la potencia eléctrica y de la eficiencia.

Fuente: Diseño de los autores

5.3.4 Cálculo de la eficiencia

Al igual que la potencia eléctrica, el cálculo de la eficiencia se realizará manualmente, utilizando la bitácora de registro descrita en el apartado anterior.

5.4 Implementación del nodo de visualización

Para implementar el nodo de visualización, se utilizó una pantalla GLCD 128x64 acoplada a la placa Arduino, a través de circuitos especialmente diseñados (Ver Fig. 5.18 a la 5.22).

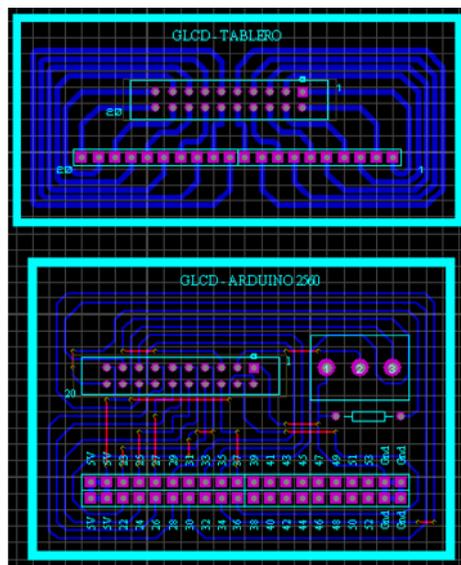


Figura 5.18 Diseño de la placa de acople entre la pantalla GLCD y la placa Arduino.

Fuente: Diseño de los autores

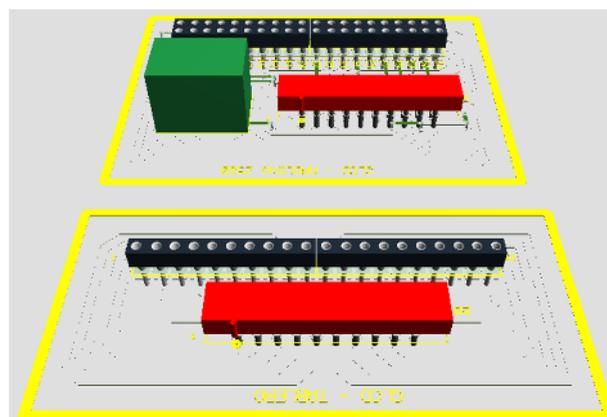


Figura 5.19 Vista 3D de las placas diseñadas para acoplar la pantalla GLCD y la placa Arduino.

Fuente: Diseño de los autores

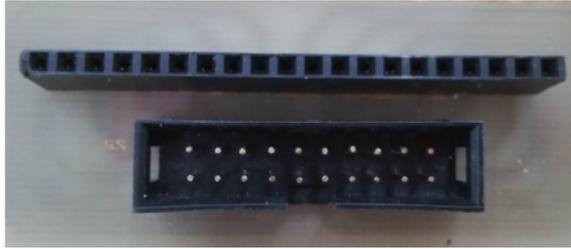


Figura 5.20 Implementación de la placa de acople entre la pantalla GLCD y la placa Arduino.

Fuente: Diseño de los autores

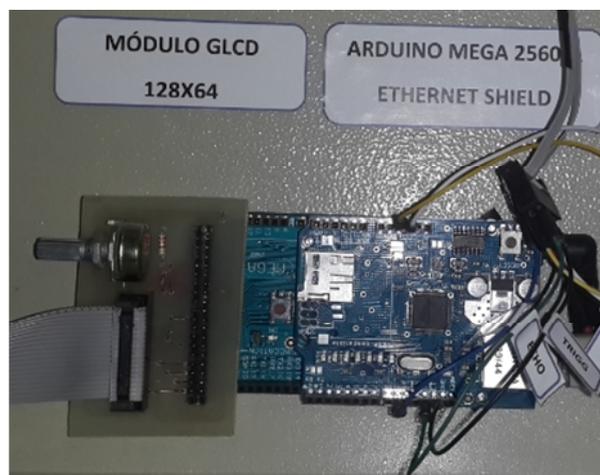


Figura 5.21 Acoplamiento de la pantalla a la placa Arduino.

Fuente: Fotografía de los autores

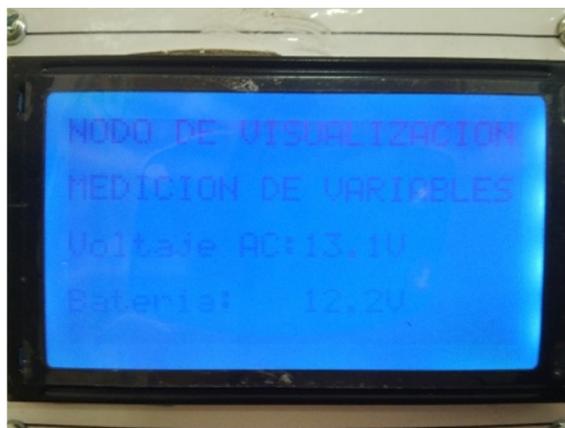


Figura 5.22 Nodo de visualización en operación.

Fuente: Fotografía de los autores

5.5 Implementación del nodo de comunicación y registro

De acuerdo al diseño descrito en [1], este nodo consta de dos bloques: storage de datos y transmisión.

El bloque de storage se construyó en la placa Arduino Ethernet Shield, que permite el almacenamiento de hasta 4GB de información (Ver Fig. 5.23). Para el bloque de transmisión de datos, se utilizó una dirección IP para conexión Ethernet, entre el módulo y una PC. El algoritmo utilizado para el nodo de comunicación y registro está representado en el flujograma mostrado en la Fig. 5.24, mientras que la Fig.5.25 detalla el código utilizado.

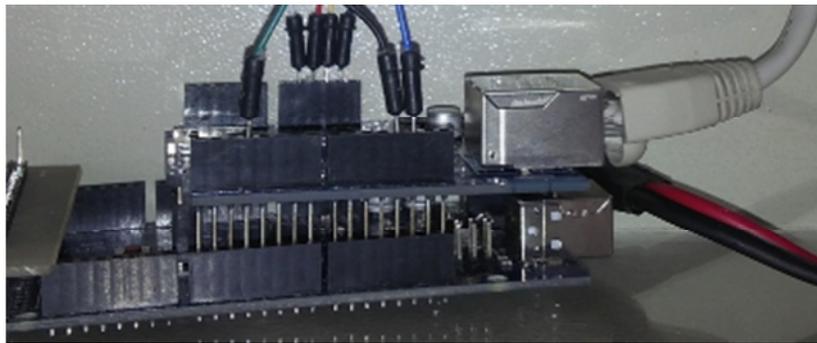


Figura 5.23 Conexión del módulo Ethernet Shield a la placa Arduino Mega 2560.

Fuente: Fotografía de los autores

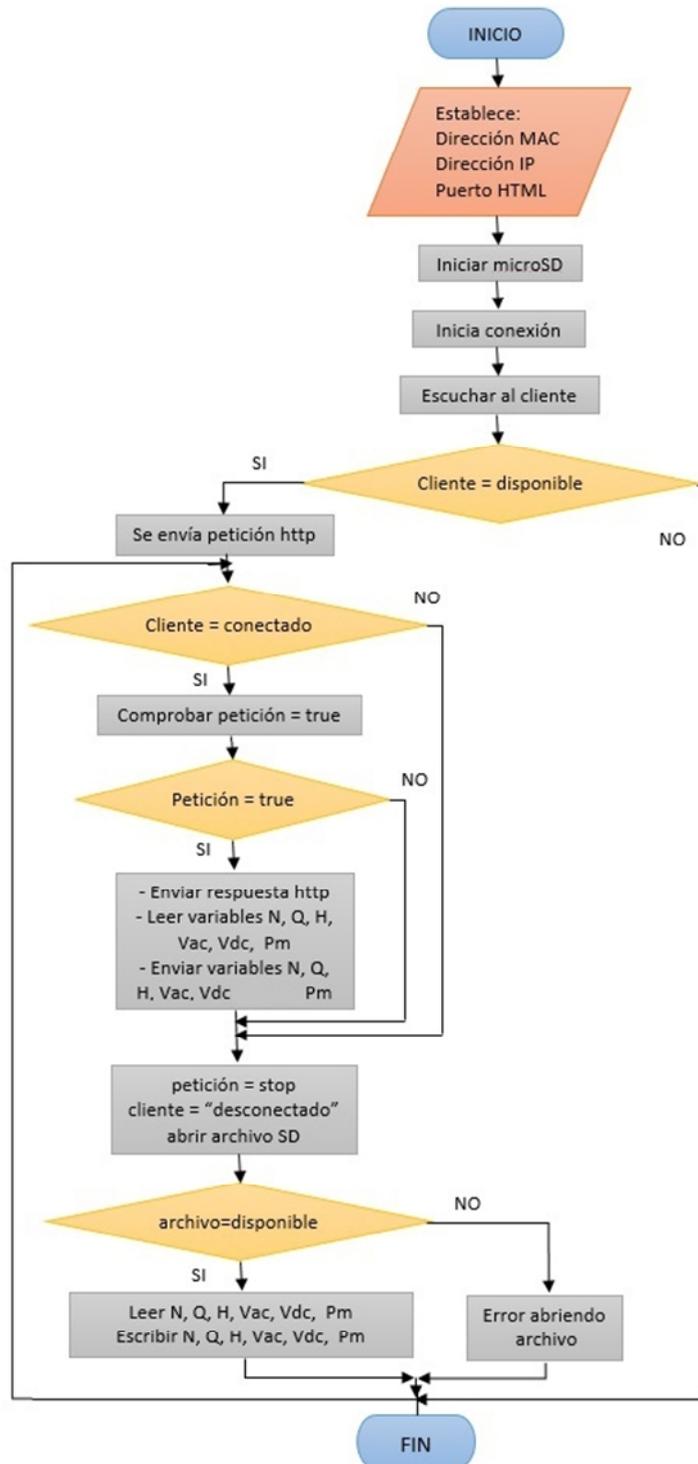


Figura 5.24 Algoritmo de operación implementado en Arduino mega 2560, para adquisición de datos del sistema, storage de data en la microSD, y, transferencia de datos al PC.

Fuente:http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/8182/1/Chuncho_Aguilar_Jasmine_Anabel.pdf

```

#include <Ethernet.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <glcd.h>
#include <fonts/allFonts.h>
byte mac[] = { 0x90, 0xA2, 0xDA, 0x0D, 0x42, 0xA0 };
byte ip[] = { 172, 18, 178, 2 };
EthernetServer server(80);
float VAC, VDC, duracion, H, tirante, Q;
const int chipSelect = 4;
int voltaje_AC=7;
int voltaje_DC=5;
#define trigPin 13
#define echoPin 12
#define led 11
#define led2 10
const int releReedPin = 9;
int vueltas = 0;
int estadoRele = 0;
int ultimoEstadoRele = 0;
long tiempo_anterior = 0;
long tiempo_una_rev = 0;
unsigned long tiempo_ahora;
long rpm;
float gen;
void setup()
{
  Ethernet.begin(mac, ip);
  server.begin();//Inicia comunicación a través del puerto
  pinMode(10, OUTPUT);
  if (!SD.begin(chipSelect))
    { Serial.println("Card failed, or not present");
      return;}
  Serial.println("card initialized.");}
void loop () {
  EthernetClient client = server.available();
  if (client) {
    Serial.println("new client");
    boolean currentLineIsBlank = true;
    while (client.connected()) {
      if (client.available()) {
        char c = client.read();
        Serial.write(c);
        if (c == '\n' && currentLineIsBlank) {
          int sensorValue = analogRead(voltaje_AC);
          int sensorValue2 = analogRead(voltaje_DC);
          float voltaje = sensorValue * (5.0 / 1024.0);
          VAC=voltaje*5.22-2;
          float voltaje_bat = sensorValue2 * (5.0 / 1024.0);
          VDC=voltaje_bat*2.856-1.6;
          encoder();
          ultrasonido();
          client.print("<Hx align=center>""SISTEMA DE HIDROGENERACION");
          client.print(VAC);
          client.print(tirante);
          client.print(rpm);
          client.print(VDC);
          client.print(Q);
          client.print(pe);      }
          client.println("</html>");
          break;  }
        if (c == '\n') {
          currentLineIsBlank = true;      }
          else if (c != '\r') {
            currentLineIsBlank = false;} } }
          delay(1);
          client.stop();
          Serial.println("client disconnected");
        } }

```

Figura 5.25 Código implementado para la transmisión y registro de data con el modulo Ethernet shield, en la placa Arduino Mega 2560.

