

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA MEDIANTE ELEMENTOS PIEZOELECTRICOS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN “INGENIERÍA ELÉCTRICA”**

ARELLANO CALVACHI KEVIN OSWALDO

ORDÓÑEZ BENAVIDES STEFANO FELIPE

DIRECTOR: ING. MIGUEL ÁNGEL LUCIO CASTRO, M.SC.

CODIRECTOR: ING. NELSON VICTORIANO GRANDA GUTIÉRREZ, PH.D.

Quito, 24 de Agosto 2022

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Kevin Oswaldo Arellano Calvachi y Stefano Felipe Ordóñez Benavides, bajo nuestra supervisión.

Ing. Miguel Ángel Lucio Castro, MSc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ing. Nelson Victoriano Granda Gutiérrez, PhD.
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Kevin Oswaldo Arellano Calvachi, Stefano Felipe Ordóñez Benavides, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



Kevin Oswaldo Arellano Calvachi



Stefano Felipe Ordóñez Benavides

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y hermanas que gracias a su apoyo constante he podido culminar esta etapa de mi vida.

Kevin Arellano

Dedico este trabajo a mi madre María Renee Benavides Cisneros quien con su amor y cariño me brindo el impulso para superar cualquier adversidad que se me fue presentada para lograr titularme en la Escuela Politécnica Nacional.

A mi padre Carlos Aníbal Ordoñez Cajas quien con su apoyo moral no me dejo nunca dudar de mi camino y seguirlo sin importar que sucediera.

A mis hermanos Carlos Renato y Dennis Alfredo quienes hicieron grandes esfuerzos para ayudarme a lograr este objetivo.

A mi tía Marta Leonor y mi primo Jacobo Ariel que me brindaron su mano siempre que lo necesitaba y me entregaron su confianza y cariño.

Al MSc. Miguel Lucio y al Dr. Nelson Granda, quienes ayudaron en el desarrollo de este trabajo de titulación.

Stefano Ordoñez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres que siempre me han dado la fuerza para soportar y enfrentar los problemas, así como su total apoyo para culminar este trabajo de titulación. A los profesores que me han inculcado e impartido los conocimientos y valores que tanto me han servido en el campo laboral como en mi vida diaria. Agradezco a mis amigos y familiares que me han dado el ánimo para continuar y han sido el ejemplo que me ha impulsado a seguir adelante.

Kevin Arellano

Agradezco al destino por darme la oportunidad de culminar este trabajo de titulación, a mi familia por darme la confianza de lograrlo. Agradezco a los profesores de la Escuela Politécnica Nacional que me instruyeron para ser una persona funcional en esta sociedad brindándome su dedicación y tiempo, un agradecimiento a nuestro tutor Miguel Lucio por ofrecernos su tiempo y dedicación en este proyecto de titulación.

Stefano Ordoñez

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo General	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 ALCANCE	2
1.3 MARCO TEÓRICO.....	4
1.3.1 FENÓMENOS DE LOS MATERIALES.....	4
1.3.2 Modelo matemático de la piezoelectricidad.....	9
1.3.3 Tipos de materiales piezoeléctricos.	22
1.3.4 Disponibilidad de materiales piezoeléctricos en el Ecuador.....	24
1.3.5 Aplicaciones de la energía piezoeléctrica	24
1.3.6 Aerogenerador de eje vertical.....	25
1.3.7 Control de Estados	36
1.3.8 Modelo de Distribución Weibull	45
1.3.9 Tratamiento de datos Eólicos.....	46
2 METODOLOGÍA, ARMADO Y CONSTRUCCION.....	50
2.1 Baldosas piezoeléctricas.....	51
2.1.1 Parámetros eléctricos de un generador piezoeléctrico	51
2.1.2 Diseño de los componentes de las baldosas piezoeléctricas.....	53
2.1.3 Rectificación de voltaje y Almacenamiento de energía	57
2.2 Cálculos para el diseño del aerogenerador de eje vertical.....	58
2.2.1 Determinación de la velocidad nominal del viento.....	59
2.2.2 Cálculos de variables en el aerogenerador Savonius	68
2.2.3 Diseño preliminar del aerogenerador–prototipo del equipo	71
2.2.4 Diseño del aerogenerador Savonius	73

2.3	Diseño del control de Estados.....	81
2.3.1	Análisis matemático para el convertidor Buck-Boost	81
2.3.2	Diseño del convertidor Buck-Boost.....	85
2.4	Materiales del sistema Piezo-Aerogenerador.....	90
2.4.1	Generador piezoeléctrico.....	90
2.4.2	Aerogenerador de eje vertical.....	95
2.5	Armado y construcción del Sistema Piezo-Aerogenerador.	96
2.5.1	Armado y construcción de las baldosas piezoeléctricas.	96
2.5.2	Armado y construcción del aerogenerador de eje vertical.....	100
2.5.3	Implementación del control de estado	108
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	113
3.1	Pruebas.....	113
3.1.1	PRUEBAS REALIZADAS AL GENERADOR PIEZOELECTRICO.....	113
3.1.2	PRUEBAS REALIZADAS AL AEROGENRADOR	124
3.1.3	INTEGRACIÓN SISTEMA PIEZO-GENERADOR EOLICO.....	131
3.2	Fiabilidad del sistema piezo-generador eólico	138
4	CONCLUSIONES	142
5	RECOMENDACIONES.....	143
6	BIBLIOGRAFIA.....	144
7	ANEXOS.....	148
7.1	Anexo A-I Registro de datos eólicos en el periodo estudiado	148
7.2	Anexo A-II Planos del prototipo de Aerogenerador Savonius	1
7.3	Anexo A-III Tabulación de Distribución Weibull.....	1
7.4	Anexo A-IV Potencias con/sin Distribución Weibull.....	5
7.5	Anexo A-V Planos del diseño final de Aerogenerador Savonius	1
7.6	Anexo A-VI Análisis detallado control de estados	1
7.7	Anexo A-VII Planos de las baldosas piezoeléctricas.....	1
7.8	Anexo A-VIII Códigos de Arduino para la Calibración & Implementación del control de estados	3

Índice de tablas

Tabla 1 Registro de datos eólicos de un día.	60
Tabla 2 Proforma de gastos y materiales para la construcción de las baldosas piezoeléctricas	94
Tabla 3 Proforma de gastos y materiales del aerogenerador Savonius.	96
Tabla 4 Mediciones de carga y descarga para distintos valores de capacitancia utilizando baldosas piezoeléctricas como fuente de voltaje.	116
Tabla 5 Datos obtenidos para medición de potencia de una baldosa.....	118
Tabla 6 Voltaje obtenido con baldosas conectadas en serie.....	119
Tabla 7 Voltaje obtenido con baldosas conectadas en paralelo.	120
Tabla 8 Voltajes obtenidos a la salida del regular lm317.	121
Tabla 9 Valores de voltaje regulado.	122
Tabla 10 Valores de voltaje a la salida del amplificador.....	123
Tabla 11 Valores de voltaje y corriente para cada relación de traslape.	128
Tabla 12 Valores de voltaje y corriente en vacío.	129
Tabla 13 Valores de Voltaje Corriente frente a una carga de 3 W.	130
Tabla 14 Valores de voltaje y corriente para el cálculo de potencia.....	130
Tabla 15 Valores de voltaje y corriente para el cálculo de potencia en conjunto.	132
Tabla 16 Proforma para construir 34 conjuntos de baldosas.	138

Índice de figuras

Figura 1-1 Curva de Histéresis para materiales ferroeléctricos [2].	4
Figura 1-2 Figura Representación bidimensional piroelectricidad [3].	5
Figura 1-3. Comportamiento de un material piezoeléctrico en presencia de un esfuerzo mecánico [4].	6
Figura 1-4 Modelo simple del efecto piezoeléctrico: a) Molécula eléctricamente neutra, b) Molécula sometida a una fuerza externa, c) Efecto de polarización en la superficie del material [6].	7
Figura 1-5 Fenómeno piezoeléctrico: a) Flujo de corriente provocado por un material piezoeléctrico sometido a presión donde F es la fuerza aplicada b) Ausencia de corriente en un material piezoeléctrico en un estado neutro [6].	8
Figura 1-6 Forma de onda de un material piezoeléctrico.	8
Figura 1-7 Ejes y planos de referencias para piezoeléctricos [12].	12
Figura 1-8 Representación eléctrica de un material piezoeléctrico [10].	14
Figura 1-9 Parámetros mecánicos sistema masa resorte [10].	15
Figura 1-10 Modelo de un circuito de generación de energía piezoeléctrico a) Con sus componentes mecánicas y eléctricas b) Circuito eléctrico equivalente [10].	16
Figura 1-11 Piezogenerador Longitudinal [14].	18
Figura 1-12 Ejes de simetría de un cristal de cuarzo [13].	19
Figura 1-13 Anemograma de velocidad del viento [27].	28
Figura 1-14 Anemograma de la ciudad de Quito para el periodo de un año.	29
Figura 1-15 Velocidades promedio del anemograma de la ciudad de Quito para el periodo de un año.	29
Figura 1-16 Curva de Frecuencia de Velocidades [27].	30
Figura 1-17 Curva de Potencia del Viento [27].	31
Figura 1-18 Maquinas Eólicas para bombeo de agua y generación de energía [25].	31
Figura 1-19 Diagrama de flujo de viento y traslape del rotor Savonius [26].	33
Figura 1-20 Diagrama de eficiencia de los rotores eólicos [26].	34
Figura 1-21 Modelos de tipos de rotores Savonius [29].	34
Figura 1-22 Diagrama del flujo de aire en un pasaje de alabe abierto [32].	35
Figura 1-23 Diagrama de bloques del sistema de control representado en el espacio de estados [32].	39
Figura 1-24 Convertidor Buck-Boost [35].	40
Figura 1-25 Convertidor Buck-Boost en estado 1 [35].	40
Figura 1-26 Convertidor Buck-Boost en estado 0 [35].	41
Figura 1-27 Diagrama del capacitor del sistema Buck Boost [36].	43
Figura 1-28 Forma típica de la función de Densidad Weibull [37].	46
Figura 1-29 Velocidad media y dirección mediante tabla [38].	47
Figura 1-30 Velocidad media y dirección mediante representación gráfica (rosa de los vientos) [38].	47
Figura 1-31 Histograma de frecuencias relativas [38].	48
Figura 1-32 Curva de duración de la velocidad [38].	49
Figura 2-1 Metodología para la verificación de la factibilidad de la generación piezoeléctrica.	51
Figura 2-2 Diagrama del sensor piezoeléctrico a utilizar [43].	55
Figura 2-3 Vista lateral de un sensor piezoeléctrico con puntos de suelda ubicados en los polos [43].	56
Figura 2-4 Arquitectura para el almacenamiento de energía [autoría propia]	57
Figura 2-5 Puente rectificador 2A,10W [45].	58

Figura 2-6 Virgen del páramo, Papallacta [autoría propia].....	60
Figura 2-7 Anemómetro para la adquisición de datos [autoría propia].....	60
Figura 2-8 Distribución temporal de datos de velocidad [autoría propia].	61
Figura 2-9 Distribución de frecuencias de probabilidad de datos de velocidad [autoría propia].	62
Figura 2-10 Distribución de frecuencias de Probabilidad Acumulada de datos Velocidad [autoría propia].....	62
Figura 2-11 Histograma de datos de velocidad [autoría propia].	63
Figura 2-12 Distribución temporal de datos de dirección [autoría propia].	63
Figura 2-13 Distribución de frecuencias de probabilidad de datos de dirección [autoría propia].	64
Figura 2-14 Distribución de frecuencias de probabilidad acumulada de datos de dirección [autoría propia].....	64
Figura 2-15 Histograma de datos de dirección [autoría propia].	65
Figura 2-16 Convención rosa de los vientos [47].....	65
Figura 2-17 Rosa de vientos del proyecto actual [autoría propia].	66
Figura 2-18 Distribución Weibull en base a factor k de forma y c de escala [47].	67
Figura 2-19 Velocidad Media usando los parámetros de escala y forma [47].....	68
Figura 2-20 Valores típicos de Cp. para varios tipos de turbinas [47].....	69
Figura 2-21 Valores típicos de densidad del aire [47].....	70
Figura 2-22 Esquema del Prototipo de Aerogenerador Savonius [autoría propia].	72
Figura 2-23 Distribución Weibull del presente proyecto [autoría propia].	74
Figura 2-24 Curva de potencia por superficie [autoría propia].	74
Figura 2-25 Densidad de Potencia [autoría propia].	75
Figura 2-26 Dimensiones de un rotor Savonius respecto al traslape [29].	75
Figura 2-27 Cruceta para los alabes con traslape variable [autoría propia].	76
Figura 2-28 Alabe y eje central para el aerogenerador [autoría propia].	77
Figura 2-29 Sistema Crucetas-alabe-ejes para el aerogenerador [autoría propia].....	77
Figura 2-30 Ficha Técnica y Medidas de los rodamientos para el aerogenerador [47]. ...	78
Figura 2-31 Datos técnicos de los rodamientos para el aerogenerador [47].	78
Figura 2-32 Rodamientos para el aerogenerador [autoría propia].	79
Figura 2-33 Estructura de soporte para el aerogenerador [autoría propia].	79
Figura 2-34 Diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].	80
Figura 2-35 Motor de corriente continua [autoría propia].	80
Figura 2-36 Curva de potencia vs corriente del motor propuesto [autoría propia].....	81
Figura 2-37 (a) Circuito. (b) Circuito equivalente cuando el interruptor está en ON y el diodo en OFF. (c) Circuito equivalente cuando el interruptor está en OFF y el diodo en ON [49].	82
Figura 2-38 Análisis en intervalo $0 < t < DT$ [49].....	82
Figura 2-39 Análisis en intervalo $DT < t < T$ [49].	84
Figura 2-40 Modelo Thévenin del Generador [49].	87
Figura 2-41 Distribución de la fuerza aplicada para: a) superficie rectangular, b) superficie cuadrada [44].	91
Figura 2-42 Área del pie vs área de la baldosa [44].	91
Figura 2-43 Espacio libre ocasionado por el arreglo de elementos para las baldosas piezoeléctricas [autoría propia].	92
Figura 2-44 Vista isométrica del contenedor [autoría propia].....	93
Figura 2-45 Disco para transmitir energía mecánica a los piezoeléctricos [autoría propia].	94

Figura 2-46 Disposición de los elementos que componen la baldosa piezoeléctrica (corte transversal) [autoría propia].	94
Figura 2-47 Distribución de los elementos piezoeléctricos en columnas de 5 sensores en paralelo (perspectiva) [40].	95
Figura 2-48 Sensores piezoeléctricos [40].	97
Figura 2-49 Pieza cuadrada de MDF para soporte. (Izquierda: Pieza cortada, Derecha: Resultado final) [autoría propia].	97
Figura 2-50 Contenedor a base de MDF y laurel con gradilla de soporte en el interior (vistas superior e inferior) [autoría propia].	98
Figura 2-51 Discos para transmisión de energía mecánica [autoría propia].	98
Figura 2-52 Contenedor y soporte para los sensores [autoría propia].	98
Figura 2-53 Sensores ubicados en el contenedor [autoría propia].	99
Figura 2-54 Discos piezoeléctricos asentados sobre los sensores [autoría propia].	99
Figura 2-55 Conexión de los sensores hacia la salida de voltaje de las baldosas [autoría propia].	100
Figura 2-56 Baldosas piezoeléctricas, resultado final [autoría propia].	100
Figura 2-57 Tubo de PVC para eje del prototipo [autoría propia].	101
Figura 2-58 Vigas de acero para soporte del prototipo [autoría propia].	101
Figura 2-59 Unión vigas con el rodamiento central del prototipo [autoría propia].	102
Figura 2-60 Rodamiento central para sujeción y giro del prototipo [autoría propia].	102
Figura 2-61 Estructura de soporte para el prototipo [autoría propia].	102
Figura 2-62 Alabe de tol galvanizado junto al eje de PVC [autoría propia].	103
Figura 2-63 Sistema de poleas del prototipo [autoría propia].	103
Figura 2-64 Diseño final del prototipo de aerogenerador Savonius [autoría propia].	104
Figura 2-65 Estructura de Soporte del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].	104
Figura 2-66 Unión de las crucetas y el eje junto a la estructura de soporte del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].	105
Figura 2-67 Unión de las alabes a las crucetas y el eje junto a la estructura de soporte del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].	105
Figura 2-68 Pintura de los alabes y de la estructura de soporte del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].	106
Figura 2-69 Unión de los rodamientos 6205 al conjunto previamente armado del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].	106
Figura 2-70 Traslape del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].	107
Figura 2-71 Sistema de Poleas del aerogenerador Savonius [autoría propia].	107
Figura 2-72 Diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].	108
Figura 2-73 Modelo Arduino Uno R3SMD.	109
Figura 2-74 Sensor de Corriente ACS712.	109
Figura 2-75 Transistor de Campo IRF640.	110
Figura 2-76 Optoacoplador 6N137.	111
Figura 2-77 Circuito de control de Estados [autoría propia].	111
Figura 2-78 Implementación del control de estados al sistema [autoría propia].	112
Figura 3-1 Formas de onda para un sensor piezoeléctrico [autoría propia].	113
Figura 3-2 Forma de onda para 5 sensores piezoeléctricos conectados en paralelo [autoría propia].	114
Figura 3-3 Forma de onda para 2 columnas conectadas en paralelo (cada columna contiene 5 sensores piezoeléctricos conectados en paralelo) [autoría propia].	114
Figura 3-4 Forma de onda para 2 columnas conectadas en serie (cada columna contiene 5 sensores piezoeléctricos conectados en paralelo) [autoría propia].	114

Figura 3-5 Seis columnas de piezoeléctricos conectados en serie (cada columna contiene cinco sensores piezoeléctricos conectados en paralelo) [autoría propia].	115
Figura 3-6 Forma de onda de Voltaje de salida de la baldosa piezoeléctrica propuesta [autoría propia].	115
Figura 3-7 Toma de datos para encendido de un LED a travez de una baldosa piezoeléctrica [autoría propia].	117
Figura 3-8 LED azul de alta eficiencia encendido mediante una baldosa piezoeléctrica [autoría propia].	118
Figura 3-9 Medición de potencia de las baldosas piezoeléctricas [autoría propia].	118
Figura 3-10 Baldosas conectadas en serie [autoría propia].	119
Figura 3-11 Baldosas conectadas en paralelo [autoría propia].	120
Figura 3-12 Circuito de regulacion de voltaje mediante lm317 [autoría propia].	121
Figura 3-13 Medición de voltaje a la salida del regulador [autoría propia].	121
Figura 3-14 Circuito de regulacion de voltaje con diodo zener y transistor TIP41 [autoría propia].	122
Figura 3-15 Medición de voltaje en la salida del circuito de regulación de voltaje [autoría propia].	122
Figura 3-16 Circuito de amplificación de voltaje utilizado [autoría propia].	123
Figura 3-17 Medición del voltaje de salida del amplificador [autoría propia].	123
Figura 3-18 Traslape relación 1 [autoría propia].	124
Figura 3-19 Prueba del voltaje con traslape en relación 1 [autoría propia].	125
Figura 3-20 Prueba de la corriente con traslape en relación 1 [autoría propia].	125
Figura 3-21 Traslape relación 2 [autoría propia].	126
Figura 3-22 Prueba del voltaje con traslape en relación 2 [autoría propia].	126
Figura 3-23 Prueba de la corriente con traslape en relación 2 [autoría propia].	126
Figura 3-24 Traslape relación 3 [autoría propia].	127
Figura 3-25 Prueba del voltaje con traslape en relación 3 [autoría propia].	127
Figura 3-26 Prueba de la corriente con traslape en relación 3 [autoría propia].	128
Figura 3-27 Valor de voltaje y corriente en vacío del aerogenerador Savonius [autoría propia].	129
Figura 3-28 Valor de voltaje y corriente con una carga del aerogenerador Savonius [autoría propia].	130
Figura 3-29 Lampara LED encendida con el aerogenerador [autoría propia].	131
Figura 3-30 Valor del voltaje del sistema en conjunto [autoría propia].	132
Figura 3-31 Valor de la corriente del sistema en conjunto [autoría propia].	132
Figura 3-32 Circuito para calibración del sensor de corriente [autoría propia].	133
Figura 3-33 Valor del multímetro y el presentado en el programa Arduino [autoría propia].	133
Figura 3-34 Calibración de sensibilidad y valor calibrado [autoría propia].	134
Figura 3-35 Circuito implementado para comprobar la onda PWM [autoría propia].	134
Figura 3-36 Onda PWM con relación de trabajo al 0 % a 15 kHz [autoría propia].	135
Figura 3-37 Onda PWM con relación de trabajo al 25 % a 15 kHz [autoría propia].	135
Figura 3-38 Onda PWM con relación de trabajo al 50 % a 15 kHz [autoría propia].	135
Figura 3-39 Onda PWM con relación de trabajo al 75 % a 15 kHz [autoría propia].	135
Figura 3-40 Onda PWM con relación de trabajo al 100 % a 15 kHz [autoría propia].	136
Figura 3-41 Circuito de prueba con el optoacoplador y a generación del sistema [autoría propia].	136
Figura 3-42 Onda PWM con relación de trabajo al 25 % con optoacoplador a 15 kHz y 12 V [autoría propia].	137

Figura 3-43 Onda PWM con relación de trabajo al 50 % con optoacoplador a 15 kHz y 12 V [autoría propia].	137
Figura 3-44 Onda PWM con relación de trabajo al 75 % con optoacoplador a 15 kHz y 12 V [autoría propia].	137
Figura 3-45 Entrada 5 del Centro Comercial el Recreo [autoría propia].	138

RESUMEN

El objetivo del trabajo propuesto fue estudiar, diseñar y construir un prototipo de generador utilizando materiales piezoeléctricos que permita transformar la fuerza de compresión mecánica en energía eléctrica para un sistema de baja potencia. La metodología utilizada para verificar si los materiales piezoeléctricos son útiles como medio de generación de energía se basó en, investigación teórica, diseño, armado, realización de pruebas y análisis de resultados. El armado y construcción que se realizó incluyendo el control de estados fueron de acuerdo con los diseños propuesto y las pruebas permitieron verificar mediante los resultados obtenidos la factibilidad de los materiales piezoeléctricos como medio de generación de energía y el funcionamiento de todo el sistema junto con el control de estados. Concluyendo que los materiales piezoeléctricos permiten recolectar energía mecánica y, a su vez, transformarla para almacenamiento y posterior uso en un sistema de potencia.

PALABRAS CLAVE: *Piezolectricidad, generador piezoeléctrico, electroestricción, tensión mecánica, deformación, constante piezoeléctrica, baldosas piezoeléctricas, energía eólica, flujo de viento, aerogenerador, control de estados.*

ABSTRACT

The objective of the proposed work was to study, design and build a prototype generator using piezoelectric materials to transform the mechanical compression force into electrical energy for a low power system. The methodology used to verify if piezoelectric materials are useful as a means of energy generation was based on theoretical research, design, assembly, testing and analysis of results. The assembly and construction, including the state control, were carried out according to the proposed designs and the tests allowed verifying the feasibility of the piezoelectric materials as a means of power generation and the operation of the whole system together with the state control through the results obtained. Concluding that piezoelectric materials allow to collect mechanical energy and, in turn, transform it for storage and subsequent use in a power system.

KEYWORDS: *Piezoelectricity, piezoelectric generator, electrostriction, mechanical stress, deformation, piezoelectric constant, piezoelectric tiles, wind energy, wind flow, wind turbine, state control.*

1 INTRODUCCIÓN

El estudio de generación piezoeléctrica es importante en el ámbito de generación alternativa llamada *Energy Harvesting*, ya que reemplaza el uso de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica a gran escala, como ejemplo se tiene la construcción de carreteras implementadas con sistemas de recolección de energía piezoeléctrica que brinda la energía necesaria a su propio sistema de alumbrado vial, y además, es capaz de conectarse al sistema eléctrico de distribución, proporcionando mayor confiabilidad al sistema de potencia. La generación de energía eléctrica de los sistemas de recolección piezoeléctricos se realiza a través de elementos que convierten la energía mecánica en energía eléctrica. De manera general, los materiales presentan distintos fenómenos cuando son sometidos a diferentes estímulos, uno de ellos es el fenómeno piezoeléctrico. Este fenómeno consiste en la conversión de energía mecánica en energía eléctrica que, a su vez, puede ser almacenada para su posterior uso.

La conversión de energía antes mencionada se puede obtener gracias a varios materiales llamados piezoeléctricos. Los materiales piezoeléctricos al ser deformados son capaces de producir diferencias de potencial entre sus caras, de esta forma, es posible la generación de corriente y voltaje. Un modelo general de piezoelectricidad permite entender y cuantificar la generación de voltaje mediante una fuerza mecánica externa al material piezoeléctrico. El modelo de generación piezoeléctrico parte de variables mecánicas, como la tensión a la que el material piezoeléctrico es sometido, estas se transforman en variables eléctricas como voltaje y corriente. Mediante el estudio de la teoría piezoeléctrica y la investigación de varios trabajos que utilizan generadores piezoeléctricos, se diseña y construye un generador piezoeléctrico de tipo baldosa para obtener energía eléctrica mediante la energía mecánica residual producida por las personas al caminar.

A pesar de que los materiales piezoeléctricos permiten obtener valores de potencia eléctrica que son capaces de encender cargas lumínicas de bajas potencias, es necesario contar con otro tipo de generación, ya que la producción de energía piezoeléctrica será únicamente cuando existan personas que caminen sobre las baldosas piezoeléctricas. Para incrementar el valor de potencia generado y darle confiabilidad al sistema, se implementa un aerogenerador. El aerogenerador implementado es de tipo Savonius, permite obtener energía eléctrica a bajas velocidades de viento, haciendo que sea posible instalarlo en lugares donde las corrientes de viento sean de bajas. El diseño del aerogenerador es realizado mediante estudios de viento y su construcción se especifica en

los capítulos correspondientes a la aerogeneración. Para conectar el sistema piezoeléctrico y de aerogeneración, se diseña y construye un control de estados, que permite acoplar los sistemas y que, además, proporciona una carga adecuada a la batería.

El capítulo de pruebas muestra las formas de onda de los generadores, así como los valores de voltaje y corriente generados tanto por las baldosas piezoeléctricas como por el aerogenerador, los cuales permiten obtener los valores de potencia generada propios de cada uno. Luego de definir las potencias y realizar las pruebas respectivas a los generadores conectándolos en un solo sistema piezo-aerogenerador mediante el control de estados implementado, se realiza un análisis económico para un centro comercial. El análisis permite cuantificar el costo del ahorro por consumo eléctrico al implementar el sistema piezo-aerogenerador en el centro comercial y se verifica la factibilidad del sistema implementado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

- Estudiar, diseñar y construir un prototipo de generador utilizando materiales piezoeléctricos que permita transformar la fuerza de compresión mecánica en energía eléctrica para un sistema de baja potencia.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un aerogenerador de eje vertical con un control de estado que permita brindar confiabilidad a un sistema de generación piezoeléctrico.
- Verificar la factibilidad del uso de materiales piezoeléctricos mediante un análisis de costos en el funcionamiento de sistemas de iluminación interiores.

1.2 ALCANCE

La aplicación para los materiales piezoeléctricos en la generación de energía ha sido motivo de estudio en los años recientes, sin embargo, la falta de información sobre el tema hace necesario un estudio teórico sobre el comportamiento de dichos materiales, fórmulas, revisión de varios diseños propuestos, a un nivel nacional como internacional, la obtención de materiales piezoeléctricos en Ecuador, etc. Todo esto permitirá obtener los conocimientos necesarios para la realización del diseño del prototipo de generador

piezoeléctrico. En cuanto a la construcción del aerogenerador se requiere una investigación que permita conocer los parámetros mecánicos y eléctricos que se necesitan para su ensamblaje y construcción.

Para el diseño del prototipo piezoeléctrico es posible utilizar el elemento piezoeléctrico AB2720B, 2 kHz, 30 V p-p, 1.063" D (27.00 mm), 300 ohms, cada disco piezoeléctrico tiene un valor de USD 0,50, en general, se revisan otros modelos para verificar cual es el mejor material piezoeléctrico para el armado del prototipo de baldosas. En conjunto, se necesitarán al menos 9 discos por cada baldosa piezoeléctrica para obtener valores que sean de al menos 2 mW de potencia por cada presión realizada a las baldosas del prototipo. Las distintas pruebas a los generadores piezoeléctricos muestran valores entre los 2 y 5 mW, el conjunto de baldosas piezoeléctricas permite incrementar este valor a las necesidades que se requieren. Se construirá como mínimo 4 baldosas para incrementar la potencia producida por el prototipo realizando las pruebas respectivas.

Es necesario considerar que el voltaje de carga a la batería debe ser un voltaje DC, por esta razón es muy importante implementar mecanismos para el eficiente funcionamiento del sistema, el valor estimado para la construcción del prototipo de generador piezoeléctrico se encuentra alrededor de USD 300. Debido a las bajas potencias producidas por el prototipo de generador piezoeléctrico se debe considerar un valor de potencia adecuado para la construcción del aerogenerador y de esta forma evitar posibles daños a la batería por sobrecargas, por lo que se vaticina construir un aerogenerador que cumpla límites de potencia adecuados, que pueden ir desde los 20 a los 120 W.

Para el aerogenerador de eje vertical se utilizará un motor de imanes permanentes y se investigará el modelo de hélices que se acople de mejor manera al prototipo con el fin de lograr una potencia adecuada de generación y se realizará su respectivo ensamblaje y construcción. El costo estimado para la construcción del aerogenerador de eje vertical es de USD 300. Para la implementación del control de estados, se utilizará la plataforma Arduino junto con sensores de corriente y voltaje, conversores DC/DC, baterías, rectificadores, etc. El costo estimado para implementar el control de estados al sistema es de USD 100. Una vez que se realicen los diseños se implementará el sistema piezo-aerogenerador y, además, se realizaran las pruebas respectivas. Se elaborará un análisis de costos para la verificación de los materiales piezoeléctricos y su factibilidad como medio de generación de energía eléctrica.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 FENÓMENOS DE LOS MATERIALES

En esta sección se centran los conceptos teóricos sobre el comportamiento de los materiales al instante de ser afectados por diferentes estímulos, como pueden ser compresión, voltaje, o calor. Cuando un material reacciona a los fenómenos antes mencionados se producen cambios en su estructura interna y da como resultado comportamientos propios de cada material, y estos pueden ser usados para diversas aplicaciones.

1.3.1.1 Ferroelectricidad

Es el fenómeno que presentan ciertos materiales dieléctricos y es la causa de la retención de polarización inducida por un campo eléctrico después de que este haya sido retirado. Esto sucede debido a que está sujeto al ciclo de histéresis ya que se muestra el efecto del campo eléctrico en la polarización y la alineación que se ejerce sobre los dipolos. Cuando un campo magnético es aplicado sobre los dipolos en el material estos se alinean al campo hasta lograr que este material se sature, en otras palabras, los dipolos se orientan en la misma dirección que el campo magnético. Si se retira el campo magnético el material queda aún polarizado, produciendo una polarización remanente a causa del acoplamiento entre los dipolos, de esta forma el material se polariza como muestra la Figura 1-1. En el momento que este campo se aplica en la dirección contraria algunos dipolos permanecen en la misma dirección mientras que otros invierten su giro, el campo aplicado es conocido como campo coercitivo, como se menciona en [1]. Al incrementarse el campo en dirección inversa, la saturación se ejerce en el sentido opuesto.

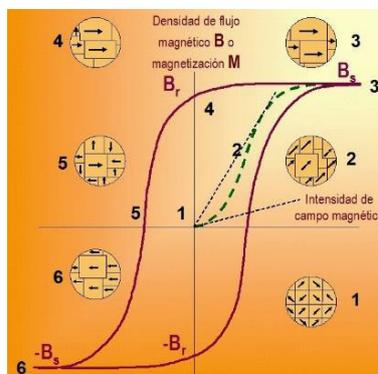


Figura 1-1 Curva de Histéresis para materiales ferroeléctricos [2].

1.3.1.2 Piroelectricidad

Como lo indica su nombre, el fenómeno de piroelectricidad es la creación de energía eléctrica mediante el uso de combustión. Se define como la propiedad que presentan ciertos materiales que cuando son sometidos a cambios de temperatura experimentan alteraciones en su polarización eléctrica, por lo que se induce un campo magnético en su estructura interna causado por el constante movimiento de cargas positivas y negativas en los externos opuestos de la superficie del material. Este fenómeno se explica como el traslado de cargas eléctricas tanto positivas como negativas a los externos opuestos de un eje polar cristalino, como consecuencia de haber variado la temperatura. Este efecto es producido por la interacción del potencial causado por los átomos eléctricamente cargados dentro de una estructura cristalina propia de cada material piroeléctrico. Cualquier excitación que es causada por un aumento de temperatura hará que se cambie el nivel de energía interna, lo que se dará como resultado un cambio en el momento de los dipolos que resulta en el efecto piroeléctrico macroscópico tal como muestra la Figura 1-2, y es mencionado por Lázaro & Tlapa [3].

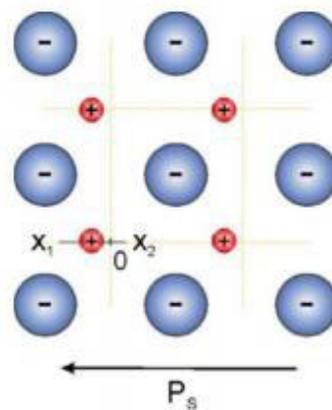


Figura 1-2 Figura Representación bidimensional piroelectricidad [3].

1.3.1.3 Fenómeno piezoeléctrico

Es un fenómeno que presentan determinados cristales y cerámicas, cuando son sometidos a tensión mecánica se produce una polarización eléctrica creando una diferencia de potencial junto a las cargas que se presentan en su superficie. Los primeros registros sobre el fenómeno de la piezoelectricidad fueron realizados por los hermanos Pierre y Jacques Curie, en 1881, al estudiar el mineral del cuarzo. Cuando se somete este mineral a una compresión mecánica, sus cargas internas se separan, lo que produce una polarización,

provocando que se generen descargas en la superficie del material (chispas). La Figura 1-3 muestra como aparecen cargas positivas y negativas cuando el mineral de cuarzo es sometido a un esfuerzo mecánico.

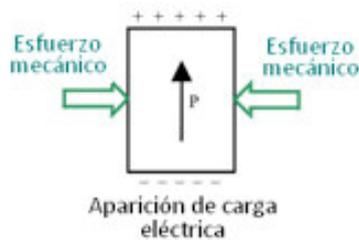


Figura 1-3. Comportamiento de un material piezoeléctrico en presencia de un esfuerzo mecánico [4].

Al conectar electrodos al mineral de cuarzo y aplicar una fuerza externa, se obtiene una diferencia de potencial en las caras donde no es ejercida la presión ocasionando pequeños arcos eléctricos, como mencionan Chila & Chong [5]. Para generar energía eléctrica a través de energía mecánica es necesario usar un material eléctricamente neutro, esto se logra por la coincidencia de los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas en las moléculas de un material piezoeléctrico. Cuando se tiene este equilibrio las cargas se cancelan y se obtienen moléculas eléctricamente neutras, esto se puede observar en la Figura 1-4a, donde se aprecia una molécula que no está sometida a presión mecánica y sus cargas están en equilibrio.

Si se aplica una fuerza mecánica en los extremos del material, la deformación ocasiona la separación de los centros de gravedad positivos y negativos provocando la generación de dipolos, apreciable en la Figura 1-4b. Al aumentar la presión, los dipolos generados se cancelan y se produce una distribución de carga en la superficie del material generando polarización en el mismo. En la Figura 1-4c se observa como la polarización genera un campo eléctrico en las caras del material ocasionado por la energía mecánica utilizada para deformar al mismo.

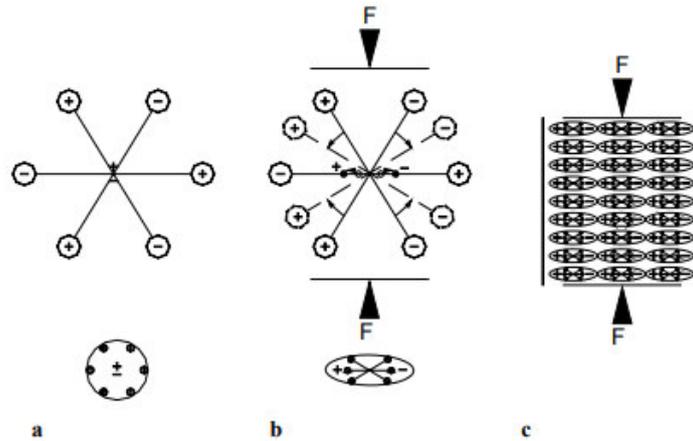


Figura 1-4 Modelo simple del efecto piezoeléctrico: a) Molécula eléctricamente neutra, b) Molécula sometida a una fuerza externa, c) Efecto de polarización en la superficie del material [6].

Al colocar electrodos en las superficies del material donde se encuentra el campo eléctrico ocasionado por una presión mecánica y se cortocircuitan los electrodos mediante un conductor, aparece una densidad de carga que está asociada a la superficie del material en contacto con los electrodos, originando un flujo de las cargas libres existentes en el conductor utilizado para unir los electrodos. El flujo de las cargas libres a través del conductor es apreciable en la Figura 1-5a, el signo determina el movimiento de las cargas libres hacia los extremos en donde se produce la polarización del cristal. Este flujo de cargas permanece hasta que las cargas libres neutralicen el efecto de la polarización. Si se detiene la presión ejercida sobre el material, desaparece la polarización y el flujo de las cargas se invierte, volviendo a la condición inicial de reposo Figura 1-5b. Si se conecta un amperímetro es posible mostrar los picos de corriente, y al conectar una resistencia en lugar de hacer un cortocircuito entre los electrodos y se presiona al material piezoeléctrico, una corriente fluirá por la resistencia y se transformará la energía mecánica en energía eléctrica, como muestra Ayerbe [6].