Fuente: Diseño de los autores

En la Fig. 5.26 se muestra los resultados obtenidos al verificar la operatividad del nodo.

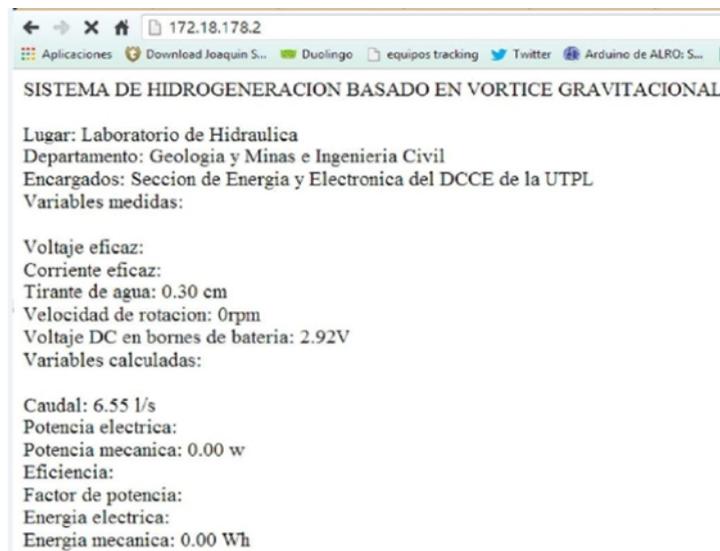


Figura 5.26 Transmisión de datos medidos y calculados a una dirección IP definida.

Fuente: Fotografía de los autores

CAPITULO 6

6. EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL DESEMPEÑO DEL BLOQUE DE GENERACIÓN DE UN SISTEMA DE HIDROGENERACIÓN BASADA EN VÓRTICE GRAVITACIONAL

6.1 Introducción

En este trabajo, se describe los resultados obtenidos en la etapa de evaluación preliminar del desempeño del bloque de generación de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional instalado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil, bajo responsabilidad de la Sección de Energía y Electrónica SEE del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica DCCE de la UTPL.

6.2 Evaluación preliminar del desempeño del bloque de generación

6.2.1 Metodología de evaluación

Problemas en la construcción del nodo de monitoreo, obligaron a adoptar una metodología resumida para evaluar el desempeño del bloque de generación. La metodología de evaluación propuesta incluye el análisis del funcionamiento del bloque en vacío y bajo carga.

6.2.1.1 Análisis del desempeño del bloque de generación en vacío

El análisis se lo realiza con el objeto de conocer el voltaje eficaz del generador eléctrico sin elementos resistivos, por consiguiente, las pruebas fueron realizadas conectando los terminales de un multímetro a los bornes del generador eléctrico etiquetados como F (fase) y N (neutro) en el tablero del panel de control (Ver Fig.6.1).



Figura 6.1 Bornes de conexión de voltaje AC generado por el GAM-FD en el tablero del panel de control.

Fuente: Fotografía de los autores

6.2.1.2 Análisis del desempeño del bloque de generación operando bajo carga

El análisis del bloque de generación operando bajo carga, fue realizado conectando las salidas del generador eléctrico al bloque de rectificación y filtrado, ubicado en el panel de control para obtener un voltaje en corriente directa. A través de las borneras etiquetadas como out y gnd del tablero se conectan las cargas resistivas (Ver Fig. 6.2).

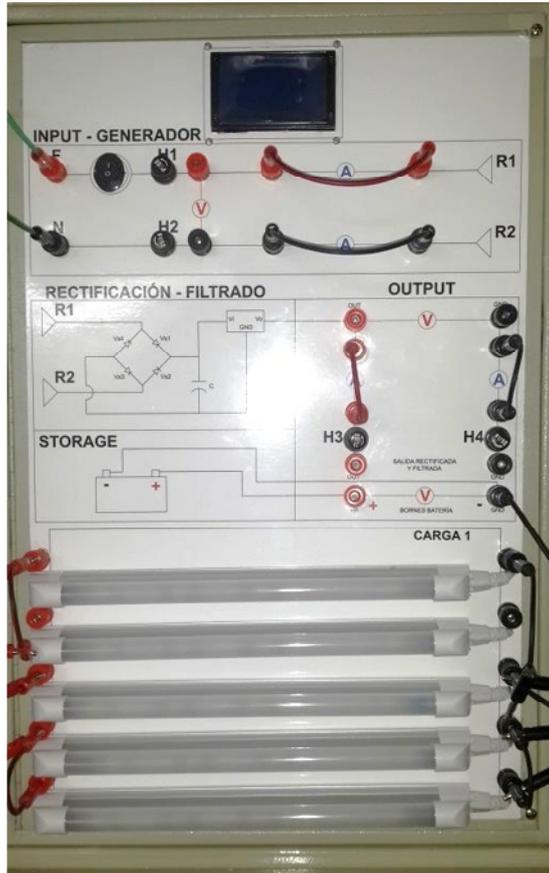


Figura 6.2 Bornes de conexión de voltaje DC a las cargas resistivas ubicadas en el tablero del panel de control.

Fuente: Fotografía de los autores

6.2.2 Análisis del funcionamiento del generador en vacío

Para el análisis en vacío del generador eléctrico, se optó por desconectar todo tipo de carga resistiva para poder sensar los valores de voltaje eficaz. Para ello se realizó variaciones en el caudal del banco hidráulico obteniendo datos de voltaje en corriente alterna a distintas velocidades de la turbina. La Tabla 6.1 indica los resultados obtenidos.

Tabla 6.1 Análisis del funcionamiento del generador en vacío

Pruebas en vacío		
Velocidad (N)	Caudal (Q)	Voltaje (VCA)
18.9 rpm	51.61 l/s	6.95 V
43.7 rpm	52.11 l/s	7.99 V
58 rpm	52.41 l/s	8.50 V
76.4 rpm	52.61 l/s	11.43 V
85.2 rpm	52.81 l/s	12.45 V
89.5 rpm	53.21 l/s	13.11 V
91 rpm	53.51 l/s	13.35 V
94.1 rpm	53.71 l/s	13.40 V
96.5 rpm	53.91 l/s	13.65 V
100.3 rpm	55.01 l/s	13.88 V
101.2 rpm	56.21 l/s	14.55 V
102.7 rpm	57.71 l/s	14.72 V

Fuente: Diseño de los autores

Las pruebas realizadas indican que el voltaje generado es directamente proporcional a la velocidad de rotación en el eje, y, este a su vez del caudal entregado por el banco hidráulico. Según los resultados obtenidos el generador entra en funcionamiento a partir de un caudal de 51 l/s, obteniendo una velocidad de 18 rpm y generando un voltaje de 6.95 V.

Dado que en el banco hidráulico existe la limitación de obtener un caudal máximo de 57 l/s, el máximo voltaje entregado por el sistema de hidrogenación será de 14.72V con una velocidad en el eje de la turbina de 102 rpm.

6.2.3 Análisis del funcionamiento del generador bajo carga

El diagrama unifilar del panel de control está representado en la Fig. 6.3, donde se observan los bornes de conexión los cuales pueden ser configurados en serie, paralelo, o mixto; dependiendo las necesidades del usuario.

Para el análisis del generador eléctrico conectado a las cargas resistivas, se realizó configuraciones en serie y paralelo respectivamente. Los resultados de dichas configuraciones son representados por la Tabla 6.2.

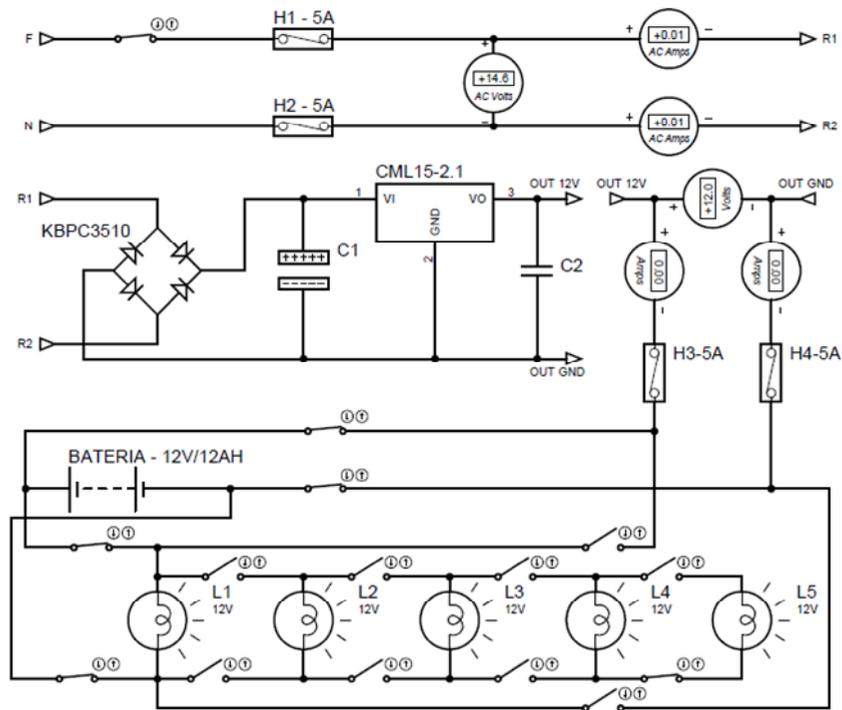


Figura 6.3 Diagrama eléctrico unifilar del tablero de control

Fuente: Diseño de los autores

Tabla 6.2 Análisis del funcionamiento del generador bajo carga.

Pruebas con carga (lámparas) a 99 rpm y 56 l/s			
Serie			
Cargas	Vcd (V)	Icd (A)	Potencia (W)
1 carga	10,6	0,36	3,816
2 cargas	12,6	0,0011	0,014
Paralelo			
2 cargas	10	0,4	4
3 cargas	10	0,43	4,3
4 cargas	10	0,48	4,8

Fuente: Diseño de los autores

CONCLUSIONES

- Considerando las limitaciones mecánicas existentes en el sistema construido de hidrogeneración basada en vórtice gravitacional, se decidió utilizar en el bloque de generación, un generador de CA asíncrono, monofásico, de fase dividida, en el que el generador se autoexcita a partir de un arrollamiento auxiliar en el estator, situado a un ángulo de 90° con respecto al arrollamiento principal.
- Se prevé que el generador opere con 6 pares de polos, con un campo magnético giratorio de inducción estática.
- Partiendo de que el campo magnético en el generador eléctrico seleccionado puede ser considerado constante, y, que en el proyecto se aprovechan los recursos del banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas, e, Ingeniería Civil de la UTP, se decidió controlar la energía generada en función de la regulación de la velocidad de rotación del generador, a través de la variación del caudal turbinado.
- La transmisión mecánica permite que, las máquinas eléctricas rotativas acoplen su velocidad de rotación, con la velocidad de giro de las turbinas, ya sea en magnitud como en dirección.
- Dadas las particularidades de este proyecto, que requiere aprovechar de manera muy eficiente, la energía entregada por la turbina, garantizando un buen torque y una buena velocidad de rotación en el eje del generador, se decidió proponer la utilización de una transmisión por rozamiento, empleando correas planas, opción que garantiza un mayor rendimiento debido a un menor peso.
- La potencia a transmitir al bloque de generación es de 278 W, mientras que la velocidad en el eje de la turbina alcanza las 115 rpm. Por otra parte, las pruebas de campo determinaron que el rendimiento óptimo del generador, se registra en la entrega de voltaje AC, entre 7.7 y 28 V. Estos valores de voltaje, corresponden a velocidades de rotación, entre 115 rpm y 430 rpm.
- Considerando que, en este proyecto la energía aportada por el bloque de generación se almacenará en una batería alimentada a 12 VCD, se decidió que el

generador aporte 15 VCA. Este régimen es posible, para una velocidad en el eje de la máquina, equivalente a 227 rpm, lo que determina una relación de transmisión igual a 3.

- La selección de la sección de la correa, se basa en la velocidad de rotación de la polea conducida y la potencia de diseño, esto a 227 rpm y 0.28 CV, respectivamente, se opta por utilizar la sección de la banda seleccionada de tipo "A".
- El bloque de generación eléctrica se construyó sobre la base de un GAM-FD, de 6 polos.
- El bloque no incluyó un circuito de arranque del GAM-FD.
- En este proyecto, se decidió complementar el bloque de generación eléctrica, con un panel de control, con los recursos suficientes para permitir valorar el desempeño y monitorear el funcionamiento del sistema.
- El módulo de monitoreo del bloque de generación de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional a implementar, consta de un nodo de adquisición de datos, de procesamiento, de comunicación, de visualización, y, de registro.
- Las variables a considerar en el marco de este proyecto, se clasificaron en medibles y calculables.
- Las variables medibles se registran a través de sensores debidamente seleccionados a través del nodo de adquisición de datos, mientras que las variables calculadas se aproximan a través de algoritmos implementados utilizando los recursos de una placa Arduino Mega 2560, en el denominado nodo de procesamiento.
- Sobre la placa Arduino, también se implementa el nodo de comunicación.
- El nodo de visualización se montará sobre un tablero de control, cuyo diseño será descrito en trabajos futuros.

- El nodo de registro, se montará de acuerdo a un esquema preestablecido por el grupo de trabajo de la SEE del DCCE UTPL.
- Se diseñó e implementó un módulo de monitoreo, conformado por nodos de adquisición de datos, procesamiento, comunicación, visualización, y, registro para la evaluación y desempeño del módulo de hidrogenación, basado en vórtice gravitacional.
- El nodo de adquisición de datos registra el voltaje eficaz a la salida del generador, el voltaje DC en los bornes de la batería, la altura del tirante de agua en el canal hidráulico, y, la velocidad de rotación del eje de la turbina.
- El nodo de procesamiento permite el cálculo del caudal y potencia mecánica del sistema de hidrogenación.
- En el nodo de visualización se muestra las variables medidas y calculadas.
- El nodo de comunicación y registro permite al usuario evaluar el sistema desde una PC o a través del registro de la información en la microSD.
- Las pruebas preliminares muestran que el bloque de generación del sistema está funcionando dentro de lo esperado.

REFERENCIAS

- [1] “Electromagnetismo” [Online]. Disponible en: <<http://www.ing.unlp.edu.ar/cys/DI/electromagnetismo.pdf>> [Consulta Julio 2013].
- [2] “Máquinas eléctricas rotativas”. [Online]. Disponible en: <http://www.infopl.net/files/documentacion/motion_control/infoPLC_net_8448127641.pdf>. [Consulta Julio del 2013].
- [3] “Máquinas eléctricas rotativas, motores y generadores”. [Online]. Disponible en: <http://centros5.pntic.mec.es/ies.de.rivas.vaciamadrid/tecnologia/electrotecnia/www.extremadurasi.org/contenidos_docentes/electro/t8.htm>. [Consulta Julio del 2013].
- [4] R. Martínez, W. Guillermo. “Motores y generadores de corriente continua” [Online]. Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/30478463/Motores-y-Generadores-de-Corriente-Continua>>. [Consultado Julio 2013].
- [5] J. Peña, “Ingeniería de Detalle y construcción de un sistema de hidrogenación basado en un sistema de vórtice gravitacional, Titulación de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Técnica Particular de Loja. [Consulta Julio 2013].
- [6] Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos, Perú Pág. 180, [Online]: Disponible en: <<http://www.uncp.edu.pe/newfacultades/ingenieriasarqui/neweolica/phocadownload/descargas/manualdemicrocentraleshidraulicas.pdf>>. [Consulta de Agosto del 2013].
- [7] Universidad Carlos III de Madrid, Diseño Mecánico, Transmisión por Correas, [Online]: Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_correas1>. [Consulta de Agosto del 2013].
- [8] J. Ortega, G. Romero “Prediseño del bloque de generación de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional”, [Online]: Disponible en: <<http://www.scribd.com/doc/180408963/predisenio-del-bloque-de-generacion-de-un-sistema-de-hidrogenacion-basada-en-vortice-gravitacional>> [Consulta de Noviembre del 2013].
- [9] Introducción a los accionamientos de máquinas Diseño II, Libardo Vanegas, Facultad de Ingeniería Mecánica, [Online]: Disponible en: <<http://blog.utp.edu.co/lvanegas/files/2011/08/Cap-1-Int-Dis-II.pdf>>. [Consulta de Agosto del 2013].
- [10] Universidad Técnica de Cotopaxi, Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Carrera de Ingeniería Electromecánica, William Llango, Edison Gallegos,

- “Diseño e implementación de una Pico-Central Hidroeléctrica aprovechando el movimiento del agua para la generación de energía eléctrica en la hacienda ecológica Baños de la parroquia Alaquez-Provincia de Cotopaxi”, [Online]: Disponible en: <repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1312/1/T-UTC-2051.pdf> [Consulta de Agosto del 2013].
- [11] V. Tokarev. “Máquinas eléctricas”, Energoisdat, Moscú, 1990, primera edición, 624p
- [12]M. Cáceres, H. Caraguay. “Diseño, implementación, y, análisis preliminar del desempeño de un sistema neumático-eléctrico para el harvesting de energía en accesos vehiculares. [Online]: Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/8011/1/Caceres_Vega_Miguel_Agustin_Caraguay_Caraguay_Hernan_Gustavo.pdf>. [Consulta Diciembre 2013].
- [13]Batería RITAR RT120 12V12AH. [Online]: Disponible en: <http://www.renova-energia.com/productos_baterias/baterias_ritar_rt12120_12v12ah.html>. [Consulta de Noviembre del 2013].
- [14] Regulador de voltaje phocos CML15. [Online]: Disponible en: <http://www.renova-energia.com/productos_reguladores/phocos_cml15.html>. [Consulta de Noviembre del 2013].
- [15]Arduino. Sitio web Proyecto Arduino. [Online]: Disponible en: <<http://www.arduino.cc/>>. [Consulta de Noviembre 2013].
- [16] Arduino Mega 2560 [Online]. Disponible en: <<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>>. [Consulta Noviembre 2013].
- [17]Medición de voltaje AC en arduino [Online]: Disponible en:<<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/measuring-voltage-with-an-acac-power-adapter>>. [Consulta de Noviembre 2013]
- [18] CT Sensors – Intefacing with an arduino [Online]: Disponible en: <<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/ct-sensors-interface>>. [Consulta de Diciembre 2013].
- [19] A. Creus. “Instrumentación industrial”, Octava edición, México D. F., 2010. [Consulta: Diciembre 2013].
- [20] Encoder HC-020K [Online]: Disponible en: <<http://www.godeal.com.ar/p/hc-020k-velocidade-dupla-modulo-de-medicao-w-encoders-fotoeletricos-preto-verde-2-pcs-219416>>. [Consulta Diciembre 2013].

- [21] Manual de hidrometría [Online]: Disponible en: <sistemamid.com/download.php?a=1096>. [Consulta Diciembre 2013].
- [22] An introduction to AC Power [En línea]: Disponible en: <<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/ac-power-introduction>>. [Consulta Diciembre 2013].
- [23] J. Peña. “Diseño de turbinas para tanques de vórtice gravitacional” [Online]: Disponible en: <<http://www.utpl.edu.ec/blogjorgeluisjaramillo/?p=1013>>. [Consulta Diciembre 2013].
- [24] Arduino Ethernet Shield [Online]: Disponible en: <<http://arduino.cc/es/Main/ArduinoEthernetShield>> [Consulta Diciembre del 2013].
- [25] J. Chunchu. “Diseño, implementación, y, operación de un nodo de telemetría para monitoreo del sistema híbrido termosolar – GLP de abastecimiento de ACS a la CU” [Online]: Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/8182/1/Chunchu_Aguilar_Jasmine_Anabel.pdf>. [Consulta Diciembre 2013].
- [26] J. Ortega, G. Romero. “Diseño del módulo de monitoreo del bloque de generación eléctrica de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional” [Online]: Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/192390448/disenio-del-modulo-de-monitoreo-del-bloque-de-generacion-electrica-de-un-sistema-de-hidrogenacion-basada-en-vortice-gravitacional>>. [Consulta Diciembre 2013].
- [27] Manual de hidrometría [Online]: Disponible en: <sistemamid.com/download.php?a=1096>. [Consulta Diciembre 2013].

ANEXO 1

PAPER: Diseño, construcción e implementación de un bloque de generación eléctrica y un módulo de monitoreo para un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional

Diseño, construcción e implementación de un bloque de generación eléctrica y un módulo de monitoreo para un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional

José Ricardo Ortega #1, Gissela Romero#2, Jorge Luis Jaramillo#3

^{#1}Profesional en formación de la EET, Universidad Técnica Particular de Loja

^{#2}Docente Investigador de la EET, Universidad Técnica Particular de Loja
Loja, Ecuador 2014

¹jortegal@utpl.edu.ec, ²geromero@utpl.edu.ec, ³jorgeluis@utpl.edu.ec

Resumen—Se describe el diseño, construcción e implementación del bloque de generación eléctrica de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional, implementado por la SEE del DCCE UTPL, instalado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil de la UTPL, bajo responsabilidad de la Sección de Energía y Electrónica del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica.

Palabras claves —generación eléctrica, sistemas de hidrogenación basados en vórtice gravitacional.

I. INTRODUCCIÓN

Como parte del conjunto de iniciativas para el aprovechamiento de fuentes renovables de energía en el Campus de la UTPL, impulsado por la Sección de Energía y Electrónica SEE del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica DCCE, con el apoyo de la Dirección de Infraestructura y el Rectorado de la Universidad, se incluye el diseño e implementación de una estación de hidrogenación eléctrica, basada en el principio de vórtice gravitacional.

Una vez diseñado e instalado el bloque mecánico, se requiere diseñar y construir un bloque de transformación de la energía mecánica en el eje de la turbina, en energía eléctrica.

En este trabajo se describe el diseño, e implementación del bloque de generación eléctrica y nodos anexos.

II. PREDISEÑO DEL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

A. Selección del generador eléctrico

En [1] se analizó las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de generadores eléctricos, y, considerando la premisa de reducir al máximo la pérdida de energía en procesos auxiliares como la rectificación, se preseleccionó un generador CD.

Sin embargo, las pruebas de campo mostraron que el bloque mecánico del sistema de vórtice gravitacional, no era capaz de asegurar los parámetros exigidos por un generador CD para su funcionamiento (alta velocidad de rotación y torque significativo). En este contexto, se decidió emplear un generador de corriente alterna asíncrono, monofásico, de fase dividida, en el que el generador se autoexcita a partir de un arrollamiento auxiliar en el estator situado a un ángulo de 90° con respecto al arrollamiento principal. Esta máquina se debería construir de acuerdo a los parámetros establecidos en [2] para garantizar la máxima potencia mecánica efectiva en el sistema. La Tabla 1 resume las características técnicas de la máquina a construir.

Tabla 1

Datos técnicos para el diseño del generador eléctrico requerido para el sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional. Diseño de los autores

Parámetro	Sistema de hidrogenación instalado en la UTPL	Generador AC de imanes permanentes
Velocidad de rotación	120 rpm, ± 10	115 - 430 rpm
Torque	5 - 69 Nm	-
Potencia	38 - 278 W	60 W
Voltaje	-	20 V AC
Corriente	-	3 A
Polos	-	6 Pares

B. Selección del sistema de regulación del voltaje requerido en el sistema

En el generador eléctrico seleccionado, el flujo magnético depende del tipo de imán permanente. Al utilizar magnetos elaborados con metales de tierras raras, como el neodimio, hierro, o, boro, se puede obtener campos magnéticos de 7 a 10 veces mayores a los creados con materiales tradicionales. Estos campos también pueden ser considerados constantes, razón por la cual la única regulación posible en la máquina es por velocidad de rotación. Esta regulación, se puede conseguir variando la carga alimentada o el caudal turbinado.