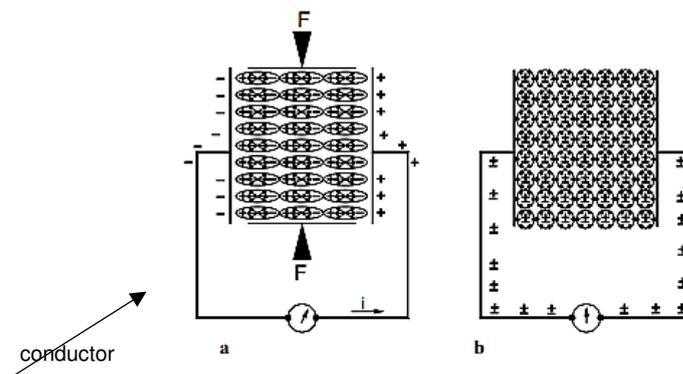


Figura 1-5 Fenómeno piezoeléctrico: a) Flujo de corriente provocado por un material piezoeléctrico sometido a presión donde F es la fuerza aplicada b) Ausencia de corriente en un material piezoeléctrico en un estado neutro [6].

Los estudios realizados al mineral de cuarzo también demostraron que el efecto piezoeléctrico es reversible, ya que al aplicar un campo eléctrico es posible deformar al mineral expandiéndolo o contrayéndolo.

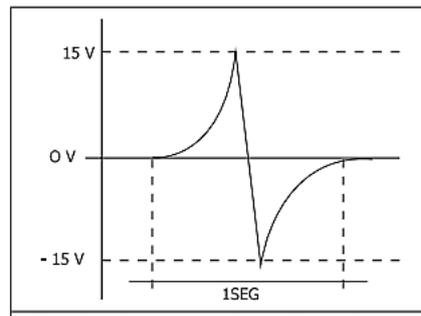


Figura 1-6 Forma de onda de un material piezoeléctrico.

En la Figura 1-6 se muestra la forma de onda típica de una celda piezoeléctrica, cuando el material piezoeléctrico deforma la onda de voltaje producida es pulsante. Se observa que la onda tiene un pico máximo de voltaje de ± 15 [V] con una duración total de un segundo. El pico de voltaje positivo indica que el material piezoeléctrico es deformado y se vuelve bruscamente negativo cuando la fuerza que ocasiona la deformación es retirada. El valor máximo del pulso dependerá de dos factores, de la fuerza con la que se presione al material y de las características internas del piezoeléctrico.

1.3.1.4 Electrostricción

Generalmente conocido como “efecto piezoeléctrico inverso”, se origina cuando diversos materiales o cerámicas sintéticas son sometidas a fuertes campos magnéticos que provocan un estiramiento o compresión del material. Este fenómeno también es presentado en materiales aislantes los cuales tienen la capacidad de deformarse en presencia de campos magnéticos fuertes, como se indica en [7]. El uso de los actuadores es un claro ejemplo sobre cómo se aplica este fenómeno, donde los circuitos electrónicos de control de alta velocidad se activan mediante una cantidad pequeña de fuerza. Algunos polímeros son capaces de producir más fuerza en las mismas condiciones eléctricas que otros, lo cual permite usar una variedad de materiales para aplicaciones donde se necesite una mayor fuerza externa que en este caso es la mecánica. Es posible crear energía sónica

para la construcción de altavoces agudos presentes en los sistemas de sonido y resonancia; como mencionan Askeland & Fulay [8].

1.3.2 MODELO MATEMÁTICO DE LA PIEZOELECTRICIDAD

El efecto piezoeléctrico se caracteriza por la polarización del material cuando es provocado por la aplicación de una tensión mecánica externa paralela al eje de polarización, mostrado en Gómez [9], que se puede calcular mediante la ecuación 1.1.

$$P = dT \quad (1.1)$$

Donde:

P = Polarización piezoeléctrica [Coulomb sobre metro cuadrado].

d = Constante de deformación piezoeléctrica [Metro sobre voltaje o Coulomb sobre Newton].

T = Tensión mecánica a la que se ve sometido el material [Newton sobre metro cuadrado].

A su vez, esta polarización piezoeléctrica provocará un campo eléctrico interno en el material y un fenómeno de desplazamiento, apuntado por Pérez & Velázquez [10], puede calcularse mediante la ecuación 1.2:

$$P = D - \varepsilon^T E \quad (1.2)$$

Donde:

D = Desplazamiento eléctrico o densidad de carga superficial [Coulomb sobre metro cuadrado].

ε^T = Permitividad del medio [Faradio por metro].

E = Campo eléctrico interno [Voltio por metro].

Las ecuaciones 1.1 y 1.2 pueden ser replanteadas como se indica con las ecuaciones 1.3 y 1.4, según [10]:

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (1.3)$$

$$E = -gT + \frac{D}{\epsilon^T} \quad (1.4)$$

Donde:

g = Coeficiente de tensión piezoeléctrica [Metro cuadrado sobre Coulomb].

Es posible realizar la acción contraria en un material piezoeléctrico, aplicando un campo eléctrico al material sin tensiones mecánicas externas para deformarlo (efecto piezoeléctrico inverso). El campo eléctrico externo provocará una deformación en el material: contracción o expansión. Se puede calcular la deformación, según Pérez & Velázquez [10], mediante las ecuaciones mostradas a continuación que relacionan la deformación en el material debido a un campo eléctrico externo, 1.5, y deformación en el material debido a un desplazamiento eléctrico, 1.6.

$$S = dE \quad (1.5)$$

$$S = gD \quad (1.6)$$

$$g = \frac{D}{\epsilon^T} \quad (1.7)$$

Donde:

S = Deformación ocasionada en el piezoeléctrico [sin unidades].

Según la Ley de Hooke, cuando un medio elástico se encuentra bajo tensión mecánica, el medio experimenta un alargamiento o deformación, como se recalca en [10], y esta deformación elástica que se produce en el material debe ser tomado en cuenta mediante la ecuación 1.8:

$$S_e = sT \quad (1.8)$$

Donde:

S_e = Deformación elástica [sin unidades]

s = Compliancia del medio al aplicar tensión mecánica sobre un material [Metro cuadrado sobre Newton].

La deformación total causada en el material de forma aproximada, según [10], es calculada mediante las ecuaciones 1.5, 1.6, 1.7 y 1.8 con las cuales se obtienen las expresiones para la deformación total causada por la aplicación de un campo eléctrico externo y la deformación total causada por la aplicación de una tensión mecánica externa en un material piezoeléctrico, cuyas expresiones se muestran en 1.9 y 1.10, respectivamente:

$$S = s^E T + dE \quad (1.9)$$

$$S = s^D T + gD \quad (1.10)$$

Donde:

s^E = Compilancia elástica del material causada por la aplicación de un campo eléctrico constante [Metro cuadrado sobre Newton].

s^D = Compilancia del material causada por la aplicación de una tensión mecánica externa [Metro cuadrado sobre Newton].

Las ecuaciones 1.9 y 1.10, describen el desplazamiento cuando se tiene el efecto piezoeléctrico inverso y cuando se tiene el efecto piezoeléctrico directo, como indica [10], se relacionan mediante las expresiones:

$$s^D = (1 - k^2)s^E \quad (1.11)$$

$$k^2 = \frac{d^2}{S^E \epsilon^T} \quad (1.12)$$

Donde:

k = Factor de acoplamiento [sin unidades].

Las ecuaciones mostradas para el efecto piezoeléctrico hasta este punto son deducidas para una sola dirección del espacio, el modelo matricial que contempla todas las direcciones de los vectores para la piezoelectricidad, según la norma IEEE [11], son las siguientes:

$$S_p = d_{kp} E_k + S_{pq}^E T_q \quad (1.13)$$

$$D_i = \varepsilon_{ik}^T E_k + d_{iq} T_q \quad (1.14)$$

Donde:

S = Esfuerzo mecánico [sin unidades].

D = Componente de desplazamiento eléctrico [Coulomb sobre metro cuadrado].

E = Campo eléctrico aplicado [Voltio por metro].

T = Tensión mecánica aplicada [Newton sobre metro cuadrado].

S^E = Deformación elástica por un campo eléctrico constante [Metro cuadrado sobre Newton].

ε^T = Permitividad del medio [Faradio por metro].

d = Contante de deformación piezoeléctrica [Metros sobre voltaje].

Según apunta [10], las ecuaciones 1.13 y 1.14 se escriben en su forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{ij}^E & d_{ij} \\ d_{ij} & \varepsilon_{ij}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Donde

i j = Dirección del campo generado en reacción a la fuerza mecánica aplicada.

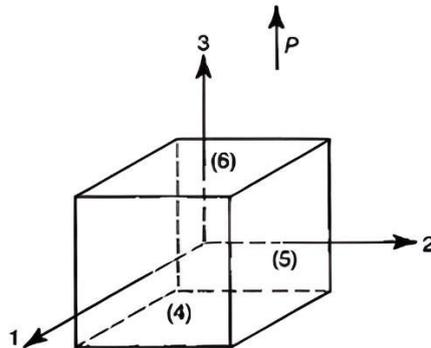


Figura 1-7 Ejes y planos de referencias para piezoeléctricos [12].

La ecuación 1.15, muestra que una variación en el espesor del material producida por una fuerza externa provoca un desplazamiento de cargas en el material creando un campo eléctrico, como sugieren Huilca & Mayor [13]. La Figura 1-7 muestra los ejes de referencia que definen la dirección de la polarización del material piezoeléctrico, estas direcciones se reflejan en los subíndices i, j de los términos de la matriz 1.15. Los ejes de referencia están orientados en las direcciones de los ejes x, y, z a los cuales se les asigna un número, dando como resultado x = 1, y = 2, z = 3, los valores 4, 5, 6 son las correspondientes direcciones negativas de los ejes x, y, z como se visualiza en la Figura 1-7.

Bolaños [4] menciona que el primer subíndice (i), indica la dirección del campo y el segundo subíndice (j) indica la dirección del esfuerzo aplicado, la polarización del material generalmente se realiza en la tercera dirección (z), También afirma que los signos se pueden generalizar en dos configuraciones: apilamiento y doblado. La configuración de apilamiento opera en modo 33 (i = 3, j = 3) y la configuración doblada opera en modo 31 (i = 3, j = 1) siempre y cuando la polarización del material (P) sea en la dirección 3 como se muestra en la Figura 1-7. La configuración de apilamiento es la que se usa en este trabajo ya que la tensión mecánica será aplicada en la dirección 3 y se polarizará el material piezoeléctrico en la misma dirección.

1.3.2.1 Modelo de generación de energía piezoeléctrico

Asumiendo que las dimensiones físicas del sistema son más pequeñas que la escala a la cual rigen los fenómenos electromagnéticos, mecánicos o acústicos, según [10], el acoplamiento ideal descrito en la ecuación 1.15, se puede reescribir como:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{t} \\ \frac{Q}{A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S^E & d \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{F}{A} \\ \frac{V}{t} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Donde:

Δt = Variación de espesor causada por la aplicación de una fuerza externa en el material [Metros].

t = Espesor del material [Metros].

Q = Carga producido en el material [Coulomb].

A = Área del material [Metros cuadrados].

V = Voltaje producido [Voltios].

F = Fuerza aplicada [Newtons].

De la ecuación 1.16, se obtiene que una tensión mecánica externa producirá una deformación en el material a una determinada velocidad, a su vez, inducirá un campo eléctrico provocado por el desplazamiento de las cargas en el material. La representación eléctrica de esta ecuación se muestra en la Figura 1-8.

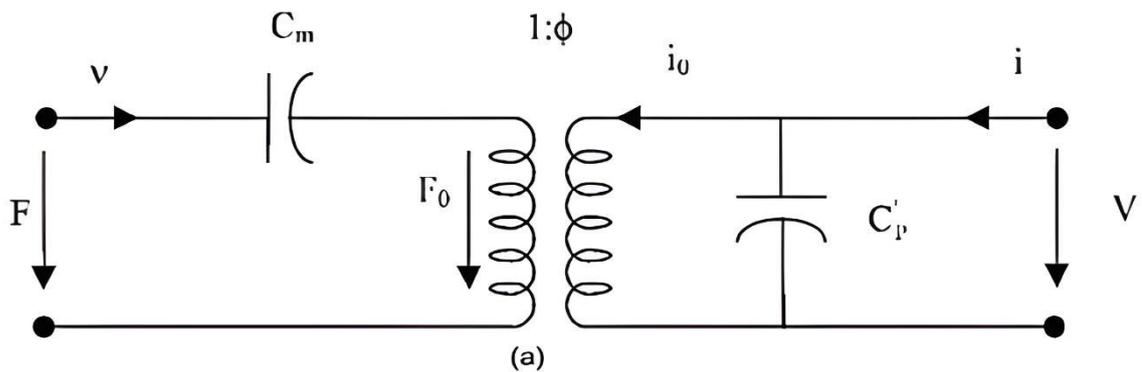


Figura 1-8 Representación eléctrica de un material piezoeléctrico [10].

De la Figura 1-8 se pueden deducir las siguientes ecuaciones, como indica [10]:

$$v = j\omega C_m F + j\omega d V \quad (1.17)$$

$$i = j\omega C_p V + j\omega d F \quad (1.18)$$

Donde:

V = Voltaje obtenido [Voltio].

F = Fuerza aplicada [Newton].

$v = \frac{\Delta t}{dt}$ Velocidad de deformación del piezoeléctrico [Metros sobre segundos].

$i = \frac{dQ}{dt}$ Corriente producida en el piezoeléctrico [Coulomb sobre segundo].

$C_m = \frac{s^E t}{A}$ Capacitancia de cortocircuito [Metros sobre newton].

$C_p = \frac{\epsilon^T A}{t}$ Capacitancia libre [Coulomb sobre voltio].

t = Tiempo de deformación [Segundos].

Q = Carga generada [Coulomb].

ε^T = Permitividad [Faradio por metro].

A = Área deformada [Metros cuadrados].

w = Frecuencia angular [Radianes sobre segundos].

s^E = Deformación elástica con un campo eléctrico constante [metro cuadrado sobre Newton].

Para el modelamiento mecánico del material piezoeléctrico es posible asumir que es un sistema simple de masa resorte amortiguado, como el de la Figura 1-9. Usando la segunda ley de Newton en el diagrama de cuerpo libre la ecuación de movimiento del sistema, apuntado en [10], será:

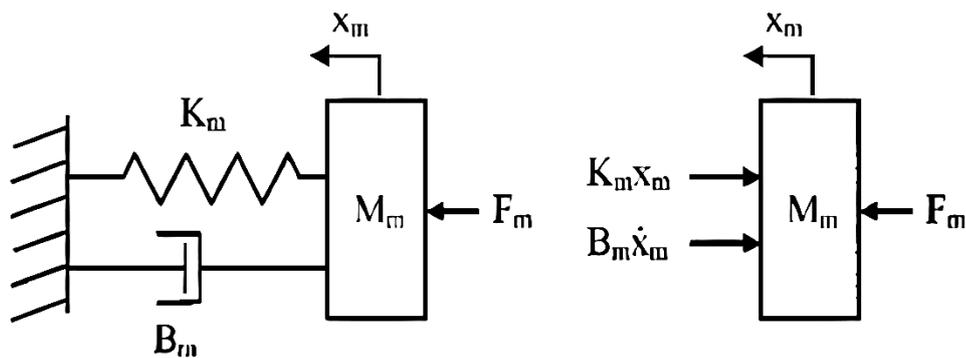


Figura 1-9 Parámetros mecánicos sistema masa resorte [10].

$$F_m = M_m \ddot{x}_m + B_m \dot{x}_m + K_m x_m \quad (1.19)$$

Donde:

F_m = Fuerza externa aplicada [Newton].

M_m = Masa del piezoeléctrico efectiva [Kilogramo].

B_m = Coeficiente de amortiguamiento [Newton por segundo sobre metro].

K_m = Constante del resorte [Newton sobre metro].

x_m = Desplazamiento de la masa [Metros].

\dot{x}_m = Velocidad de la masa [metros sobre segundo].

\ddot{x}_m = Aceleración de la masa [metro sobre segundo cuadrado].

Las componentes del sistema mecánico del material piezoeléctrico de la Figura 1-9 se asocian con las ecuaciones de la representación eléctrica del piezoeléctrico de la Figura 1-8, de tal forma que al aplicar una fuerza en el sistema masa resorte de la ecuación 1.19 se inducirá un voltaje de salida al incluir la impedancia mecánica en la representación del acoplamiento piezoeléctrico, como muestra [10], ilustrado en la Figura 1-10a. El circuito de la Figura 1-10b indica la equivalencia de los elementos mecánicos agrupados en variables eléctricas donde se incluye una carga RL en la salida del circuito.

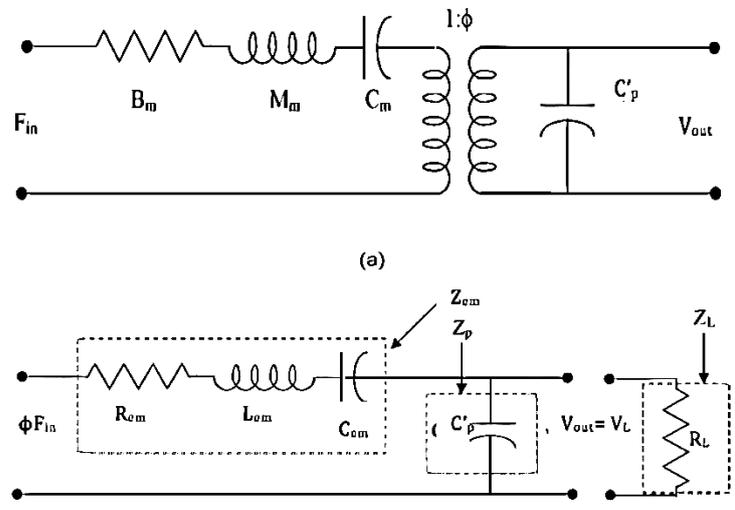


Figura 1-10 Modelo de un circuito de generación de energía piezoeléctrico a) Con sus componentes mecánicas y eléctricas b) Circuito eléctrico equivalente [10].

Las es del modelo eléctrico equivalente de la Figura 1-10b, observados en [10], son las siguientes:

$$R_{em} = \phi^2 B_m \quad (1.20)$$

$$L_{em} = \phi^2 M_m \quad (1.21)$$

$$C_{em} = \frac{C_m}{\phi^2} \quad (1.22)$$

$$V_{out} = \phi F_{in} \quad (1.23)$$

$$C_p = \left(1 - \frac{d}{S^E \varepsilon^T}\right) (\varepsilon^T) \quad (1.24)$$

Donde:

R_{em} = Resistencia equivalente mecánica [Ohmios].

L_{em} = Inductancia equivalente mecánica [Henrios].

C_{em} = Capacitancia equivalente mecánica [Faradios].

V_{out} = Voltaje de salida producido por una fuerza [Voltios].

C_p = Capacitancia libre [Coulomb sobre voltio].

\emptyset = Flujo eléctrico inducido por una fuerza externa [Voltaje sobre Newton].

La ecuación 1.23, permite el cálculo del voltaje producido por una fuerza externa para cualquier dirección de polarización en los ejes de referencia. El modelo de generación de energía piezoeléctrico mostrado en la Figura 1-10 representa las ecuaciones para todos los ejes de acción ya que se utilizan las ecuaciones 1.13 y 1.14 como punto de partida para modelar el sistema. Si se representa el modelo para solo un eje de referencia y se considera que se agregan electrodos en las caras del material, como se muestra en la Figura 1-11, el sistema puede ser reescrito en función de las direcciones de los ejes de referencia para la configuración de apilamiento anteriormente descrita mediante las ecuaciones 1.25 y 1.26, como se menciona en [10]:

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d^{31} E_3 \quad (1.25)$$

$$D_3 = d^{31} E_3 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (1.26)$$

En un sistema donde la dirección de la tensión mecánica es paralela a la dirección del eje de polarización de una cerámica piezoeléctrica, como apunta Merino [14], se tiene un generador piezoeléctrico longitudinal.

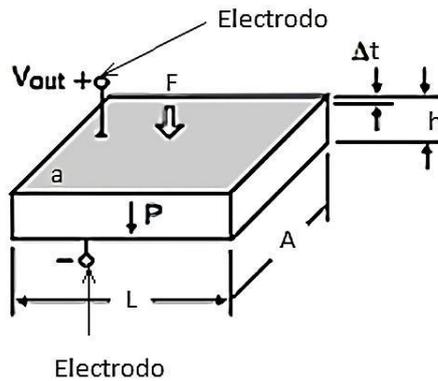


Figura 1-11 Piezogenerador Longitudinal [14]

Donde las variables mostradas en la Figura 1-11 son:

F = Fuerza externa aplicada al material piezoeléctrico.

P = Polarización.

Δt = Variación de espesor causada por la aplicación de una fuerza F en el material.

L = Largo del material piezoeléctrico.

A = Ancho del material piezoeléctrico.

h = Espesor del material.

a = Área del material piezoeléctrico.

V_{out} = Voltaje inducido por una fuerza mecánica en un piezoeléctrico.

Las ecuaciones de carga y voltaje del piezogenerador longitudinal [14], son las siguientes:

$$q = F \times d_{33} \quad (1.27)$$

$$V = F \times g_{33} \times \frac{h}{a} \quad (1.28)$$

Donde:

q = Carga producida en un piezoeléctrico por una fuerza externa [Coulomb].

F = Fuerza externa aplicada [Newton].

d_{33} = Constante de deformación piezoeléctrica [Coulomb sobre Newton].

g_{33} = Coeficiente de tensión piezoeléctrica [Voltio x metro sobre Newton].

a = Área del piezoeléctrico sometido a fuerza externa [Metros cuadrados].

h = Espesor del material piezoeléctrico [Metros].

El modelo de generación piezoeléctrica de la ecuación 1.28, representa el voltaje de salida de un material piezoeléctrico cuando la dirección de la tensión mecánica es paralela a la dirección del eje de polarización y este modelo es el que se utiliza en el presente trabajo para el cálculo del voltaje de salida pico de un sensor piezoeléctrico

1.3.2.2 Constantes piezoeléctricas

Los materiales piezoeléctricos son anisótropos, esto quiere decir que las propiedades de estos materiales varían con la dirección como una consecuencia de su estructura interna. Por ejemplo, en un material anisótropo cuando se proyecta un haz de luz varían los índices de refracción ocasionando que la luz no se transmita con la misma velocidad para cada una de las direcciones. Si la luz incide perpendicularmente en un material anisótropo esta se divide en dos rayos perpendiculares polarizados que se mueven con distinta velocidad y tienen direcciones distintas. La anisotropía de los materiales mencionados ocasiona que se produzcan diferentes constantes en función de las direcciones de la tensión y deformaciones mecánicas generando las fuerzas eléctricas y viceversa definidas por los ejes de simetría del piezoeléctrico, como se indica en [15].

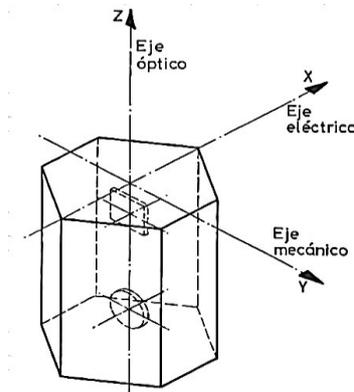


Figura 1-12 Ejes de simetría de un cristal de cuarzo [13]

De acuerdo con la Figura 1-12 los ejes de simetría en un material piezoeléctrico como el cuarzo son: óptico, eléctrico y mecánico y se corresponden a los ejes de referencia 1, 2, 3 antes mostrados en la Figura 1-7. Los cristales que tienen más de un eje de simetría son los que presentan el fenómeno de la piezoelectricidad y de acuerdo a las direcciones de estos ejes se obtendrán los valores de las constantes [9]. Algunas de estas constantes son vistas en las fórmulas matriciales de las ecuaciones 1.13 y 1.14, otras son utilizadas para

calcular los valores de los vectores que componen las matrices. Son de gran importancia para el modelamiento y aplicaciones que utilizan materiales piezoeléctricos. A continuación, se detallan algunas de las constantes piezoeléctricas más importantes y utilizadas en el diseño de actuadores, sensores, modelamientos, etc.

- *Constante de deformación piezoeléctrica.*

Polarización por unidad de tensión mecánica aplicada. Esta constante se utiliza en el cálculo de actuadores ya que cuantifica el campo eléctrico requerido para deformar el material [13].

$$d = \frac{S}{E} = \frac{\sigma}{T} \quad (1.29)$$

Donde:

S = Deformación.

E = Campo eléctrico aplicado [Voltio sobre metro].

σ = Densidad de carga [Coulomb sobre metro cuadrado].

T = Tensión mecánica [Newton sobre metro cuadrado].

Los tres valores de constantes más utilizados son:

d33: Constante de deformación piezoeléctrica resultado de las mediciones mecánicas y eléctricas en la dirección de polarización.

d31: Constante de deformación piezoeléctrica resultante de medir las magnitudes mecánicas en la dirección 1 y las magnitudes eléctricas en la dirección de polarización.

d15: Constante de deformación piezoeléctrica resultado de medir magnitudes perpendiculares mecánicas en la dirección 5 y magnitudes perpendiculares eléctricas en la dirección 1.

- *Coefficiente de tensión piezoeléctrica.*

$$g = \frac{E}{T} = \frac{S}{\sigma} \quad (1.30)$$

Es el campo eléctrico que se genera en circuito abierto por unidad de fuerza aplicada. Es utilizada en la fabricación de sensores que permiten detectar variaciones de presión.

Los tres valores del coeficiente de tensión más utilizados son:

g33: Coeficiente de Tensión Piezoeléctrica resultado de las mediciones mecánicas y eléctricas en la dirección de polarización.

g31: Coeficiente de Tensión Piezoeléctrica resultante de medir las magnitudes mecánicas en la dirección 1 y las magnitudes eléctricas en la dirección de polarización.

g15: Coeficiente de Tensión Piezoeléctrica resultado de medir magnitudes perpendiculares mecánicas en la dirección 5 y magnitudes perpendiculares eléctricas en la dirección 1.

- *Coeficiente de acoplamiento electromecánico (k)*

$$k^2 = \frac{\text{Energía de salida}}{\text{Energía entregada}} \quad (1.31)$$

Mide la eficiencia de la transformación de energía del material piezoeléctrico. Su valor es menor a la unidad y es la energía transformada del piezoeléctrico por unidad de energía aportada, como se menciona en [11].

- *Permisividad (ϵ)*

Es la capacidad del material para permitir el desplazamiento eléctrico cuando el material es sometido a un campo eléctrico. Para materiales piezoeléctricos se tienen dos valores de permisividad debido a las direcciones de las fuerzas eléctricas y mecánicas.

ϵ^S = Permisividad a deformación constante.

ϵ^T = Permisividad a presión constante.

- *Constante dieléctrica relativa (k^T)*

$$k^T = \frac{\epsilon^T}{\epsilon_0} \quad (1.32)$$

Es la permitividad relativa con respecto a la permitividad del vacío.

- *Módulo de Young (Y)*

$$T = Y \times S \quad (1.33)$$

Utilizada para calcular la tensión aplicada, se define como la deformación del material por unidad de tensión aplicada y permite caracterizar a los componentes elásticos de los materiales según la fuerza aplicada y la dirección de esta, como mencionan Moulson & Herbert [12].

1.3.3 TIPOS DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS.

Los materiales piezoeléctricos son de varios tipos como por ejemplo cristales, cerámica, polímeros, etc. Resulta importante definir los materiales que se pueden encontrar en el medio ambiente y los materiales sintéticos ya que la generación de tensión de deformación es variable dependiendo de la estructura interna molecular.

1.3.3.1 Materiales piezoeléctricos naturales y sintéticos.

Los materiales naturales se los encuentra en el medio ambiente, en la naturaleza. Como ejemplo de estos materiales pueden ser: seda, colágeno, esmalte y hueso seco. Cristales de origen natural como la turmalina, topacio, azúcar y cuarzo. Los materiales piezoeléctricos de origen natural no pueden producir grandes conversiones de energía por lo que no pueden ser utilizados para aplicaciones que exigen eficiencias altas. El estudio de los fenómenos piezoeléctricos ha podido lograr un avance científico no solo en el campo de los circuitos electrónicos de control donde este fenómeno es muy usado en actuadores, sensores, etc.

En cuanto a los materiales sintéticos, se tiene: ortofosfato de galio y langasita, cerámicas como titanato de zirconato de plomo, titanato de bario y titanato de plomo. La cerámica de piezoeléctrica más usada es el titanato de zirconato de plomo [17]. Las cerámicas y cristales más utilizados se clasifican en un subgrupo llamado ferroeléctrico. Estos materiales al estar por debajo de una temperatura específica proporcionan características de materiales piezoeléctricos, tal como indica Ayerbe [6].

1.3.3.2 Materiales piezoeléctricos cerámicos y ferroeléctricos

Son cerámicas sintéticas policristalinas formadas por numerosos cristales ferroeléctricos. La temperatura, frecuencia, amplitud de la fuerza aplicada y el tiempo de vida del material son mayores que cualquier otro tipo de piezoeléctrico, mencionado en [6]. Entre las piezocerámicas más conocidas se encuentran: titanato de plomo (II) $[PbTiO_3]$ y titanato de zirconato. Este último $[Pb(Zr_x, Ti_{1-x})O_3]$ es el material más conocido entre las cerámicas,

es mejor que los polímeros ya que su coeficiente piezoeléctrico es 10 veces mayor, como apunta Othman [18].

- *Cerámicas blandas*

Tienen altos factores de acoplamiento, constantes piezoeléctricas de valores altos, alta permitividad, altas pérdidas dieléctricas, baja linealidad. La despolarización y deterioro ocasiona mayores pérdidas en estos materiales. Se los encuentra en aplicaciones donde existan temperaturas, frecuencias y campos eléctricos bajos [6].

- *Cerámicas duras*

Tienen características opuestas a las cerámicas blandas, alta temperatura de Curie, altos factores de calidad mecánica, la polarización del material es más difícil, soportan gran cantidad de carga mecánica y altos voltajes.

- *Polímeros piezoeléctricos (PVDF)*

Son materiales con características de flexibilidad mayores que las cerámicas y cristales piezoeléctricos. El PVDF es semicristalino, debe ser sometido a campos eléctricos fuertes para poder presentar el fenómeno de la piezoelectricidad a frecuencias en el orden de las microondas. Soportan mayores presiones mecánicas y son adecuados en aplicaciones donde se requiera soportar altas presiones [6]. El policloruro de vinilo (PVC) y polifloruro de vinilo (PVF) si son sometidos a grandes presiones o elevados campos eléctricos también presentan el fenómeno de la piezoelectricidad [19].

- *Semiconductores piezoeléctricos*

Los semiconductores piezoeléctricos no son comunes, sus ecuaciones son más complejas al presentar un componente adicional en el desplazamiento de las cargas. Los semiconductores binarios presentan piezoelectricidad por su disimetría atómica. Estos materiales son usados en integrados y dispositivos con efectos mixtos, por ejemplo, controladores electrónicos que modulan los procesadores fotónicos con componentes ópticos, como se muestra en [19]. El material comúnmente encontrado en el mercado son las cerámicas piezoeléctricas. El cerámico PZT, titanato de zirconato de plomo, es el material utilizado en el presente trabajo. Son fabricados a bajos costos y es el tipo de

piezoeléctrico más usado en la industria de la electrónica porque permiten tiempos de respuesta rápidos, altas sensibilidades a los impulsos, y variedad de formas y tamaños.

1.3.4 DISPONIBILIDAD DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS EN EL ECUADOR.

En el Ecuador las aplicaciones de los materiales piezoeléctricos como generadores de energía han sido estudiados desde hace varios años, como se evidencia en [5], [20] y [4]. Sin embargo, los trabajos realizados no son muy conocidos a nivel nacional y generalmente los piezoeléctricos son usados en su mayoría en el campo de la electrónica. Las cerámicas piezoeléctricas disponibles en el Ecuador son utilizadas comúnmente como sensores y actuadores, además se los encuentra en zumbadores, ya que es la aplicación más conocida para estos materiales. En los puntos de venta de material electrónico es común encontrar elementos piezoeléctricos de tipo circular con voltajes pico de entre los 12 y 30 voltios. Otra forma de adquirir estos materiales es mediante la importación de los mismos ya que varias empresas se dedican a la adquisición de elementos electrónicos bajo pedido lo que hace muy fácil la compra de un elemento piezoeléctrico con características específicas que no se encuentre disponible en el país.

1.3.5 APLICACIONES DE LA ENERGÍA PIEZOELÉCTRICA

1.3.5.1 Aplicaciones en el Ecuador

Una de las aplicaciones realizadas en el Ecuador es la obtención de energía eléctrica mediante las olas, donde se utiliza materiales piezoeléctricos para realizar la conversión de energía llegando a alumbrar 500 metros la avenida Puerto Atún ubicada en Manta, como se muestra en [21]. Otra aplicación es la generación de energía eléctrica con materiales piezoeléctricos en una máquina elíptica de gimnasio, permitiendo generar energía mediante el movimiento de una persona al hacer ejercicio. Otras aplicaciones en su mayoría quedan como prototipos y no son implementados a gran escala [22].

En otras universidades ecuatorianas se han realizado trabajos en base al tema de generación eléctrica con materiales piezoeléctricos destacando la importancia sobre los sistemas *Energy Harvesting* y el beneficio que se obtiene de los mismos.

1.3.5.2 Aplicaciones Internacionales

Dentro de las aplicaciones posibles de este sistema de generación de energía eléctrica podemos determinar que es posible hacer uso del efecto piezoeléctrico para la generación de energía, dentro de estas aplicaciones se tiene:

- *Calzado con transductores piezoeléctricos*

Tomando en cuenta que la principal característica de un sistema piezoeléctrico es el aprovechamiento energético producido por la pisada humana, pero en este caso se basa en el individuo. La propuesta contempla la colocación de transductores piezoeléctricos en las zapatillas o zapatos capaces de generar energía eléctrica a partir de la fuerza producida por la pisada de las personas. Se debe considerar la colocación de un pequeño sistema piezoeléctrico en cada zapatilla y se asume que este será capaz de recoger toda la energía de la pisada, como sugiere Malmcrona [23]. El diseño del dispositivo es realizado aproximando un modelo que toma en cuenta el número de pisadas.

- *Implementación en vías en ciudades intermedias*

Se han venido desarrollando diferentes proyectos de energía, uno de estos es la implementación de sistemas piezoeléctricos en las vías, con el fin de mejorar la calidad de vida de una comunidad. El proceso de generación de energía mediante estos dispositivos se basa en el principio de sometimiento de una superficie ante una carga, donde el peso y la energía del movimiento del vehículo genera una deflexión despreciable, sin embargo, con el aumento del tráfico y el paso de las ruedas del vehículo se crea una diferencia de potencia, la cual se recolecta en un sistema de almacenamiento de energía para posterior distribución en el alumbrado público aprovechando la fuerza que se le imprime al pavimento de acuerdo a la velocidad de tránsito y el flujo vehicular [24].

1.3.6 AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL

1.3.6.1 El recurso eólico

El recurso para la generación de energía eólica es el viento, el cual es generado por corrientes de aire debido al desigual calentamiento de la superficie de la tierra. Como mencionan Arbeola & Zurita [25], la no uniformidad del flujo de radiación solar incidente hace que algunas zonas se calienten más que otras, provocando movimientos conectivos de la masa atmosférica.

1.3.6.2 Velocidad del viento

A pesar de las muchas ventajas que tiene la energía eólica (no es agresiva con el medio ambiente y es inagotable), hay que tener en cuenta que tiene el inconveniente de que el viento es disperso y aleatorio. El gradiente de velocidades es más alto en cuanto mayor es la diferencia de presiones y su movimiento está influenciado por el giro de la Tierra. La velocidad del viento es una magnitud vectorial y ésta varía de forma aleatoria tanto en módulo como en dirección y sentido. Los valores medios suelen encontrarse entre 3 y 7 m/s. Sin embargo, dependiendo de la altitud y la topografía éstos pueden ser mayores o menores (valores mayores en altas montañas, valles estrechos y costas) [25].

1.3.6.3 Descripción de las máquinas eólicas de baja potencia

En [21] se detalla los componentes que poseen los aerogeneradores siendo los principales:

- Góndola
- Palas del rotor
- Buje
- Eje de Baja Velocidad
- Eje de alta velocidad
- Generador Eléctrico
- Unidad de refrigeración
- Torre
- Mecanismos de Orientación

Debido a que el proyecto se basa principalmente en el aerogenerador de eje vertical tipo Savonius las únicas partes que se toman en cuenta son el eje de alta velocidad, palas del rotor, generador eléctrico y una góndola especial.

1.3.6.4 Potencia eólica disponible: potencial eólico

La energía se define como la capacidad para realizar un trabajo. La potencia, en cambio, se define como la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo. Por lo que ambas están relacionadas con la ecuación 1.34 y 1.35, de la forma que se muestra en [25]:

$$P = \frac{\text{Energía}}{\text{tiempo}} \quad (1.34)$$

$$E = 0,5 \times m \times v^2 \quad (1.35)$$

Donde:

m = masa del aire [kg].

v = Velocidad del aire [m/s].

E = Energía Cinética [J].

El caudal másico de aire de densidad ρ que fluye a través de una superficie de área A perpendicular a la dirección del flujo, viene dado por la ecuación de continuidad mostrada en [25], a continuación, por 1.36:

$$\dot{m} = \rho \times Av \quad (1.36)$$

Donde:

ρ = densidad del aire [kg/m^3].

A = Superficie perpendicular a la dirección del flujo [m^2].

La ecuación 1.37, muestra la potencia disponible asociada al caudal de aire que atraviesa dicha sección:

$$Pd = 0,5 \times \dot{m} \times v^2 = 0,5 \times \rho \times Av^3 \quad (1.37)$$

En cuanto al valor de esta potencia disponible, hay que tener en cuenta otros factores que disminuirán su valor como son el límite de Betz, los rozamientos aerodinámicos y mecánicos, el rendimiento del generador eléctrico, permitiendo, solamente un aprovechamiento máximo del 40 % de dicha potencia, como se muestra en [25]. El viento a su paso sufre un parón donde sale con una velocidad menor que con la que entro al aerogenerador.

En la práctica se piensa aprovechar entre el 40 % y el 50 % de la potencia eólica disponible. El límite de Betz, como apunta Hernández [26], establece que una turbina eólica puede convertir energía mecánica como máximo un 59,26 % de la energía brindada por el viento

que incide en el rotor, entonces el límite de Betz el cual varía desde 0,05 hasta 0,6 denota que el 40 % anteriormente mencionado depende mucho de la configuración del aerogenerador.

La ecuación 1.38, muestra la densidad de potencia o potencia por unidad de área:

$$\frac{Pd}{A} = 0,5 \times \rho \times Av^3 \quad (1.38)$$

Para poder extraer del viento la mayor cantidad de energía se debe combinar las características del aerogenerador y las condiciones del lugar de estudio. Así para el funcionamiento exitoso es importante contar con información real y actualizada sobre los vientos del lugar que se quiera analizar, para que un buen diseño opere de manera óptima y adaptándose a las características del lugar.

El cumplimiento de esto exige la ejecución de mediciones meteorológicas que pueden reflejar resultados o valores confiables. Para ello se incluyen los anemogramas, como se muestra en la Figura 1-13, que son diagramas que miden la velocidad del viento y como está varia a través del tiempo [27]

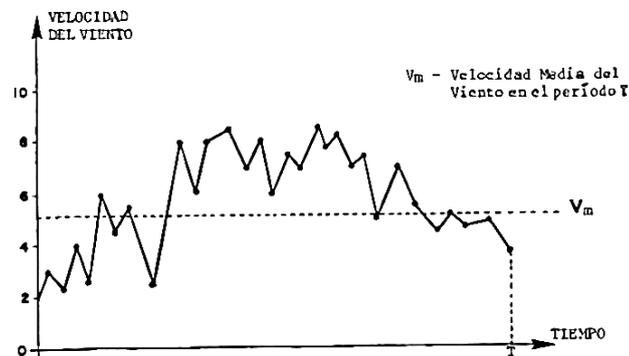


Figura 1-13 Anemograma de velocidad del viento [27]

Los anemogramas muestran velocidades del viento en un periodo de tiempo para poder ser analizados y de estas curvas se obtienen las velocidades medias para las estimaciones. En la Figura 1-14 se muestra el anemograma de la ciudad de Quito en el sector Mariscal Sucre, para el año 2020.

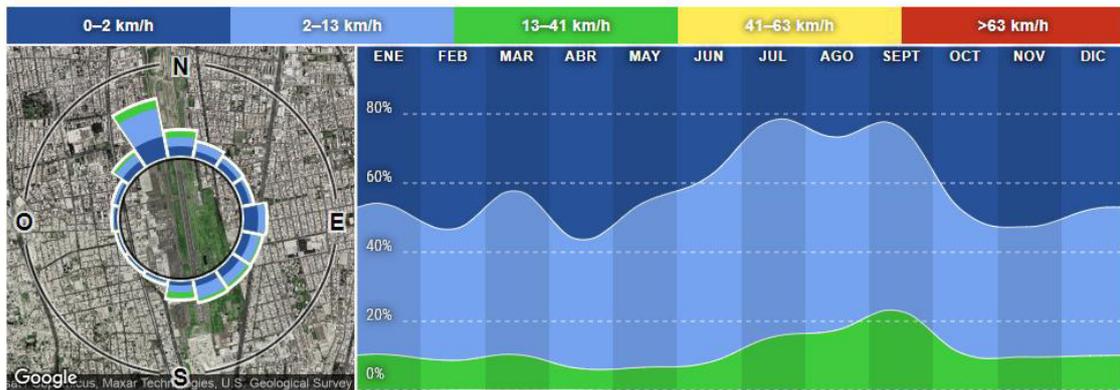


Figura 1-14 Anemograma de la ciudad de Quito para el periodo de un año.

En la Figura 1-15 se dispone de las velocidades medias en cada tramo del periodo de análisis.

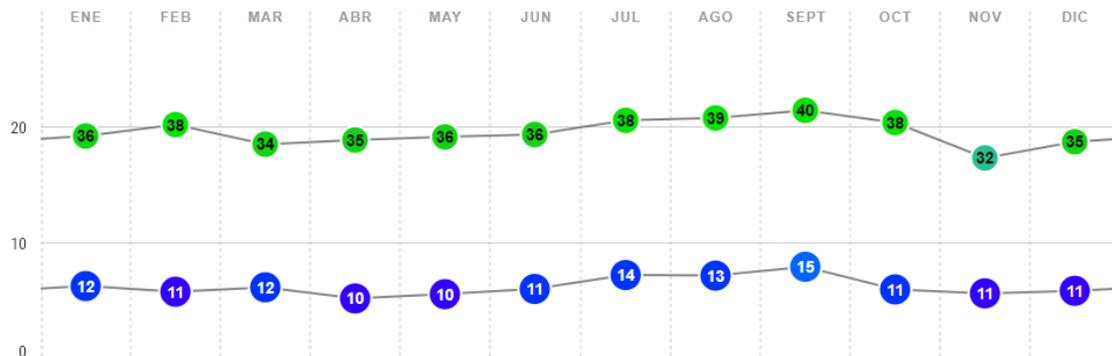


Figura 1-15 Velocidades promedio del anemograma de la ciudad de Quito para el periodo de un año.

Determina entonces que la velocidad promedio en Quito corresponde de 8 a 14 km/h.

- *Curvas de Frecuencia de Velocidades y Frecuencia Relativa del viento.*

Las curvas de Frecuencia de velocidades y frecuencia relativa del viento se deducen para un periodo T de tiempo suficientemente largo de medición. Los registros continuos se traducen en una curva de frecuencia de velocidades, como se muestra en la Figura 1-16. Esta curva se la realiza para cada mes y para el año completo y proporciona por rangos de velocidades el tiempo total que le corresponde, como se indica en [27].

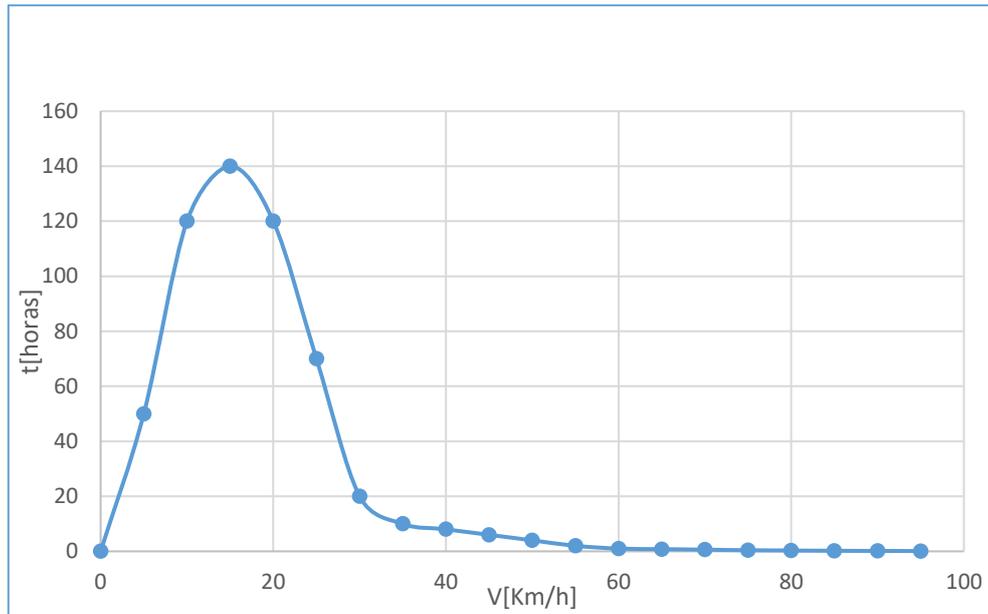


Figura 1-16 Curva de Frecuencia de Velocidades [27].

- *Curvas de Duración de Velocidad*

Se obtienen integrando las curvas de frecuencia relativa del viento, donde T es la coordenada del tiempo referida a la velocidad del viento. De esta forma, 8760 por T es el número de horas del año durante las cuales supera una velocidad del viento igual o superior a Von (velocidad inicial máxima), como muestra la ecuación 1.39.

$$T = \frac{\int_{\max}^{v_{on}} Fre1 \, dvo}{\int_{\max}^{v_o} Fre1 \, dvo} \quad (1.39)$$

Donde:

T = es la duración del viento en [%].

Von = es la velocidad inicial máxima en [m/s].

Vo = Velocidad Inicial [m/s].

Fre1 = Frecuencia Relativa [u].

Curvas de Potencia del Viento

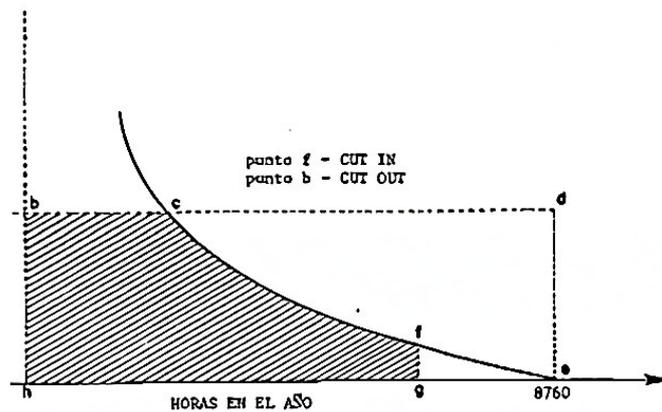


Figura 1-17 Curva de Potencia del Viento [27].

Como se observa en la Figura 1-17 que en el intervalo g-f-e, el viento aún es débil para producir un incremento significativo de potencia, es a partir del punto g que comienza a generarse una potencia apreciable. El punto de la curva dado por la recta f-g es llamado el CUT-IN, punto de arranque. A medida que la velocidad del viento aumenta la potencia también lo hace y en c, el aerogenerador está a su capacidad nominal y se mantiene constante a pesar de incrementos de velocidad del viento [27].

1.3.6.5 Clasificación de las máquinas eólicas

- *Clasificación por usos*

Esta clasificación de las maquinas eólicas tienen en cuenta la categoría de trabajo en donde van a ser empleadas como pueden ser el bombeo de agua, la generación de energía eléctrica y la molienda de diferentes granos como se muestra en la Figura 1-18 [25].

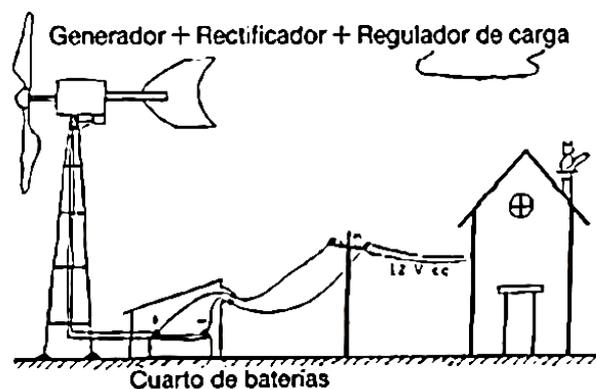


Figura 1-18 Maquinas Eólicas para bombeo de agua y generación de energía [25].

- *Clasificación por potencias*
 - Microturbinas (<3 [kW]).
 - Pequeños aerogeneradores (<50 [kW]).
 - Grandes aerogeneradores (<850 [kW]).
 - Aerogeneradores multimegawat (1-3 [MW]).

La potencia del aerogenerador corresponde a menos de 100 [W] por lo que entraría en la clasificación de microturbina [25].

- *Clasificación por número de palas*
 - Hélices de una pala
 - Hélices de dos palas
 - Hélices de tres palas
 - Hélices múltipalas

El objetivo del presente proyecto entraría en la clasificación de Hélices de dos palas a pesar de tener una proyección de dos pisos, cada piso constaría de 2 palas por lo que este factor no afectaría a su clasificación por número de palas.

- *Clasificación por tipo de eje*

Aerogenerador de eje horizontal

El generador de eje horizontal es más común de los modelos de aerogeneradores. Las hélices y los mecanismos de la turbina están montados a una gran altura del suelo sobre un pedestal. Esta altura a la que se encuentran los aerogeneradores representa una desventaja al momento de realizar algún mantenimiento. Además, Ching & Figueroa [28], mencionan que se requiere un sistema de apoyo mecánico para orientarlos de tal manera que sean perpendiculares al viento siempre.

Aerogenerador de eje vertical

Las turbinas de viento del eje vertical son capaces de atrapar el viento desde prácticamente todas las direcciones y no necesitan mecanismos de orientación, timones o conos de viento. Estos generadores eléctricos pueden ser colocados cerca del suelo y por ende son de fácil acceso en comparación a los de eje horizontal. Existen los aerogeneradores

verticales tipo Darrieus y los tipos Savonius. En este proyecto se centrará el análisis e implementación del tipo Savonius [28].

1.3.6.6 Rotor Savonius

El modelo de rotor Savonius consiste en un cilindro hueco partido por la mitad en el cual sus mitades han sido desplazadas para convertirlas en una S. Los cóncavos son las que captan el viento mientras que la parte posterior presentan una menor resistencia al viento, por lo que girara en el sentido que menos resistencia le oponga. El sistema suele presentar el inconveniente de indicar una presión extra en el interior de las zonas cóncavas al no poder salir el aire, perjudicando así mucho el rendimiento. El sistema mejora esta falencia separando ambas palas y dejando un pequeño hueco llamado “traslape”, que se muestra en la Figura 1-19, para que exista un flujo de aire. Debido a la gran resistencia del aire que ofrece este rotor solo se utiliza a bajas velocidades y el uso para la energía eléctrica requiere multiplicadores lo que reduce su rendimiento, como se muestra en [26].

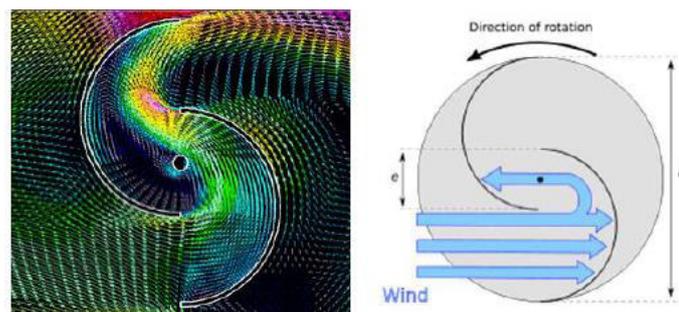


Figura 1-19 Diagrama de flujo de viento y traslape del rotor Savonius [26].

1.3.6.7 Eficiencia del rotor Savonius

El rotor Savonius no tiene mucha eficiencia, pero su bajo costo y su poca tecnología utilizada lo hace viable para el bombeo de agua en poblaciones rurales y con bajos presupuestos económicos. Los rotores generan energía dependiendo de su coeficiente de potencia (C_p), el cual es variable en función de la velocidad en la punta de los alabes. La Figura 1-20 muestra la eficiencia de los rotores eólicos que están disponibles [26].

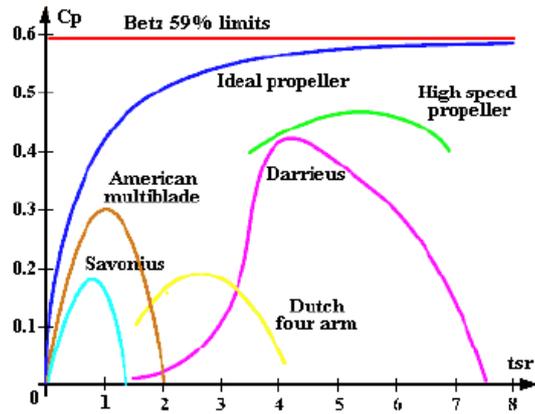


Figura 1-20 Diagrama de eficiencia de los rotores eólicos [26].

La ilustración muestra que los rotores que funcionan con propulsión de fuerzas de sustentación son mucho más eficientes y giran a velocidades mayores que las de arrastre. Es así que los más eficientes son los de eje horizontal de 3 palas mismos que son los más conocidos e implementados en proyectos eólicos a gran escala, como menciona Vidal [29]. Entonces el rotor Savonius, es conocido por su menor eficiencia respecto a otros tipos de rotores. Los estudios realizados con este tipo de rotor tienen diferentes resultados que van desde los 5 a 8 [m/s]. Debido a la gran cantidad de modelos de rotor Savonius existentes como se muestra en la Figura 1-21 (tradicional de 2 y 3 palas, múltipalas, 2 o más pisos y helicoidales) no existe un consenso fijo acerca de dichos valores. Además, los coeficientes de potencia varían según el diámetro del rotor, la altura de este, la relación entre ambos y el espaciado entre las palas, como se muestra en [29].

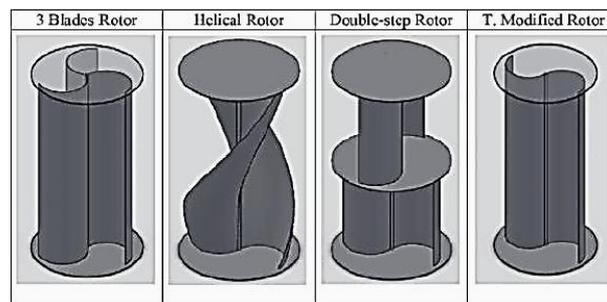


Figura 1-21 Modelos de tipos de rotores Savonius [29].

El rotor de 2 pisos presenta un coeficiente de potencia mayor que los tradicionales de 2 o más palas, lo que sugiere que es un mejor modelo para implementar que los tradicionales pues tiene un coeficiente de velocidad mayor. La velocidad que pueda alcanzar el rotor depende mucho de la geometría y de la carga que se encuentre acoplada al rotor,

habitualmente la carga conectada es un generador eléctrico en el eje el cual hace que la velocidad específica de las palas disminuya.

Por el contrario, si el rotor no está conectado a una carga su velocidad especificada puede alcanzar valores superiores [29].

El rotor Savonius de 2 palas tradicional y su variante modificada tienen un coeficiente de par con valores máximos mayores, pero con una oscilación senoidal mayor, como afirma Cuesta [30]. Además, Khan en su libro "Características y rendimiento en prototipos de aerogeneradores tipo Savonius", del año 1978, concluyó que con una unidad prototipo de escala completa se tuvo que el coeficiente máximo de potencia es 1/3 a la total, definiendo la relación entre la altura y el diámetro máximo. como indica Cueva [31].

Como se indica en [25], el rotor consta de palas y ejes circulares o rectangulares, todos ellos de aluminio ya que se trata de materiales ligeros que ayudarían al movimiento del aerogenerador. Algo importante a considerar es que el peso de la estructura recaería sobre el eje y la estructura de sujeción.

En base a las dimensiones de las palas se obtienen las medidas de diámetro y la altura que serán más importantes para los cálculos futuros. Cuando las aspas se conectan entre sí con el eje del rotor a esto se lo conoce como pasaje del alabe cerrado, así se impide en gran medida la circulación del flujo de aire. Esto ocasiona un vacío parcial del lado del viento justo por debajo del alabe, el cual avanza en la dirección del viento. Debido al vacío parcial que existe, la fuerza de retardo de las aspas es grande y el torque en el rotor es moderado si se desplazan las aspas se obtiene lo conocido como geometría del pasaje de alabe abierto o traslape como muestra la Figura 1-22, tal como explica Ogata [32].

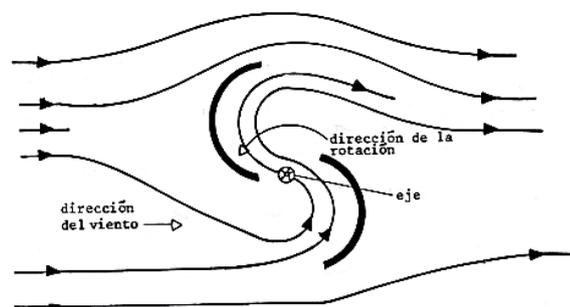


Figura 1-22 Diagrama del flujo de aire en un pasaje de alabe abierto [32].

Se obtiene que la región de vacío que provocaba el alabe cerrado es reemplazada por una región de presión obteniendo un aumento del torque, es así que por la regulación del flujo de aire en esta apertura provocada por la implementación de un traslape variable como lo proyectado en este trabajo se puede controlar tanto la velocidad de rotación como la producción del torque.

1.3.7 CONTROL DE ESTADOS

La Teoría de Control moderna se basa en el análisis y el dominio temporal de los sistemas de ecuaciones diferenciales. Esta teoría simplificó el diseño de los sistemas de control porque se basa en un modelo del sistema real que se quiere controlar. La estabilidad del sistema depende del error entre el sistema real y su modelo según [32].

1.3.7.1 Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con sistemas de lazo abierto

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas de los parámetros del sistema. Así es posible usar componentes relativamente poco precisos y baratos para obtener un control adecuado caso que es imposible en un sistema de lazo abierto, como se menciona en [32].

Las ventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto son:

1. Construcción simple y facilidad de mantenimiento.
2. Menor costo que el correspondiente sistema en lazo cerrado.
3. No hay problemas de estabilidad.
4. Conveniente cuando la salida es difícil de medir o cuando medir la salida de manera precisa es muy costoso.

Las desventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto son:

5. Las perturbaciones y los cambios en la calibración originan errores y la salida puede ser diferente a lo que se desea.
6. Para mantener la calidad requerida en la salida, es necesaria una recalibración regularmente.

1.3.7.2 Modelado en el espacio de Estados

La tendencia moderna en los sistemas de ingeniería es hacia una mayor complejidad, debido a que se requieren tareas complejas y buena precisión. Los sistemas que son complejos pueden tener múltiples entradas y múltiples salidas y que pueden variar en el tiempo. Tal como se describe en [32], existen ciertos elementos, detallados a continuación:

Estado: El estado de un sistema dinámico es el conjunto de variables más pequeñas, de forma que el conocimiento de estas variables en el inicio junto con el conocimiento de la entrada determina completamente el comportamiento del sistema.

Variable de estado: Las variables de un sistema dinámico son las variables que constituyen el menor conjunto de variables que determinan el estado del sistema dinámico. Si al menos se necesitan n variables para describir completamente el comportamiento de un sistema dinámico, entonces tales n variables son un conjunto de variables de estado [31].

Sea un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas con n integradores. Además, si existen r entradas ($u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)$) y m salidas ($y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$) se definen las n salidas de los integradores como variables de estado ($x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$) entonces las ecuaciones 1.40 y 1.41 muestran que este sistema se puede describir como:

$$\dot{x}_1(t) = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad (1.40)$$

$$\dot{x}_n(t) = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad (1.41)$$

Las salidas $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$ son las ecuaciones 1.42, 1.43 y 1.44:

$$y_1(t) = g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad (1.42)$$

$$y_2(t) = g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad (1.43)$$

$$y_m(t) = g_m(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad (1.44)$$

Si se define a la ecuación 1.49 como una matriz de entradas y 1.47 como la matriz de salida se tiene que 1.45 corresponde a la función compuesta por entradas y variables de estado, las ecuaciones 1.46 y 1.48 son las matrices compuestas por variables de estado y entradas respectivamente:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x1(t) \\ x2(t) \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

$$f(x, u, t) = \begin{bmatrix} f1(x1, x2, \dots, xn; u1, u2, \dots, ur; t) \\ f2(x1, x2, \dots, xn; u1, u2, \dots, ur; t) \\ \vdots \\ fn(x1, x2, \dots, xn; u1, u2, \dots, un; t) \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y1(t) \\ y2(t) \\ \vdots \\ ym(t) \end{bmatrix} \quad (1.47)$$

$$g(x, u, t) = \begin{bmatrix} g1(x1, x2, \dots, xn; u1, u2, \dots, ur; t) \\ g2(x1, x2, \dots, xn; u1, u2, \dots, ur; t) \\ \vdots \\ gm(x1, x2, \dots, xn; u1, u2, \dots, un; t) \end{bmatrix} \quad (1.48)$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u1(t) \\ u2(t) \\ \vdots \\ ur(t) \end{bmatrix} \quad (1.49)$$

Las ecuaciones anteriores se resumen a las ecuaciones 1.50 y 1.51:

$$x(t) = f(x, u, t) \quad (1.50)$$

$$y(t) = g(x, u, t) \quad (1.51)$$

Donde:

$x(t)$ = Ecuaciones de estado de entrada.

$y(t)$ = Ecuaciones de estado de salida.

Si las funciones vectoriales f y g involucran explícitamente el tiempo t , el sistema se denomina sistema variante con el tiempo. Finalmente, la linealización de las ecuaciones alrededor del estado de operación, se tienen las ecuaciones de estado y de salidas linealizadas 1.52 y 1.53, como se mencionó en Ogata [32] y Flores [33].

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (1.52)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \quad (1.53)$$

Donde:

$A(t)$ = Es la matriz de estados.

$B(t)$ = Es la matriz de entrada.

$C(t)$ = Es la matriz de salida.

$D(t)$ = Es la matriz de transmisión directa.

Cuyo diagrama de bloques que representa las ecuaciones se presenta en la Figura 1-23:

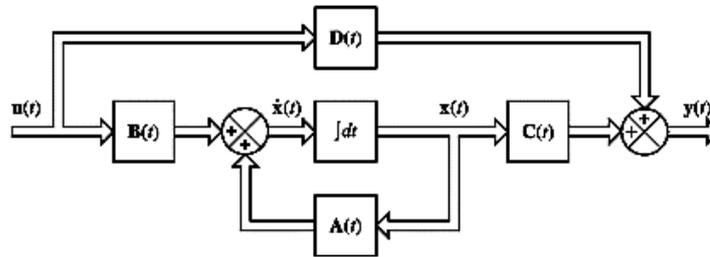


Figura 1-23 Diagrama de bloques del sistema de control representado en el espacio de estados [32].

1.3.7.3 Convertidor DC-DC Tipo Buck-Boost

Los convertidores CD-CD son dispositivos electrónicos de potencia que permiten, a partir de una fuente de DC, controlar su voltaje DC a la salida. Tienen múltiples aplicaciones como las fuentes de poder, computadoras, sistemas distribuidos, sistemas que permiten controlar la aceleración, además tienen alta eficiencia y una respuesta dinámica rápida. Las configuraciones básicas de los convertidores DC-DC son tres: Buck (reductora), Boost (elevadora) y Buck-Boost (elevadora-reductora). Estas permiten elevar, reducir o elevar/reducir el voltaje de alimentación en la salida. Esta configuración tiene además 4 elementos básicos que son: la bobina (L), el capacitor (C), un diodo y un interruptor controlado (Q). Las propiedades de cada tipo de convertidor dependen de la ubicación de estos 4 elementos [33].

Con el propósito de evitar la complejidad de tratar ecuaciones diferenciales con entradas discontinuas correspondiente a modelos de convertidores DC-DC conmutados, se recurre a un modelo promedio de estos, suponiendo que la frecuencia con la que conmuta es

idealmente infinita. Según [34], El convertidor Buck-Boost mostrado en la Figura 1-24 permite reducir o elevar el valor de salida con respecto al de entrada, esta topología es inversora en su salida, como menciona Ospina [35].

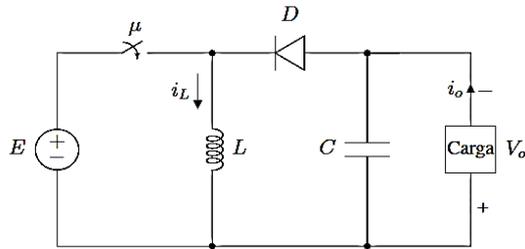


Figura 1-24 Convertidor Buck-Boost [35].

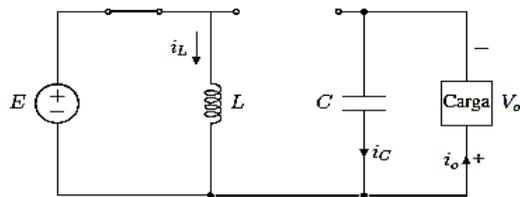


Figura 1-25 Convertidor Buck-Boost en estado 1 [35].

$$\tau 1(q) = \frac{1}{2} L q l^2 \quad (1.54)$$

$$V 1(q) = \frac{1}{2C} q c^2 \quad (1.55)$$

$$F 1(q) = \frac{1}{2} R (-q c)^2 \quad (1.56)$$

Tomando como condiciones de analisis $Q_{qc}^1 = E$ y $Q_{ql}^1 = 0$

Donde:

L: es la inductancia del inductor [mh].

C: es la capacitancia del capacitor [uF].

R: es la resistencia de a carga [Ω].

Ql: es la carga del inductor [uC].

Qc: es la carga del capacitor [uC].

E = Tensión aplicada el circuito Buck-Boost [V].

La ecuación 1.54 es la energía cinética en estado 1, 1.55 la energía potencial del convertidor Buck-Boost en estado 1 y 1.56 es la fuerza de disipación.

Tomando ahora el caso de conmutación 0 la Figura 1-26 muestra el equivalente del circuito en este caso:

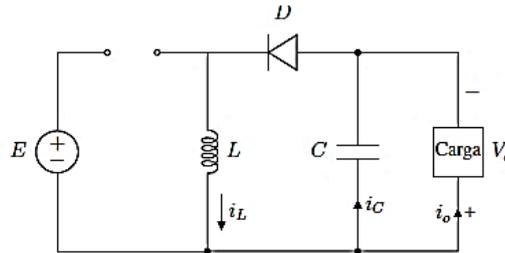


Figura 1-26 Convertidor Buck-Boost en estado 0 [35].

$$\tau_0(q) = \frac{1}{2} L q l^2 \quad (1.57)$$

$$V_0(q) = \frac{1}{2C} q c^2 \quad (1.58)$$

$$F_0(q) = \frac{1}{2} R (-q l - q c)^2 \quad (1.59)$$

Tomando como condiciones de analisis $Q_{qc}^0 = 0$ y $Q_{ql}^0 = 0$

La ecuación 1.57 es la energía cinética en estado 0, 1.58 la energía potencial del convertidor Buck Boost en estado 0 y 1.59 es la fuerza de disipación.

La función lagrangiana se muestra en la ecuación 1.60:

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} L (\dot{q} l)^2 - \frac{1}{2C} (q c)^2 \quad (1.60)$$

Derivando parcialmente las ecuaciones se tiene el siguiente conjunto de ecuaciones compuesto por 1.61 y 1.62:

$$L \dot{q} l = R(1 - \mu)[-(1 - \mu)q l - q c] + E \mu \quad (1.61)$$

$$\frac{1}{C} q c = -R[(1 - \mu)q l - q c] \quad (1.62)$$

Despejando y reemplazando se obtiene las ecuaciones 1.63 y 1.64 diferenciales no lineales para un convertidor Buck-Boost [35]:

$$ql = (1 - \mu) \frac{qc}{LC} + \frac{E}{L} \mu \quad (1.63)$$

$$qc = -\frac{1}{RC} qc - (1 - \mu) ql \quad (1.64)$$

Como menciona Ospina [35], para obtener el modelo de convertidor Buck Boost y al aplicar las leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff en el circuito de la Figura 1-24, se puede obtener su modelo dinámico, dando como consecuencia un sistema de ecuaciones diferenciales 1.65 y 1.66 que describen el convertidor Buck-Boost.

$$L \frac{di}{dt} = (1 - \mu)v + \mu E \quad (1.65)$$

$$C \frac{dv}{dt} = -(1 - \mu)i - \frac{v}{R} \quad (1.66)$$

Para determinar las ecuaciones de la bobina 1.70 y la resistencia de carga 1.69 estas son obtenidas de las relaciones de corriente en el inductor 1.67 y la corriente de salida 1.68 [35]:

$$I_L = \frac{I_0}{1 - D} \quad (1.67)$$

$$I_0 = I_L(1 - D) = \frac{V_0(1 - D_{min})^2}{2fsL} \quad (1.68)$$

$$R_L = \frac{V_0}{I_0} = \frac{2fsL}{V_0(1 - D_{min})^2} \quad (1.69)$$

$$L = \frac{V_0(1 - D_{min})^2}{2fsI_0} = \frac{R_L(1 - D_{min})^2}{2fs} \quad (1.70)$$

Para obtener la relación se define que el capacitor se centra en la salida del convertidor Buck-Boost como muestra la Figura 1-27 donde se observa un capacitor y una resistencia parasita r_c , mencionado en [35].

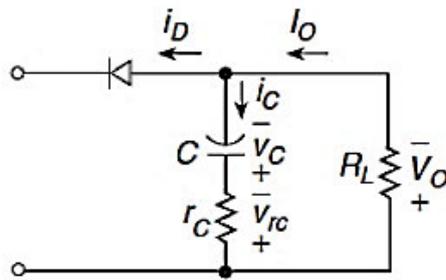


Figura 1-27 Diagrama del capacitor del sistema Buck Boost [36].

El valor de la corriente del capacitor como se muestra en la ecuación 1.71 se define por:

$$I_{C_{pp}} = I_1 + I_0 = \frac{I_0}{1 - D} \quad (1.71)$$

Donde:

I_0 : Corriente de la carga [A].

I_c : Corriente del capacitor [A].

I_d : Corriente del diodo [A].

r_c : Resistencia del capacitor [Ω].

D : Es la conmutación del diodo

Dando como resultado la ecuación 1.72 que es el valor pico pico del voltaje a través de la resistencia:

$$V_{rC_{pp}} = r_c I_{C_{pp}} = \frac{r_c I_0}{1 - D} \quad (1.72)$$

La ecuación 1.73 es el voltaje pico pico del capacitor:

$$V_{C_{pp}} = V_r - V_{rC_{pp}} \quad (1.73)$$

El valor pico pico del capacitor se define como la ecuación 1.74:

$$V_{C_{pp}} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_0 D T}{C} = \frac{V_0 D}{f_s R_L C} \quad (1.74)$$

Finalmente, la relación del capacitor mostrada en la ecuación 1.75 se define por:

$$C = \frac{I_0 D}{f_s V_{C_{pp}}} = \frac{V_0 D}{f_s R_L V_{C_{pp}}} \quad (1.75)$$

Donde:

R_L : Resistencia del inductor [Ω].

f_s : Frecuencia de trabajo [Hz].

Para la selección de elementos en el convertidor DC-DC donde cabe destacar que el Buck-Boost y el control de estados tienen como entradas el voltaje de alimentación y el sistema PWM, en cuanto a la salida del convertidor esta consta de mediciones de voltaje y estas se compara con un valor de referencia [35].

Se empieza con determinar los límites de potencia mostrados en las ecuaciones 1.76 y 1.77 dados por:

$$P_{Omax} = V_0 I_{Omax} \quad (1.76)$$

$$P_{Omin} = V_0 I_{Omin} \quad (1.77)$$

Se obtiene el valor de la inductancia mínima L_{min} 1.78 y 1.79 y para el capacitor C

$$L_{min} = \frac{R_L (1 - D)^2}{2 f_s} \quad (1.78)$$

$$C = \frac{V_0 D}{f_s R_L V_{C_{pp}}} \quad (1.79)$$

Como se muestra en [35] se obtiene las funciones de transferencia mostradas en las ecuaciones 1.80 y 1.81:

$$G1(s) = \frac{-a}{s^2 + bs + c} \quad (1.80)$$

$$G2(s) = \frac{a1s - b1}{s^2 + c1s + d1} \quad (1.81)$$

Resultando dos funciones que corresponden a las dos entradas. Para un análisis de modelado en variables de estado del sistema se realiza la prueba de controlabilidad como muestra la ecuación 1.82 [35], que determina que si un estado es controlable se puede transferir el estado inicial a cualquiera otro en cualquier tiempo.

$$x(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1.82)$$

El sistema es controlable si y solo si la matriz de controlabilidad Q con la ecuación 1.83 es de rango completo n, definida de la siguiente forma:

$$Q = [B|AB|A^2B \dots |A^{n-1}B|] \quad (1.83)$$

Si la matriz Q posee un rango definido y completo indica que el sistema es controlable con los valores calculados y con estas dos entradas se puede llevar el estado entre 2 valores cualesquiera del espacio de estado [35]. En el presente trabajo, para la implementación del control de estados aparte de los elementos como la inductancia y la capacitancia ya mencionados, el generador de la onda PWM será un sistema Arduino y el dispositivo que controle los estados corresponderá a un transistor de campo (Mosfet) que para resguardar su integridad será enlazado al control de estados con un optoacoplador.

1.3.8 MODELO DE DISTRIBUCIÓN WEIBULL

La distribución Weibull es usada especialmente en el tratamiento de los datos de velocidad de viento que son muy importantes en el modelamiento de un aerogenerador Savonius, por lo que en el presente trabajo se utiliza esta distribución para decidir el lugar de pruebas. Esta distribución es probablemente la distribución más utilizada en aerogeneradores. Ello se debe a la gran flexibilidad que presenta esta distribución, mediante la cual es posible modelarlas, como muestran las ecuaciones 1.84, 1.85, 1.86, 1.87 y 1.88. Puede tener tasas de fallo creciente, decreciente o constante, Así cuando $\beta = 1$ el modelo Weibull se convierte en exponencial y presenta tasa de fallo constante, como menciona Mayordomo [37].

$$f(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta} \quad (1.84)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta} \quad (1.85)$$

$$S(t) = e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta} \quad (1.86)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} \quad (1.87)$$

$$H(t) = \left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta \quad (1.88)$$

Donde:

B = parámetro de forma [adimensional].