La variación de la carga conectada al generador, se logra a través de la inserción o no, de resistencias o disipadores de potencia, sumergidas en agua o en el aire.

La variación del caudal turbinado para regulación de la velocidad del generador, puede ser manual o automática. Aunque en la práctica, este tipo de regulación es costosa y compleja, sobre todo para centrales de picogeneración, en este proyecto se facilita debido a la construcción del sistema de hidrogenación sobre la base del banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL.

III. TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

A. Dimensionamiento de la transmisión mecánica requerida para el sistema

La transmisión requerida para este proyecto, se dimensionó en base a la potencia a transmitir (W), las velocidades de entrada y salida (rpm), y, las condiciones de servicio.

De acuerdo a los resultados mostrados en [2], la potencia a transmitir al bloque de generación es de 278 W, mientras que la velocidad en el eje de la turbina alcanza las 115 rpm.

Las pruebas de campo realizadas al generador a utilizar en el proyecto [1], determinaron que el rendimiento óptimo de la máquina se registra en la entrega de voltaje AC, entre 7.7 y 28 V. Estos valores de voltaje, corresponden a velocidades de rotación, entre 115 rpm y 430 rpm. La Tabla 2, muestra los resultados del desempeño de la máquina construida, sin restricciones mecánicas.

Tabla 2

Desempeño del generador a implementar en el sistema de vórtice gravitacional, sin restricciones mecánicas. Datos de los autores.

Velocidad de rotación	Corriente	Voltaje eficaz	Potencia eléctrica
115 rpm	1.2 A	7.70 V	9.24 W
162 rpm	1.8 A	10.80 V	19.44 W
227 rpm	2.5 A	14.93 V	37.33 W
306 rpm	3.1 A	20.09 V	62.28 W
430 rpm	3.8 A	28.00 V	106.40 W

La Tabla 3, resume los requerimientos técnicos del bloque de generación, a instalar en el sistema.

Tabla 3

Parámetros eléctricos del sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional. Diseño de los autores

Parámetro técnico	Turbina	Generador
velocidad de rotación	120 rpm, ±10	115 - 430 rpm
torque	5 - 69, Nm	-
potencia	38 - 278, W	106, W

Considerando que en este proyecto, la energía aportada por el bloque de generación se almacenará en una batería alimentada a 12 VCD, se decidió que la máquina eléctrica trabaje en un régimen tal que aporte 15 VCA. Este régimen es posible, para una velocidad en el eje de la máquina, equivalente a 227 rpm. De acuerdo a (1), entonces la relación de transmisión se calcula en:

$$i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{D_1}{D_2} \quad (1)$$

En dónde,

- i , es la relación de transmisión
- N_1 , es la velocidad de rotación de la rueda impulsora, rpm
- N_2 , es la velocidad de rotación de la rueda conducida, rpm
- D_1 , es el diámetro de la rueda impulsora, m
- D_2 , es el diámetro de la rueda conducida, m

$$i = \frac{227 \text{ rpm}}{81 \text{ rpm}}$$

$$i = 2.8 \quad 3$$

Para propósitos prácticos, la selección del sistema de transmisión se basa en la potencia de diseño, definida por la ecuación (2):

$$P_{dis} = P_{trans} F_{serv} \quad (2)$$

En dónde,

- P_{dis} , es la potencia de diseño, W
- P_{trans} , es la potencia transmitida, W
- F_{serv} , es el factor de servicio.

El factor de servicio está relacionado con el tipo de máquina motriz, con el tipo de máquina conducida, con las vibraciones en la transmisión; con las horas de servicio, con las condiciones ambientales, etc. [4]. En una transmisión por fajas, sin sacudidas, con 3 horas diarias de operación, la bibliografía [4] recomienda un factor de servicio de 0.75. Por lo tanto, la potencia de diseño se aproxima a:

$$P_{dis} = 278 \text{ W} \cdot 0.75$$

$$P_{dis} = 208.5 \text{ W}$$

$$P_{dis} = 208.5 \text{ W} / 735$$

$$P_{dis} = 0.28 \text{ CV}$$

La selección de la sección de la correa, se basa en la velocidad de rotación de la polea conducida, y, en la potencia de diseño [1]. Como la polea conducida deberá girar a 227 rpm, y, la potencia de diseño es de 0.28 CV, la sección de la banda seleccionada es de tipo "A".

Conocida la sección de la banda a utilizar, se calcula los otros parámetros de diseño: diámetro de la polea conducida e impulsora, longitud de la banda, y, distancia entre el eje conducido e impulsor.

B. Cálculo de los parámetros de diseño

Diámetro de la polea conducida e impulsora

A partir del diámetro de la polea impulsora, de 15.24 cm que corresponden a la medida estándar de 6 pulgadas tipo A, incluida en la turbina; y, considerando la relación de transmisión calculada, se obtuvo el diámetro de la polea conducida en 5.08 cm, correspondiente a la medida estándar de una polea de 2 pulgadas tipo A.

La distancia entre los ejes de las poleas, se determina a través de la ecuación (3):

$$C = \frac{D_1 + 3D_2}{2} \quad (3)$$

En dónde,

- C, es la distancia entre ejes primitiva, cm
- D₁, es el diámetro polea conducida, cm
- D₂, es el diámetro polea impulsora, cm

$$C = \frac{5.08 \text{ cm} + (3 \cdot 15.24 \text{ cm})}{2}$$

$$C = 25.4 \text{ cm}$$

Esta distancia, se conoce como primitiva ya que, sirve para evaluar la longitud primitiva de la banda, en correspondencia al valor normalizado más cercano. La Tabla 4, resume los parámetros calculados.

Tabla 4.

Diámetros y distancia primitiva entre ejes de las poleas.
Elaboración de los autores

diámetro polea impulsora [D ₁]	15.24	cm
diámetro polea conducida [D ₂]	5.08	cm
distancia entre ejes primitiva [C]	25.40	cm

Longitud de la banda

Para una transmisión por banda abierta, la longitud primitiva de la banda se calcula por la expresión (4):

$$L = 2C + \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2} + \frac{(D_1 - D_2)^2}{4C} \quad (4)$$

En dónde,

- L, es la longitud primitiva de la banda, cm
- C, es la distancia entre ejes primitivo, cm
- D₁, es el diámetro polea conducida, cm

D₂, es el diámetro polea impulsora, cm

La longitud primitiva de la banda, para los valores ya calculados, se determinó en 83.73 cm. Considerando los valores normalizados de correas, y, las constantes de potencia (Tabla VI-5 de [5]), se aproximó la longitud de la banda (L') a 88.9cm.

Distancia entre ejes conducido e impulsor

La distancia entre ejes correspondientes, se calcula a partir de la ecuación (5):

$$C' = C + \frac{L' - L}{2} \quad (5)$$

En dónde,

- C', es la distancia entre ejes, cm
- C, es la distancia entre ejes primitivo, cm
- L', es la longitud de la banda, cm
- L, es la longitud primitiva de la banda, cm

La Tabla 5, resumen los parámetros de la banda y distancia entre los ejes.

Tabla 5.

Longitud de la banda y distancia entre ejes de las poleas.
Elaboración de los autores.

longitud primitiva de la banda, [L]	83.73	cm
longitud de la banda normalizada A35 [L']	88.9	cm
distancia entre ejes [C']	27,98	cm

IV. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

A. Diseño y construcción del generador eléctrico

En el primer apartado se explicó las razones para seleccionar en este proyecto, un generador eléctrico tipo asíncrono monofásico de fase dividida (GAM-FD), cuyo funcionamiento se explica en [6] al referirse a transformadores rotatorios.

La bibliografía explica que en un GAM-FD, el campo magnético entre el estator y el rotor debe ser lo más senoidal posible. Esto se logra seleccionando el número adecuado de polos y la sección correcta del conductor del devanado. Por otra parte, los GAM-FD deben arrancar en un régimen de vacío, para lograr estabilizar el voltaje, el flujo magnético, y, la fuerza electromotriz [6]. En el marco de este proyecto, considerando el objetivo general planteado, y, las limitaciones económicas, se decidió construir un GAM-FD con 6 polos en el rotor (ver Fig.1), sin incluir el diseño del circuito de arranque.

El rotor del GAM-FD se construyó con un rotor de hierro de 6 núcleos, con embobinados de conductor esmaltado AWG24, conectados en un esquema monofásico que facilita la rectificación del voltaje entregado y el posterior storage de energía en una batería [5].

Para salvaguardar la integridad del GAM-FD, la máquina se colocó dentro de una protección mecánica, tal como lo muestra la Fig. 2.

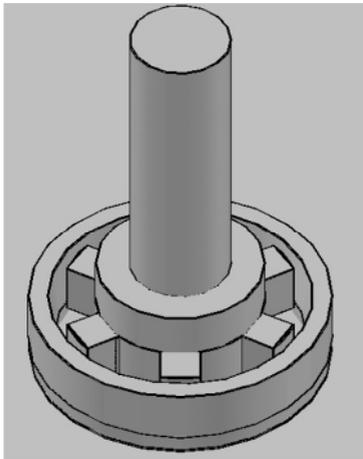


Fig. 1 Vista 3D del GAM-FDa construir. Diseño de los autores.

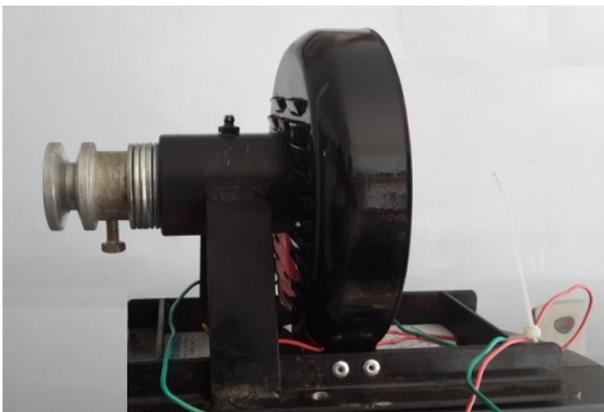


Fig. 2 GAM-FD acoplado a la protección mecánica. Fotografía de los autores.

B. Implementación del bloque de generación eléctrica

Diseñado y construido el generador, este se instaló en la parte superior derecha del soporte mecánico del módulo de turbinas. Esta ubicación permitió instalar en forma directa, la transmisión mecánica entre el eje del rodete de la turbina y el eje del generador. En esta etapa del proyecto, se decidió reemplazar el volante diseñado y construido en [2], por una polea tipo A de 6 pulgadas. La Fig.3 muestra una vista panorámica del bloque instalado.



Fig. 3 Bloque de generación eléctrica instalado en el banco hidráulico. Fotografía de los autores.

C. Diseño e implementación del panel de control

En este proyecto, se decidió complementar el bloque de generación eléctrica, con un panel de control, con los recursos suficientes para permitir valorar el desempeño y monitorear el funcionamiento del sistema. La Fig. 4 muestra el diagrama eléctrico propuesto para el panel requerido.

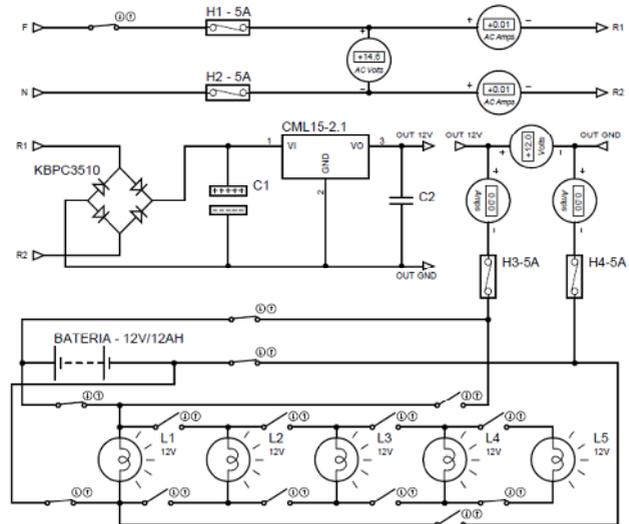


Fig. 4 Diagrama eléctrico del tablero de control. Diseño de los autores.