λ = parámetro de escala [m/s].

$f(t)$ =Es la función de densidad de probabilidad de Weibull.

$F(t)$ = Es la función de Distribución acumulativa de Weibull.

$S(t)$ =Probabilidad de que la velocidad del viento supere un valor determinado.

$h(t)$ =Tasa de Fallos de la distribución Weibull.

$H(t)$ =Tendencia de la curva de distribución Weibull en base a los parámetros de forma y escala.

El parámetro de forma β representa las distribuciones de duración estudiadas permitiendo adaptar la forma de la curva $h(t)$ mostrada en la Figura 1-28 a lo largo de la vida de un sistema de generación eólica de energía, tal como se menciona en [37].

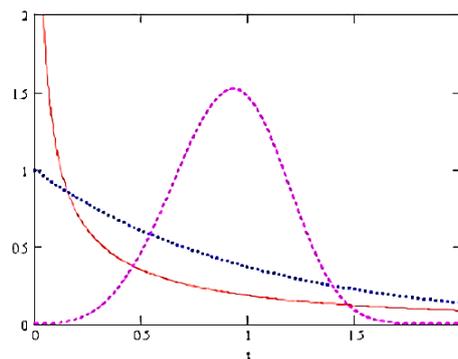


Figura 1-28 Forma típica de la función de Densidad Weibull [37].

Como se mencionó la distribución Weibull es la más usada en el análisis de parámetros de velocidad de viento. Por lo que en este trabajo será utilizada para el análisis estadístico de los datos eólicos, centrándose en la función de densidad de probabilidad de manera que se ajuste de manera óptima.

1.3.9 TRATAMIENTO DE DATOS EÓLICOS.

Conviene indicar que los resultados obtenidos en una campaña de medición son poco representativos del comportamiento del viento, dada la variabilidad y aleatoriedad de este. Para tener un nivel óptimo de representación, según Villarubia [38], se debe disponer series históricas lo más largas posibles para un mejor resultado. A continuación, se muestran las

formas más comunes de representar una serie de datos históricos acerca de velocidad y dirección de viento.

Datos de viento en forma de tablas o series numéricas: Valor promedio durante 10 minutos de la velocidad y dirección instantánea, constituyen series de gran detalle. También se realizan promediados para cada hora o cada 3 horas. En algunos observatorios se dispone de una tabla que indica junto con la velocidad media anual las frecuencias relativas de la velocidad media anual por intervalos de velocidad como se muestra en la Figura 1-29,[38].

Mes	En	Fe	Mz	Ab	My	Jn	Jul	Ag	Se	Oc	No	Di	Año
Velocidad (m/s)	3,5	2,6	3,3	4,1	4,1	3,5	3,5	3,5	3,1	3,5	3,8	3,9	3,5
Dirección dominante	NE	SO	N	NE	SO	SO	N	SO	E	N	SO	N	SO

Figura 1-29 Velocidad media y dirección mediante tabla [38]

Representaciones gráficas: La representación gráfica más usada es la denominada rosa de los vientos. Consiste en un diagrama polar en el cual se definen diferentes direcciones o rumbos distintos de valores relacionados con la velocidad y dirección del viento como muestra la Figura 1-30. La rosa de los vientos permite representar las direcciones dominantes de los vientos. En general, no coincide la dirección dominante con la de mayor intensidad del viento, como se indica en [38].

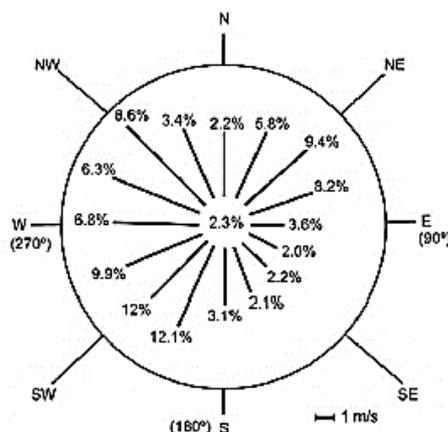


Figura 1-30 Velocidad media y dirección mediante representación gráfica (rosa de los vientos) [38].

Representaciones mediante datos estadísticos: Los conceptos estadísticos más usados en el análisis de viento son los de centralización y dispersión, Ambas categorías se centran

en la variable velocidad, así mismo todos estos conceptos pueden ser aplicados a otras variables como la dirección, etc. [38].

Parámetro de centralización.

- Media Aritmética: Valor promedio de todas las medidas.
- Mediana: Es el valor medio de los dos valores que dividen al conjunto de datos en 2 partes iguales.
- Moda: Valor que se representa con la máxima frecuencia.

Parámetro de Dispersión.

- Rango: Es la diferencia entre el mayor y menor de los valores.
- Desviación Estándar: Valor que relaciona la raíz de las frecuencias relativas con los datos de velocidad.

Agrupación de datos en clases o categorías: Determinando la frecuencia de clase, es decir el número de ellos que pertenecen a cada clase. Cada clase tiene sus límites superior e inferior que definen el intervalo de clase.

Histogramas: Permite esbozar la ley o función de distribución continua de probabilidad. A partir de la forma que adopta el polígono de frecuencias como muestra la Figura 1-31. Así mismo conviene dibujar la curva de frecuencias acumuladas, como se menciona en [38].

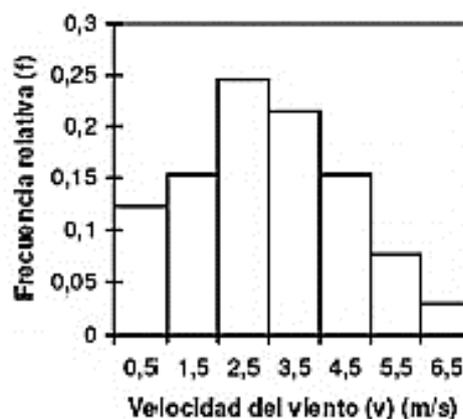


Figura 1-31 Histograma de frecuencias relativas [38].

Curva de duración de la velocidad: Se dibuja a partir de las frecuencias acumuladas, colocando en ordenadas la velocidad y en las abscisas el número de horas acumuladas. Esta curva como se aprecia en la Figura 1-32 indica el tiempo durante el que la velocidad del viento se mantiene superior a un valor [38].

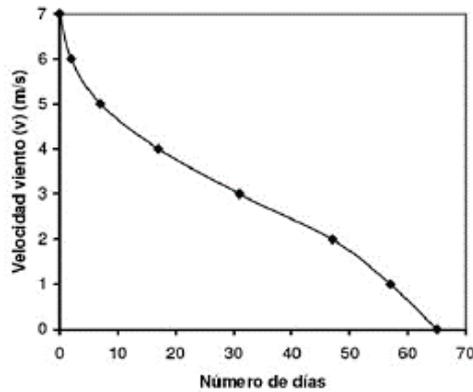


Figura 1-32 Curva de duración de la velocidad [38].

Para el presente trabajo con el fin de facilitar el análisis y la toma de decisiones se opta por escoger las siguientes representaciones para los datos eólicos que se obtendrán:

- Datos de viento en forma de tablas: Tabulación de velocidad y dirección del viento para cada hora del lugar de prueba.
- Datos estadísticos: Tanto para velocidad y dirección, se tiene la distribución temporal, distribución de frecuencias de probabilidad, distribución acumulada.
- Histogramas: Distribuciones graficas de velocidad y dirección del lugar de prueba.
- Graficas de rosa de vientos: Diagrama Polar de las direcciones del viento tomadas en el lugar de prueba.

2 METODOLOGÍA, ARMADO Y CONSTRUCCION

La metodología propuesta y expuesta en la

Figura 2-1 para verificar si los materiales piezoeléctricos son útiles como medio de generación de energía, se basa en investigación teórica, diseño, armado, realización de pruebas y análisis de resultados. La exploración teórica permite entender de mejor manera el efecto piezoeléctrico, así como las ecuaciones relacionadas con el mismo, brindando una clara idea de cómo aprovechar esta energía de mejor manera. De igual forma, la investigación acerca de los aerogeneradores de eje vertical permite diseñar un modelo que se adapte a las necesidades requeridas de potencia, ya que la generación piezoeléctrica necesita de un soporte de confiabilidad por la baja potencia producida por el material piezoeléctrico.

El diseño posterior a la fase teórica está enfocado a la aplicación de la teoría consultada sobre generación piezoeléctrica y aerogeneradores de eje vertical. La implementación del sistema de control de estados permite al sistema piezo-aerogenerador brindar energía a la batería de manera eficiente y sin variaciones que puedan ocasionar daños a esta.

Fase A (teórica): Se recopila toda la información necesaria para comprender los conceptos acerca de los materiales piezoeléctricos, y se investiga cómo se produce el efecto piezoeléctrico. Se investiga el diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical y un control de estados.

Fase B (diseño): Con la información recopilada en la fase anterior, se realiza un diseño del prototipo del generador piezoeléctrico y del aerogenerador de eje vertical, para ello se utilizan las ecuaciones investigadas y se escogen los materiales a utilizar.

Fase C (armado y construcción): Mediante el uso del diseño realizado en la fase anterior, se construye el prototipo del generador piezoeléctrico y aerogenerador junto con un control de estados para un sistema de iluminación de baja potencia.

Fase D (medición y pruebas de funcionamiento): Una vez realizado el prototipo, se realizan las pruebas y mediciones necesarias para comprobar el funcionamiento, obtención formas de onda, valores característicos, etc.

Fase E (análisis de resultados): Una vez realizadas las pruebas y mediciones, se analizan los resultados obtenidos y se establece la validez de los materiales piezoeléctricos como fuente de energía.

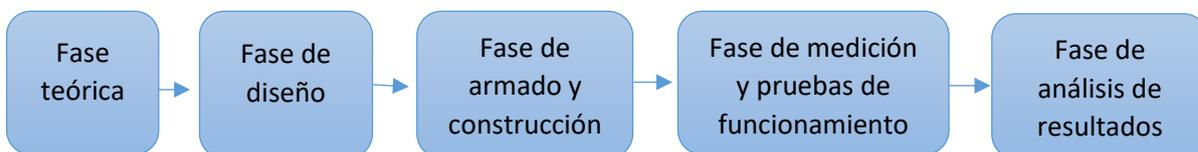


Figura 2-1 Metodología para la verificación de la factibilidad de la generación piezoeléctrica

2.1 Baldosas piezoeléctricas

En la actualidad no existe una normativa definida para el diseño y la construcción de un generador piezoeléctrico, sin embargo, una de las formas más comunes y estudiadas de este tipo de generadores son las baldosas piezoeléctricas. Estas permiten captar la energía mecánica que una persona produce al caminar, mediante una baldosa colocada en una zona de tránsito peatonal. convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica a través de un material piezoeléctrico y almacenarlo para su posterior uso. La energía se produce a cada instante que se dé un paso al caminar de una persona, si varias personas caminan a través de varias baldosas piezoeléctricas la energía producida es directamente proporcional al número de personas caminando sobre las baldosas piezoeléctricas.

2.1.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO

Los parámetros que se describen a continuación están enfocados a la premisa de que los materiales piezoeléctricos son deformados en sentido vertical, ya que el generador al ser una baldosa estará ubicado en el piso y la energía a recolectarse será la de una persona al caminar, la fuerza producida de una pisada está en sentido vertical.

2.1.1.1 Tensión eléctrica por deformación

La fuerza aplicada a un material piezoeléctrico como muestra la ecuación 2.1 [40], se estima mediante el peso promedio de la población, en Ecuador el peso promedio de una persona es de 74,2 [kg] [39].

$$f = m \times g \quad (2.1)$$

Dónde:

m = Masa de la persona sobre la baldosa piezoeléctrica [kg].

g = Constante de gravedad (9.81) [m/s²].

f = Fuerza aplicada [N].

El área de acción es donde participa la cerámica piezoeléctrica, se calcula con la fórmula 2.2:

$$A = d^2 \times \frac{\pi}{4} \quad (2.2)$$

Dónde:

A = Área de acción de la cerámica piezoeléctrica [m²].

d = Diámetro del disco [m].

Para el cálculo del voltaje producido por la deformación de un material expuesto a una presión mecánica externa mostrada en la ecuación 2.3 es necesario, como indican Zapata y Bustamante [40], conocer la constante piezoeléctrica del material a utilizar. La proporción entre la variación de la longitud de las caras del material piezoeléctrico y la diferencia de potencial está definida por la constante piezoeléctrica, de esta manera se define la generación de cargas producidas en Coulomb y la fuerza aplicada en Newtons [10].

$$V = \left(g_{33} \times h \times \frac{f}{a} \right) = \left(g_{33} \times h \times \left(\frac{f}{d^2 \times \frac{\pi}{4}} \right) \right) \quad (2.3)$$

Dónde:

V = Tensión máxima esperada por la deformación del material [V].

g₃₃ = Coeficiente de tensión Piezoeléctrica [Vm/N].

h = Longitud o espesor piezoeléctrico [mm].

f = Fuerza aplicada en la cerámica piezoeléctrica [N].

d = Diámetro del material piezoeléctrico [mm].

a = Área de la cerámica piezoeléctrica [m²].

La ecuación 2.3 corresponde a la ecuación antes deducida en la sección 1.3.2.1 modelo de generación de energía piezoeléctrico, y cuantifica el voltaje producido por un material

piezoeléctrico cuando es sometido a una presión mecánica externa que en este caso corresponde a una pisada de una persona.

2.1.1.2 Corriente generada

La corriente de salida se verá afectada por la cantidad de elementos piezoeléctricos que se encuentren conectados en serie y además se verán afectados por la impedancia equivalente de los mismos. Sin embargo, es común que los discos piezoeléctricos presenten corrientes del orden de 1 [mA] ya que su impedancia es aproximadamente 400 [Ω], siendo un valor demasiado alto provocando valores bajos de corriente, como se menciona en [40].

2.1.1.3 Potencia generada por presión

Cada vez que el prototipo piezoeléctrico sea accionado, la potencia generada mostrada en la ecuación 2.4, como indica Zapata & Bustamante [40], será el producto del voltaje de salida producido por los piezoeléctricos multiplicado por la intensidad de corriente generada.

$$W = V \times I \quad (2.4)$$

Dónde:

W = Potencia [W].

V = Voltaje del circuito [V].

I = Intensidad de corriente [A].

2.1.2 DISEÑO DE LOS COMPONENTES DE LAS BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS

Para la construcción de las baldosas piezoeléctricas es necesario tener en cuenta la resistencia de los materiales y la geometría de la cerámica piezoeléctrica, así como de las baldosas a construir, para lo cual se definen varios aspectos que ayudarán a elegir los materiales adecuados para su fabricación.

2.1.2.1 Elección del material piezoeléctrico

En base a las referencias [3], [6], [4], [36], [41], [46] y [10], se ha propuesto que el material piezoeléctrico a utilizar en la construcción de las baldosas debe cumplir con las siguientes características:

- Voltaje pico de salida entre 15 a 30 [V].
- Su geometría debe ser óptima, debe dar el mayor voltaje posible.
- Fácil de conseguir en el mercado.
- Resistencia a altas fuerzas de presión.
- Bajo costo.

Como materiales piezoeléctricos existentes en el mercado, los sensores piezoeléctricos son de bajo costo, muy utilizados en aplicaciones como zumbadores y sensores de presión. Los sensores piezoeléctricos presentan una resistividad media de 400 [Ω], con voltajes pico comunes de 30 [V], se los puede encontrar en distintas geometrías como: rectangulares, cuadradas, circulares. La geometría elegida para el piezoeléctrico es circular, ya que, si se tiene una superficie con vértices, los bordes más alejados del centro no tendrán la misma fuerza de presión que los bordes más cercanos, como se menciona en [10].

Existen puntos de suelda en el sensor piezoeléctrico asociados a la polaridad negativa o positiva del sensor, en este caso, habrá una pequeña parte del elemento que no participe en la generación de potencial eléctrico a causa de los puntos de soldadura ubicados en los polos del sensor. La Figura 2-2 muestra el sensor piezoeléctrico elegido: es de 35 mm de diámetro total y 23 mm de diámetro activo, de constante piezoeléctrica de $27 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{Vm}}{\text{N}}\right]$, cómo se menciona en [42], y un espesor de 0.33 mm fabricado de PZT (Zirconato titanato de plomo). Este disco no es el óptimo para un diseño de baldosa que permita una mejor generación de potencia por su muy elevada impedancia y baja resistencia de compresión, sin embargo, para realizar ensayos destructivos y experimentación es una opción adecuada [40].

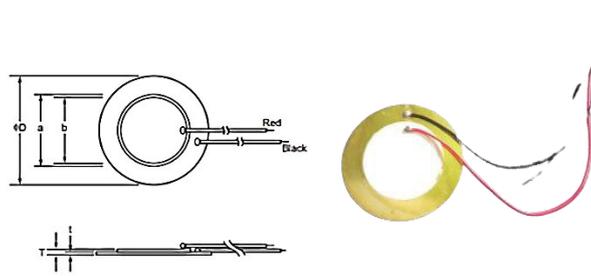


Figura 2-2 Diagrama del sensor piezoeléctrico a utilizar [43].

Una vez elegido el sensor piezoeléctrico, es posible calcular la potencia esperada, 2.8, con las ecuaciones de fuerza, 2.5, área, 2.6, y tensión, 2.7.

$$f = 74,2 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 706,32 \text{ [N]} \quad (2.5)$$

$$A = (0.022 \text{ m})^2 \times \frac{\pi}{4} = 0,0003801 \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.6)$$

$$V = \left(27 \times 10^{-3} \frac{\text{Vm}}{\text{N}} \times 0.00033 \text{ m} \times \frac{706,32 \text{ N}}{3.8 \times 10^{-3}} \right) = 16.56 \text{ [V]} \quad (2.7)$$

$$W = 16,56 \text{ V} \times 0.001 \text{ A} = 1,7 \times 10^{-2} \text{ [W]} \quad (2.8)$$

2.1.2.2 Diseño estructural de las baldosas piezoeléctricas

Es necesario que sean definidos varios componentes que se usarán en la construcción de las baldosas piezoeléctricas, así como también las características mínimas que deben cumplir los elementos que conformarán las baldosas piezoeléctricas.

- *Características técnicas de los elementos que conformarán las baldosas piezoeléctricas*

Soporte

Servirá como medio de apoyo para las personas y transmitirá la fuerza de una persona al caminar hacia los sensores piezoeléctricos ubicados en parte inferior. El soporte de la baldosa piezoeléctrica debe superar el área de una pisada estándar que es de 300 cm², como apunta Pilicita [44].

Contenedor

La baldosa piezoeléctrica constará de un contenedor donde los sensores piezoeléctricos serán ubicados de tal manera que cubran el área del soporte y garanticen la sostenibilidad necesaria para una persona; asimismo debe ser resistente a los esfuerzos mecánicos. El contenedor deberá ser de una medida adecuada para evitar que los materiales piezoeléctricos queden expuestos a la intemperie, y debe asegurar que el soporte se mantenga fijo junto con los sensores piezoeléctricos. También contará con una salida positiva y negativa de voltaje para conectar la baldosa piezoeléctrica a un medio externo que permitirá realizar las pruebas eléctricas pertinentes.

Disco de transmisión de energía mecánica

La función de esta pieza es permitir que se produzca un mayor contacto entre el soporte y el sensor piezoeléctrico evitando pérdidas de potencia producido por los puntos de suelda existentes en el sensor. El material con el que se fabricará el disco debe ser rígido, permitiendo el aislamiento eléctrico entre la superficie del sensor piezoeléctrico y el soporte, deberá proporcionar una adecuada elasticidad al sensor en el momento que sea presionado como muestra la Figura 2-3 evitando rupturas internas en el material por la falta de espacio al momento de ejercer presión en el soporte.

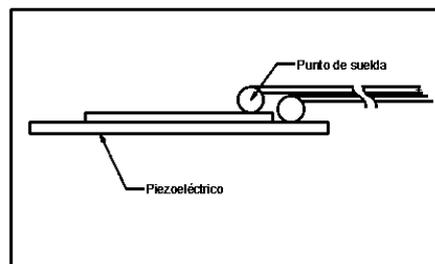
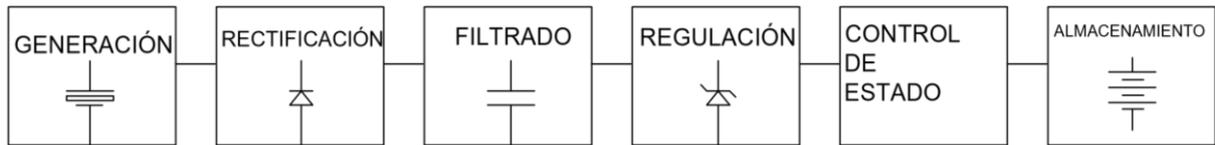


Figura 2-3 Vista lateral de un sensor piezoeléctrico con puntos de suelda ubicados en los polos [43].

Soporte base para los sensores piezoeléctricos

El contenedor tendrá en su base un soporte donde se colocarán los sensores piezoeléctricos y debe permitir la deformación del material piezoeléctrico sin riesgo de romper su estructura interna, protegiéndolo de daño por falta de espacio en el instante en que los sensores piezoeléctricos se deformen por acción de una fuerza externa (pisada). Este recubrimiento también puede ser colocado en la parte inferior del soporte para



proteger a los discos que transmiten la energía mecánica hacia los sensores piezoeléctricos.

2.1.3 RECTIFICACIÓN DE VOLTAJE Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

El diagrama del sistema de recolección de energía piezoeléctrico propuesto es el mostrado en la Figura 2-4:

Figura 2-4 Arquitectura para el almacenamiento de energía [autoría propia]

Consta de las siguientes etapas:

- Generación
- Rectificación
- Filtro
- Control de estado
- Almacenamiento

2.1.3.1 Rectificación de voltaje

Por la naturaleza de la generación de energía eléctrica en las baldosas piezoeléctricas (picos de voltaje positivos al momento de dar un paso y picos de voltaje negativos al momento de retirar la presión) es necesario contar con un sistema de rectificación de voltaje en la salida de los bloques serie-paralelo de los sensores piezoeléctricos. El rectificador de voltaje de la Figura 2-5 permite obtener valores positivos de la onda de voltaje generada. Un puente de diodos de baja potencia en cada etapa es suficiente para la rectificación y para rectificar la onda de voltaje se eligió un puente rectificador de 2 [A], 10 [W].

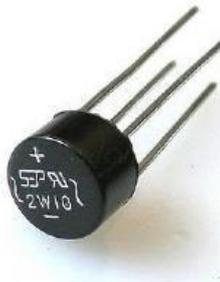


Figura 2-5 Puente rectificador 2 A,10 W [45].

Según [46] el cálculo de la salida de voltaje para una onda completa de un sensor piezoeléctrico se lo realiza con la ecuación 2.9:

$$V_{dc} = 0.636 (V_m - 2V_k) \quad (2.9)$$

Donde:

V_{dc} = Voltaje de salida del rectificador [V].

V_m = Voltaje pico del sensor piezoeléctrico (ecuación 2.3) [V].

V_k = Voltaje de polarización del rectificador ($V_k = 0,7$ V) [V].

Entonces el voltaje a la salida del rectificador será:

$$V_{dc} = 0,636 (16,56 V_p - 2 \times 0,7V) = 9,65 [V_{dc}]$$

2.1.3.2 Filtro

Para disminuir el rizado de la onda de voltaje se utiliza un condensador como filtro. La elección del capacitor se la realiza a mayor detalle en la sección 3.1.1.2 Forma de onda de las baldosas piezoeléctricas.

2.1.3.3 Control de estados

Esta etapa es estudiada en la sección 2.3. Proporciona una salida de voltaje continuo, necesario para alimentar a una batería, además, es el punto de conexión entre los generadores permitiendo al aerogenerador dar confiabilidad al sistema.

2.1.3.4 Almacenamiento

El almacenamiento de la energía producida por los generadores construidos se lo realiza mediante una batería de 12 [V], 2 [A], recargable. Los detalles de la batería se muestran a continuación:

Voltaje constante de Carga: 13,6 - 13,8 [V].

Corriente Inicial Máxima: menor que 0,6 [A].

2.2 Cálculos para el diseño del aerogenerador de eje vertical

El proceso del diseño se divide en varios componentes claves, cada uno de los sistemas se revisan en las secciones posteriores y algunos serán tratados a detalle ya que son fundamentales para la concepción del prototipo. El modelo de turbina que se pretende diseñar consta principalmente de un rotor de eje vertical. Esta sección describe las consideraciones previas y el proceso de diseño del prototipo. El prototipo por desarrollar debe cumplir con las siguientes características generales de diseño:

- Los componentes deben estar fabricados con materiales livianos, resistentes, económicos y asequibles en el mercado que permita una fabricación y ensamble óptimo.
- La transmisión mecánica entre el rotor y el generador será a puesta a prueba para verificar el comportamiento del aerogenerador ante este caso.
- Estructura robusta que permita realizar pruebas de campo, con un peso optimo y que al mismo tiempo brinde rigidez, estabilidad para contrarrestar efectos de vibraciones.
- Debe ser fácilmente transportable para que pueda ser instalado en distintos sitios durante la fase de prueba.

2.2.1 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD NOMINAL DEL VIENTO

Se realizaron mediciones de velocidad de viento con un anemómetro en el siguiente lugar:

- Virgen del Páramo Papallacta, Limite Pichincha-Napo a 4000 m con coordenadas $0^{\circ}19'51''S$ $78^{\circ}12'11''W$.

Los registros obtenidos en este lugar muestran un comportamiento bastante favorable ya que la topografía del sitio mostrado en la Figura 2-6 al ser un páramo presenta corrientes de viento óptimas.



Figura 2-6 Virgen del páramo, Papallacta [autoría propia].

Se desarrolla un estudio del potencial eólico del lugar donde se realizan las pruebas del prototipo a fin de establecer un valor de velocidad de diseño de la turbina. Para ello se realizaron mediciones con un anemómetro como muestra la Figura 2-7 y se toman medidas cada hora durante 1 mes, así como las direcciones del viento de la zona de Papallacta fueron adquiridos de la página meteorológica freemeteo.ec, como se sugiere en [47].



Figura 2-7 Anemómetro para la adquisición de datos [autoría propia].

En el Anexo “A-I” se muestran los datos obtenidos durante el periodo de consideración y la tabla 1 muestra el registro de un día.

Tabla 1 Registro de datos eólicos de un día.

Día	Mes	Año	Hora	Velocidad	Dirección
3/	2/	2021	0:00:00	6,9	231
3/	2/	2021	1:00:00	8,3	225
3/	2/	2021	2:00:00	9,9	240
3/	2/	2021	3:00:00	11,1	249
3/	2/	2021	4:00:00	12,8	250
3/	2/	2021	5:00:00	12,1	253
3/	2/	2021	6:00:00	11,8	255
3/	2/	2021	7:00:00	11,9	258
3/	2/	2021	8:00:00	11,9	260
3/	2/	2021	9:00:00	11,4	257
3/	2/	2021	10:00:00	11,3	253
3/	2/	2021	11:00:00	11,3	252
3/	2/	2021	12:00:00	13,4	248

3/	2/	2021	13:00:00	14,6	242
3/	2/	2021	14:00:00	14,7	237
3/	2/	2021	15:00:00	15	235
3/	2/	2021	16:00:00	14,9	240
3/	2/	2021	17:00:00	13,7	237
3/	2/	2021	18:00:00	11,9	239
3/	2/	2021	19:00:00	9,3	236
3/	2/	2021	20:00:00	9,1	230
3/	2/	2021	21:00:00	10	227
3/	2/	2021	22:00:00	11,6	218
3/	2/	2021	23:00:00	8,8	213

Con la ayuda del Software de Simulación Matlab se puede manejar los datos obtenidos a lo largo de todo el mes, lo que constata un total de 673 mediciones [47].

2.2.1.1 Velocidad

Los datos de velocidad obtenidos mediante el anemómetro son tratados mediante variables estadísticas para una mejor comprensión. La siguiente gráfica, en la Figura 2-8, muestra una distribución temporal de las velocidades (673 datos a lo largo de todo el mes de febrero) que constan en el anexo “A-III”. La gráfica muestra las tendencias de velocidades a lo largo de todo este mes, Es posible notar en la Figura 2-8 que las últimas medidas que representan los últimos días del mes de estudio se mostraron velocidades superiores a 20 [km/h].

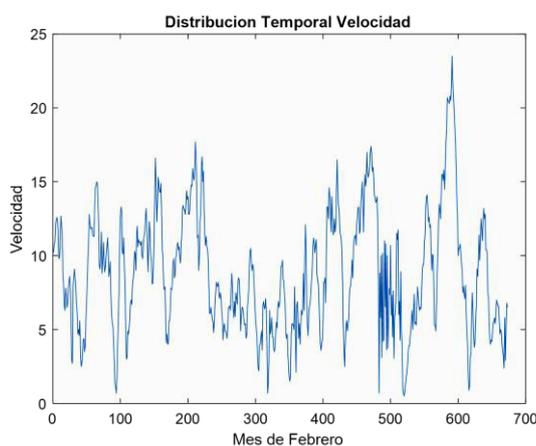


Figura 2-8 Distribución temporal de datos de velocidad [autoría propia].

La distribución de frecuencias ordenadas expuesta en la Figura 2-9, obtiene los valores de las velocidades y cuenta su frecuencia a lo largo de toda la serie si existen valores similares se suman y entran en la probabilidad con un valor más alto que el resto. En este caso la velocidad de 15 [km/h] es la que posee la mayor distribución de frecuencia.

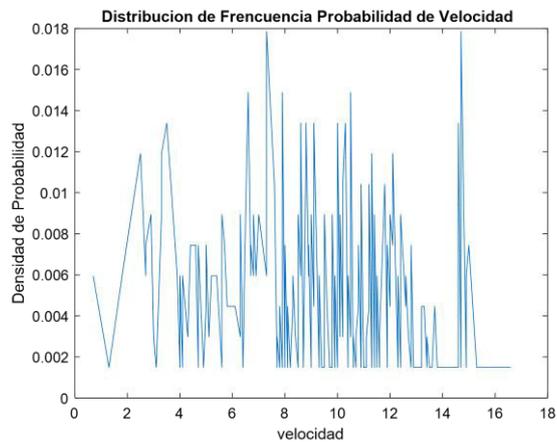


Figura 2-9 Distribución de frecuencias de probabilidad de datos de velocidad [autoría propia].

Una vez obtenida una función de distribución de frecuencias, se realiza una sumatoria de las frecuencias de probabilidad de velocidad hasta llegar al valor máximo de una probabilidad que es equivalente a 1. En la Figura 2-10 es posible notar que el grafico tiende a ser 1 entre las velocidades de 10 a 14 [km/h].

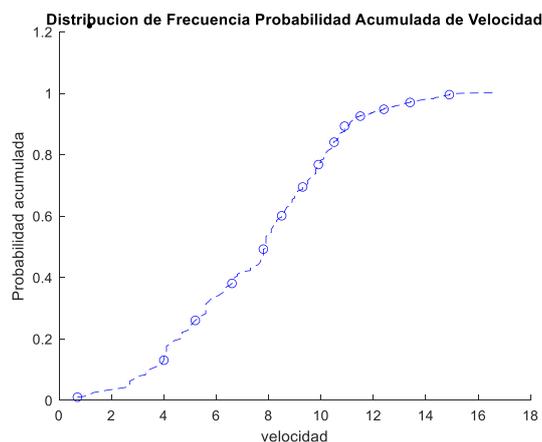


Figura 2-10 Distribución de frecuencias de Probabilidad Acumulada de datos Velocidad [autoría propia].

Finalmente, el análisis indica el histograma de las velocidades del viento mostrando las velocidades que presentaron mayor presencia a lo largo de todas las horas de análisis. El

histograma mostrado en la Figura 2-11 muestra que alrededor de 8 [m/s] o 28,8 [km/h] fue la velocidad que se presentó la mayor parte de tiempo. Debido a que las mediciones fueron hechas en un mes predominante de invierno hubo una gran cantidad de días nublados que dificultaron la circulación de aire.

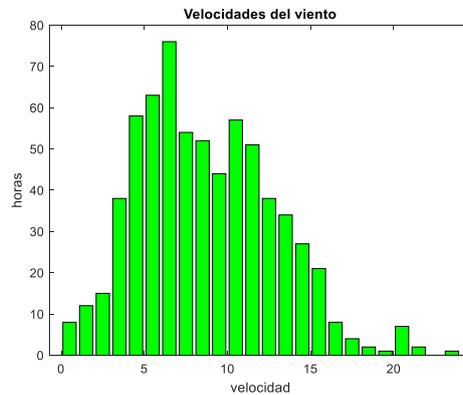


Figura 2-11 Histograma de datos de velocidad [autoría propia].

2.2.1.2 Dirección

Los datos de dirección fueron obtenidos mediante recopilación de datos de la página freenet.ec, y se realiza un tratamiento estadístico para una mejor interpretación. La Figura 2-12 muestra una distribución temporal de las direcciones del viento (673 datos a lo largo de todo el mes de febrero). Se muestra las tendencias de direcciones a lo largo de todo este mes denotando que las últimas medidas que representan los últimos días de febrero se mostraron direcciones bastante regulares, pero más inclinadas en los 250 a 350 grados.

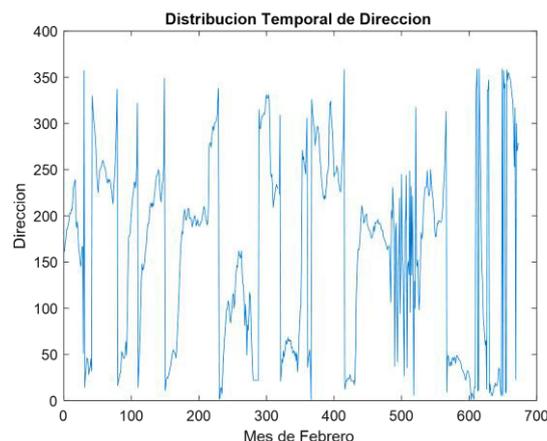


Figura 2-12 Distribución temporal de datos de dirección [autoría propia].

La distribución de frecuencias ordenadas, en la Figura 2-13, obtiene los valores de las direcciones y cuenta su frecuencia a lo largo de toda la serie. Sí existen valores similares se suman y entran en la probabilidad con un valor más alto que el resto en este caso la dirección de 189 grados es la que posee la mayor distribución de frecuencia

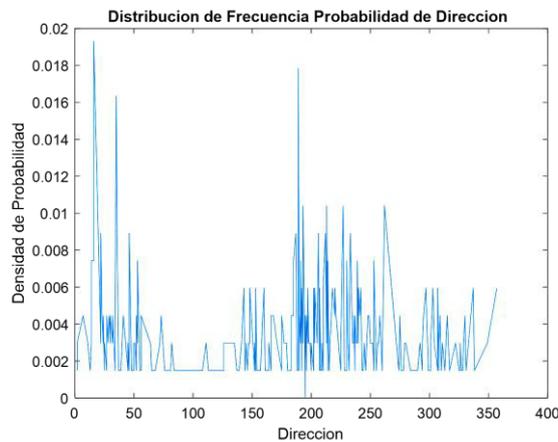


Figura 2-13 Distribución de frecuencias de probabilidad de datos de dirección [autoría propia].

Una vez obtenida una función de distribución de frecuencias, Se realiza una sumatoria de las frecuencias de probabilidad de dirección hasta llegar al valor máximo de una probabilidad, que es equivalente a 1. En la Figura 2-14, es posible notar que el gráfico tiende a ser 1 entre las direcciones de 200 a 300 grados.

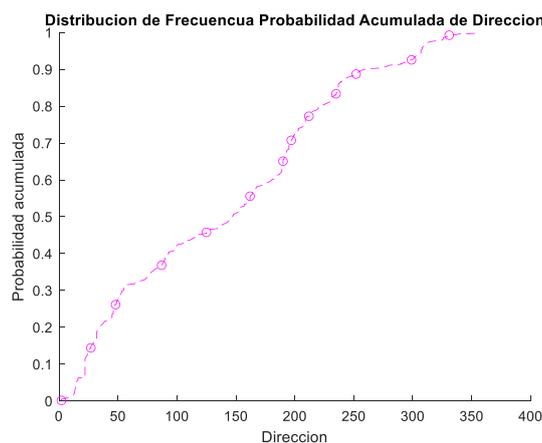


Figura 2-14 Distribución de frecuencias de probabilidad acumulada de datos de dirección [autoría propia].

El análisis muestra el histograma de las direcciones del viento mostrando las direcciones que presentaron mayor presencia a lo largo de todas las horas de análisis. El histograma en la Figura 2-15 muestra que alrededor de 189 grados fue la dirección que se presentó la mayor parte de tiempo.

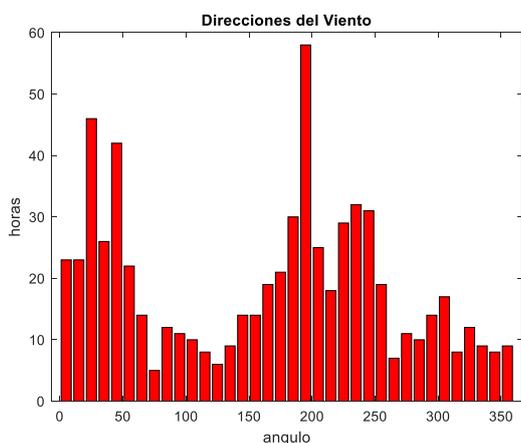


Figura 2-15 Histograma de datos de dirección [autoría propia].

La distribución de las direcciones del viento puede mostrarse mediante la rosa de vientos que consta de 8 rumbos de las frecuencias para cada dirección en el periodo analizado. Dado que anteriormente se obtuvo que 189 grados es la dirección dominante en el análisis, se constata con la rosa de vientos dicho valor y se determina que está en el rumbo 7 West (7 Dirección Oeste) como muestra la Figura 2-16 [47].

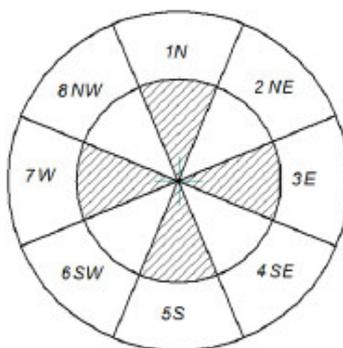


Figura 2-16 Convención rosa de los vientos [47].

Esto significa que la mayor parte del tiempo el viento tiene una dirección apuntando hacia el Oeste como muestra la Figura 2-17.

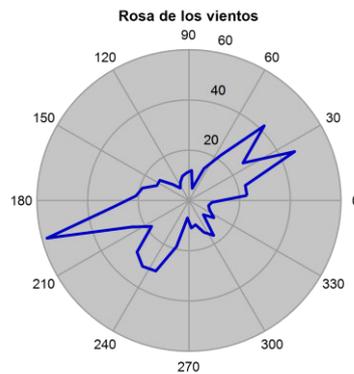


Figura 2-17 Rosa de vientos del proyecto actual [autoría propia].

2.2.1.3 Distribución Weibull

Como ya fue mencionado, este tipo de distribución es ampliamente usada para describir la distribución de intensidad de viento. La función de densidad de probabilidad se define como la ecuación 2.10:

$$f(v) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^\beta} \quad (2.10)$$

Donde:

v = Velocidad del viento medido en [m/s].

β = Parámetro de forma [adimensional].

λ = Parámetro de escala [m/s].

Teniéndose que para la velocidad media se aplica la ecuación 2.11:

$$V = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n v_i \quad (2.11)$$

Donde:

n = Número de mediciones [sin unidad]

v_i = Número de mediciones obtenidas de velocidad. [m/s]

Desviación estándar en la figura 2.12, se tiene que:

$$S = \left[\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (v_i - V)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Y los factores de forma β y escala c respectivamente por las ecuaciones 2.13 y 2.14:

$$\beta = \left(\frac{S}{V} \right)^{-1.086} \quad (2.13)$$

$$\lambda = \frac{V}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})} \quad (2.14)$$

Donde Γ es la función gamma para la obtención de las constantes.

Obteniendo como resultado:

$$V = 8,72820678 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$S = 4,13913583$$

$$\beta = 2,24843671$$

$$\lambda = 9,8542977 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Una vez obtenidos los datos de escala y forma se procede a usar el trazador de la distribución Weibull de la “Danish Wind Industry Association” disponible en el sitio web: www.windpower.com, en la Figura 2-18 [47].

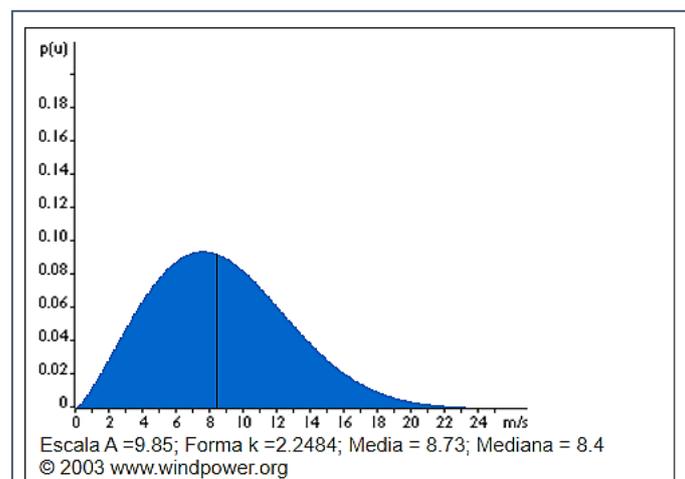


Figura 2-18 Distribución Weibull en base a factor k de forma y c de escala [47].

Así también el trazador indica, en la Figura 2-19, el valor de la velocidad media que será usada para el diseño del prototipo y el diseño final será de 8,4 [m/s] o 30,24 [km/h].

$$V = 8,4 \text{ m/s}$$

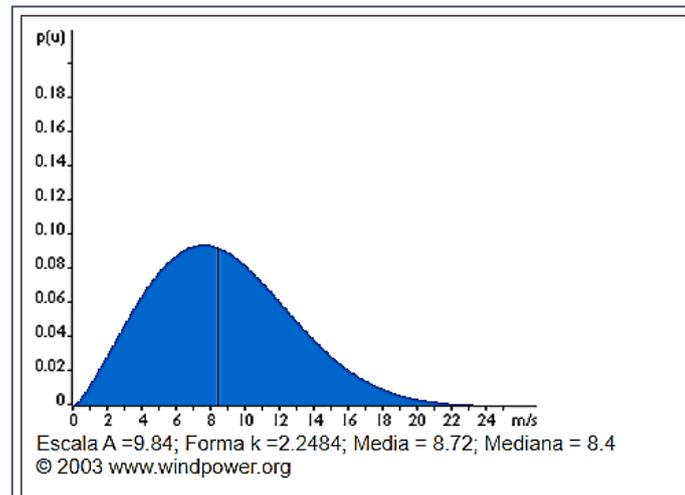


Figura 2-19 Velocidad Media usando los parámetros de escala y forma [47].

2.2.2 CÁLCULOS DE VARIABLES EN EL AEROGENERADOR SAVONIUS

2.2.2.1 Voltaje

Normalmente en la generación de energía eléctrica especialmente en las altas potencias, se utilizan generadores de corriente alterna, sin embargo, en el presente trabajo y en general para potencias bajas la mejor opción recae en la utilización de generadores de corriente continua [48].

$$VDC = k \times \phi \times w \tag{2.15}$$

Donde:

ϕ : Flujo magnético por cada polo [Wb].

k: Constante que depende de la reluctancia del núcleo y las vueltas por polo.

w: Velocidad de giro del rotor [rpm].

Con la ecuación 2.15, es posible calcular el voltaje del generador de corriente continua que se anexa al rotor del aerogenerador Savonius mediante el sistema de transmisión, según [48], considerando que este voltaje a entregar es en corriente continua.

2.2.2.2 Potencia

Considerando las diversas pérdidas presentes en un sistema se procede a determinar el rendimiento total o nominal. Para este análisis se asume un rendimiento mecánico del 100 %, ya que el generador va a estar directamente acoplado al rotor y, por ende, no se considerarían pérdidas mecánicas. Se asume también una eficiencia eléctrica de 85 % en la generación. Como se muestra en la Figura 2-20 [47].

Wind System	Efficiency %	
	Simple Construction	Optimum Design
Multibladed farm water pump	10	30
Sailwing water pump	10	25
Darrieus water pump	15	30
Savonius windcharger	10	20
Small wind generator up to 2kW	20	30
Medium wind generator 2 to 10kW	20	30
Large wind generator over 10kW		30 to 45
Darrieus wind generator	15	35

Figura 2-20 Valores típicos de C_p para varios tipos de turbinas [47].

Se observa que el valor para un aerogenerador Savonius es de 20 % con lo que se tiene en 2.16:

$$C_p = 0,2 \quad (2.16)$$

El rendimiento global se puede determinar mediante la ecuación 2.17:

$$nt = nm \times ne \times Cp \quad (2.17)$$

Donde:

nm : Eficiencia mecánica [sin unidad].

ne : Eficiencia sistema eléctrico [sin unidad].

Cp : Coeficiente de potencia [sin unidad].

Se tiene previsto que la potencia nominal que entregue la turbina Savonius como muestra la ecuación 2.18, es, según [47]:

$$P_n = \frac{P_{util}}{nt} \quad (2.18)$$

Y la potencia generada por un rotor eólico se da por la ecuación 2.19:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \quad (2.19)$$

Donde:

P : Potencia nominal o generada [W].

ρ : Densidad de aire [kg/m^3].

A : Área de barrido por el motor [m^2].

V : Velocidad del flujo libre de viento [m/s].

Tomando el valor de la densidad del aire, como indica la Figura 2-21, de la asociación danesa de la industria eólica para aire seco a la presión atmosférica estándar a nivel del mar a 20 grados Celsius [47].

Temperatura °Celsius	Temperatura °Fahrenheit	Densidad Kg/m ³	Contenido de agua max Kg/m
-25	-13	1,423	
-20	-4	1,395	
-15	5	1,358	
-10	14	1,342	
-5	23	1,317	
0	32	1,292	0,005
5	41	1,269	0,007
10	50	1,247	0,009
15	59	1,225	0,013
20	68	1,204	0,017
25	77	1,184	0,023
30	86	1,165	0,03
35	95	1,146	0,039
40	104	1,127	0,051

Figura 2-21 Valores típicos de densidad del aire [47].

Tomando el valor correspondiente:

$$\rho = 1,204 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Para el cálculo del área de barrido, como apunta [47], se tiene que considerar que para una turbina vertical esta área comprende el diámetro total del rotor multiplicado por la longitud del aspa la cual se define como indica la ecuación 2.20:

$$A = D \times H \quad (2.20)$$

Para el modelo previsto en el diseño final, este consta de 2 pisos, por lo tanto, las dimensiones corresponden a un diámetro total y una altura de 2 pisos así el área total del barrido mostrada en la ecuación 2.21, será el doble de lo anteriormente calculado, según [47].

$$At = 2 \times A \quad (2.21)$$

2.2.3 DISEÑO PRELIMINAR DEL AEROGENERADOR-PROTOTIPO DEL EQUIPO

El prototipo o diseño preliminar es la primera versión o modelo del proyecto en cuanto a la sección del aerogenerador, en que se han incorporado algunas características del producto final. Se fabrican con bastante rapidez y a un costo bajo para explorar la factibilidad del concepto propuesto por el trabajo de titulación. Se puede fabricar con mucha facilidad, con materiales simples, sin embargo, se pueden necesitar diseños a pesar de ser un prototipo. La función del prototipo es ayudar a visualizar y refinar su producto. Prueba la funcionalidad y viabilidad de la idea inicial en convertirse en un producto deseado y útil. Así que necesita varias interacciones para terminar la idea. Se repite el proceso hasta que el prototipo ha evolucionado tanto como fuera posible. El prototipo fue realizado tomando en cuenta los principios básicos de un rotor Savonius de 2 aspas, que ayudó a llegar a la conclusión que este tipo de modelo no era el óptimo para la implementación del rotor y tendría que ser remodelado para alcanzar el objetivo deseado.

A continuación, se muestra en la Figura 2-22 el esquema del prototipo del Aerogenerador y los puntos claves en su diseño:

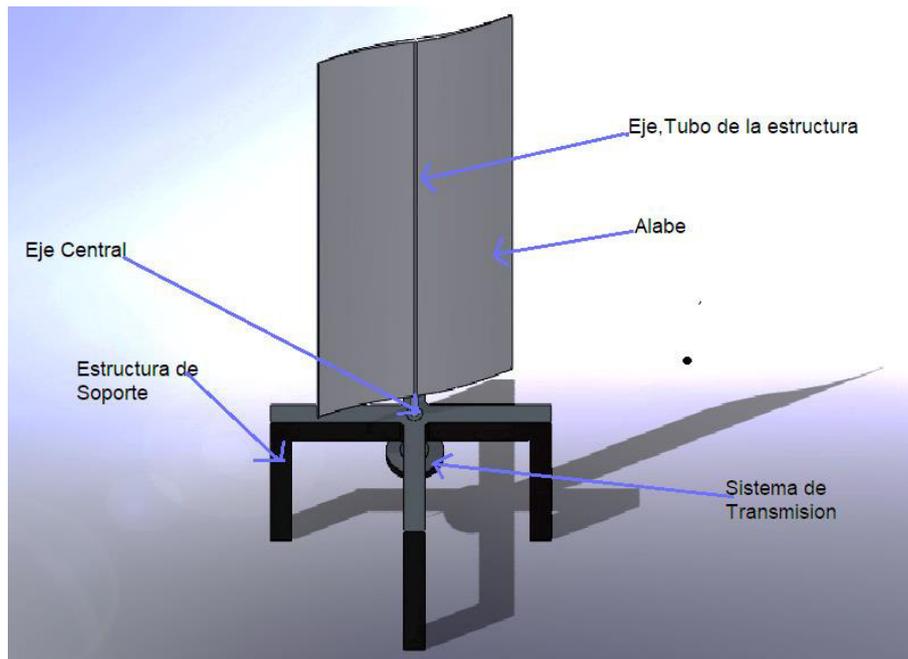


Figura 2-22 Esquema del Prototipo de Aerogenerador Savonius [autoría propia].

Elección del eje y el tubo para la estructura: Se escogió un tubo PVC de 1 [cm] de diámetro para la realización del prototipo con una altura de 15 [cm], la estructura es de viga de acero de 3 x 3 [cm] para una mayor estabilidad.

Construcción del eje central: El eje central al ser la estructura que tiene que soportar la inercia, y se diseñó para construirlo a base de un rodamiento sólido de 1[cm] de diámetro interno.

Unión de la estructura de soporte con el eje central: Una vez estén realizados ambos elementos se procede a unirlos para obtener el soporte total del aerogenerador, cuyas dimensiones resultarían en 40 [cm] entre los extremos de cada par de soportes y una altura de 20 [cm].

Alabe del aerogenerador: La estructura del alabe es una pieza de aluminio de 60 [cm] de altura con 28,3 [cm] de ancho, con una curvatura interna de radio 4,47 [cm] para producir la turbulencia que permitirá al aerogenerador moverse. Si bien el diseño general de un rotor Savonius incluye fundamentalmente el concepto del traslape en este prototipo será omitido.

Sistema de transmisión de velocidad: Dado que el diseño general de un aerogenerador Savonius es mediante una polea fija al eje y otra fija al motor el diseño consta de un sistema

de poleas de radio 2,5 [cm] y 1 [cm] con banda para transmitir la energía producida por el viento al generador.

Ensamblaje final: Una vez realizadas todas las piezas se ensamblan y se obtiene el prototipo de un aerogenerador Savonius de un alabe sin traslape.

Para un mayor detalle se presenta en el Anexo A-II los planos del prototipo en el software de diseño SolidWorks.

2.2.4 DISEÑO DEL AEROGENERADOR SAVONIUS

Para el diseño del aerogenerador Savonius se ha comprobado que la velocidad media mensual del viento en la cumbre de la Virgen Papallacta es de 8,4 [m/s]. Sin embargo, la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento, por aquello, los flujos de viento con una velocidad bastante alta generan mucha más potencia que los flujos de baja velocidad, inclusive si las velocidades altas se dan con poca frecuencia. Por ese motivo aparte de tomar en cuenta el valor de la velocidad media se ha optado por estimar la potencia, dependiendo de las velocidades del viento y la frecuencia con la que estas se dan [29].

Las fórmulas de la distribución Weibull se presentan en las ecuaciones 2.22, 2.23 y 2.24:

$$f(v) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^\beta} \quad (2.22)$$

$$F(v) = CDF = 1 - e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^\beta} \quad (2.23)$$

$$\frac{Pd}{A} = \frac{1}{2} \rho \lambda^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{\beta}\right) \quad (2.24)$$

La Figura 2-23, similar al expuesto en capítulos anteriores de la “Danish Wind Industry Association”. El Anexo “A-III” presenta los resultados tabulados de la distribución Weibull.

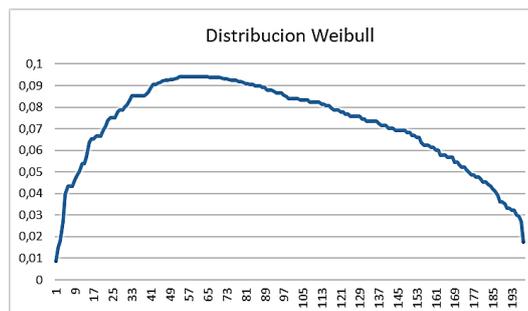


Figura 2-23 Distribución Weibull del presente proyecto [autoría propia].

La ecuación de la potencia por superficie $P_{sup}(v)$ mostrada en la ecuación 2.25 es la misma que la potencia del viento P , pero sin tener en cuenta el área de barrido del generador.

$$P_{sup}(v) = \frac{\rho \times v^3}{2} \quad (2.25)$$

Obteniendo la siguiente Figura 2-24 que es la curva de potencia:

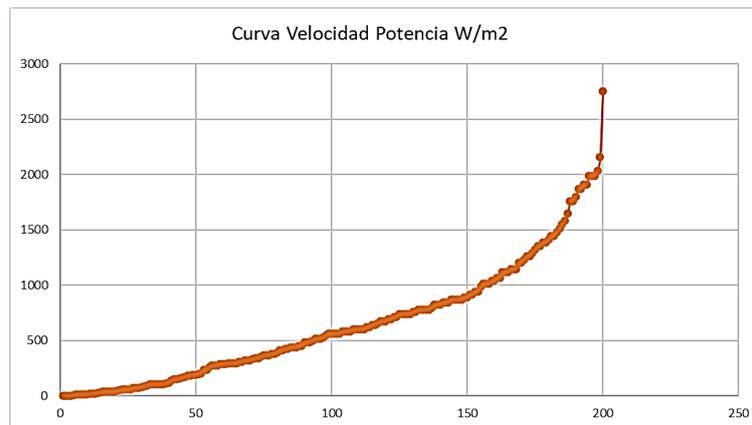


Figura 2-24 Curva de potencia por superficie [autoría propia].

Finalmente, se obtiene la curva de densidad de potencia por metro cuadrado mostrada en la Figura 2-25. Estos valores de potencia usualmente son el doble de la potencia calculada con la velocidad media del viento. Esto quiere decir que la potencia real estimada con la distribución Weibull es aproximadamente el doble de la que se habría calculado con la velocidad obtenida anteriormente. Una vez realizada la ponderación de la potencia media por metro cuadrado, con ayuda de la distribución de Weibull, se aplica el coeficiente de potencia de un rotor Savonius y el rendimiento total, para saber que fracción de esta potencia es la que se convierte en potencia eléctrica útil. En el anexo "A-IV" se muestra los valores de las potencias sin considerar y considerando la distribución de Weibull siendo estos últimos los óptimos a considerar para el diseño, tal como se muestra en [29].

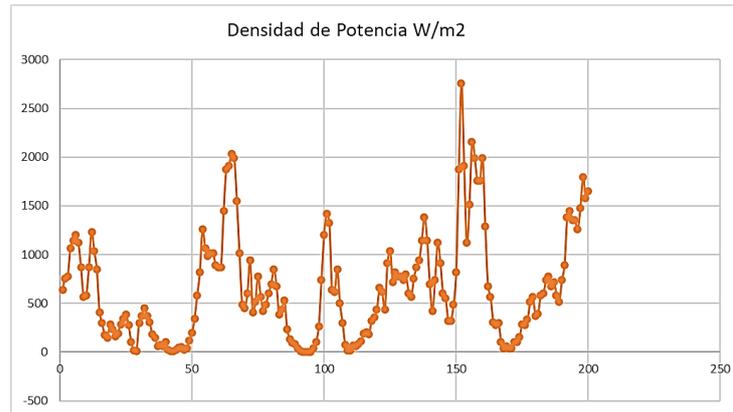


Figura 2-25 Densidad de Potencia [autoría propia].

2.2.4.1 Alabes y Eje

Una vez conocidas las velocidades del viento y la potencia eléctrica útil que puede producirse, se pueden utilizar las fórmulas para calcular los valores de las dimensiones geométricas del rotor Savonius, así como las demás variables eléctricas. El espaciado entre las palas llamado traslape, como se observa en la Figura 2-26, constará de 3 posiciones diferentes para poder analizar la diferencia de cada uno de estos por lo que las 3 relaciones de traslape se exponen a continuación [29].

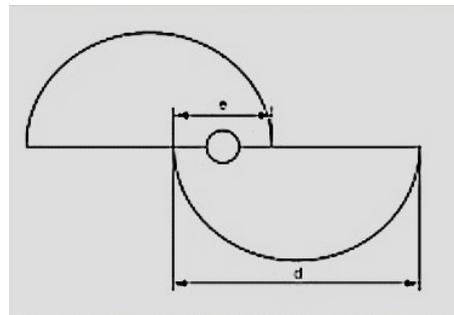


Figura 2-26 Dimensiones de un rotor Savonius respecto al traslape [29].

La ecuación 2.26 muestra la relación 1:

$$\frac{e1}{d} = \frac{1}{2} = \frac{0,26}{0,02} = 13 [cm] \quad (2.26)$$

La ecuación 2.27 muestra la relación 2:

$$\frac{e2}{d} = \frac{1}{3} = \frac{0,26}{0,03} = 8,7 [cm] \approx 9 [cm] \quad (2.27)$$

La ecuación 2.28 muestra la relación 3:

$$\frac{e3}{d} = \frac{1}{4} = \frac{0,26}{0,04} = e2 = 6 \text{ [cm]} \quad (2.28)$$

Normalmente, es utilizada la relación de 1/3, pero debido a la altura del aerogenerador se utilizará en su mayoría la relación 3 de 1/4. Para lograr el traslape variable, el diseño dispone de 4 crucetas que sostendrán los 2 pisos del rotor que fue seleccionado en el Capítulo 1, como el modelo de mayor eficiencia. Las crucetas dispondrán de 12 huecos para mover los 2 alabes por 3 posiciones variables como indica la Figura 2-27, y tendrá como medidas 53 [cm] de largo y 6 [cm] de ancho. El material será tol galvanizado, por su poco peso y resistencia al esfuerzo mecánico debido al recubrimiento hace que este sea el material ideal para la construcción de aerogeneradores, como se muestra en [29].

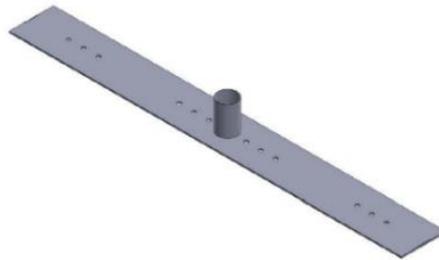


Figura 2-27 Cruceta para los alabes con traslape variable [autoría propia].

Para maximizar la potencia del aerogenerador, siempre es recomendable escoger la máxima altura posible para el rotor Savonius, como se toma en la ecuación 2.29. La altura de los alabes rondan los 60 [cm] y al ser un sistema de 2 pisos aproximan 2 [m]. El sistema de alabes posee una altura de 1,6 [m], con lo que el área de barrido corresponde a la ecuación 2.30:

$$D = 2 \times d - e = 2 \times 0,26 - 0,06 = 0,46 \text{ [m]} = 46 \text{ [cm]} \quad (2.29)$$

$$A = At = H \times D = 1,6 \times 0,46 = 0,736 \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.30)$$

Los alabes fueron diseñados igualmente para ser construidos con material de tol galvanizado para brindar las características de peso y resistencia. Según [29], los 4 alabes poseen orejas a los extremos que están enganchados a las crucetas para lograr el sistema

de traslape variable. Estos alabes poseen 60 cm de alto y 26 [cm] de diámetro con una cavidad interna de 18,38 [cm].



Figura 2-28 Alabe y eje central para el aerogenerador [autoría propia].

Si se ensamblan estos 3 componentes junto con el eje, que es un tubo hueco de acero de 1 pulgada de diámetro y 2 [m] de altura, se obtiene básicamente el modelo completo del rotor Savonius como se muestra en la Figura 2-29.

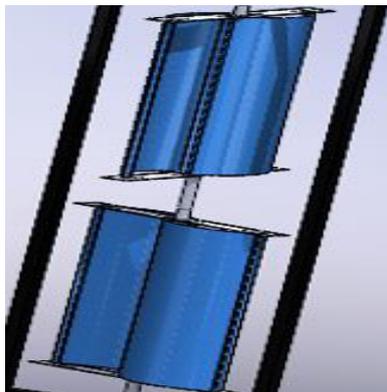


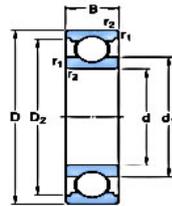
Figura 2-29 Sistema Crucetas-alabe-ejes para el aerogenerador [autoría propia].

Una gran ventaja que presenta el aerogenerador Savonius es que cada piso posee un desfase de 90 grados, lo que le permite aprovechar al máximo una ráfaga de viento y ayudar en gran medida al torque inicial.

2.2.4.2 Rodamientos y Estructura

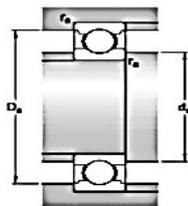
Para el ensamble del proyecto, la elección de los rodamientos es un factor muy importante ya que estos permitirán el movimiento relativo entre el rotor y la estructura de soporte. Las cargas a las que se verán sometidos incluyen efectos radiales y los pesos de los elementos,

soportando más carga el rodamiento inferior que el superior. Se debe elegir un rodamiento de baja fricción para minimizar las pérdidas por este factor en el eje de la turbina [47]. Se escogió el rodamiento rígido 6205 por el tamaño del eje central, como muestra la Figura 2-30, y por sus especificaciones de fuerza y resistencia de carga dinámica máxima, como se aprecia en la Figura 2-31, son óptimas, entonces, para el aerogenerador.



DIMENSIONES

d	25 mm	Diámetro del agujero
D	52 mm	Diámetro exterior
B	15 mm	Ancho
d ₁	≈ 34.35 mm	Diámetro del resalte
D ₂	≈ 46.21 mm	Diámetro de rebaje
r _{1,2}	min. 1 mm	Dimensión del chaflán



DIMENSIONES DE LOS RESALTES

d ₁	min. 30.6 mm	Diámetro del resalte del eje
D	max. 46.4 mm	Diámetro del resalte del soporte
r _e	max. 1 mm	Radio del eje o acuerdo del soporte

Figura 2-30 Ficha Técnica y Medidas de los rodamientos para el aerogenerador [47].

DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica	C	14.8 kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	7.8 kN
Carga límite de fatiga	P _u	0.335 kN
Velocidad de referencia		28 000 r/min
Velocidad límite		18 000 r/min
Factor de carga mínima	k _r	0.025
Factor de cálculo	f ₀	14

Figura 2-31 Datos técnicos de los rodamientos para el aerogenerador [47].

Ese rodamiento completa el sistema de giro para el aerogenerador, como se ilustra en la Figura 2-32, instalado en la estructura de soporte.

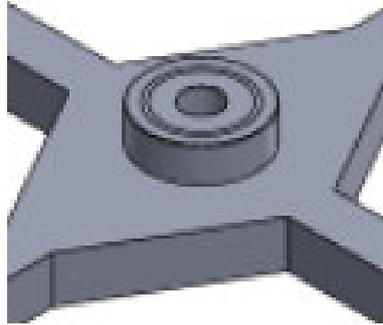


Figura 2-32 Rodamientos para el aerogenerador [autoría propia].

Para este componente, se propone el uso de una estructura en forma de marco con 4 patas de soporte para el peso de la estructura. Esta configuración presenta una ventaja relativa respecto a otras estructuras, ya que se obtienen todos los puntos de apoyo en un solo plano, especialmente si se encuentra en terrenos irregulares, según [47]. La tubería utilizada es de perfil cuadrado con medidas de 3 x 3 [cm], que es bastante asequible y comercial. El diseño de la estructura es pensado para al menos soportar vientos de 5 a 9 [m/s]. La estructura tiene 60 [cm] de ancho y 209 [cm] de alto con unas patas de soporte de 46 [cm] como muestra la Figura 2-33.



Figura 2-33 Estructura de soporte para el aerogenerador [autoría propia].

Para finalmente montar todos los elementos en un sistema, obteniendo el diseño final para el aerogenerador Savonius, mostrado en la Figura 2-34.

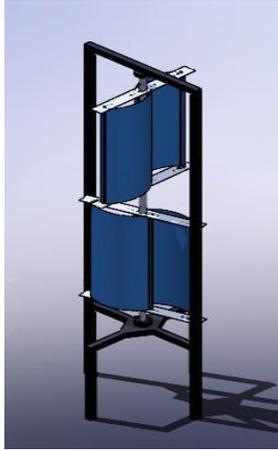


Figura 2-34 Diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].

2.2.4.3 Generador de corriente DC

Para el generador del proyecto se seleccionó un motor de corriente continua a 12-24 [V], diseñado para aerogeneradores, tal como se puede observar en la Figura 2-35.



Figura 2-35 Motor de corriente continua [autoría propia].

Mediante pruebas de velocidad se obtuvo la curva característica de P vs I del motor para 3 diferentes velocidades, como indica la Figura 2-36.

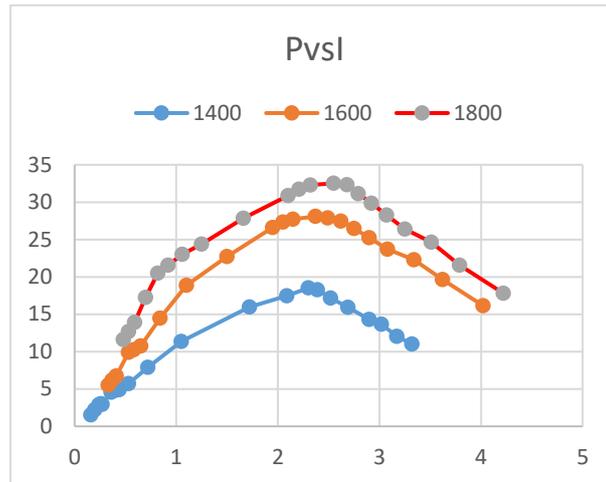


Figura 2-36 Curva de potencia vs corriente del motor propuesto [autoría propia].

Los planos del diseño final del Aerogenerador Savonius se presentan en el anexo “A-V” realizados en el software de diseño Solid Works.

2.3 Diseño del control de Estados

El control de estados permite conectar eléctricamente a los generadores, para que la energía producida por ellos se almacene en una batería. Esta batería debe alcanzar un voltaje mínimo con el cual puede cargarse, esta carga voltaica será regulada por el control de estados, el cual se conectará a la batería. A continuación, se presenta la Figura 2-37 donde se muestran los gráficos de análisis para el modelamiento del convertidor Buck-Boost utilizado.

2.3.1 ANÁLISIS MATEMÁTICO PARA EL CONVERTIDOR BUCK-BOOST

Para este análisis se asumirán las siguientes condiciones:

1. El mosfet y el diodo son interruptores ideales.
2. La capacitancia de salida del transistor, la capacitancia del diodo, inductancias de los cables y las perdidas por conmutación son cero.
3. Los componentes pasivos son lineales, invariantes en el tiempo e independientes de la frecuencia.
4. La impedancia de salida de la fuente de voltaje de entrada V_i es cero para los componentes CC y CA, como se mencionó en [49].

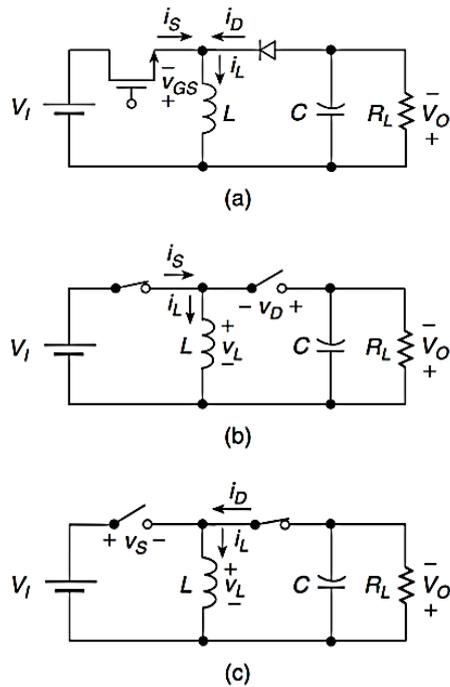


Figura 2-37 (a) Circuito. (b) Circuito equivalente cuando el interruptor está en ON y el diodo en OFF. (c) Circuito equivalente cuando el interruptor está en OFF y el diodo en ON [49].

Para así realizar un examen de sistemas eléctricos con las ecuaciones 2.31 y 2.32., el intervalo de 0 a DT se muestra en la Figura 2-38.

Intervalo $0 < t < DT$

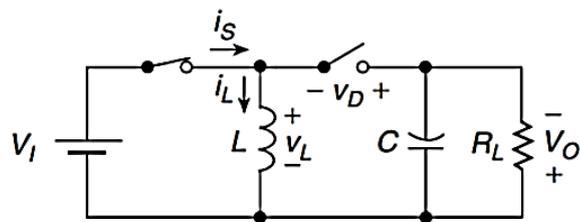


Figura 2-38 Análisis en intervalo $0 < t < DT$ [49].

$$-V_1 - V_D - V_0 = 0 \quad (2.31)$$

$$V_D = -(V_1 + V_0) \quad (2.32)$$

Donde:

V_1 = Es el voltaje de entrada [V].

VD = Es el voltaje del interruptor de conmutación [V].

VO = Es el voltaje en la carga [V].

L = Es la inductancia del circuito Buck-Boost [mH].

C = Es la capacitancia del circuito Buck-Boost [μ F].

Tomando las ecuaciones 2.33 y 2.34, se puede determinar la corriente del inductor del interruptor mostrada por la ecuación 2.35. El anexo "A-VI 7a" permite determinar la variable para el control de estados.

$$VL = V1 = L \frac{diL}{dt} \quad (2.33)$$

$$is = iL = \frac{1}{L} \int_0^t VLdt + iL(0) = \frac{V1}{L}t + iL(0) \quad (2.34)$$

$$Ism = IL(pico) = I1 + I0 + \frac{\Delta iL}{2} = \frac{I0}{1-D} + \frac{\Delta iL}{2} \quad (2.35)$$

Donde:

iL = Es el valor inicial de la corriente del inductor en t = 0 [A].

VL = Voltaje del inductor [V].

Is = Es el valor de la corriente de la fuente [A].

iL (DT) = Es el valor de la corriente pico del inductor [A].

ΔiL = Es el valor pico-pico de la corriente de rizado a través del inductor L [A].

Vd = Es el voltaje del diodo [V].

Ism = Es la corriente pico [A].

MVDC = Es la función de transferencia del convertidor [A].

I0 = Es la corriente de la carga [A].

I1 = Es la corriente de la fuente [A].

Intervalo DT < t < T

Analizado de manera similar al anterior intervalo, el nuevo caso propone resolver entre DT a T, ilustrado en la Figura 2-39, teniendo las ecuaciones (2.36) y (2.37).

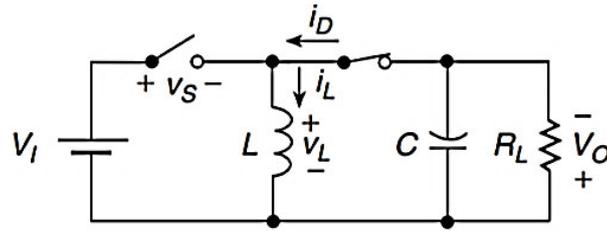


Figura 2-39 Análisis en intervalo $DT < t < T$ [49].

$$V_L = -V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} i_D = i_L &= \frac{1}{L} \int_{DT}^t V_L dt + i_L(DT) \\ &= \frac{1}{L} \int_{DT}^t -V_O dt + i_L(DT) = \frac{-V_O}{L} (t - DT) + i_L(DT) \\ &= \frac{-V_O}{L} (t - DT) + \frac{V_1 D}{f_s L} + i_L(0) \end{aligned} \quad (2.37)$$

Donde:

i_D = Es la corriente del diodo en el circuito [A].

i_L = Es la corriente del Inductor [A].

V_L = Es el voltaje del inductor [V].

V_D = Es el voltaje del interruptor de conmutación [V].

V_O = Es el voltaje en la carga [V].

Analizando la variación de la corriente en el inductor, 2.38, el voltaje del interruptor, 2.39, y el voltaje máximo de este, 2.40, se obtiene los valores de corriente nominal, 2.41, y máximos, 2.42.

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(T) = \frac{V_O(1 - D)}{f_s L} \quad (2.38)$$

$$V_s = V_{sm} = (V_1 + V_O) = \frac{V_O}{D} \quad (2.39)$$

$$V_{smmax} = V_{dmmax} = (V_{1max} + V_O) = \frac{V_O}{D_{min}} \quad (2.40)$$

Donde:

V_s = Es el voltaje máximo en el interruptor y el diodo [V].

V_s = Es el voltaje en el interruptor de potencia [V].

Δi_L = Es el valor pico-pico de la corriente de rizado a través del inductor L [A].

$$IDM = IL(pico) = I1 + I0 + \frac{\Delta iL}{2} = \frac{I0}{1-D} + \frac{\Delta iL}{2} \quad (2.41)$$

$$IDMax = \frac{I0max}{1-Dmax} + \frac{\Delta iL}{2} \quad (2.42)$$

Donde:

IDMax = Es el valor máximo de corriente [A].

IDM = Es la corriente pico en el diodo y el interruptor [A].

2.3.2 DISEÑO DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST

El diseño del convertidor Buck-Boost, tiene las siguientes especificaciones:

$$V1 = 4,9 \text{ a } 25 \text{ V}, V0 = 13,8, I0 = 0,3 \text{ a } 1,5 \text{ A}, \frac{Vr}{V0} \leq 1\%, fs = 15 \text{ KHz}, Vinom = 11,85$$

Se tiene que las ecuaciones 2.43, 2.44 y 2.45 muestran los resultados de relación entre los voltajes:

$$\frac{V0}{V1} = \frac{D}{1-D}$$

$$\frac{V0}{V1nom} = \frac{Dnom}{1-Dnom} \rightarrow Dnom = 0,538 \quad (2.43)$$

$$\frac{V0}{V1min} = \frac{Dmin}{1-Dmin} \rightarrow Dmin = 0,3557 \quad (2.44)$$

$$\frac{V0}{V1max} = \frac{Dmax}{1-Dmax} \rightarrow Dmax = 0,738 \quad (2.45)$$

Donde:

Dnom = Es el valor nominal del diodo a seleccionar.