Los elementos requeridos en el diagrama eléctrico, se ubicaron dentro de un armario metálico diseñado con 3 secciones. En la primera, se incluyó la batería, la placa de rectificación y filtrado, y, el regulador de voltaje. En la segunda sección, se colocó un ventilador para mantenimiento de temperatura en el panel y una fuente de poder de 12 VDC y 5VDC. En la tercera, se ubicó la placa de adquisición de datos requerida para el módulo de monitoreo, la placa de procesamiento de información (montada sobre un Arduino Mega 2560), y, la placa de comunicación y registro (Arduino Ethernet Shield). La Fig. 5 muestra el tablero completo.



Fig. 5 Tablero del panel de control instalado. Fotografía de los autores.

Como batería se *seleccionó* el modelo VRLA de 12 V y 12AH [8], cuyo tiempo de carga se calcula a través de la expresión (6). Para una corriente nominal del generador de 2A, el tiempo de carga de la batería es de 6h.

$$t_c = \frac{I_B}{I_G} \quad (6)$$

En dónde,

- t_c , es el tiempo de carga de la batería, h.
- I_B , es la carga eléctrica de la batería, mAh.
- I_G , es la corriente que soporta el generador, mAh.

Para la *rectificación y filtrado*, se utilizó un rectificador de onda completa KBPC3510, conectado a un arreglo de capacitores.

Para la etapa de *regulación de voltaje* se utilizó un regulador CML15-2.1, con regulación tipo PWM. Este regulador trabaja entre 12V y 24V, soportando corrientes de carga de hasta 15A [9].

Para evaluar el desempeño del sistema, se decidió utilizar una *carga* tipo resistiva. Se seleccionó entonces lámparas LED, alimentadas a 12VDC y con un consumo de corriente de 0.4A.

Para la climatización de los componentes electrónicos en el tablero, se utilizó un *ventilador* común de 12 VCD (ver Fig. 6).



Fig. 6 Sección de climatización y alimentación de energía eléctrica a la sección de módulo de monitoreo. Fotografía de los autores.

V. DISEÑO DEL MÓDULO DE MONITOREO DEL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

A. Requerimientos de diseño del módulo de monitoreo

Las variables medibles, identificadas en el proyecto, se adquieren y acondicionan a través del nodo de adquisición de datos. La información recopilada, sirve de base para el cálculo de otras variables en el nodo de procesamiento (ver Tabla 6). La data resultante, se almacena temporalmente, previo su transmisión, desde el nodo de comunicación al nodo de registro. Simultáneamente, la información relevante, se muestra en el nodo de visualización, ubicado en las cercanías del sistema de hidrogenación. Finalmente, la data se registra permanentemente en el nodo de registro.

Tabla 6

Variables identificadas para el monitoreo. Elaboración de autores.

Variable	Símbolo	Unidad	Rango de variación
Variables a medir			
Voltaje eficaz	VAC	V	0 a 20
Corriente eficaz	IAC	A	0 a 5
Tirante de agua	h	cm	2 a 40
Velocidad de rotación	n	rpm	0 a 300
Voltaje en la batería	VDC	V	0 a 12
Variables a calcular			
Potencia eléctrica	Pe	W	0 a 100
Potencia mecánica	Pm	W	0 a 300
Eficiencia		-	0 - 100
Factor de potencia	Fp	-	0 a 1
Energía eléctrica	Ee	Wh	0 a 100
Energía mecánica	Em	Wh	0 a 300
Caudal	Q	l/s	15 50

B. Diseño del módulo de monitoreo

Para el registro de las 5 variables a medir, se decidió utilizar la instrumentación que se detalla en la Tabla 7. Para montar el nodo de procesamiento, se optó por emplear los recursos de la placa Arduino [10].

Tabla 7

Instrumentación seleccionada para el registro de las variables a medir. Elaboración de autores.

Variable a medir	Instrumento de medición
voltaje eficaz	divisor de voltaje para tensión AC
corriente eficaz	amperímetro con resistor shunt
tirante de agua	sensor ultrasónico HC-SR04
velocidad de rotación	sensor de velocidad HC-020K
voltaje en la batería	divisor de voltaje para tensión DC

Registro del voltaje eficaz en los bornes del generador

De acuerdo a la bibliografía [11], para la medición de voltaje en placas Arduino, se requiere reducir la amplitud de onda, y, desplazar la señal a lo largo del eje y para cancelar valores negativos. La amplitud de la onda se reduce en un divisor de tensión conectado entre los terminales del generador; y, el desplazamiento se logra usando una fuente de tensión creada por otro divisor, conectado a través de la alimentación de la placa (ver Fig. 7).

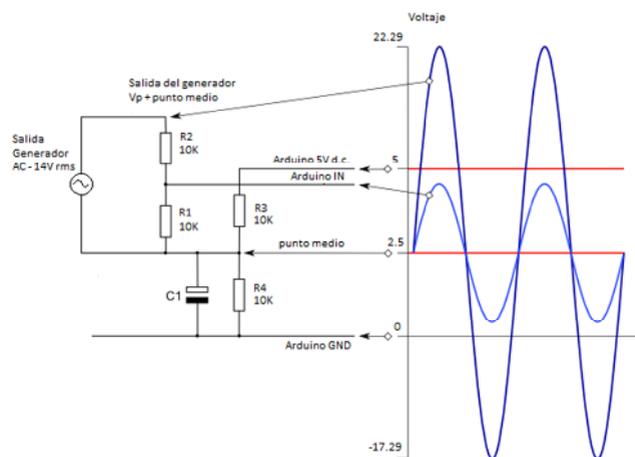


Fig. 7. Diagrama del circuito para medición del voltaje eficaz [11].

Las pruebas efectuadas en el bloque de generación, mostraron que el voltaje eficaz AC variaba entre 13.5V y 14.5V. Para el cálculo de los componentes de los divisores de tensión, se decidió emplear el voltaje eficaz promediado equivalente a 14 VCA, con un voltaje máximo de 19,79VCA.

De acuerdo a la bibliografía [11], el voltaje de desplazamiento debe ser igual a la mitad de la tensión de la alimentación de la placa, razón por la cual R3 y R4 deben ser iguales. En este proyecto, el voltaje de desplazamiento será de 2,5 V, y se emplearán resistores con resistencias equivalentes a 10 K . El uso de resistores de alta resistencia, pretende reducir el consumo de energía en la placa.

Según la bibliografía [11], para R1 se asigna un valor de 10 K . De acuerdo al esquema mostrado en la Fig. 7, a través de R1 y R2, fluye una corriente eléctrica de 2,5 mA. Entonces, el valor de R2 se puede aproximar utilizando la expresión (7), considerando que la caída de tensión en R2 es de 19.79 Vp:

$$R_2 = \frac{V}{I} \quad (7)$$

En dónde,

- R_2 , es el valor del resistor, .
- V , es el voltaje pico de salida del generador, V.
- I , es la corriente que circula por R1 y R2, A.

Con estas consideraciones, el valor de R2 se calcula en 10 K .

Registro de la corriente eficaz en el circuito de carga

La Fig. 8 muestra el esquema de medición de la corriente eficaz. Un transformador de corriente (sensor CT o SCT), se conecta en paralelo con un resistor de carga (resistor Burden) que entrega una tensión proporcional a la cantidad de corriente que circula a través de la carga. De acuerdo a la bibliografía [12], el cálculo del resistor Burden se realiza a través de la expresión (8):

$$R_{Burden} = \frac{V_{ref} N}{2 I_p} \quad (8)$$

En dónde,

- R_{Burden} , es el valor del resistor Burden, .
- V_{ref} , es el voltaje de referencia de la placa Arduino, V.
- N , es el número de espiras del bobinado secundario del transformador.
- I_p , es la corriente pico del sensor, A.

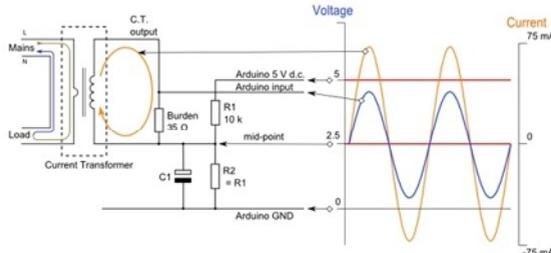


Fig. 8.Diagrama del circuito para medición de la corriente eficaz [12].

Registro de la altura del tirante de agua en el canal

Con la intención de determinar el caudal en el vórtice gravitacional, se decidió instalar, en el canal del banco hidráulico un sensor de ultrasonido tipo HC- SR04 [13], capaz de medir el tirante de agua en esa sección del canal.

El sistema ultrasónico de medición de nivel, se basa en la emisión de un impulso ultrasónico hacia una superficie reflectante, y, la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco, dependerá entonces del nivel del tanque. A la salida del sensor seleccionado, se obtiene un tren de pulsos, cuyo número es proporcional al tiempo transcurrido. Al multiplicar el número de pulsos por la duración de los mismos, se aproxima el tiempo de tránsito del sonido

Conocido el tiempo de tránsito del sonido, el nivel del líquido en el tanque, se obtiene a través de la expresión (9) [14]:

$$H = \frac{v \cdot t}{2} \quad (9)$$

En dónde,

- H , es la altura desde la película de agua hasta la ubicación del sensor, cm.
- v , es la velocidad del sonido en el aire, 34000cm/s.
- t , es el tiempo de tránsito del sonido, s.

En la lectura del sensor, pueden influir varios factores, como la presencia de espuma en la superficie del líquido que absorbe el sonido, la turbulencia extrema en el seno del líquido, el movimiento de la superficie del líquido; así como también el material y el estado de las paredes del tanque. Todos estos factores pueden compensarse con circuitos amortiguadores o temporizadores [14].

La altura del tirante de agua se calcula a través de la expresión (10):

$$h = y - H \quad (10)$$

En dónde,

- h , es la altura del tirante de agua, cm
- y , es la altura total, cm
- H , es la altura medida por el sensor, cm

Registro de la velocidad de rotación del eje de la turbina

Para el registro de la velocidad de rotación del eje de la turbina, se decidió instalar en el bloque de hidrogenación, un encoder HC-020K [15]. Este transductor rotativo, transforma el movimiento angular en una serie de impulsos digitales, con una sensibilidad de 20 pulsos por cada rpm. La velocidad de rotación se calcula a través de una interrupción programada, que cuenta los pulsos generados en un determinado intervalo de tiempo, considerando la sensibilidad del encoder, tal como lo muestra la expresión (11) [15]:

$$N = \frac{n \cdot 60}{t \cdot S} \quad (11)$$

En dónde,

- N , es la velocidad de rotación, rpm.
- n , es el número de pulsos generados.
- t , es el tiempo de generación de los pulsos en una revolución, s.
- S , es la sensibilidad del encoder, pulsos/rpm

Registro del nivel de voltaje en la batería

Para medir el nivel de voltaje en la batería con ayuda de la placa Arduino, se acordó emplear un divisor de tensión (ver Fig. 9), capaz de acondicionar la señal de voltaje de 12V a 5 V. Los componentes del divisor de tensión, se calculan a través de la expresión (12):

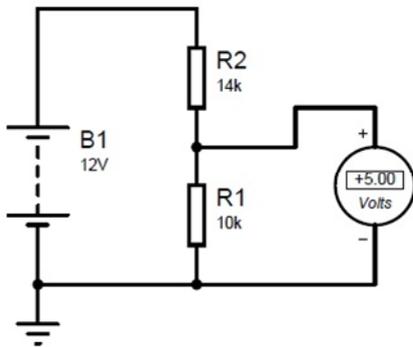


Fig. 9 Divisor de tensión utilizado para medir el nivel de voltaje en la batería. Diseño de los autores.

$$V = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{ard} \quad (12)$$

En dónde,

- V , es el voltaje en la batería, V.
- R_1, R_2 , son las resistencias del divisor, .
- V_{ard} , es la tensión de que ingresa al Arduino, V.