Dmin = Es el valor mínimo del diodo a seleccionar.

Dmax = Es el valor máximo del diodo a seleccionar.

2.3.2.1 Cálculo de la inductancia

La ecuación 2.46 muestra la inductancia mínima a tener y la ecuación 2.47 muestra el capacitor mínimo.

$$L_{min} = \frac{V1 \min \times D_{max}}{2 \times f_s \times \Delta i_L} = 0,904 [mH] \vee 0,35 [mH] \quad (2.46)$$

Lmin = Es el valor del inductor a escoger para el diseño [mH].

Cálculo del capacitor

$$C_{min} = \frac{V_o \times D_{min}}{2 \times f_s \times \Delta V \times RL_{max}} = 133,37 [\mu F] \vee 53,3 [uF] \quad (2.47)$$

Donde:

Cmin = Es el valor del capacitor a escoger para el diseño [uF].

IDM = Es el valor máximo de corriente [A].

Selecciona como inductor, 2.48, y capacitor, 2.49, los siguientes parámetros:

$$L = 1 [mH] \quad (2.48)$$

$$C = 150 [\mu F] \quad (2.49)$$

Las resistencias del condensador, 2.51, y del inductor, 2.50, son:

$$RL = 0,33 [\Omega] \quad (2.50)$$

$$RC = \frac{2\pi f_s C}{160} = 0,1178 [\Omega] \quad (2.51)$$

2.3.2.2 Modelo Thévenin del generador

Para el modelamiento matemático del control de estados es importante utilizar el equivalente Thévenin puesto que simplifica el análisis y brinda una favorable resolución del modelo matemático. Como se puede apreciar en la Figura 2-40 el circuito que será implementado en el trabajo será el siguiente:

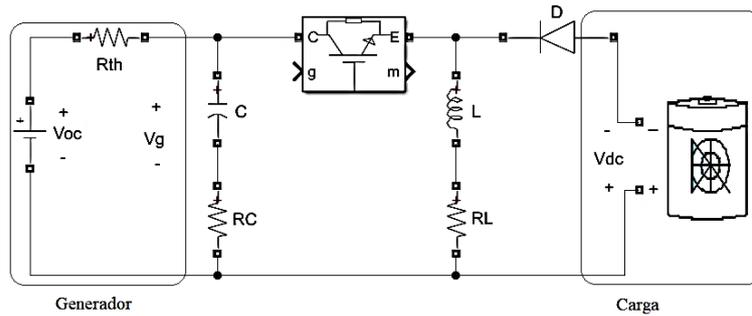


Figura 2-40 Modelo Thévenin del Generador [49].

Donde como condiciones para cálculo se encuentran:

$$V_{oc} = 14 \text{ [V]}.$$

$$I_{mpp} = 2,3 \text{ [A]}.$$

$$V_{mpp} = 10,85 \text{ [V]}.$$

$$V_{dc} = 13,8 \text{ [V]}.$$

Para determinar el parámetro de resistencia Thévenin equivalente se utiliza la ecuación 2.52.

$$R_{th} = \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{I_{mpp}} = 1,36 \text{ [\Omega]} \quad (2.52)$$

Donde:

R_{th} = Es la resistencia equivalente del generador [Ω].

V_{mpp} = Es el valor del voltaje medido en los terminales del equivalente Thévenin [V].

I_{mpp} = Es el valor de la corriente medida en los terminales del equivalente Thévenin [A].

2.3.2.3 Modelo matemático del generador

El modelo matemático del generador tiene como entradas, la velocidad de giro del eje, la corriente, y su salida es el voltaje con el análisis dinámico se genera un polinomio de dos variables que tiene dependencia lineal con la velocidad de giro del eje y dependencia de orden 4 con la corriente del generador. El desarrollo del modelo matemático del generador se encuentra en el anexo "A-VI 7b", obteniéndose como resultado la relación de trabajo delta δ .

$$\delta = 0,5897$$

2.3.2.4 Espacios de Estado

Para el espacio de estado se parte del hecho de considerar las matrices de variables eléctricas, 2.53, y matriz de Thévenin, 2.54.

$$X = \begin{bmatrix} iL \\ VC \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

$$U = \begin{bmatrix} \delta \\ Vdc \\ VOC \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Donde:

X = Es la matriz de variables de voltaje y corriente que forma parte del espacio de estados.

U = Es la matriz de variables del equivalente Thévenin que forma parte del espacio de estados.

Se obtiene la ecuación 2.55 que juntamente con las ecuaciones 2.56 y 2.57 pueden formar las matrices de jacobianos, 2.58. Adicionalmente para el análisis de estados es necesario implementar la variable A, 2.59, y B, 2.60, que son las derivadas de los jacobianos respecto a los vectores X, U respectivamente.

$$C \times \frac{dVC}{dt} = \frac{Voc - VC - Rth \times iL \times \delta}{Rth + RC} = iC \quad (2.55)$$

$$f1 = \frac{(iC \times Rc + VC)\delta - iL \times RL - Vdc(1 - \delta)}{L} \quad (2.56)$$

$$f2 = \frac{Voc - VC - Rth \times iL \times \delta}{C(Rth + RC)} \quad (2.57)$$

$$F = \begin{bmatrix} f1 \\ f2 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

$$A = \frac{\partial F}{\partial X} \quad (2.59)$$

$$B = \frac{\partial F}{\partial U} \quad (2.60)$$

Donde:

A = Es la derivada de la matriz de jacobianos respecto a la variable X.

B = Es la derivada de la matriz de jacobianos respecto a la variable U.

$f1$ = Es la derivada de la corriente en el inductor.

f_2 = Es la derivada del voltaje en el capacitor.

F = Matriz de jacobianos respecto a las variables X y U .

A partir del análisis de matrices y derivadas parciales del jacobiano presente en el anexo "A-VI 7c", encontramos los valores de las ecuaciones 2.61, 2.62, 2.63 y 2.64. Además de que el sistema queda descrito de la siguiente forma, como se ilustra en las ecuaciones 2.65 y 2.66:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{RC \times Rth \times \delta}{Rth + Rc} - RL & \frac{\delta - \frac{RC \times \delta}{Rth + Rc}}{L} \\ \frac{-Rth \times \delta}{C \times (Rth + Rc)} & \frac{-1}{C \times (Rth + Rc)} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{(iC \times RC + VC) + Vdc}{L} \\ \frac{-Rth \times iL}{C \times (Rth + Rc)} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

$$C = [1 \quad 0] \quad (2.63)$$

$$D = [0] \quad (2.64)$$

$$X' = AX + BU \quad (2.65)$$

$$Y = CX + DU \quad (2.66)$$

2.3.2.5 Ganancias de los controladores de voltaje y corriente

Finalmente, para obtener las ganancias de los controladores que se van a utilizar, se realiza un proceso matemático que se detalla en el anexo "A-VI 7d", obteniéndose las siguientes ganancias del controlador de lazo de corriente corresponde a la ecuación 2.67.

$$G = 11586 \times \frac{s + 2148}{(s + 2146)(s + 32,86)} \quad (2.67)$$

Una vez encontrada la ganancia del lazo de corriente, se procede a obtener la ganancia del controlador mediante el análisis del anexo "A-VI 7d" y las ecuaciones 2.68 y 2.69 se puede encontrar la constante K y se determina la ganancia del controlador de corriente mostrado en la ecuación 2.70.

$$|Gc(s)G(s)| = 1 \quad (2.68)$$

$$K = \frac{1}{|Gc(s)G(s)|} = 1,724 \quad (2.69)$$

$$Gc = 1,724 \times \frac{s + 14328,89}{s} \quad (2.70)$$

Para el controlador de voltaje la ganancia del lazo de voltaje se muestra en la ecuación 2.71, que se traduce en la ecuación Gc.

$$Gvi = -0,071034 \times \frac{s + 56590}{s + 2127} \quad (2.71)$$

Una vez encontrada la ganancia del lazo de voltaje, se procede a obtener la ganancia del controlador mediante el análisis del anexo "A-VI 7d" y con las ecuaciones 2.72 y 2.73 mostradas se puede encontrar la constante K y se determina la ganancia del controlador de voltaje mostrado en la ecuación 2.74.

$$|Gc(s)G(s)| = 1 \quad (2.72)$$

$$K = \frac{-1}{|Gc(s)G(s)|} = -0,46035 \quad (2.73)$$

$$Gc = -0,46035 \times \frac{s + 4687,11}{s} \quad (2.74)$$

2.4 Materiales del sistema Piezo-Aerogenerador

2.4.1 GENERADOR PIEZOELÉCTRICO

Los materiales para la construcción de las baldosas piezoeléctricas son fáciles de conseguir, sin embargo, los sensores piezoeléctricos se adquieren mediante pedido ya que el modelo de piezoeléctrico utilizado se tuvo que importar.

2.4.1.1 Selección de la geometría de las baldosas y elección de materiales.

- *Selección de la geometría de las baldosas*

La elección de la geometría de las baldosas es cuadrada. Los estudios mostrados en [44] determinan que una geometría cuadrada permite una mayor salida de potencia que una geometría rectangular. En la geometría rectangular, si se produce presión en el centro de la baldosa, la energía mecánica no se transmite en la misma proporción por toda la superficie de las baldosas concentrándose la mayor parte de energía mecánica en el centro de la baldosa y no en sus vértices. En la geometría cuadrada la concentración de energía se distribuye en una mayor superficie de la baldosa, como se indica en la Figura 2-41.

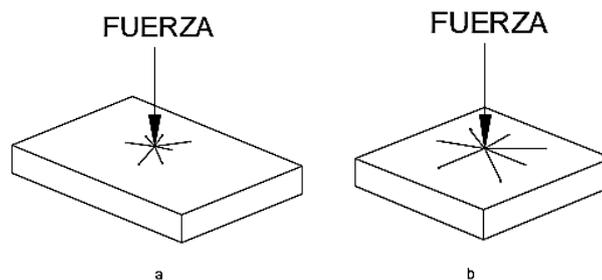


Figura 2-41 Distribución de la fuerza aplicada para: a) superficie rectangular, b) superficie cuadrada [44].

- *Selección de las dimensiones y material para el soporte*

La Figura 2-42 muestra un soporte cuadrado de dimensiones 30,6 x 30,6 [cm], suficiente para cubrir el área total del pie.

Área promedio del pie: 300 [cm²]

Área de la baldosa: 936,36 [cm²]

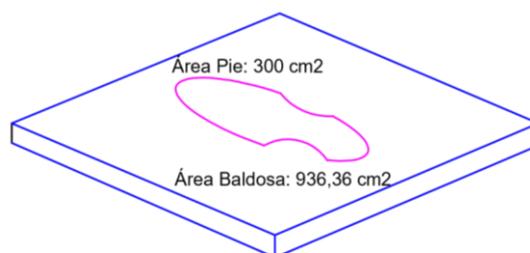


Figura 2-42 Área del pie vs área de la baldosa [44].

Al tener que resistir el peso de una persona, puede ser fabricado de un material que permita el paso peatonal ya sea madera, cerámica, metal, piso falso, etc. En el caso de la cerámica, tendrá que ser fijada con un adhesivo a base de cemento para rellenar todo el contorno alrededor de los sensores piezoeléctricos y dar estabilidad a las baldosas piezoeléctricas; evitando así el quiebre del material de soporte. En vista de que las baldosas piezoeléctricas

tendrán espacios sin rellenar en su interior, apreciable en Figura 2-43, se eligió como material para el soporte, un tablero de densidad media o MDF. Es un material ligero, de fácil manipulación y alta resistencia recubierto con una capa de sellador y laca para dar un mejor acabado y proporcionar mayor resistencia al agua.

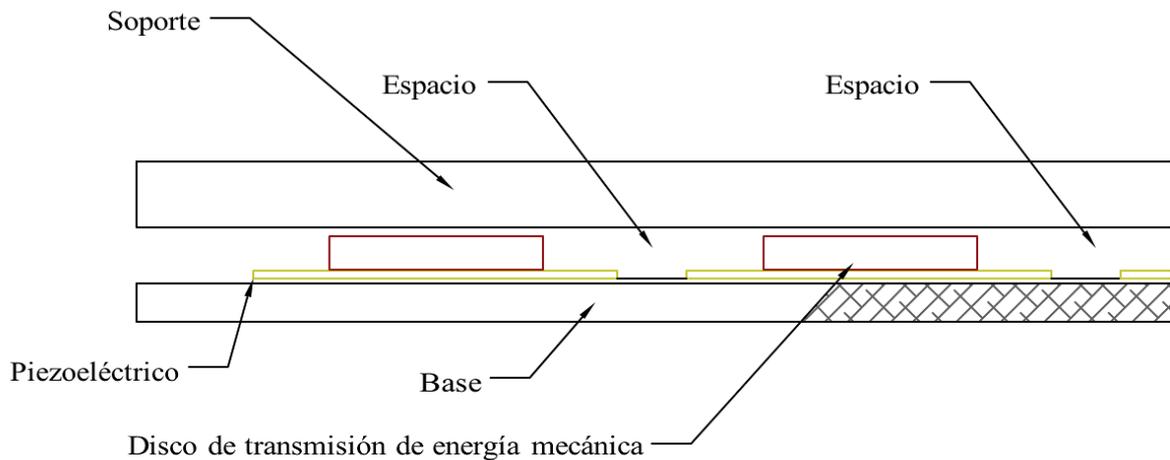


Figura 2-43 Espacio libre ocasionado por el arreglo de elementos para las baldosas piezoeléctricas [autoría propia].

- *Selección de la geometría y el material para el contenedor*

El contenedor es de geometría cuadrada, al igual que el soporte, y debe ser resistente a los esfuerzos mecánicos. Puede ser construido de fibra de vidrio, madera, resina, goma de neumáticos, vinilo, materiales cerámicos, etc., como se menciona en [40]. El material elegido es la madera debido a su durabilidad, maleabilidad, utilidad para ensayos con esfuerzos mecánicos grandes, ligero y de bajo costo. Las medidas detalladas del contenedor se muestran en el Anexo A-VII. En la Figura 2-44 se aprecia la forma del contenedor, tiene una salida de voltaje positivo y negativo en su costado derecho para conectarse hacia los circuitos de rectificación de voltaje. La abertura principal es de 30,6 x 30,6 [cm].

La altura del contenedor se calcula en base al siguiente detalle:

Altura de los piezoeléctricos: 0,33 [mm]

Altura de los discos: 2,5 [mm]

Altura del soporte: 6 [mm]

Altura de la base del soporte: 6 [mm]

Altura de la base para los piezoeléctricos: 3 [mm]

Altura total del contenedor: 1,8 [cm]

Para garantizar un mejor acabado se realizó un tratamiento a la madera mediante sellado y lacado para evitar filtraciones de agua y posibles plagas en la madera.

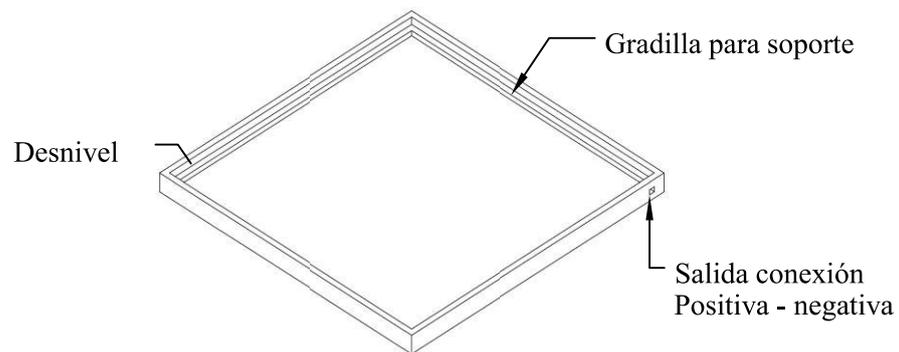


Figura 2-44 Vista isométrica del contenedor [autoría propia].

- *Selección del material para el disco de transmisión de energía mecánica*

Ya que el disco para transmitir la energía mecánica surge del inconveniente que provocan los puntos del sensor piezoeléctrico, en los polos del sensor piezoeléctrico tienen en un costado una abertura de radio igual a 0,5 [cm] donde irá colocado el punto de suelda. Se lo construyó de diámetro de 23 [mm] y de altura de 2,5 [mm], garantizando la cobertura total del área de acción del sensor piezoeléctrico y de altura mayor a los puntos de suelda. Construidos de cartón prensado, calibre igual a 2,5 [mm] y gramaje de 1575 [g/m²], este material es de fácil manipulación, resistente a la humedad y no permite la formación de hongos e insectos, como se indica en [50]. En la Figura 2-45 se aprecia la forma del disco de transmisión de energía mecánica.

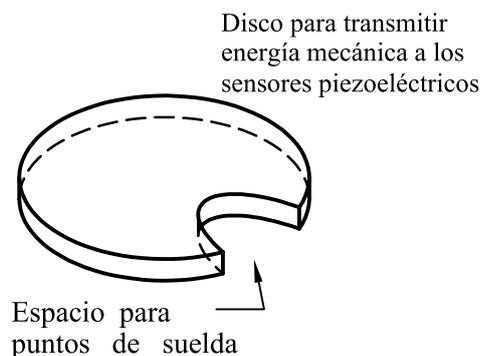


Figura 2-45 Disco para transmitir energía mecánica a los piezoeléctricos [autoría propia].

- *Selección del material del soporte base para los sensores piezoeléctricos*

Para el soporte de los sensores piezoeléctricos se utilizó etilvinilacetato (goma EVA) colocado en la base del contenedor de medida 30 x 30 [cm]. Tiene una alta resistividad al ambiente y químicos, baja absorción de agua, maleable, no tóxico, amigable al medio ambiente, como se muestra en [51]. El etilvinilacetato también permite el aislamiento eléctrico entre los sensores piezoeléctricos. En la Figura 2-46 se puede apreciar la colocación de todos los materiales que componen la baldosa piezoeléctrica.

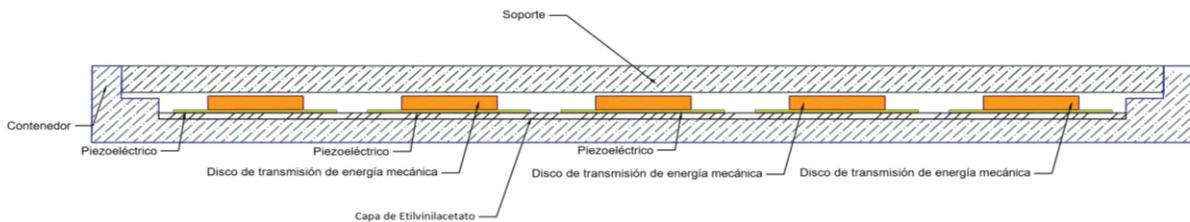


Figura 2-46 Disposición de los elementos que componen la baldosa piezoeléctrica (corte transversal) [autoría propia].

Los materiales utilizados y su precio se enlistan en la Tabla 2:

Tabla 2 Proforma de gastos y materiales para la construcción de las baldosas piezoeléctricas

Material	Cantidad	Unidad	Precio Unitario [\$]	Precio Total [\$]
Sensores piezoeléctricos	120	u	1.5	180
Tablero MDF de 6 mm de espesor	1	u	6	6
Tablero de Laurel 1 cm espesor	1	u	4.5	4.5
Cables	10	m	3	30
Sellador	1	u	5	5
Laca	1	u	6	6
Barniz	1	u	6	6
Etilvinilacetato (goma EVA)	2	m	1.25	2.5
Roleta eléctrica 10 mm2	4	u	3	12
Herramienta (Suelda, brochas, cautín, etc.)	1	grupo	25	25

Mano de obra	1	u	50	50
	Total			327

- *Conexión eléctrica de los sensores piezoeléctricos*

Los sensores piezoeléctricos pueden conectarse de dos formas: en serie o paralelo. La conexión en serie permite obtener un mayor voltaje de salida mientras que la conexión en paralelo permite obtener una mayor corriente. Para conseguir una mejor potencia de salida la conexión óptima de los sensores será mixta, serie-paralelo. La conexión en paralelo de los sensores se realizó en columnas a una distancia aproximada de 6.5 [cm] de centro a centro entre sensores, a su vez, cada columna es conectada en serie a una distancia aproximada de 5,5 [cm] de centro a centro entre columnas. Se conectó en serie 6 columnas formadas por 5 sensores en paralelo, dando como resultado un total de 30 sensores piezoeléctricos por baldosa. En la Figura 2-47, la distribución de los elementos piezoeléctricos se puede apreciar el detalle de la conexión de los piezoeléctricos y su geometría final.

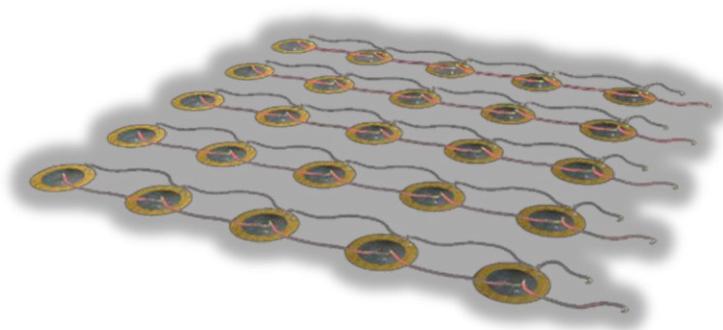


Figura 2-47 Distribución de los elementos piezoeléctricos en columnas de 5 sensores en paralelo (perspectiva) [40].

2.4.2 AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL

Cumpliendo con los requisitos necesarios en su composición aerodinámica por su resistencia, flexibilidad y bajo peso se adquirieron 4 alabes semicirculares de 60 x 26 [cm]. Al ser una aleación de acero y otros materiales, el tol es un buen material para realizar las crucetas, debido a su peso ligero y resistencia para soportar el peso de los alabes. Aunque en este caso se usa un tol más grueso de 3 mm se adquiere en total 4 crucetas de 60 x 6 [cm] con estructura de abrazadera.

El acero brinda la estabilidad y resistencia necesaria para que el viento pueda permitir el funcionamiento del rotor y así lograr el objetivo de generación de energía. El elemento que actúa como eje central del rotor donde las crucetas se enlazan y los alabes se unen fue escogido de acero debido a la dureza y durabilidad de este. Fue dispuesto un tubo de 25,4 [mm] de diámetro en una estructura hueca por cuestiones de peso con una altura de 2 metros.

La estructura consta de 2 rodamientos destinados a dar un giro óptimo y sin obstrucciones entre las estructuras que tienen contacto, ya que el aerogenerador Savonius es un sistema de rotación sin fricción. Además, se adquirieron 2 rodamientos de acero 6205 con un diámetro de 1 pulgada para el eje de rotación. La multiplicación de velocidad corresponde a un sistema de piñones en relación 1:10 de vueltas para multiplicar las revoluciones y proporcionar una mayor potencia al sistema. El sistema de piñones corresponde a 2 piñones de bicicleta elíptica con una gran relación de intercambio y una cadena ligera y resistente.

Una vez mencionados los materiales se elabora una proforma en la Tabla 3 con el conjunto de gastos de todos los materiales adquiridos.

Tabla 3 Proforma de gastos y materiales del aerogenerador Savonius.

Material	Unidades	Precio Unitario [\$]	Precio Total [\$]
Alabes de Tol Galvanizado	4	20	80
Cruceta de Tol Galvanizado	4	15	60
Vigas de Acero	6	10	60
Tubo de Acero	1	45	45
Rodamientos de Acero	2	25	50
Motor	1	50	50
Sistema de poleas	1	50	50
TOTAL			395

2.5 Armado y construcción del Sistema Piezo-Aerogenerador.

2.5.1 ARMADO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS.

Se adquirió el material piezoeléctrico de las características especificadas en la sección 2.1.2.1 *Elección del material piezoeléctrico*, tal y como se aprecia en la Figura 2-48.



Figura 2-48 Sensores piezoeléctricos [40].

Para el soporte se cortaron piezas de MDF con 6 [mm] de espesor y de área 30.6 x 30.6 [cm], como muestra la Figura 2-49 y se dio un tratamiento de sellado y lacado para obtener una mejor resistencia al agua y dar un mejor acabado.



Figura 2-49 Pieza cuadrada de MDF para soporte. (Izquierda: Pieza cortada, Derecha: Resultado final) [autoría propia].

En la Figura 2-50 se muestra el contenedor que se realizó con una estructura de madera cuyos bordes son de laurel, mientras que su base es de MDF. Se realizó el tratamiento a la madera a base de sellado y lacado para mejorar su resistencia al agua y dar un buen acabado.



Figura 2-50 Contenedor a base de MDF y laurel con gradilla de soporte en el interior (vistas superior e inferior) [autoría propia].

Los discos para transmitir la energía mecánica fueron construidos según lo especificado en la sección *Selección de la geometría de las baldosas y elección de materiales*. Se pueden visualizar en la Figura 2-51.



Figura 2-51 Discos para transmisión de energía mecánica [autoría propia].

El soporte base para los materiales piezoeléctricos de la Figura 2-52 se lo construyó del tamaño interno del contenedor, sin contar la gradilla, cubriendo todo el espacio destinado para los piezoeléctricos



Figura 2-52 Contenedor y soporte para los sensores [autoría propia].

Se colocaron 6 columnas de 5 piezoeléctricos en paralelo, en la base del contenedor como muestra la Figura 2-53. Un mayor detalle del porque se eligió este tipo de conexión se lo realiza en la parte de pruebas (sección 3.1.1) de este mismo capítulo en base a las formas de onda obtenidas de los distintos tipos de conexión.

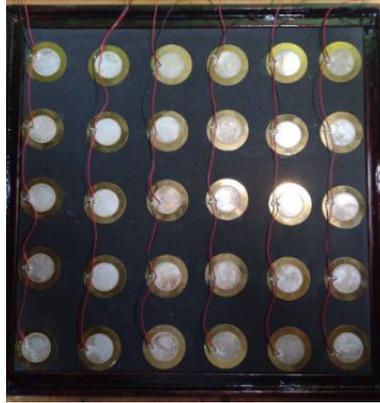


Figura 2-53 Sensores ubicados en el contenedor [autoría propia].

Sobre los sensores se situaron los discos de transmisión de energía mecánica, cuidando que el espacio en el disco sea colocado de tal forma que se encuentre los puntos de suelda de los polos de cada sensor. Esta disposición se puede apreciar en la Figura 2-54.



Figura 2-54 Discos piezoeléctricos asentados sobre los sensores [autoría propia].

Se realizó la respectiva conexión en serie de las columnas, paralelo de los sensores. Se conectaron los terminales para salida positiva-negativa ubicado en la parte lateral de las baldosas como se muestra en la Figura 2-55.

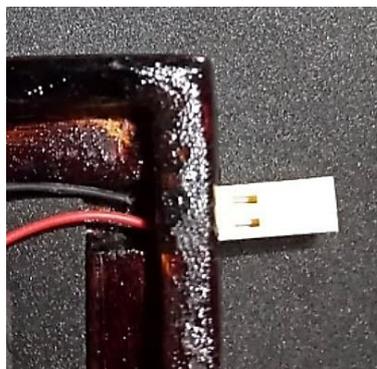


Figura 2-55 Conexión de los sensores hacia la salida de voltaje de las baldosas [autoría propia].

Una vez ubicado el soporte, se obtiene una baldosa piezoeléctrica de dimensiones 30,12 x 30,12 [cm]. Debido a sus materiales esta baldosa puede ser usada en cualquier superficie seca, es también apta para pruebas de laboratorio y pruebas en espacios abiertos o cerrados. En la Figura 2-56 se muestra que se realizaron 4 baldosas de las mismas características para incrementar el valor de potencia generada y el área de generación disponible.



Figura 2-56 Baldosas piezoeléctricas, resultado final [autoría propia].

2.5.2 ARMADO Y CONSTRUCCIÓN DEL AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL

2.5.2.1 Armado y Construcción del Prototipo

En el proceso de construcción del aerogenerador Savonius y en base a los diseños propuestos en el Capítulo 2, la fabricación de un prototipo es fundamental para comprobar la utilidad y factibilidad del diseño propuesto. Por lo general el prototipo es un diseño simple de bajo costo y fácil construcción, pero con las características bases del diseño final. El prototipo utiliza un tubo PVC de 1 [cm] de diámetro y 15 cm de altura debido a su resistencia y estabilidad, es un material idóneo para el eje central como indica la Figura 2-57.



Figura 2-57 Tubo de PVC para eje del prototipo [autoría propia].

La estructura de soporte tiene por material vigas de acero de 3 x 3 [cm], que se unen con una suelda de punto para asegurar la fijación de las uniones como se ve en la Figura 2-58. El material de las vigas es acero hueco para ayudar el peso del prototipo y su movilidad.



Figura 2-58 Vigas de acero para soporte del prototipo [autoría propia].

Mediante suelda de punto, la estructura de viga se une al rodamiento central del prototipo cuyo diámetro interno corresponde a 10 [mm] notado en la Figura 2-59 para obtener la estructura junto con su parte motriz.



Figura 2-59 Unión vigas con el rodamiento central del prototipo [autoría propia].

El rodamiento de acero 6200 para 10 [mm] de diámetro corresponde a un fijo y resistente componente de rotación para el eje del rotor, como se muestra en la Figura 2-60.



Figura 2-60 Rodamiento central para sujeción y giro del prototipo [autoría propia].

La estructura de soporte y el rodamiento unidos por suelda conforman la estructura final que va a soportar el eje con 4 ejes para soportar las corrientes de vientos del lugar prueba, como en la Figura 2-61.



Figura 2-61 Estructura de soporte para el prototipo [autoría propia].

El alabe para el prototipo es una lámina de tol galvanizado de medidas 28,3 cm de ancho y una altura de 60 cm, con una curvatura interna que tiene un radio de 4,47 [cm]. Este prototipo no tiene un traslape ya que la lámina posee una única curvatura con fines de prueba para poner a prueba la fuerza que ejerce el viento y su capacidad para rotar el eje y producir la energía como se ilustra en la Figura 2-62.



Figura 2-62 Alabe de tol galvanizado junto al eje de PVC [autoría propia].

Un sistema de transmisión que consta de una polea de radio 2,5 [cm] y 1 [cm] de altura junto con una banda brindan la fuerza necesaria, para que el sistema motriz del aerogenerador como se ve en la Figura 2-63, pueda desplazar el motor y producir energía.



Figura 2-63 Sistema de poleas del prototipo [autoría propia].

Finalmente, como se observa en la Figura 2-64 se unen todos los sistemas para obtener el prototipo de aerogenerador Savonius de un solo piso. Este prototipo no es apto para el presente trabajo debido a su tamaño y aunque tenga todas las características de un aerogenerador Savonius su área de barrido de viento es muy pequeña y su aprovechamiento del recurso muy limitado, además no posee un traslape lo que le perjudica aún más su eficiencia.



Figura 2-64 Diseño final del prototipo de aerogenerador Savonius [autoría propia].

2.5.2.2 Armado y Construcción del Diseño Final

Una vez realizadas las directrices del prototipo, el diseño final se acogerá a estas, pero con mejoras muy importantes para el funcionamiento correcto del sistema de generación de energía mediante energía eólica. La estructura de soporte del diseño final consta igualmente de una viga de acero de 3 x 3 [cm] con las dimensiones de 60 [cm] de ancho, 209 [cm] de alto con unas patas de soporte de 46 [cm] para brindar la máxima estabilidad al sistema de rotación que se observa en la Figura 2-65.



Figura 2-65 Estructura de Soporte del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].

Como la primera innovación de diseño respecto al prototipo se adicionaron crucetas de tol galvanizado para el soporte de los alabes del diseño final, con medidas de 53 [cm] de largo

y 6 [cm] de ancho, como se observa en la Figura 2-66. Estas crucetas se unen al eje mediante abrazaderas y pernos de sujeción pudiendo ser fácilmente móviles y desmontables. La característica más importante de las crucetas es disponer de 12 huecos en su largo para poder obtener la característica de un traslape variable de 3 posiciones.



Figura 2-66 Unión de las crucetas y el eje junto a la estructura de soporte del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].

Como segunda innovación, respecto al prototipo el diseño final de aerogenerador, es que dispone de 2 pisos por lo que posee 4 alabes de tol galvanizado, con las medidas de 60 [cm] de altura, 26 [cm] de ancho y una cavidad interna con radio de 18,38 [cm], como se muestra en la Figura 2-67. Se dispondrán a 90 grados el uno del otro para brindar un torque mayor al momento de recibir rafagas de viento y aprovechar mejor el recurso eólico.



Figura 2-67 Unión de las alabes a las crucetas y el eje junto a la estructura de soporte del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].

Una vez incorporados los alabes con las crucetas y unidas al eje con las abrazaderas, se procede a pintar los alabes y unirlos a la estructura de soporte para formar el sistema de rotación que se muestra en la Figura 2-68.



Figura 2-68 Pintura de los alabes y de la estructura de soporte del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].

La Figura 2-69 muestra que para compactar el sistema de rotación es necesario el uso de 2 rodamientos de acero 6205, que sostienen el eje y le brindan la facilidad para poder rotar sin impedimentos.



Figura 2-69 Unión de los rodamientos 6205 al conjunto previamente armado del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].

La Figura 2-70 permite observar el traslape variable que se propuso. Esto se logra mediante los alabes y las crucetas con posiciones variables para poder poner a prueba las diferentes posiciones y determinar mejor eficiencia para el giro del aerogenerador vertical.



Figura 2-70 Traslape del diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].

Como tercera innovación, respecto al prototipo, para brindar la mayor eficiencia y generación de energía el aerogenerador, se dispone de un sistema de piñones. Esto para incrementar las revoluciones que el rotor genere, como se observa en la Figura 2-71. Los piñones se consideran un medio de multiplicación de velocidad bastante simple y eficiente.



Figura 2-71 Sistema de Poleas del aerogenerador Savonius [autoría propia].

Una vez unido el sistema de poleas al sistema de rotación, y este unido a la estructura de soporte con los rodamientos, se obtiene el diseño final de aerogenerador Savonius de 2 pisos con traslape variable, como es mostrado en la Figura 2-72, para ser puesto a prueba en el lugar designado. Priorizando la estabilidad y resistencia del sistema frente a las corrientes de viento de baja, media y alta velocidad.



Figura 2-72 Diseño final del aerogenerador Savonius [autoría propia].

2.5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DE ESTADO

La implementación del control de estados se basa en la integración de un circuito junto a un Arduino Uno, que es una plataforma de hardware basado en una placa de circuito con un microcontrolador y un entorno de desarrollo para el uso de la electrónica en proyectos. Como ya se mencionó en la sección 1.3.7.3 *Convertidor DC-DC Tipo Buck-Boost* el circuito de Control de Estados presenta los siguientes componentes:

1. Arduino Uno

El Arduino Uno posee entradas y salidas, digitales y analógicas, que pueden realizar varias acciones según el programa que se introduce por medio de un ordenador y que puede ejecutar, de forma autónoma, el proceso impuesto en su microcontrolador. El modelo Arduino utilizado en este proyecto, como se ve en la Figura 2-73, será el modelo UNO R3SMD basado en el microcontrolador AtMega328, 14 pines E/S digitales, 6 pines PWM, 6 pines ADC adicionales, Comparadores, ACD, Interrupciones.



Figura 2-73 Modelo Arduino Uno R3SMD.

Entre las principales características se tiene:

- Voltaje de Funcionamiento: 5 [V].
- Voltaje de Entrada: 7-12 [V].
- Corriente continua por pin: 0-20 [mA].
- Corriente continua para 3,3 V: 50 [mA].
- Velocidad del reloj: 16 [MHz].

2. Sensor de Corriente

El sensor de corriente es ACS712ELCTR-5^a-T, mostrado en la Figura 2-74, y soporta mediciones de corriente en AC o DC. Internamente trabaja con un sensor de efecto Hall, que detecta unos campos magnéticos surgidos del paso de una corriente por el alambre de cobre y convirtiendo esto en un voltaje variable.

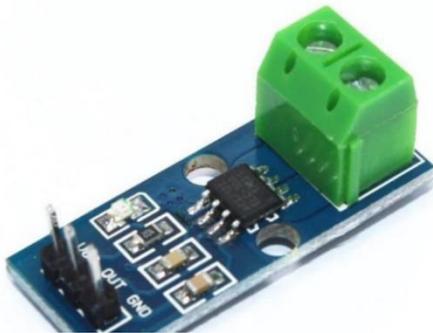


Figura 2-74 Sensor de Corriente ACS712.

Entre las principales características se tiene:

- Voltaje de Funcionamiento: 5 [V].
- Rango Máximo: 5 [A].
- Salida análoga: 100 [mV/A].
- Salida cuando no detecta corriente: 2 [VCC].
- Sensibilidad: 66 [mV/A].

- Resistencia interna: 1,2 [mΩ].

3. *Transistor de Campo*

El transistor utilizado en el proyecto es de efecto de campo Mosfet. Se utilizan principalmente para conmutación, convertidores, controladores y controladores de relé. En este proyecto utilizamos principalmente para la conmutación un Mosfet modelo IRF640 como se ve en la Figura 2-75.



Figura 2-75 Transistor de Campo IRF640.

Entre las principales características se tiene:

- Disipación total del dispositivo: 125 [W].
- Tensión drenaje-fuente: 200 [V].
- Corriente continua de drenaje: 18 [A].
- Temperatura operativa máxima: 150 [Celsius].
- Conductancia de drenaje-sustrato: 2100 [pF].
- Resistencia drenaje-fuente: 0,18 [Ω].