Para un valor de R1 de 10 K , se obtiene un valor de R2 de 14 K

C. Definición de algoritmos a implementar en el nodo de procesamiento

Algoritmo a implementar para calcular el caudal

Obtenido el valor de la altura del tirante de agua en el canal, el caudal en el vórtice se obtendrá a través de la expresión (13) [16]:

$$Q = C A \sqrt{2 * g * h} \quad (13)$$

En dónde,

- Q , es el caudal del banco hidráulico, m^3/s .
- C , es el coeficiente de descarga para un canal hidráulico rectangular, 0.9.
- A , es el área del canal rectangular, m^2 .
- g , es la aceleración de la gravedad, m/s^2 .
- h , es la altura del tirante de agua, m.

Algoritmo a implementar para calcular la potencia eléctrica

Al sistema de hidrogenación, como cargas experimentales, se conectará cargas resistivas (lámparas led). Estas cargas consumirán potencia activa, cuyo valor numérico se determinará con la ecuación (14) [17]:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v(n) i(n) \quad (14)$$

En dónde,

- P , es la potencia activa, W.
- $v(n)$, es el voltaje instantáneo, V.
- $i(n)$, es la corriente instantánea, A.

Algoritmo a implementar para calcular el factor de potencia

Para determinar el factor de potencia, se utilizará las potencias activa y aparente. La potencia aparente, se define de acuerdo a la ecuación (15):

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (15)$$

En dónde,

- S , es la potencia aparente, VA.
- V_{rms} , es el voltaje eficaz, V.
- I_{rms} , es la corriente eficaz, A.

Entonces, el factor de potencia se define a través de la expresión (16):

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (16)$$

En dónde,

- φ , es el factor de potencia.
- P , es la potencia activa, W.
- S , es la potencia aparente, VA.

Algoritmo para calcular la potencia mecánica

En [2], se estableció la relación existente entre el torque en el eje de la turbina, el caudal en el vórtice, y la velocidad de rotación del eje (ver Tabla 7).

Tabla 7

Torque en el eje de la turbina del sistema de hidrogenación, en función del caudal y velocidad de rotación.

rpm	caudal			
	15l/s	25l/s	40l/s	50l/s
0	25.63	44.42	54.37	69.75
10	22.73	41.13	49.60	65.85
20	19.77	37.77	44.95	61.72
30	16.75	34.33	40.42	57.34
40	13.67	30.80	36.01	52.72
50	10.53	27.20	31.72	47.86
60	7.33	23.51	27.55	42.76
70	4.07	19.75	23.50	37.43
80	0.75	15.91	19.57	31.85
90	-	11.98	15.76	26.03
100	-	7.98	12.07	19.97
110	-	3.89	8.50	13.67
120	-	-	5.05	7.14
130	-	-	1.72	0.36
140	-	-	-	-
Torque (Nm)				

La información obtenida sobre el valor del torque en el eje, servirá de base para calcular la potencia mecánica a través de la expresión (17):

$$P_m = \tau N \quad (17)$$

En dónde,

P_m , es la potencia mecánica o par motor, .W
 τ , es el torque o momento de torsión, Nm.
 N , es la velocidad de rotación, rpm.

Algoritmo a implementar para calcular la energía eléctrica y mecánica

La energía eléctrica aportada por el bloque de generación, se calculará a través de la ecuación (18):

$$E_e = P t \quad (18)$$

En dónde,

E_e , es la energía eléctrica aportada, Wh.
 P , es la potencia eléctrica demandada por una carga resistiva, W.
 t , es el tiempo de consumo, h.

La energía mecánica en el eje de la turbina, se calculará a través de la ecuación (19):

$$E_m = P_m t \quad (19)$$

En dónde,

E_m , es la energía mecánica en el eje de la turbina, Wh.
 P_m , es la potencia mecánica en el eje de la turbina, W.
 t , es el tiempo de observación, h

Algoritmo a implementar para calcular eficiencia

La eficiencia del sistema de hidrogenación, se calcula utilizando la ecuación (1).

D. Diseño del nodo de visualización

Las variables medidas y calculadas, serán mostradas a través de una pantalla tipo GLCD, conectada a la placa Arduino [18]. La pantalla GLCD se ubicará en la parte superior central del tablero del panel de control.

E. Diseño del nodo de comunicación

Este nodo consta de dos subnodos: storage y transmisión de datos.

Bloque de storage

El subnodo de storage se propuso como un almacenamiento temporal, que permita recibir la información medida y calculada, previo su transmisión al nodo de registro, y, su presentación en el nodo de visualización.

Considerando la cantidad de información que se requiere almacenar en el subnodo de storage, este se construirá sobre una placa Arduino Ethernet Shield [19], que dispone de un

zócalo para tarjetas de memoria micro-SD, que permite almacenar hasta 4GB de información.

Bloque de transmisión de datos

Para la transmisión de data entre el subnodo de storage y el nodo de registro, se utilizará los recursos de Internet a través de la misma placa Arduino Ethernet Shield [20].

F. Diseño del nodo de registro

El nodo de registro deberá garantizar la correcta recepción de la información emitida desde el nodo de comunicación.

En la SEE del DCCE UTPL, se mantiene una línea de trabajo relacionada al diseño e implementación de soluciones de telemetría de bajo costo. Para este proyecto, se decidió utilizar una herramienta desarrollada con anterioridad, que utiliza recursos de Arduino, Internet, y, Microsoft Access [20].

VI. IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO DE MONITOREO PARA EL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

A. Implementación de nodo de adquisición de datos

El nodo de adquisición de datos del módulo diseñado, permite obtener información sobre el voltaje eficaz a la salida del generador, de la corriente eficaz en el circuito de carga, del voltaje DC en los bornes de la batería, del tirante de agua en el canal hidráulico, y, de la velocidad de rotación del eje de la turbina.

Registro de voltaje eficaz, y, voltaje DC

La Fig. 10 muestra la placa electrónica diseñada e implementada para acondicionar las señales de voltaje eficaz y voltaje DC. La placa se diseñó en PCB, y, se construyó en fibra de vidrio, utilizando elementos electrónicos disponibles en el mercado local, de acuerdo a las especificaciones técnicas descritas en [21].

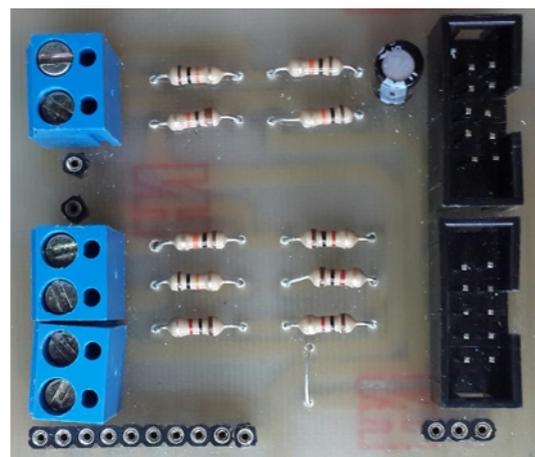


Fig.10Placa de acondicionamiento de voltaje eficaz y voltaje DC construida.Fotografía de los autores.

En la Fig.11 se muestra en el esquema eléctrico requerido para registrar los valores del voltaje eficaz (entre los terminales *fase* y *neutro* del panel de control), y, voltaje DC (entre los terminales *out* y *GND* del panel de control). Una vez configurado el esquema en el panel de control, conexiones internas alimentan las entradas respectivas en la placa de acondicionamiento. Esta a su vez, se conecta a la placa Arduino.

Para valorar el funcionamiento de la placa de acondicionamiento, se decidió comparar el voltaje eficaz y el voltaje DC registrados utilizando un voltímetro, y, los valores correspondientes mostrados en el display del panel de control. La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos, estableciendo un error relativo máximo de 0,7 % en la medición de voltaje eficaz, y, un error relativo máximo de 0.89% en la medición de voltaje DC.

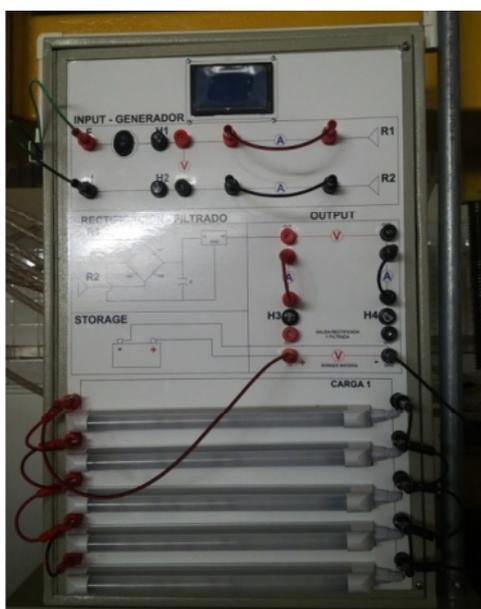


Fig. 11 Esquema eléctrico montado sobre el panel de control, para registro e voltaje eficaz a la salida del generador, y, de voltaje DC a la salida del bloque de rectificación y filtrado. Fotografía de los autores.

Tabla 8

Análisis comparativo de los registros de voltaje eficaz y voltaje DC. Elaborado por los autores.

N° de lámparas	Caudal (l/s)	Velocidad (rpm)	Voltaje eficaz (V)		Voltaje DC (V)	
			Mult.	Ard.	Mult.	Ard.
1	54	101	13.60	13.24	12.42	12.32
2	54	101	13.06	13.04	12.35	12.29
3	54	101	12.98	12.99	12.32	12.16
4	54	101	12.86	12.94	12.30	12.07
5	54	101	12.58	12.96	12.32	12.05

Registro de la corriente eficaz

No fue posible implementar físicamente el diseño descrito en [21] para la medición de corriente eficaz en el circuito de carga, debido a la imposibilidad de ubicar en el mercado local, un par de elementos electrónicos requeridos.

Ante esta situación, se decidió registrar el valor de la corriente en el circuito de carga, de manera manual, utilizando un amperímetro común, aprovechando las facilidades para experimentación del panel de control.

Registro del tirante de agua en el canal hidráulico

Para registrar la altura del tirante de agua en el canal, el sensor de ultrasonido se ubicó en el segmento de ingreso al tanque de vórtice (ver Fig.12). El sensor se unió a la placa Arduino, a través de un bus de datos.

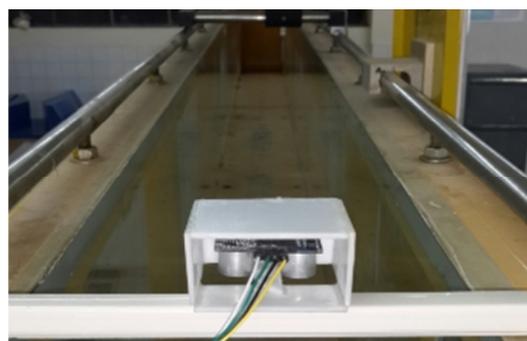


Fig. 12 Instalación del sensor ultrasónico HC-SR04 en el canal hidráulico. Fotografía de los autores.

Para validar el funcionamiento del circuito sensor, se decidió comparar las mediciones efectuadas por el sensor y mostradas en el display, con las establecidas utilizando una regla calibrada. La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos, estableciendo un error relativo máximo de 4,17 %.

Tabla 9

Análisis comparativo de los registros de tirante de agua. Elaborado por los autores.

Tirante de agua (h)				
N (rpm)	Caudal (l/s)	Regla (cm)	Sensor ultrasónico (cm)	Error relativo
101,7	54,32	20,5	20,65	0,73 %
99,1	53,12	19,3	19,75	2,33 %
97,3	51,76	18,6	18,75	0,81 %
97	51,76	18,6	18,75	0,81 %
95,7	53,12	19,4	19,75	1,80 %
95,4	51,06	18	18,25	1,39 %
94,6	52,30	19,1	19,14	0,21 %
93,1	51,41	17,9	18,5	3,35 %
92,3	51,76	18,5	18,75	1,35 %
90,7	51,76	18	18,75	4,17 %
90,4	51,76	18,1	18,75	3,59 %
89,5	51,18	18,1	18,33	1,27 %
89,2	51,02	18	18,22	1,22 %
89,2	50,19	17,3	17,63	1,91 %
88,9	49,65	17,5	17,25	1,43 %
87,5	48,55	16,1	16,5	2,48 %
87,2	50,36	17,5	17,75	1,43 %
81,5	48,19	16,1	16,25	0,93 %
80,1	48,92	16,5	16,75	1,52 %
77	47,81	16,1	16	0,62 %
76,8	50,15	17,3	17,6	1,73 %
74,1	48,92	16,5	16,75	1,52 %
63,8	48,92	16,3	16,75	2,76 %
47,5	48,55	16,4	16,5	0,61 %
30,1	48,19	16	16,25	1,56 %

Registro de la velocidad de rotación

Para el registro de la velocidad de rotación del eje de la turbina, se utilizó un encoder HC-020K capaz de detectar el movimiento de una punta adaptada al prisionero situado en la chumacera de la transmisión mecánica (ver Fig. 13). El sensor se unió a la placa Arduino, a través de un bus de datos.