4. *Optoacoplador*

El deseo que la interconexión entre ambas etapas, la digital y la de potencia, se realice, es por un medio de un acoplamiento que permita aislar eléctricamente los dos sistemas. Esto se puede lograr con los dispositivos optoacopladores como el mostrado en la Figura 2-76.



Figura 2-76 Optoacoplador 6N137.

Entre las principales características se tiene:

- Voltaje de aislamiento: 5,3 [kV].
- Tipo: Alta Velocidad
- Tipo Optoacoplador salida: Compuerta lógica
- Entrada de Corriente: 15 [mA].
- Voltaje de salida: 7 [V].
- Numero de pines: 8.

De acuerdo con los elementos que conformarán el sistema de control de estados, se dispone del circuito de control que consta de 2 sensores de corriente para el ajuste de la estimación de estados en el código especificado. Un mosfet acoplado a un optoacoplador para lograr la conmutación prevista del diseño. A continuación, el circuito a implementar se presenta en la Figura 2-77:

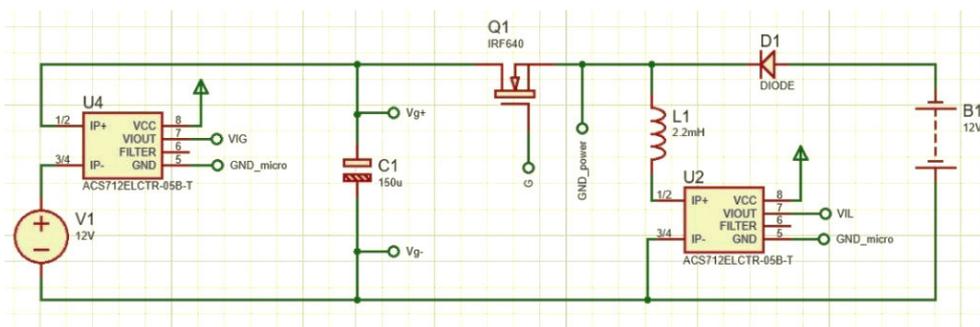


Figura 2-77 Circuito de control de Estados [autoría propia].

En base a lo establecido, se arma el circuito con los elementos y se tiene como entrada al aerogenerador vertical y a la generación de las baldosas piezoeléctricas, en conjunto con

el Arduino Uno que se encargará del funcionamiento sincronizado de ambos, como se muestra en la Figura 2-78.



Figura 2-78 Implementación del control de estados al sistema [autoría propia].

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Pruebas

Para comprobar que las baldosas piezoeléctricas son capaces de producir la energía eléctrica necesaria para alimentar un sistema de baja potencia, se realizaron pruebas para validar el funcionamiento del modelo de baldosa propuesto. Además, con las pruebas y ensayos se determinó el tipo de conexión de las columnas piezoeléctricas en paralelo, así como también el tipo de conexión entre las baldosas. Las pruebas realizadas al aerogenerador tienen como objetivo comprobar el funcionamiento del mismo, y sus elementos.

3.1.1 PRUEBAS REALIZADAS AL GENERADOR PIEZOELECTRICO

Para comprobar la forma de onda de un sensor piezoeléctrico y de los bloques conectados en serie y paralelo se realizaron las siguientes pruebas:

3.1.1.1 Formas de onda de las columnas piezoeléctricas

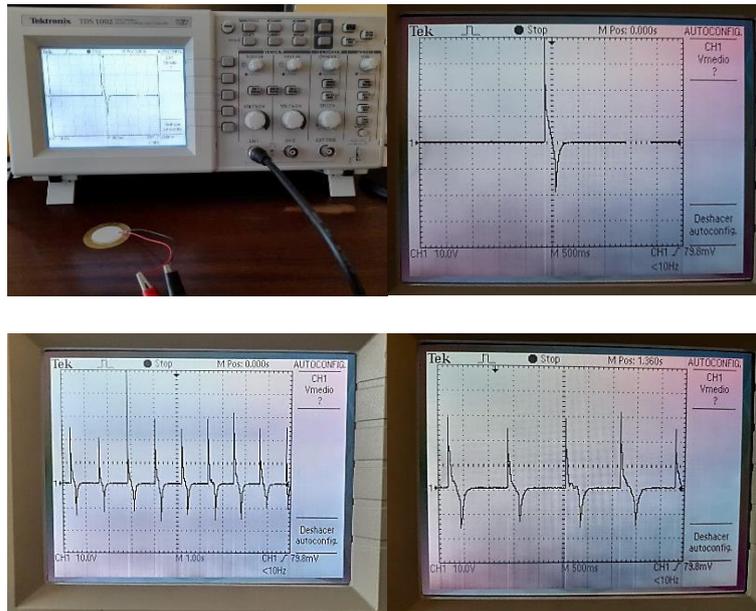


Figura 3-1 Formas de onda para un sensor piezoeléctrico [autoría propia].

La forma característica de la onda de voltaje, mostrado en la Figura 3-1, producido por un material piezoeléctrico es un impulso de voltaje de valor positivo mientras se ejerce presión en el material piezoeléctrico; y negativo cuando la presión es retirada como muestra la Figura 3-2.

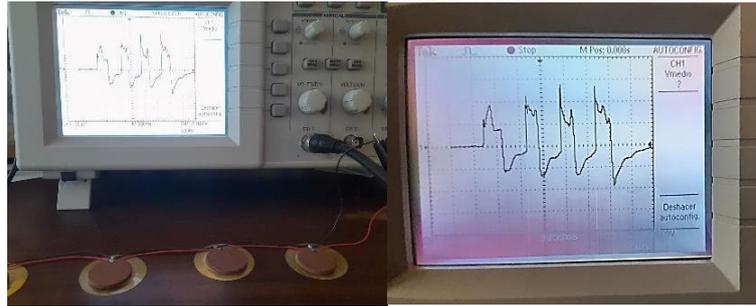


Figura 3-2 Forma de onda para 5 sensores piezoeléctricos conectados en paralelo [autoría propia].

Cuando se realiza una conexión en paralelo de los sensores, como se aprecia en la Figura 3-3, el área de la onda se ensancha provocando que la corriente total producida se incremente. Si las columnas se conectan en paralelo, se produce un incremento de la corriente generada, pero al mismo tiempo se reduce el pico de voltaje producido

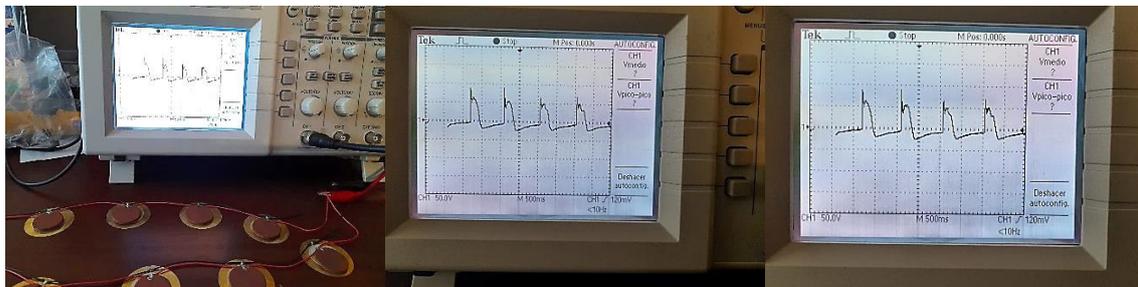


Figura 3-3 Forma de onda para 2 columnas conectadas en paralelo (cada columna contiene 5 sensores piezoeléctricos conectados en paralelo) [autoría propia].

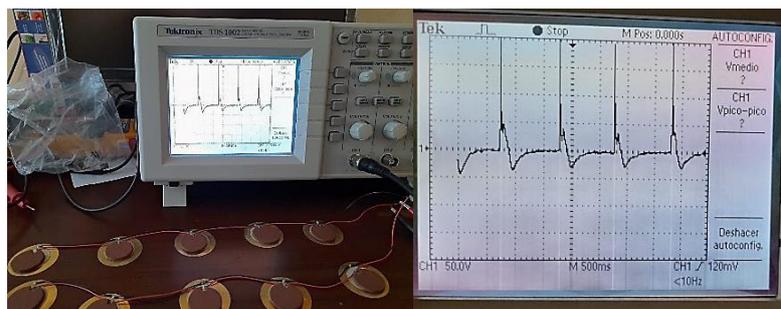


Figura 3-4 Forma de onda para 2 columnas conectadas en serie (cada columna contiene 5 sensores piezoeléctricos conectados en paralelo) [autoría propia].

Si las columnas de piezoeléctricos se conectan en serie, los picos de voltaje son mayores, sin embargo, la forma de onda tiende a ser de menor área, provocando que la corriente entregada sea menor, tal como se indica en la Figura 3-4. De esta forma se comprueba que el voltaje producido mediante piezoeléctricos es proporcional a la fuerza aplicada. Los valores de voltaje negativos, producidos por los sensores piezoeléctricos al momento de

retirar la presión mecánica, deben ser rectificadas para su posterior almacenamiento. Debido a que en la conexión en serie se obtienen picos de voltaje más elevados, y en la conexión en paralelo se obtiene una mayor área en su forma de onda, se opta por realizar una conexión mixta: 5 sensores en paralelo para mejorar la producción de corriente que a su vez son conectados en serie para incrementar el valor de voltaje producido.



Figura 3-5 Seis columnas de piezoeléctricos conectados en serie (cada columna contiene cinco sensores piezoeléctricos conectados en paralelo) [autoría propia].

En la Figura 3-5 se puede apreciar la forma de conexión interna que tienen las baldosas piezoeléctricas. Esta conexión asegura un incremento tanto de voltaje como de corriente producida por cada baldosa. Se utilizan seis comunas de piezoeléctricos para abarcar una mayor área y mejorar la producción de potencia de salida de la baldosa.

3.1.1.2 Forma de onda de las baldosas piezoeléctricas

Una vez armadas las baldosas piezoeléctricas, se realizaron mediciones de la forma de onda de voltaje a la salida de cada baldosa. Estas mediciones fueron realizadas en vacío obteniéndose la onda presentada en la Figura 3-6:



Figura 3-6 Forma de onda de Voltaje de salida de la baldosa piezoeléctrica propuesta [autoría propia].

Este voltaje de salida, luego de ser rectificado, debe ser almacenado en un capacitor. Pruebas realizadas a generadores piezoeléctricos muestran que capacitores del rango de 22000 [uF] en adelante tienen pérdidas de energía bajas con el tiempo, en el orden del 7 %, sin embargo, la carga hacia las baterías es muy lenta y se necesita mucho tiempo para obtener valores de voltaje considerables. Por esta razón, se realizaron mediciones de voltaje a capacitores conectados en la salida de los rectificadores de las baldosas en el rango de 1 [uF] a 27 [uF] con pasos de una frecuencia aproximada de un segundo, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 4.

La Tabla muestra la cantidad de pasos que se dieron para obtener el voltaje mínimo de trabajo de una carga LED para distintos capacitores. La ultima medicion de la tabla muestra el voltaje que se produjo sin conectar la carga led .

Tabla 4 Mediciones de carga y descarga para distintos valores de capacitancia utilizando baldosas piezoeléctricas como fuente de voltaje.

# pasos dados [u]	Capacitancia del circuito [uf]	Tiempo de descarga [s]	Voltaje máximo [V]	Estado
1	0.22	4	2.2	Con carga
		10	2	Con carga
		7	2.2	Con carga
		7	2	Con carga
		6	2.2	Con carga
4	2.2	12	2.3	Con carga
		12	2.3	Con carga
		12	2.3	Con carga
		12	2.3	Con carga
7	4.7	23	2.3	Con carga
		21	2.3	Con carga
		22	2.3	Con carga
		20	2.3	Con carga
		20	2.3	Con carga
27	22	90	2.3	Con carga
		100	3.5	Sin carga

Se llegó a obtener voltajes más altos cuando se realizan las pruebas sin carga, sin embargo, cuando se conecta una carga en el sistema de generación pizoeléctrico el voltaje producido disminuye. Se puede apreciar que el tiempo de descarga del capacitor aumenta conforme se incrementa el valor de capacitancia, esto es muy adecuado ya que se almacena energía por un tiempo más prolongado.

La Tabla 4 muestra que se requiere un mayor número de pasos para llegar al voltaje mínimo que el LED requiere para funcionar, esto implica un tiempo de carga mayor para el capacitor, lo que provocaría que se tenga un tiempo muy alto en la carga hacia una batería. Para obtener un tiempo relativamente bajo de carga hacia la batería se eligió un capacitor de 10 [uF] como filtro, ya que son necesarios unicamente 9 pasos para llegar al voltaje requerido por el diodo LED y además el tiempo de descarga del capacitor es de un valor medio, 30 segundos.

3.1.1.3 Aplicación a una carga

Para comprobar que las baldosas piezoeléctricas son capaces de producir energía, se encendió un LED azul mostrado en el circuito de la Figura 3-7 de alta eficiencia tomando valores de voltaje y teniendo una comprobación visual mediante el encendido del LED.

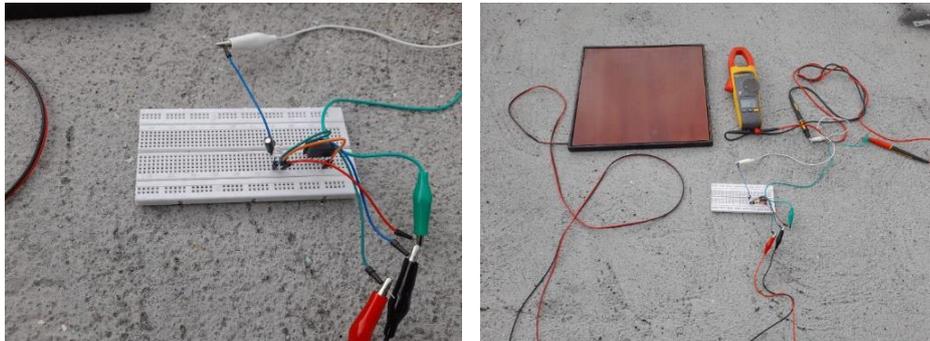


Figura 3-7 Toma de datos para encendido de un LED a través de una baldosa piezoeléctrica [autoría propia].

Para encender el LED, se caminó por encima de la baldosa piezoeléctrica. Cada que se da un paso, el capacitor se carga hasta llegar al valor de voltaje mínimo de funcionamiento del LED. Una vez que llega a ese voltaje, el LED se mantiene encendido como se observa en la Figura 3-8, mientras se siga caminando sobre la baldosa.

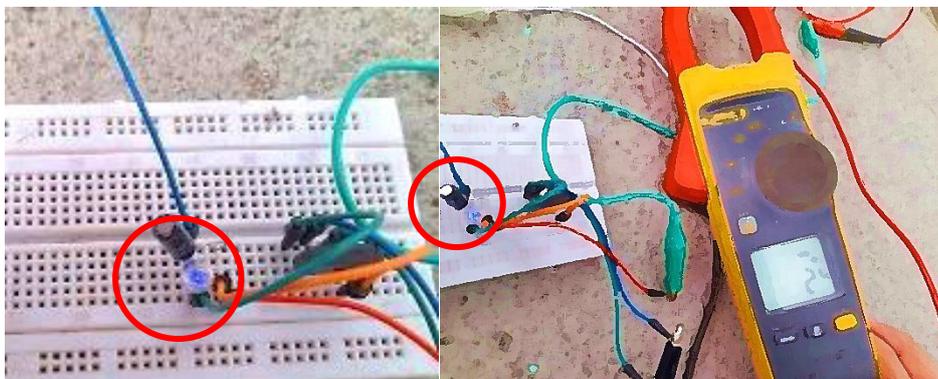


Figura 3-8 LED azul de alta eficiencia encendido mediante una baldosa piezoeléctrica [autoría propia].

En color rojo, se puede apreciar un LED azul encendido con un voltaje de 2.4 [V], mientras se dan pasos sobre la baldosa piezoeléctrica.

3.1.1.4 Cálculo de la potencia generada por baldosa



Figura 3-9 Medición de potencia de las baldosas piezoeléctricas [autoría propia].

Para medir la potencia de las baldosas piezoeléctricas, como muestra la Figura 3-9 fue utilizada una resistencia de 1 megaohmio y un capacitor de 220 [uF]. Se realizaron mediciones de voltaje y corriente cuyos resultados se tabulan en la Tabla 5:

Tabla 5 Datos obtenidos para medición de potencia de una baldosa.

VOLTAJE GENERADO [V]									
1,7	1,62	1,56	1,65	1,68	1,2	1,36	1,51	1,1	1,47
CORRIENTE GENERADA [mA]									
20,3	16,2	15,9	17,9	19,8	13,5	14,9	14,98	11,2	14,6

El valor promedio de voltaje es de 1,5 [V] y de corriente es 16 [mA], con estos datos se puede obtener la potencia de cada baldosa mediante la ecuación 3.1:

$$P = V \times I \quad (3.1)$$

Donde:

P = Potencia de la baldosa piezoeléctrica [W].

V = Voltaje producido por la baldosa [V].

I = Corriente producida por la carga [A].

Dando como resultado:

$$P = 1,5 [V] \times 16 [mA] = 0,24 [W]$$

Cada baldosa piezoeléctrica puede producir una potencia de 2,4 [mW], de esta forma, el sistema completo de 4 baldosas produce 0,96 [W]. Se debe tener en cuenta, que los valores de voltaje y corriente medidos son valores RMS ya que fueron tomados mediante un multímetro digital.

3.1.1.5 Conexión serie-paralelo de las baldosas piezoeléctricas

Para determinar cual es la mejor forma de conectar las baldosas piezoeléctricas se realizaron mediciones de voltaje, como se muestra en la Tabla 6 para conexión en serie y la Tabla 7 para la conexión en paralelo. Así conectando el grupo de 4 baldosas en serie y paralelo, como se muestra en la Figura 3-10 y Figura 3-11 respectivamente.



Figura 3-10 Baldosas conectadas en serie [autoría propia].

Tabla 6 Voltaje obtenido con baldosas conectadas en serie.

	Serie [V]				
Dia 1	2,1	1,9	1,8	2,2	2,3
Dia 2	2	1,7	2,2	2,4	1,8



Figura 3-11 Baldosas conectadas en paralelo [autoría propia].

Tabla 7 Voltaje obtenido con baldosas conectadas en paralelo.

Paralelo [V]					
Dia 1	3,2	2,7	3,34	2,75	2,95
Dia 2	2,9	2,6	2,75	3,04	3,3

Con los datos obtenidos se concluye que la conexión en paralelo de las baldosas es la más adecuada, ya que brinda mayor voltaje y es la conexión elegida para las 4 baldosas piezoeléctricas.

3.1.1.6 Regulación de voltaje

Para conectar las baldosas piezoeléctricas al control de estados se realizaron pruebas con el fin de obtener un voltaje regulado a la salida de la generación piezoeléctrica. El voltaje mínimo que debe llegar al control de estados para funcionar correctamente es de 1 voltio, con valores menores el control de estados no funcionará correctamente y la carga hacia las baterías únicamente lo realizaría el aerogenerador. Se realizaron varias pruebas con distintos circuitos y para la elección de la correcta y más eficiente forma de conectar el sistema piezoeléctrico al control de estados. A continuación, se muestran los circuitos utilizados y los valores de voltaje obtenidos a la salida de cada uno de ellos.

- *Regulación de voltaje mediante Regulador Im317*

El circuito de regulación mediante Im317, de la Figura 3-12, con mediciones de voltaje y corriente, como se muestra en la Figura 3-13, dio como resultado los valores de la Tabla 8.

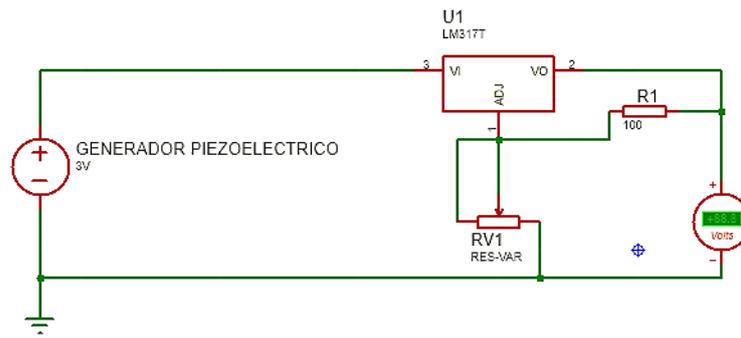


Figura 3-12 Circuito de regulacion de voltaje mediante lm317 [autoría propia].

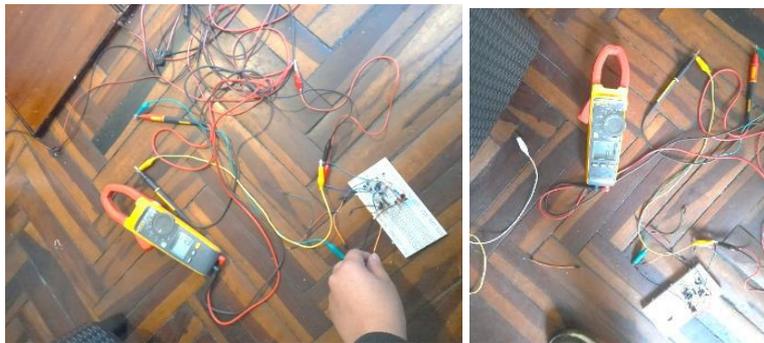


Figura 3-13 Medición de voltaje a la salida del regulador [autoría propia].

Tabla 8 Voltajes obtenidos a la salida del regular lm317.

Voltaje [v]				
0,3	0,4	0,1	0,15	0,27

Los voltajes obtenidos en la Tabla 8 son muy bajos, además, para llegar al valor de voltaje de 0,4 [V], tomó un tiempo considerable de carga en el capacitor. El circuito rectificador de voltaje mediante lm317, no es válido para rectificar el voltaje de salida de las baldosas piezoeléctricas debido a que el consumo del propio circuito rectificador disminuye considerablemente el voltaje de salida de las baldosas. El circuito de regulación mediante zenner de la Figura 3-14 con mediciones de voltaje y corriente como muestra la Figura 3-15, dio como resultado los valores de la Tabla 9.

- *Regulación de voltaje mediante transistor y zenner*

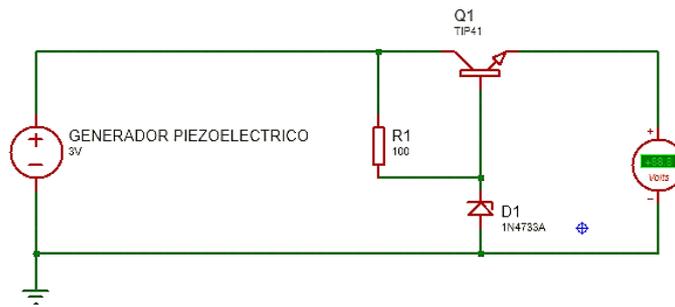


Figura 3-14 Circuito de regulacion de voltaje con diodo zener y transistor TIP41 [autoría propia].



Figura 3-15 Medición de voltaje en la salida del circuito de regulación de voltaje [autoría propia].

Tabla 9 Valores de voltaje regulado.

Voltaje [v]				
0,7	0,8	0,89	0,91	0,93

Es notable el mejoramiento del valor de voltaje regulado con un diodo zener y transistor, sin embargo, los valores continúan siendo bajos y no llegan al voltaje mínimo requerido de 1 [V]. Por tanto, este circuito no será utilizado en la etapa de regulación. Los circuitos que incluyen elementos de control tienen un consumo interno de corriente, esto provoca que existan pérdidas de potencia ocasionadas por los elementos encargados de regular el voltaje, obtenido mediante el generador piezoeléctrico tipo baldosa. Debido a esta constante pérdida de energía se decidió amplificar el voltaje del sistema piezoeléctrico con el circuito de la Figura 3-16 y una prueba de corriente y voltaje como se ve en la Figura 3-17, que muestra como resultado lo expuesto en la Tabla 10.

- *Amplificación de voltaje*

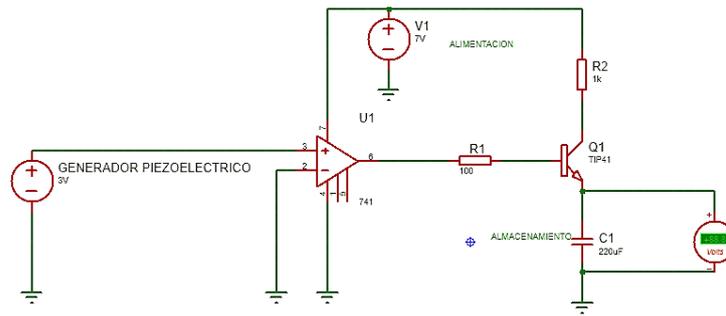


Figura 3-16 Circuito de amplificación de voltaje utilizado [autoría propia].



Figura 3-17 Medición del voltaje de salida del amplificador [autoría propia].

Tabla 10 Valores de voltaje a la salida del amplificador.

Voltaje [v]				
4,17	5,31	6,5	4,88	4,23

El circuito amplificador tiene un capacitor de 220 [uF] y se lo cargó a su voltaje máximo. Una vez cargado el capacitor, se retiró la fuente externa y se tomaron valores de descarga del capacitor, para verificar la producción de energía de las baldosas piezoeléctricas. A continuación, se muestran los tiempos de descarga promedio del capacitor obtenidos:

Tiempo de descarga normal del capacitor: 1 min 25.

Tiempo de descarga del capacitor con generación piezoeléctrica: 2 min 59.

Haciendo uso de las baldosas piezoeléctricas, el capacitor aumenta su tiempo de descarga ya que se aporta energía mediante los piezoeléctricos. La Tabla 10 muestra los valores de voltaje obtenidos con la amplificación, utilizando una fuente de corriente continua de siete voltios. El valor de voltaje amplificado ya es aceptable para conectar el control de estado junto al sistema piezoeléctrico, sin embargo, se decidió conectar las baldosas directamente

al control de estado ya que siempre los circuitos producen una pérdida de energía ocasionada por su propio consumo. Además, las pruebas realizadas para la medición de potencia indican que las baldosas piezoeléctricas por si solas pueden superar el valor mínimo de un voltio, requerido por el control de estados.

3.1.2 PRUEBAS REALIZADAS AL AEROGENERADOR

Con el fin de comprobar el funcionamiento y eficiencia del aerogenerador Savonius se procedieron a realizar las siguientes pruebas:

3.1.2.1 Traslape

La relación de traslape es la primera prueba a la que fue expuesto el aerogenerador, determinada anteriormente como una variable importante en el torque y generación de energía del aerogenerador. Teniendo en cuenta que el proyecto dispone de un traslape variable de 3 posiciones, como se muestra en: (Figura 3-18, Figura 3-21 y Figura 3-24), las pruebas mostraron los resultados de voltaje presentado en las (Figura 3-19, Figura 3-22, Figura 3-25) y corriente (Figura 3-20, Figura 3-23 ,

Figura **3-26**), respectivamente. Las velocidades del viento fueron de 14 a 30 [km/h] para las 3 pruebas, que equivalen a las velocidades promedios en el lugar de prueba designado para este trabajo.

Relación 1:

$$Traslape = \frac{1}{2}$$



Figura 3-18 Traslape relación 1 [autoría propia].



Figura 3-19 Prueba del voltaje con traslape en relación 1 [autoría propia].



Figura 3-20 Prueba de la corriente con traslape en relación 1 [autoría propia].

La relación 1 de 1/2 muestra los siguientes resultados de voltaje y corriente.

$$V_{relacion1} = 10,4[V]$$

$$I_{relacion1} = 0,52 [A]$$

Relación 2:

$$Traslape = \frac{1}{3}$$



Figura 3-21 Traslape relación 2 [autoría propia].



Figura 3-22 Prueba del voltaje con traslape en relación 2 [autoría propia].



Figura 3-23 Prueba de la corriente con traslape en relación 2 [autoría propia].

La relación 2 de 1/3 muestra los siguientes resultados de voltaje y corriente.

$$V_{relacion2} = 11,5 [V]$$

$$I_{relacion2} = 0,5 [A]$$

Relación 3:

$$Traslape = \frac{1}{4}$$



Figura 3-24 Traslape relación 3 [autoría propia].



Figura 3-25 Prueba del voltaje con traslape en relación 3 [autoría propia].



Figura 3-26 Prueba de la corriente con traslape en relación 3 [autoría propia].

La relación 3 de 1/4 muestra los siguientes resultados de voltaje y corriente.

$$V_{relacion3} = 13,1 [V]$$

$$I_{relacion3} = 0,49 [A]$$

Tabla 11 Valores de voltaje y corriente para cada relación de traslape.

	Traslape	Voltaje [V]	Corriente [A]
Relación 1 Traslape	1/2	10,4	0,52
Relación 2 Traslape	1/3	11,5	0,5
Relación 3 Traslape	1/4	13,1	0,49

Los resultados presentes en la Tabla 11, muestran que la mejor posición y que resulta más eficiente es la relación 3 de 1/4, comprobando lo anteriormente mencionado en la fase de diseño. Sabiendo que las relaciones más eficientes son entre 0,2 a 0,25 lo que confirma la relación de 1/4 como la óptima para el aerogenerador.

3.1.2.2 Prueba en vacío

Con las conexiones, indicadas en la Figura 3-27, se efectúa una prueba en vacío para determinar los valores que puede generar en esta condición teniendo como resultado los valores que se representan en la Tabla 12:



Figura 3-27 Valor de voltaje y corriente en vacío del aerogenerador Savonius [autoría propia].

Tabla 12 Valores de voltaje y corriente en vacío.

	Velocidad [rpm]	Voltaje [V]	Corriente [A]
Medición 1	150/1155	13,1	0,49
Medición 2	145/1116	12,8	0,493
Medición 3	135/1039	12,1	0,513
Medición 4	139/1070	12,25	0,506

3.1.2.3 Aplicación a una Carga

Adicionalmente, el aerogenerador Savonius con la conexión mostrada en la Figura 3-28 se rige a una prueba con una carga de 3 [W] resultante de una lampara LED, se obtienen los parámetros que se exponen en la Tabla 13:



Figura 3-28 Valor de voltaje y corriente con una carga del aerogenerador Savonius [autoría propia].

Tabla 13 Valores de Voltaje Corriente frente a una carga de 3 W.

	Velocidad [rpm]	Voltaje [V]	Corriente [A]
Medición 1	150/1155	8,1	0,02
Medición 2	145/1116	7,9	0,018
Medición 3	135/1039	7,5	0,014
Medición 4	139/1070	7,7	0,016

3.1.2.4 Determinación de la potencia Generada

Una vez obtenidas, las variables necesarias en las anteriores pruebas se obtiene la potencia que produce el sistema de aerogeneración, las mismas que se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14 Valores de voltaje y corriente para el cálculo de potencia.

	Voltaje [V]	Corriente [A]
Medición 1	13,1	0,49
Medición 2	12,8	0,493
Medición 3	12,1	0,513
Medición 4	12,25	0,506
Medición 5	12,7	0,492

Usando los resultados de la Tabla 14 se aplica un promedio a cada variable teniendo como valor promedio de voltaje 12,6 [V] y de corriente 0,4988 [A], con estos valores se puede aplicar la ecuación 3.2, que es la potencia para obtener su valor:

$$P_{savonius} = Vg \times Ig \quad (3.2)$$

Donde:

$P_{savonius}$ = Potencia del aerogenerador Savonius [W].

V_g = Voltaje producido por el aerogenerador Savonius [V].

I_g = Corriente producida por el aerogenerador Savonius [A].

Dando como resultado:

$$P_{savonius} = V \times A = 6,3 [W]$$

Como prueba de la potencia generada, se dispuso a encender una lampara LED de 3 [W] con un foco LED de igual potencia, usando el aerogenerador, como se observa en la Figura 3-29.



Figura 3-29 Lampara LED encendida con el aerogenerador [autoría propia].

3.1.3 INTEGRACIÓN SISTEMA PIEZO-GENERADOR EOLICO

El sistema en conjunto muestra el voltaje y la corriente, en la Figura 3-30 y Figura 3-31 respectivamente, para formar el total de generación que se muestra en la Tabla 15.

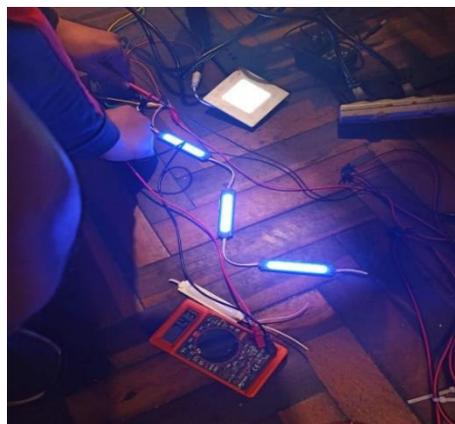


Figura 3-30 Valor del voltaje del sistema en conjunto [autoría propia].



Figura 3-31 Valor de la corriente del sistema en conjunto [autoría propia].

Tabla 15 Valores de voltaje y corriente para el cálculo de potencia en conjunto.

	Voltaje [V]	Corriente [A]
Medición 1	7,43	0,05
Medición 2	7,7	0,048
Medición 3	7,89	0,047
Medición 4	8,01	0,045
Medición 5	8,2	0,044

Para la implementación del control de estados se procede primero a calibrar los sensores de corriente ACS712, con un circuito mostrado en la Figura 3-32, que consta una resistencia y un multímetro para comparar la similitud de mediciones como se muestra en la

Figura 3-33. El código para la calibración consta en el Anexo A-VIII.

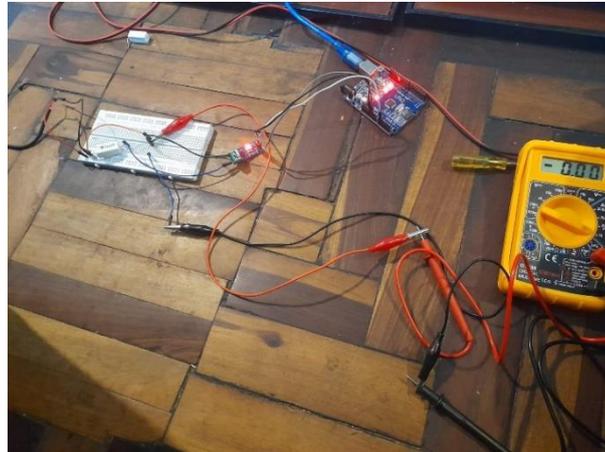


Figura 3-32 Circuito para calibración del sensor de corriente [autoría propia].

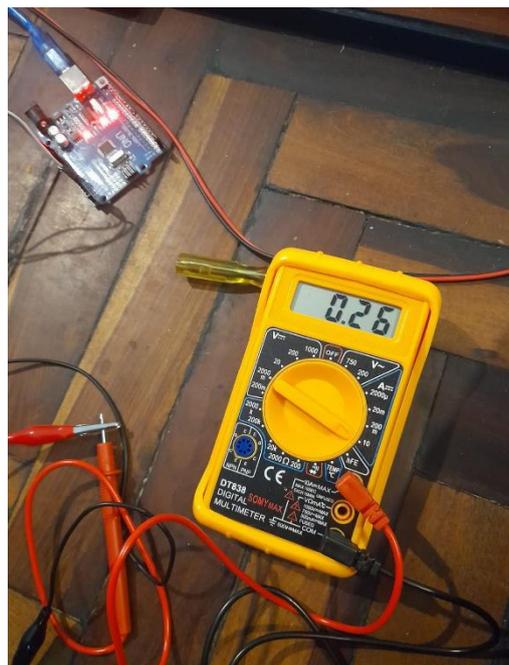


Figura 3-33 Valor del multímetro y el presentado en el programa Arduino [autoría propia].

Inicialmente, dando una corriente ligeramente diferente se procede, como muestra la Figura 3-34, a cambiar el parámetro de sensibilidad del código Arduino para ajustarlo tanto como sea posible.

```

float sensi=0.180,Ig=0,I1=0;
float GCS=0,ICS=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  GCS=analogRead(A0)*(5.0/1023.0);//Generator current sensor
  ICS=analogRead(A1)*(5.0/1023.0);// Inductor current sensor

  Ig=(GCS-2.5)/sensi;//Corriente del generador
  I1=(ICS-2.5)/sensi;//Corriente del inductor

  Serial.print("Ig: ");
  Serial.print(Ig,2);
  Serial.print("    I1: ");
  Serial.println(I1,2);
}

```

Figura 3-34 Calibración de sensibilidad [autoría propia].

Se realiza el mismo proceso con el otro sensor ACS712, obteniendo un valor igual al de un multímetro y determinando que los sensores fueron correctamente calibrados para el control de estados. Posteriormente se realiza la comprobación del PWM del Arduino para una frecuencia de trabajo de 15 [kHz], para así cumplir el correcto desempeño del control de estados. El código de verificación consta en el Anexo A-VIII. Por lo que se dispone del circuito, de la Figura 3-35, que es un LED y un potenciómetro de 10 [kΩ] para poder verificar la relación de trabajo de la onda PWM del microprocesador Arduino, que se expone en las Figura 3-36, Figura 3-37, Figura 3-38, Figura 3-39 y Figura 3-40, respectivamente.

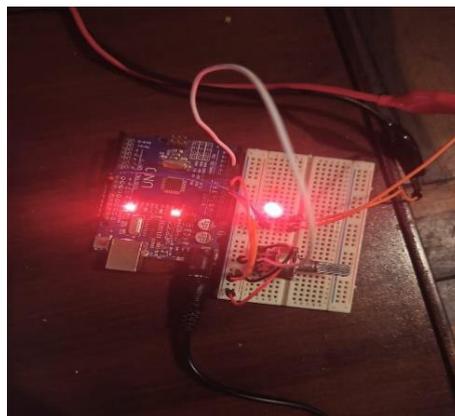


Figura 3-35 Circuito implementado para comprobar la onda PWM [autoría propia].