Fig. 13Detalle de la instalación del encoder HC-020K en la chumacera de la transmisión mecánica. Fotografía de los autores.

Para validar el funcionamiento del circuito sensor, se decidió comparar las mediciones efectuadas por el sensor y mostradas en el display, con las establecidas utilizando un tacómetro digital. La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos, estableciendo un error relativo máximo de 7,50 %.

Tabla 10

Análisis comparativo de los registros de velocidad de rotación. Elaborado por los autores.

Caudal (Q) l/s	Velocidad de rotación (N)		
	Tacómetro (rpm)	Encoder (rpm)	Error relativo
54,32	101,7	102	0,29 %
53,12	99,1	99	0,10 %
51,76	97,3	97	0,31 %
51,76	97	96	1,04 %
53,12	95,7	94	1,81 %
51,06	95,4	95	0,42 %
52,30	94,6	93	1,72 %
51,41	93,1	96	3,02 %
51,76	92,3	91	1,43 %
51,76	90,7	90	0,78 %
51,76	90,4	92	1,74 %
51,18	89,5	89	0,56 %
51,02	89,2	89	0,22 %
50,19	89,2	90	0,89 %
49,65	88,9	89	0,11 %
48,55	87,5	87	0,57 %
50,36	87,2	88	0,91 %
48,19	81,5	81	0,62 %
48,92	80,1	86	6,86 %
47,81	77	78	1,28 %
50,15	76,8	79	2,78 %
48,92	74,1	73	1,51 %
48,92	63,8	63	1,27 %
48,55	47,5	50	5,00 %
48,19	30,1	28	7,50 %

B. Implementación del nodo de procesamiento

Adquiridas las variables medibles, se procedió a programar en Arduino los algoritmos descritos en un trabajo anterior para el cálculo de variables requeridas[21]. Arduino utiliza un lenguaje basado en C/C++.

Cálculo del caudal

El flujograma del algoritmo utilizado para el cálculo del caudal, está representado en la Fig. 14. El flujograma permite obtener el tiempo de tránsito del sonido a través del sensor ultrasónico, determinando la distancia entre la altura del canal y la altura del tirante de agua representada por la variable H, restada de la altura total del canal hidráulico ($y=31.75$ cm), con la cual se calcula el caudal.

En el marco de este proyecto, se utilizó el banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica de UTP, en el que el área del canal rectangular es de 0.0635 m^2 , y, el coeficiente de descarga corresponde al de un canal hidráulico rectangular, igual a 0.9 [16]. El código de implementación se muestra en [21].

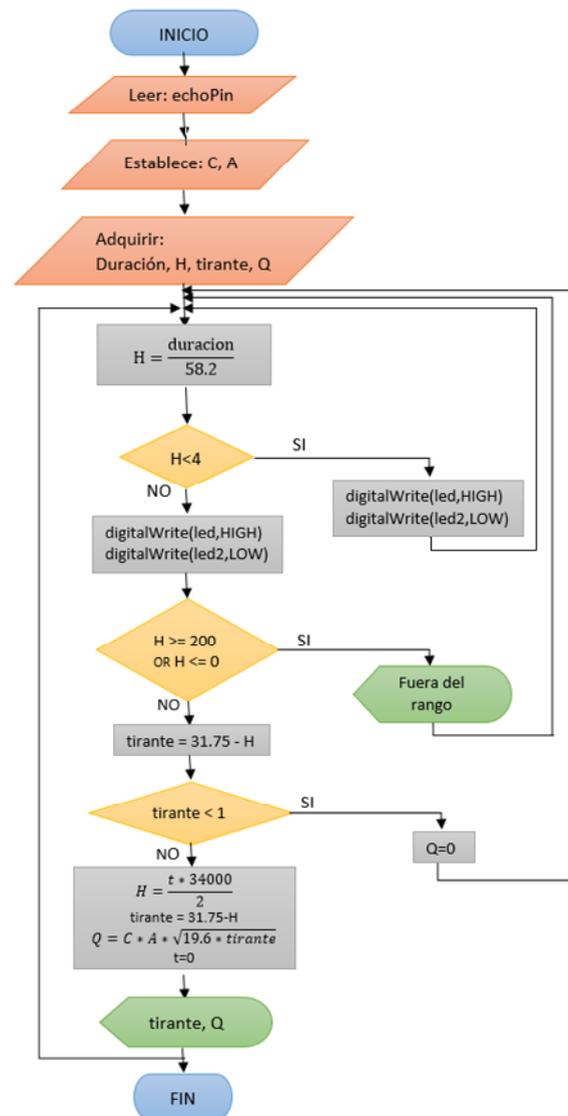


Fig. 14Algoritmo de cálculo del caudal, implementado en Arduino Mega 2560. Diseño de los autores.

Cálculo de la potencia mecánica

Para el cálculo de la potencia mecánica se utilizó la información obtenida en [2], sobre el valor del torque en el eje del rodete de la turbina en función de la velocidad de rotación. El flujograma del algoritmo utilizado para el cálculo de la potencia mecánica se muestra en la Fig. 15, mientras que el código de implementación se detalla en [21].

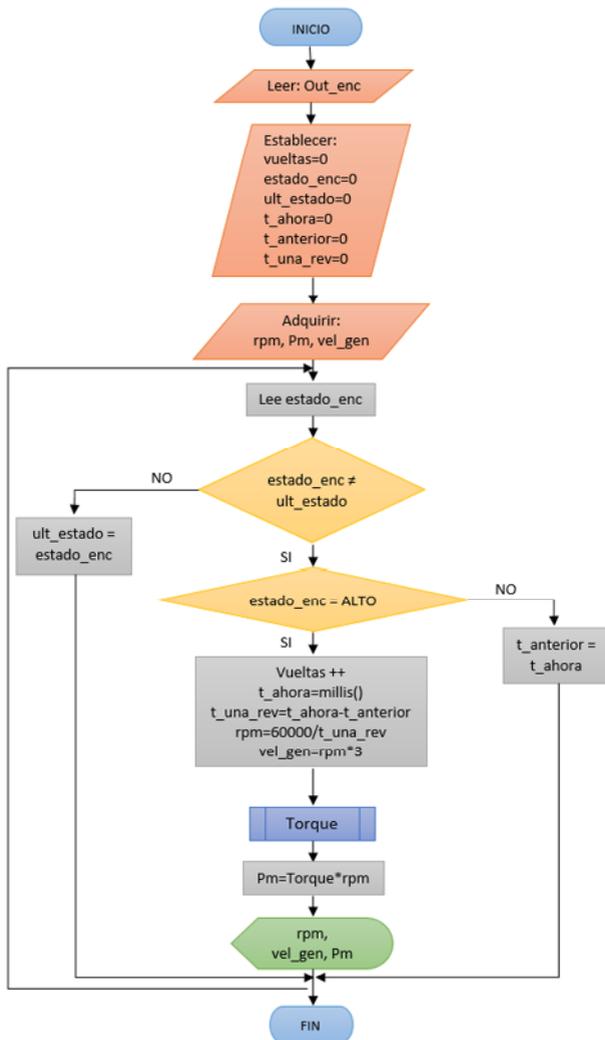


Fig. 15 Algoritmo de cálculo de potencia mecánica y velocidad de rotación, implementado en Arduino Mega 2560. Diseño de los autores.

Cálculo de la potencia eléctrica

Para el cálculo de la potencia eléctrica, se necesita el valor de voltaje eficaz y corriente eficaz.

Debido a que no fue posible implementar físicamente la placa de acondicionamiento para la adquisición del valor de corriente eficaz; se decidió que el cálculo de potencia eléctrica sea manual. Para este fin, se formalizó el uso de una bitácora de registro, tal como se muestra en la Fig. 16.



BITÁCORA DE REGISTRO

Responsable:

Fecha	Hora	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W) $P_e = V \cdot I$	Eficiencia $n = P_e / P_m$

Fig. 16 Bitácora de registro para el cálculo de la potencia eléctrica y de la eficiencia. Elaborado por los autores.

Cálculo de la eficiencia

Al igual que la potencia eléctrica, el cálculo de la eficiencia se realizará manualmente, utilizando la bitácora de registro descrita en el apartado anterior.

C. Implementación del nodo de visualización

Para implementar el nodo de visualización, se utilizó una pantalla GLCD 128x64 acoplada a la placa Arduino, a través de circuitos especialmente diseñados (ver Fig. 17 y 18).



Fig. 17 Acoplamiento de la pantalla a la placa Arduino. Fotografía de los autores



Fig. 18 Nodo de visualización en operación. Fotografía de los autores

D. Implementación del nodo de comunicación y registro

De acuerdo al diseño descrito en [21], este nodo consta de dos bloques: storage de datos y transmisión.

El bloque de storage se construyó en la placa Arduino Ethernet Shield, que permite el almacenamiento de hasta 4GB de información. Para el bloque de transmisión de datos, se utilizó una dirección IP para conexión Ethernet, entre el módulo y una PC. El algoritmo utilizado para el nodo de comunicación y registro está representado en el flujograma mostrado en la Fig. 19, mientras que en [21] se detalla el código utilizado.

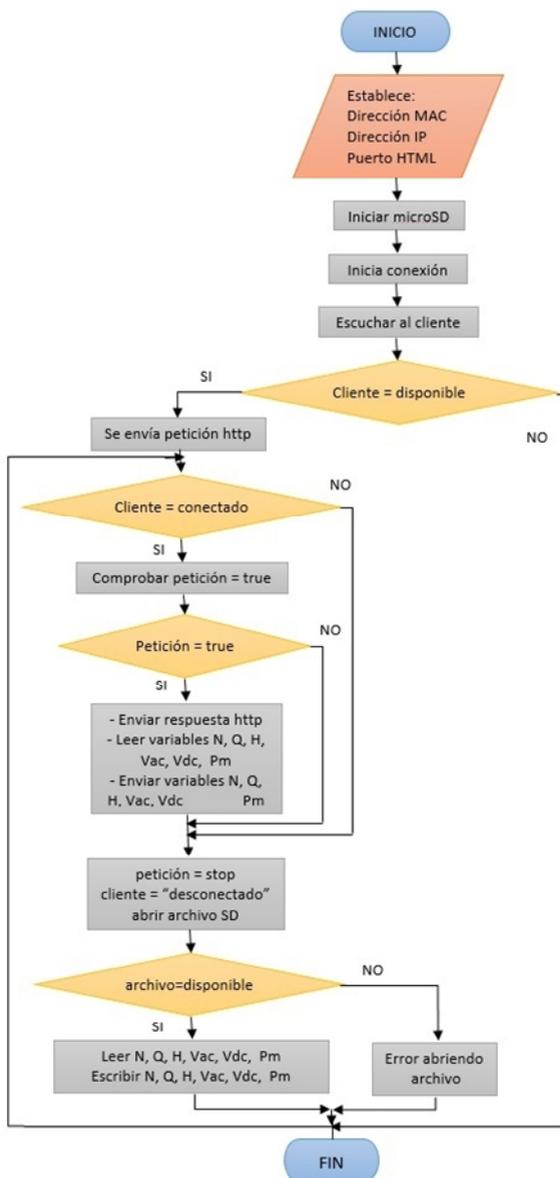


Fig. 19 Algoritmo de operación implementado en Arduino mega 2560, para adquisición de datos del sistema, storage de data en la microSD, y, transferencia de datos al PC [20].

En la Fig. 20 se muestra los resultados obtenidos al verificar la operatividad del nodo.

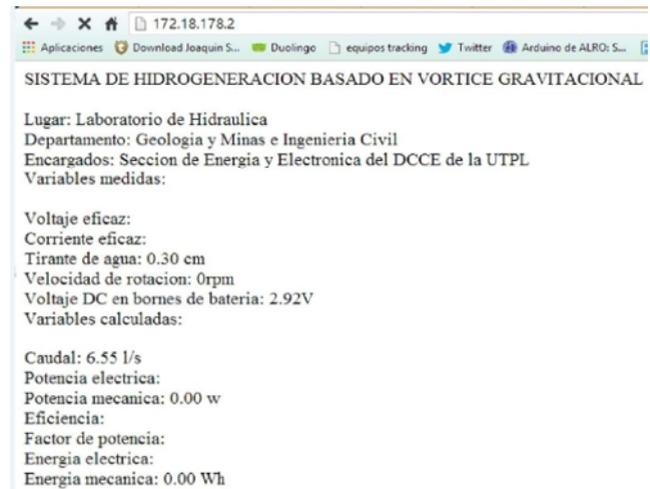


Fig. 20 Transmisión de datos medidos y calculados a una dirección IP definida. Fotografía de los autores

VII. EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL DESEMPEÑO DEL BLOQUE DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

Problemas en la construcción del nodo de monitoreo, obligaron a adoptar una metodología resumida para evaluar el desempeño del bloque de generación. La metodología de evaluación propuesta incluye el análisis del funcionamiento del bloque en vacío y bajo carga.

A. Análisis del funcionamiento del generador en vacío

Este análisis se realizó con el objetivo de determinar el voltaje eficaz entre los bornes del generador eléctrico [22]. La Tabla 1, indica los resultados obtenidos, mostrando que el generador empieza a entregar energía, cuando el eje rota a 18 rpm (51 l/s de caudal). En este punto, se registra un voltaje eficaz de 6.95 V.

Tabla 11. Análisis del funcionamiento del generador en vacío. Elaborado por los autores.

Pruebas en vacío		
Velocidad (N)	Caudal (Q)	Voltaje (VCA)
18.9 rpm	51.61 l/s	6.95 V
43.7 rpm	52.11 l/s	7.99 V
58 rpm	52.41 l/s	8.50 V
76.4 rpm	52.61 l/s	11.43 V
85.2 rpm	52.81 l/s	12.45 V
89.5 rpm	53.21 l/s	13.11 V
91 rpm	53.51 l/s	13.35 V
94.1 rpm	53.71 l/s	13.40 V
96.5 rpm	53.91 l/s	13.65 V
100.3 rpm	55.01 l/s	13.88 V
101.2 rpm	56.21 l/s	14.55 V
102.7 rpm	57.71 l/s	14.73 V

La medición de voltaje generado hacia el máximo se vio limitada por la capacidad del banco hidráulico, que es capaz de entregar un caudal máximo de 57 l/s. En este punto, el eje rota a 102 rpm, y, el generador entrega un voltaje de 14.72V.

B. Análisis del funcionamiento del generador bajo carga

Para este análisis, se conectó los bornes del generador eléctrico al bloque de rectificación y filtrado en el panel de control [22]. Los resultados muestran que las leyes de Kirchoff y Ohm se cumplen en los circuitos, razón por la cual se puede afirmar que el generador es capaz de mantener la alimentación de la carga en diferentes configuraciones (ver Tabla 12).

Tabla 12.

Análisis del funcionamiento del generador bajo carga.
Elaborado por los autores.

Pruebas con carga (lámparas) a 99 rpm y 56 l/s			
Serie			
Cargas	Vcd (V)	Icd (A)	Potencia (W)
1 carga	10,6	0,36	3,816
2 cargas	12,6	0,0011	0,014
Paralelo			
2 cargas	10	0,4	4
3 cargas	10	0,43	4,3
4 cargas	10	0,48	4,8

VIII. CONCLUSIONES

- Considerando las limitaciones mecánicas existentes en el sistema construido de hidrogenación basada en vórtice gravitacional, se decidió utilizar en el bloque de generación, un generador de CA asíncrono, monofásico, de fase dividida, en el que el generador se autoexcita a partir de un arrollamiento auxiliar en el estator, situado a un ángulo de 90° con respecto al arrollamiento principal.
- Se prevé que el generador opere con 6 pares de polos, con un campo magnético giratorio de inducción estática.
- Partiendo de que el campo magnético en el generador eléctrico seleccionado puede ser considerado constante, y, que en el proyecto se aprovechan los recursos del banco hidráulico del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Geología y Minas, e, Ingeniería Civil de la UTPL, se decidió controlar la energía generada en función de la regulación de la velocidad de rotación del generador, a través de la variación del caudal turbinado.
- Dadas las particularidades de este proyecto, que requiere aprovechar de manera muy eficiente, la energía entregada por la turbina, garantizando un buen torque y una buena velocidad de rotación en el eje del generador, se decidió proponer la utilización de una transmisión por rozamiento, empleando correas planas, opción que garantiza un mayor rendimiento debido a un menor peso.
- La potencia a transmitir al bloque de generación es de 278 W, mientras que la velocidad en el eje de la turbina alcanza las 115 rpm. Por otra parte, las pruebas de campo determinaron que el rendimiento óptimo del generador, se registra en la entrega de voltaje AC, entre 7.7 y 28 V. Estos valores de voltaje, corresponden a velocidades de rotación, entre 115 rpm y 430 rpm.
- Considerando que, en este proyecto la energía aportada por el bloque de generación se almacenará en una batería alimentada a 12 VCD, se decidió que el generador aporte 15 VCA. Este régimen es posible, para una velocidad en el eje de la máquina, equivalente a 227 rpm, lo que determina una relación de transmisión igual a 3.
- La selección de la sección de la correa, se basa en la

velocidad de rotación de la polea conducida y la potencia de diseño, esto a 227 rpm y 0.28 CV, respectivamente, se opta por utilizar la sección de la banda seleccionada es de tipo "A".

- En este proyecto, se decidió complementar el bloque de generación eléctrica, con un panel de control, con los recursos suficientes para permitir valorar el desempeño y monitorear el funcionamiento del sistema.
- Se diseñó e implementó un módulo de monitoreo, conformado por nodos de adquisición de datos, procesamiento, comunicación, visualización, y, registro para la evaluación y desempeño del módulo de hidrogenación, basado en vórtice gravitacional.
- El nodo de adquisición de datos registra el voltaje eficaz a la salida del generador, el voltaje DC en los bornes de la batería, la altura del tirante de agua en el canal hidráulico, y, la velocidad de rotación del eje de la turbina.
- El nodo de procesamiento permite el cálculo del caudal y potencia mecánica del sistema de hidrogenación.
- En el nodo de visualización se muestra las variables medidas y calculadas.
- El nodo de comunicación y registro permite al usuario evaluar el sistema desde una PC o a través del registro de la información en la microSD.
- Las pruebas preliminares muestran que el bloque de generación del sistema está funcionando dentro de lo esperado.

IX. REFERENCIAS

- [1] J. Ortega, G. Romero "Prediseño del bloque de generación de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional", [En línea]: Disponible en: <<http://www.utpl.edu.ec/blogjorgeluisjaramillo/?p=1130>> [Consulta de Noviembre del 2013].
- [2] J. Peña. "Ingeniería de detalle y construcción de un sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional" [En línea]: Disponible en: <<http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/7769/1/FINAL.pdf>>. [Consulta Julio 2013].
- [3] R. Batista, J.Fonseca. "Generadores y sistemas de control en micro y mini centrales hidroeléctricas de 1kW a 1MW" [En línea]: Disponible en: <<http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0629t.pdf>>. [Consulta Julio del 2013].
- [4] Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos, Perú Pág. 180, [En línea]: Disponible en: <<http://www.uncp.edu.pe/newfacultades/ingenieriasarqui/new-electrica/phocadownload/descargas/manualdemicrocentraleshidraulicas.pdf>> [Consulta de Agosto del 2013].
- [5] Universidad Técnica de Cotopaxi, Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Carrera de Ingeniería Electromecánica, William Llango, Edison Gallegos, "Diseño e implementación de una Pico-Central Hidroeléctrica aprovechando el movimiento del agua para la generación de energía eléctrica en la hacienda ecológica Baños de la parroquia Alaquez-Provincia de Cotopaxi", [En línea]: Disponible en: <repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/1312/1/T-UTC-2051.pdf> [Consulta de Agosto del 2013].
- [6] V. Tokarev. "Máquinas eléctricas", Energoisdat, Moscú, 1990, primera edición, 624p.
- [7] M. Cáceres, H. Caraguay. "Diseño, implementación, y, análisis preliminar del desempeño de un sistema neumático-

- eléctrico para el harvesting de energía en accesos vehiculares. [En línea]: Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/8011/1/Caceres_Vega_Miguel_Agustin_Caraguay_Caraguay_Hernan_Gustavo.pdf>. [Consulta Diciembre 2013].
- [8] Batería RITAR RT120 12V12AH. [En línea]: Disponible en: <http://www.renova-energia.com/productos_baterias/baterias_ritar_rt12120_12v12_ah.html>. [Consulta de Noviembre del 2013].
- [9] Regulador de voltaje phocos CML15. [En línea]: Disponible en: <http://www.renova-energia.com/productos_reguladores/phocos_cml15.html>. [Consulta de Noviembre del 2013].
- [10] Arduino. Sitio web Proyecto Arduino. Disponible en: <<http://www.arduino.cc/>> [Consulta de Noviembre 2013]
- [11] Medición de voltaje AC en arduino [En línea]: Disponible en: <<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/measuring-voltage-with-an-acac-power-adapter>>. [Consulta de Noviembre 2013]
- [12] CT Sensors – Intefacing with an arduino [En línea]: Disponible en: <<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/ct-sensors-interface>>. [Consulta de Diciembre 2013].
- [13] Ultrasonic Ranging Module HC-SR04 [En línea]: Disponible en: <users.ece.utexas.edu/~.../Datasheets/HCSR04b.pdf>. [Consulta de Diciembre 2013]
- [14] A. Creus. “Instrumentación industrial”, Octava edición, México D. F., 2010.
- [15] Encoder HC-020K [En línea]: Disponible en: <<http://www.godeal.com.ar/p/hc-020k-velocidade-dupla-modulo-de-medicao-w-encoders-fotoeletricos-preto-verde-2-pcs-219416>>. [Consulta Diciembre 2013].
- [16] Manual de hidrometría [En línea]: Disponible en: <sistemamid.com/download.php?a=1096>. [Consulta Diciembre 2013].
- [17] An introduction to AC Power [En línea]: Disponible en: <<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/ac-power-introduction>>. [Consulta Diciembre 2013].
- [18] GLCD Graphical LCD library [En línea]: Disponible en: <http://playground.arduino.cc/uploads/Code/GLCD_Documentation.pdf>. [Consulta Diciembre 2013].
- [19] Arduino Ethernet Shield [En línea]: Disponible en: <<http://arduino.cc/es/Main/ArduinoEthernetShield>> [Consulta Diciembre del 2013].
- [20] J. Chunchu. “Diseño, implementación, y, operación de un nodo de telemetría para monitoreo del sistema híbrido termosolar – GLP de abastecimiento de ACS a la CU” [En línea]: Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/8182/1/Chunchu_Aguilar_Jasmine_Anabel.pdf>. [Consulta Diciembre 2013].
- [21] J. Ortega, G. Romero. “Diseño del módulo de monitoreo del bloque de generación eléctrica de un sistema de hidrogenación basada en vórtice gravitacional” [En línea]: Disponible en: <<http://www.utpl.edu.ec/blogjorgeluisjaramillo/?p=1169>>. [Consulta Diciembre 2013].
- [22] J. Ortega, G. Romero. “Evaluación preliminar del desempeño del bloque de generación eléctrica” [En línea]: Disponible en: <<http://es.scribd.com/doc/207023740/evaluacion-preliminar-del-desempeno-del-bloque-de-generacion-de-un-sistema-de-hidrogenacion-basada-en-vortice-gravitacional>>. [Consulta Febrero 2013].