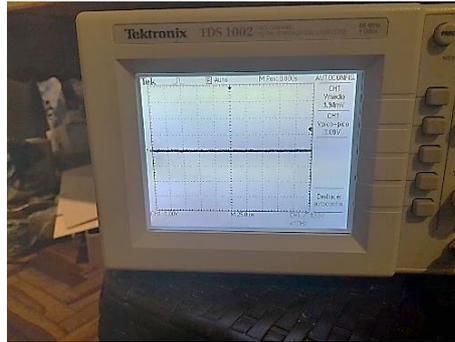


Figura 3-36 Onda PWM con relación de trabajo al 0 % a 15 kHz [autoría propia].

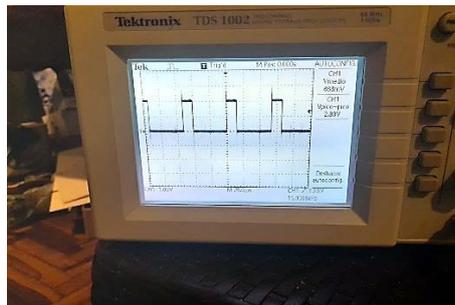


Figura 3-37 Onda PWM con relación de trabajo al 25 % a 15 kHz [autoría propia].

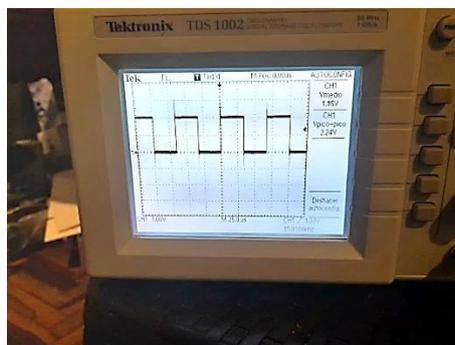


Figura 3-38 Onda PWM con relación de trabajo al 50 % a 15 kHz [autoría propia].

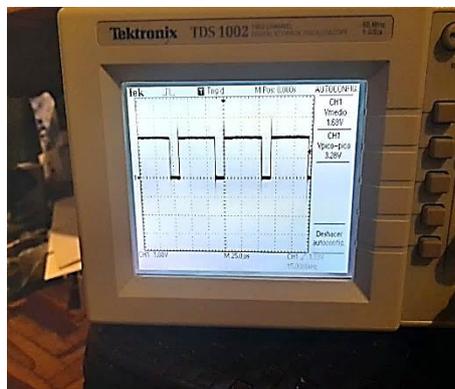


Figura 3-39 Onda PWM con relación de trabajo al 75 % a 15 kHz [autoría propia].

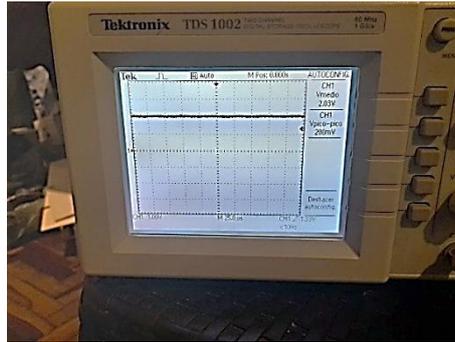


Figura 3-40 Onda PWM con relación de trabajo al 100 % a 15 kHz [autoría propia].

Obteniendo como resultado la señal de PWM regulable y en la frecuencia deseada completando así esta calibración. Como último paso se tiene el disparo de la señal por medio de un optoacoplador y un transistor de campo Mosfet para el manejo y correcto desempeño del control de estados, que se muestra en la Figura 3-41. Por lo que la entrada al sistema corresponde los 12 [V] de generación de ambos sistemas y la salida es la onda PWM con sus relaciones de trabajo, expuestas en las Figura 3-42, Figura 3-43 y Figura 3-44.

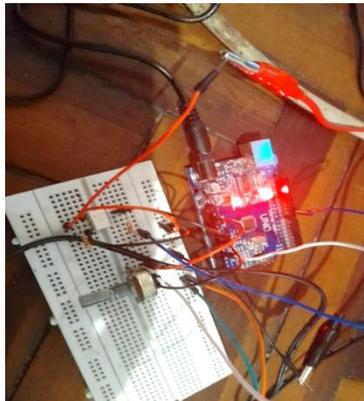


Figura 3-41 Circuito de prueba con el optoacoplador y a generación del sistema [autoría propia].

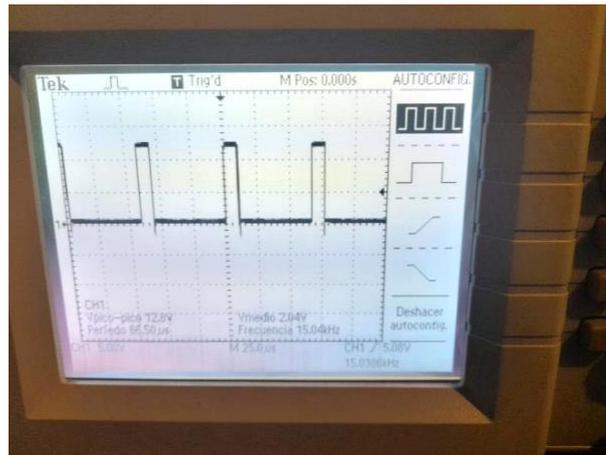


Figura 3-42 Onda PWM con relación de trabajo al 25 % con optoacoplador a 15 kHz y 12 V [autoría propia].

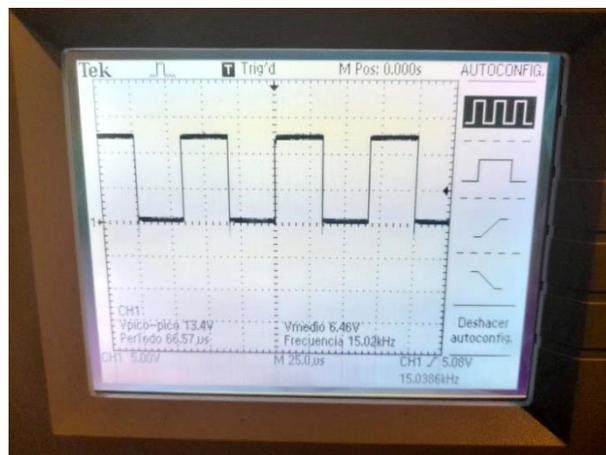


Figura 3-43 Onda PWM con relación de trabajo al 50 % con optoacoplador a 15 kHz y 12 V [autoría propia].

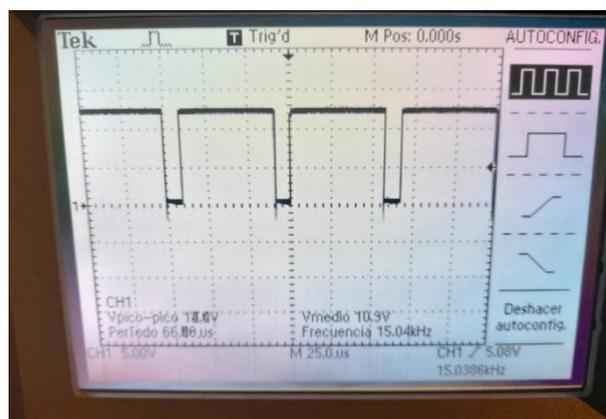


Figura 3-44 Onda PWM con relación de trabajo al 75 % con optoacoplador a 15 kHz y 12 V [autoría propia].

Los resultados muestran un correcto acople y fusión entre el sistema de generación y el sistema PWM. Como muestra la imagen se denota una onda de trenes de pulsos a 15 kHz y 12 V, el cual corresponde al voltaje de generación propuesto.

3.2 Fiabilidad del sistema piezo-generator eólico

Para empezar un análisis de fiabilidad del sistema piezo-generator eólico, es necesario empezar por conocer un lugar de prueba para este mismo, el cual vendría a ser la entrada 5 del Centro Comercial El Recreo, que se observa en la siguiente Figura 3-45. Adicionalmente, para este análisis se usa la tarifa de energía eléctrica del centro comercial la cual es USD 0.095 [kW/h], la cual entra en la categoría de tarifa general para servicio comunitario.



Figura 3-45 Entrada 5 del Centro Comercial el Recreo [autoría propia].

El sistema de generación piezoeléctrico que fue diseñado y construido tiene un área de 0,36 [m²] y contiene 120 unidades de piezoeléctricos, para la entrada 5 del Centro Comercial el Recreo. Esta dispone de 12 [m²] lo cual teóricamente interpreta que se necesitan 34 conjuntos de 4 baldosas piezoeléctricas, y un total de 4080 unidades de piezoeléctricos. Tomando como referencia la Tabla 2, que muestra el costo total para realizar el conjunto de baldosas piezoeléctricas se toma este valor que es igual a: \$ 327 Para fabricar los 34 conjuntos de baldosas piezoeléctricas, que servirán para la generación de energía eléctrica se calcula una inversión aproximada que se muestra en la Tabla 16:

Tabla 16 Proforma para construir 34 conjuntos de baldosas.

Costo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario [\$]	Precio Total [\$]
Material de Conexión (cables, canaletas, rectificadores)	34	U	9.5	323

Proforma para construir un conjunto	34	U	327	11118
Total				11441
Total, a invertir:	\$ 11441			

Considerando que la tarifa del Centro Comercial es de USD 0.095 [kW/h]. La potencia instalada en la entrada del este establecimiento corresponde a 900 [W], también considerando el factor de simultaneidad propuesto por la Empresa Eléctrica Quito de un 90 %, lo que resultarían en un total de 810 [W]. Por lo tanto, el consumo en una hora es 810 [W/h]. Con esta información, la ecuación 3.3 representa el consumo por la tarifa del Centro Comercial y su resultado corresponde a la ecuación 3.4.

$$(810 [wh] \times \$ \left[\frac{0,095}{kwh} \right]) \quad (3.3)$$

$$\left(810[wh] \times \$ \left[\frac{0.095}{kWh} \right] \times 10^{-3} \right) = \$ 0,07695 \quad (3.4)$$

Constituye a un ahorro económico de \$ 0.07695 por hora de funcionamiento. Considerando que el centro comercial funciona los 7 días de la semana con un horario de:

- Lunes a viernes: 10H00 a 21H00.
- Sábado y domingo: 10H00 a 18H00.

Acumulando 11 horas diarias de lunes a viernes y 8 horas diarias en el fin de semana, dando 71 horas semanales y 284 horas al mes. Por lo que se estima un ahorro al mes mostrado en la ecuación 3.5:

$$\left(\frac{\$ 0,07695}{h} \right) \times 284[h] = \$ 21,85 \quad (3.5)$$

Y un ahorro anual equivalente como se muestra en la ecuación 3.6:

$$(\$ 21,85) \times 12 = \$ 262,24 \quad (3.6)$$

Con estos valores es posible estimar el tiempo de recuperación de la inversión como muestra la ecuación 3.7 con lo que se tiene el valor de tiempo de recuperación de la inversión del sistema piezoeléctrico:

$$\text{Tiempo de Recuperacion} = \frac{\text{Inversion Estimada}}{\text{Ahorro anual estimado}} \quad (3.7)$$

$$\text{Tiempo de Recuperacion} = \frac{\$ 11411}{\$ 262,24} = 43,62 \text{ años}$$

El resultado de 43,62 años resulta un tiempo excesivamente alto, por lo que la implementación del sistema aerogenerador eléctrico ayudará a recuperar la inversión más rápido. Teniendo esto en cuenta el costo total de construcción de un aerogenerador Savonius, que fue calculado anteriormente en la Tabla 3, se vuelve a usar y su valor es de USD 395. El Centro Comercial el Recreo posee un área amplia en su terraza lo que hace posible la implementación de 2 aerogeneradores Savonius lo que representa un incremento en la inversión de USD 790.

Total, a invertir incluido aerogenerador **USD 12231**

Tomando que el ahorro económico calculado anteriormente era de USD 0,07695 por hora de funcionamiento y considerando que como el caso anterior el centro Comercial El Recreo funciona 7 días de la semana con el mismo horario visto en el análisis del generador piezoeléctrico. Acumulando igualmente 284 horas al mes por el sistema piezoeléctrico, y por parte del sistema de aerogenerador su principal ventaja es que su funcionamiento es sin horario ni depende de valores externos, por lo que puede teóricamente generar las 24 horas del día. Sin embargo, las ráfagas del viento presentan 2 rangos donde su generación es relativamente confiable y constante dichos rangos son:

- Rango 1: 07H00 hasta las 12H00 (aproximadamente)
- Rango 2: 18H00 hasta las 03H00 (aproximadamente)

Esto permite adicionar 14 horas diarias, 98 a la semana y 392 al mes. De igual forma, al ser 2 aerogeneradores resultan 784 horas, resultando conjuntamente con el sistema piezoeléctrico de 284 horas, resulta en el sistema piezo-aerogenerador con 1068 horas.

$$\left(\frac{\$ 0,07695}{h} \right) \times 1068 [h] = \$ 82,183$$

Y un ahorro anual nuevo del sistema piezo-aerogenerador igual a:

$$(\$ 82,183) \times 12 = \$ 986.2$$

Estos valores permiten estimar el tiempo de recuperación del nuevo sistema piezo-aerogenerador:

$$\textit{Tiempo de Recuperacion} = \frac{\textit{Inversion Estimada}}{\textit{Ahorro anual estimado}}$$

$$\textit{Tiempo de Recuperacion} = \frac{\$ 12231}{\$ 986,2} = 12,402 \text{ [años]}$$

El valor de 12,4 años muestra la reducción considerable del valor de inversión al haberse implementado un sistema de aerogeneradores, esto en la medida que los materiales piezoeléctricos son económicos, pero no producen suficiente energía para recuperar la inversión rápidamente. La vida útil de los sensores piezoeléctricos aproximadamente es de 20 años ya que su desgaste es mínimo, porque están diseñados para soportar altas presiones y pueden funcionar mientras el piezoeléctrico se mantenga completo. La vida útil del aerogenerador se estima en 20 años debido a que no se produce un desgaste mecánico intenso por las bajas presiones de aire a las que se encuentra sometido. El sistema piezo-aerogenerador puede generar un ahorro durante 8 años estimado en USD 7889,6.

4 CONCLUSIONES

- Se demostró que los materiales piezoeléctricos permiten recolectar energía mecánica y, a su vez, transformarla para almacenamiento y posterior uso en un sistema de potencia.
- El sistema de generación piezoeléctrico por sí solo no puede abastecer a cargas muy elevadas, necesita de un generador que brinde soporte por las bajas potencias de generación producidas.
- Es necesario un estudio más detallado para la regulación de energía obtenida por generadores piezoeléctricos ya que las bajas potencias de generación recolectadas se disipan en los componentes de los reguladores utilizados.
- Este proyecto se realiza con la necesidad de conocer el comportamiento del aerogenerador de eje vertical de tipo Savonius, frente a diferentes condiciones de viento en el que se puede conocer su eficiencia, potencia y factibilidad para la construcción y ensamblaje.
- Para la generación de energía eléctrica mediante un aerogenerador se requieren velocidades de 8,4 m/s, con esta velocidad es posible garantizar la continua producción de energía.
- La configuración de los alabes y el traslape variable permiten el mejor rendimiento del sistema de generación. El traslape de 1/4 de distancia es el más eficiente, ya que permite mejor velocidad y torque respecto a las turbulencias generadas por el viento. La configuración de 2 alabes y 2 pisos contribuye al torque a causa del desfase de 90 grados. Con este desfase se maximiza el aprovechamiento del recurso eólico sin importar la dirección de este.
- El aerogenerador Savonius resultó en una gran alternativa para el aprovechamiento de la energía cinética del viento, convirtiéndola en energía eléctrica. Los materiales asequibles pudieron permitir que el torque sea eficiente con bajas velocidades de ráfagas de viento.
- El sistema piezo-aerogeneración demostró su rentabilidad monetaria, además de ser una buena alternativa a las tecnologías de generación convencionales.

5 RECOMENDACIONES

- Es necesario utilizar piezoeléctricos con mejores características de generación de voltaje para obtener valores de potencia de salida más altos y de esta forma reducir el tiempo de recuperación de la inversión.
- Se recomienda conectar a los piezoeléctricos por capas, ya que la producción de energía eléctrica por pisada mejorara considerablemente, al tener un mayor número de piezoeléctricos por baldosa.
- Para mejorar el acoplamiento entre generadores, se recomienda dimensionarlos a valores de potencia de salida que se encuentren en rangos de valores cercanos y así evitar que uno de ellos consuma la potencia del otro generador.
- Es recomendable que para el sistema de aerogeneración se utilice el tipo de eje vertical Darrieus, debido a que este posee una eficiencia y generación de energía más altos que otros tipos de aerogenerador de eje vertical, por lo que podrá producir más potencia con velocidades de viento más bajas.
- Para obtener mejores resultados para el sistema de transmisión de velocidad del aerogenerador se utilicen cajas multiplicadoras, que soporten el torque y la velocidad del diseño, ya que el usar cajas reductoras al sentido contrario daña el eje de alta velocidad destruyendo los engranajes.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Universidad Politécnica de Valencia. (2021, julio 09). Efecto ferroeléctrico [En línea]. Disponible en: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm09/pfcm9_4_1.html (Consultado: sep. 21, 2021)
- [2] EcuRed. (2013, marzo 26). Ferroelectricidad. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Ferroelectricidad> (Consultado: ene. 22, 2022).
- [3] C. Lázaro & O. Tlapa, "Obtención de energía eléctrica por medio de piroelectricidad", Tesis M.S, Instituto Politécnico Nacional, México D. F., México, 2016.
- [4] J. Bolaños, "Diseño, construcción y puesta en operación del prototipo: Sistema de suministro de energía por paneles piezoeléctricos en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, USAC", Tesis M.S, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2016.
- [5] E. Chila & M. Chong, "Diseño sostenible para la eficiencia energética de iluminación utilizando el efecto piezoeléctrico en los bloques FIIC de la ULVR", Tesis M.S, Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2019.
- [6] G. Ayerbe, "Diseño de un sistema de alimentación de un dispositivo portátil por recolección de energía de la pisada," Tesis M.S, Universidad de Zaragoza, Aragón, España, 2019.
- [7] Netinbag. (2021, abril 05). ¿Qué es la Electrostricción?, Disponible en: <https://www.netinbag.com/es/science/what-is-electrostriction.html> (Consultado: ene. 04, 2021).
- [8] D. Askeland & P. Fulay, Ciencia e ingeniería de materiales, (6ta ed.) EUA: Cengage Learnig, 2011.
- [9] A. Gómez, "Diseño de un sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos," Tesis M.S, Universidad de Alcalá, Madrid, España, 2018.
- [10] P. Pérez & A. Velázquez, "Diseño e implementación de un generador piezoeléctrico baldosa, para alimentar un sistema de iluminación de baja potencia", Tesis M.S, México D.F, México, 2016.
- [11] F. and F. C. S. Standards Committee of the IEEE Ultrasonics, "IEEE Standard on Piezoelectricity," 1987.
- [12] A. J. Moulson & J. M. Herbert. Electroceramics. Wiley, Inglaterra, 2003.
- [13] I. Huilca & N. Mayor, "Simulación de un sistema energy harvesting utilizando material piezoeléctrico para la estación norte de la Metrovía," Tesis M.S, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2018.
- [14] V. Merino, "Análisis de la operación y desempeño de un sistema de generación de energía con la utilización de baldosas piezoeléctricas", Tesis M.S, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, 2013.

- [15] Universidad del País Vasco. (2019, mayo 01) Isotropía y anisotropía. Disponible en: <http://www.ehu.es/mineralogiaoptica/isotropia-y-anisotropia-optica-indicatric.html> (Consultado: nov. 06, 2021).
- [16] Beijing Ultrasonic, (2021, mayo 15) Piezoelectricidad en el hueso - Efecto piezoeléctrico y densidad ósea. Disponible en: <https://www.bjultrasonic.com/es/piezoelectricity-in-bone/> (Consultado: ene. 22, 2022).
- [17] Beijing Ultrasonic, (2021, mayo 11) Piezoelectricidad y lista de materiales. Disponible en: <https://www.bjultrasonic.com/es/all-about-piezoelectric-materials/> (Consultado: ene. 22, 2022).
- [18] A. Othman, "Modeling of Piezoelectric Energy Harvesting System Embedded in Soldier's boot Using Matlab/Simulink", en Modeling of Piezoelectric Energy Harvesting System Embedded in Soldier's boot Using Matlab/Simulink, EUA, 2017, pp. 767–792.
- [19] A. Ballato, Piezoelectricity: Venerable Effect, Modern Thrust. Vol. ARL-TR-70. Adelphi, Maryland, 1994.
- [20] D. Tamayo & N. Cardozo, "El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible como proyecto piloto en un perfil vial de Bogotá", Universidad Católica de Colombia," Tesis, M.S, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017.
- [21] El Comercio (2009, noviembre 22) Un sistema obtiene energía de las olas [En línea]. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/actualidad/sistema-obtiene-energia-olas.html> (Consultado: ene. 29, 2022)
- [22] J. Hidalgo, C. Jaramillo, and M. Padilla, "Diseño, implementación, y, evaluación del desempeño de una estación de aeróbicos para harvesting de energía, utilizando efecto piezoeléctrico", Tesis, M.S, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, 2013.
- [23] A. Malmcrona, "Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía", Tesis, M.S, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2018.
- [24] C. Lesmes, J. Cuervo, & D, Juez, "Generadores Piezoeléctricos como Alternativa Energética: Evaluación de Factibilidad en la Implementación en Vías en Ciudades Intermedias," Tesis, M.S, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, Tunja, Colombia, 2020.
- [25] L. Arbeloa. & J. Zurita, "Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural," Tesis, M.S, Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales y De Telecomunicación, Navarra, España 2012.
- [26] E. Hernández, "Diseño y Construcción de un modelo de rotor eólico de eje vertical tipo Savonius para la obtención de energía Mecánica," Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería Medellín, Medellín, Colombia, 2012.
- [27] R. Tolosa & O, Alcir de Faro, Aerogeneración de Energía. pp. 15–23, 1981.

- [28] L. Ching & A. Figueroa, "Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical para un sistema de iluminación de emergencia con luces LED," Tesis, M.S, Universidad Católica De Santiago De Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [29] D. Vidal, "Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico," Tesis, M.S. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño Valencia, Valencia, España, 2019.
- [30] A. Cuesta, "Diseño y Construcción De Un Generador Eólico Tipo Savonius De Eje Vertical" Tesis, M.S, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores Monterrey, Monterrey, México, 2011.
- [31] L. Cueva, "Diseño y Construcción de un generador eólico de eje vertical tipo Savonius para producir 20 Watts", Tesis, M.S, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2015.
- [32] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, (5ta ed.). Madrid, España: Editorial Pearson, 2010.
- [33] T. Flores, J. Estévez, J. Días, R. Senén, & J. Pérez, "Análisis y diseño de un convertidor Buck-Boost" Tesis, M.S, Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México, 2019.
- [34] Y. Soto & B. Ríos, "Control por Realimentación de salidas de un convertidor DC-DC tipo Buck Boost", Tesis, M.S, Universidad de los Andes, Venezuela, 2008.
- [35] H. Ospina, "Análisis de Controladores no lineales para convertidor DC-DC tipo Buck-Boost aplicado a un generador eólico", Tesis, M.S, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2019.
- [36] A. Arriagada, "Evaluación de Confiabilidad en Sistemas Eléctricos de Distribución," Tesis, M.S, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 1994.
- [37] M. Mayordomo, "Análisis de la fiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores", Tesis, M.S, Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales, Valladolid, España, 2015.
- [38] M. Villarrubia, Ingeniería de la Energía Eólica. Marcombo, Barcelona, España, 2005.
- [39] DatosMundial, (2019, enero 01) Altura y peso medio por país, Disponible en: <https://www.datosmundial.com/estatura-promedio.php> (Consultado: abr. 05, 2022).
- [40] D. Zapata & G. Bustamante, "Análisis de viabilidad para desarrollo de prototipo de acera que produce electricidad", Tesis, M.S, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia, 2012.
- [41] M. Núñez, "Aprovechamiento de la tecnología piezoeléctrica para la generación de energía en la pista de baile de la discoteca La Cayet - Distrito de Soritor - Departamento de San Martín", Tesis, M.S, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú, 2018.

- [42] M. Johnson, (2022, marzo 05) Piezoelectric ceramics. Disponible en: <https://www.piezoproducts.com/products-solutions/piezo-ceramics/> (Consultado: may. 03, 2022).
- [43] Murata Manufacturing, Piezoelectric Sound Components, Kyoto, Japón, 2001, [Online]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/documents/datasheets/PIEZO-PKM22EPPH4001-BO.pdf> (Consultado: may. 04, 2022)
- [44] J. Pilicita, “Análisis comparativo del nivel de energía eléctrica producida por baldosas piezoeléctricas en función de su forma geométrica en la Universidad Técnica de Cotopaxi”, Tesis, M.S Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2020.
- [45] Unit Electronics, (2022, abril 06) Puente Rectificador 2W10 1000V 2A. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/puente-rectificador-2w10-1000v-2a/> (Consultado: ene. 03, 2022).
- [46] L. Boylestad & N. Nashelsky, Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. (10ma ed.) EUA, Prentice Hall., 2009.
- [47] J. Suarez & O. Orduz, “Diseño y construcción de un prototipo de Turbina Eólica de eje vertical para generación a baja potencia”, Tesis, M.S, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2011.
- [48] J. Barzola, “Construcción de un prototipo de generador eólico de baja potencia con eje vertical en el edificio de la carrera de electricidad de la universidad técnica del Norte”, Tesis, M.S, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, 2021.
- [49] F. De and R. de Tesis. Repositorio Nacional en Ciencia y Tecnología.
- [50] Torraspapel. (2015, enero 01). Cartopack. Cartón Gris Contracolado. [En línea]. Disponible en: <https://www.torrasdistribucion.com/FichasTecnicas/TechnicalSheetCartopack.pdf> (Consultado: mar. 05, 2022).
- [51] Conocimientos Web. (2013, octubre 01). Características del foami. [Online]. Disponible en: <https://conocimientosweb.net/descargas/article1041.html> (Consultado: mar. 06, 2022).

7 ANEXOS

A continuación, se muestran los anexos mencionados a lo largo del escrito:

7.1 Anexo A-I Registro de datos eólicos en el periodo estudiado

Día	Mes	Año	Hora	Velocidad	Dirección
1/	2/	2021	0:00:00	10,8	171
1/	2/	2021	1:00:00	10,9	175
1/	2/	2021	2:00:00	12,1	185
1/	2/	2021	3:00:00	12,4	185
1/	2/	2021	4:00:00	12,6	189
1/	2/	2021	5:00:00	12,3	192
1/	2/	2021	6:00:00	11,3	197
1/	2/	2021	7:00:00	9,8	203
1/	2/	2021	8:00:00	9,9	202
1/	2/	2021	9:00:00	11,3	207
1/	2/	2021	10:00:00	12,7	206
1/	2/	2021	11:00:00	12	214
1/	2/	2021	12:00:00	11,2	230
1/	2/	2021	13:00:00	8,8	233
1/	2/	2021	14:00:00	7,9	237
1/	2/	2021	15:00:00	6,6	239
1/	2/	2021	16:00:00	6,3	193
1/	2/	2021	17:00:00	7,8	187
1/	2/	2021	18:00:00	7,3	194
1/	2/	2021	19:00:00	6,5	183
1/	2/	2021	20:00:00	6,8	164
1/	2/	2021	21:00:00	7,8	160
1/	2/	2021	22:00:00	8,3	152
1/	2/	2021	23:00:00	8,6	145

2/	2/	2021	0:00:00	7,7	153
2/	2/	2021	1:00:00	5,6	167
2/	2/	2021	2:00:00	2,9	166
2/	2/	2021	3:00:00	2,7	51
2/	2/	2021	4:00:00	7,9	357
2/	2/	2021	5:00:00	8,5	14
2/	2/	2021	6:00:00	9,1	27
2/	2/	2021	7:00:00	8,5	35
2/	2/	2021	8:00:00	8	46
2/	2/	2021	9:00:00	6,7	45
2/	2/	2021	10:00:00	6,3	41
2/	2/	2021	11:00:00	4,7	28
2/	2/	2021	12:00:00	5	33
2/	2/	2021	13:00:00	4,6	36
2/	2/	2021	14:00:00	5,6	45
2/	2/	2021	15:00:00	3,3	32
2/	2/	2021	16:00:00	2,5	330
2/	2/	2021	17:00:00	2,7	317
2/	2/	2021	18:00:00	3,3	307
2/	2/	2021	19:00:00	4,3	299
2/	2/	2021	20:00:00	4,4	290
2/	2/	2021	21:00:00	3,5	280
2/	2/	2021	22:00:00	3,9	262
2/	2/	2021	23:00:00	5,8	241
3/	2/	2021	0:00:00	6,9	231
3/	2/	2021	1:00:00	8,3	225
3/	2/	2021	2:00:00	9,9	240
3/	2/	2021	3:00:00	11,1	249
3/	2/	2021	4:00:00	12,8	250

3/	2/	2021	5:00:00	12,1	253
3/	2/	2021	6:00:00	11,8	255
3/	2/	2021	7:00:00	11,9	258
3/	2/	2021	8:00:00	11,9	260
3/	2/	2021	9:00:00	11,4	257
3/	2/	2021	10:00:00	11,3	253
3/	2/	2021	11:00:00	11,3	252
3/	2/	2021	12:00:00	13,4	248
3/	2/	2021	13:00:00	14,6	242
3/	2/	2021	14:00:00	14,7	237
3/	2/	2021	15:00:00	15	235
3/	2/	2021	16:00:00	14,9	240
3/	2/	2021	17:00:00	13,7	237
3/	2/	2021	18:00:00	11,9	239
3/	2/	2021	19:00:00	9,3	236
3/	2/	2021	20:00:00	9,1	230
3/	2/	2021	21:00:00	10	227
3/	2/	2021	22:00:00	11,6	218
3/	2/	2021	23:00:00	8,8	213
4/	2/	2021	0:00:00	9,5	232
4/	2/	2021	1:00:00	10,9	242
4/	2/	2021	2:00:00	9,8	254
4/	2/	2021	3:00:00	8,9	275
4/	2/	2021	4:00:00	9,3	303
4/	2/	2021	5:00:00	10	337
4/	2/	2021	6:00:00	10,5	16
4/	2/	2021	7:00:00	11,2	23
4/	2/	2021	8:00:00	10,4	24
4/	2/	2021	9:00:00	8,6	29

4/	2/	2021	10:00:00	9	30
4/	2/	2021	11:00:00	9,6	45
4/	2/	2021	12:00:00	7,3	53
4/	2/	2021	13:00:00	6,1	50
4/	2/	2021	14:00:00	5,4	46
4/	2/	2021	15:00:00	5,2	46
4/	2/	2021	16:00:00	4,1	46
4/	2/	2021	17:00:00	2,7	55
4/	2/	2021	18:00:00	1,3	64
4/	2/	2021	19:00:00	1,1	49
4/	2/	2021	20:00:00	0,7	90
4/	2/	2021	21:00:00	1,8	146
4/	2/	2021	22:00:00	4	177
4/	2/	2021	23:00:00	5,6	178
5/	2/	2021	0:00:00	7,6	181
5/	2/	2021	1:00:00	10,7	191
5/	2/	2021	2:00:00	12,6	203
5/	2/	2021	3:00:00	13,3	213
5/	2/	2021	4:00:00	13	220
5/	2/	2021	5:00:00	10,2	225
5/	2/	2021	6:00:00	10,1	235
5/	2/	2021	7:00:00	11,2	237
5/	2/	2021	8:00:00	9,4	230
5/	2/	2021	9:00:00	7,9	237
5/	2/	2021	10:00:00	5	254
5/	2/	2021	11:00:00	3	322
5/	2/	2021	12:00:00	3,1	14
5/	2/	2021	13:00:00	4,9	32
5/	2/	2021	14:00:00	4,7	50

5/	2/	2021	15:00:00	5,1	73
5/	2/	2021	16:00:00	5,7	111
5/	2/	2021	17:00:00	6,8	135
5/	2/	2021	18:00:00	7	148
5/	2/	2021	19:00:00	6,7	141
5/	2/	2021	20:00:00	8,1	143
5/	2/	2021	21:00:00	8,4	147
5/	2/	2021	22:00:00	9	153
5/	2/	2021	23:00:00	10,3	164
6/	2/	2021	0:00:00	10,1	168
6/	2/	2021	1:00:00	9	179
6/	2/	2021	2:00:00	11,5	191
6/	2/	2021	3:00:00	12	191
6/	2/	2021	4:00:00	10,6	193
6/	2/	2021	5:00:00	11,1	207
6/	2/	2021	6:00:00	10,9	212
6/	2/	2021	7:00:00	10,9	214
6/	2/	2021	8:00:00	10,7	209
6/	2/	2021	9:00:00	11	214
6/	2/	2021	10:00:00	10	210
6/	2/	2021	11:00:00	9,8	214
6/	2/	2021	12:00:00	10,8	221
6/	2/	2021	13:00:00	11,3	228
6/	2/	2021	14:00:00	11,6	237
6/	2/	2021	15:00:00	12,4	243
6/	2/	2021	16:00:00	13,2	244
6/	2/	2021	17:00:00	12,4	245
6/	2/	2021	18:00:00	10,5	250
6/	2/	2021	19:00:00	8,9	246

6/	2/	2021	20:00:00	10,7	230
6/	2/	2021	21:00:00	12,3	220
6/	2/	2021	22:00:00	11,5	215
6/	2/	2021	23:00:00	10	223
7/	2/	2021	0:00:00	9,7	236
7/	2/	2021	1:00:00	8,1	238
7/	2/	2021	2:00:00	8,1	256
7/	2/	2021	3:00:00	9,3	349
7/	2/	2021	4:00:00	11,1	11
7/	2/	2021	5:00:00	14,6	16
7/	2/	2021	6:00:00	16,6	24
7/	2/	2021	7:00:00	14,7	25
7/	2/	2021	8:00:00	12,3	24
7/	2/	2021	9:00:00	13,6	27
7/	2/	2021	10:00:00	15,3	30
7/	2/	2021	11:00:00	14,9	34
7/	2/	2021	12:00:00	14,3	37
7/	2/	2021	13:00:00	14,3	43
7/	2/	2021	14:00:00	14,9	48
7/	2/	2021	15:00:00	12,9	52
7/	2/	2021	16:00:00	10,4	55
7/	2/	2021	17:00:00	9,8	53
7/	2/	2021	18:00:00	8	52
7/	2/	2021	19:00:00	7,7	50
7/	2/	2021	20:00:00	7,9	46
7/	2/	2021	21:00:00	5,6	56
7/	2/	2021	22:00:00	4,1	72
7/	2/	2021	23:00:00	4,7	89
8/	2/	2021	0:00:00	4	106

8/	2/	2021	1:00:00	4,1	126
8/	2/	2021	2:00:00	5,6	148
8/	2/	2021	3:00:00	5,6	166
8/	2/	2021	4:00:00	6,4	175
8/	2/	2021	5:00:00	7,8	183
8/	2/	2021	6:00:00	7,7	180
8/	2/	2021	7:00:00	8,2	196
8/	2/	2021	8:00:00	9,5	203
8/	2/	2021	9:00:00	9,8	207
8/	2/	2021	10:00:00	8,5	197
8/	2/	2021	11:00:00	8,7	195
8/	2/	2021	12:00:00	9,9	199
8/	2/	2021	13:00:00	10	200
8/	2/	2021	14:00:00	10,7	208
8/	2/	2021	15:00:00	10,9	208
8/	2/	2021	16:00:00	10,4	197
8/	2/	2021	17:00:00	10,6	198
8/	2/	2021	18:00:00	9,9	197
8/	2/	2021	19:00:00	9,5	196
8/	2/	2021	20:00:00	10,7	188
8/	2/	2021	21:00:00	11,4	192
8/	2/	2021	22:00:00	13,2	195
8/	2/	2021	23:00:00	13,4	199
9/	2/	2021	0:00:00	13,1	200
9/	2/	2021	1:00:00	13,1	195
9/	2/	2021	2:00:00	12,8	189
9/	2/	2021	3:00:00	13,5	192
9/	2/	2021	4:00:00	14,4	196
9/	2/	2021	5:00:00	13,8	190

9/	2/	2021	6:00:00	14	190
9/	2/	2021	7:00:00	12,8	189
9/	2/	2021	8:00:00	12,8	192
9/	2/	2021	9:00:00	13,4	192
9/	2/	2021	10:00:00	14,5	195
9/	2/	2021	11:00:00	14,8	200
9/	2/	2021	12:00:00	14,7	202
9/	2/	2021	13:00:00	15,9	210
9/	2/	2021	14:00:00	15,3	209
9/	2/	2021	15:00:00	15,1	205
9/	2/	2021	16:00:00	15,9	195
9/	2/	2021	17:00:00	17,7	195
9/	2/	2021	18:00:00	16,8	190
9/	2/	2021	19:00:00	14,3	192
9/	2/	2021	20:00:00	11,2	209
9/	2/	2021	21:00:00	11,4	276
9/	2/	2021	22:00:00	9	278
9/	2/	2021	23:00:00	10	279
10	/2	/2021	0:00:00	12,4	274
10	/2	/2021	1:00:00	12,8	284
10	/2	/2021	2:00:00	16,1	294
10	/2	/2021	3:00:00	16,7	297
10	/2	/2021	4:00:00	15	292
10	/2	/2021	5:00:00	15,7	300
10	/2	/2021	6:00:00	13	301
10	/2	/2021	7:00:00	11,4	301
10	/2	/2021	8:00:00	10,7	304
10	/2	/2021	9:00:00	11,3	309
10	/2	/2021	10:00:00	10,6	326

10	/2	/2021	11:00:00	10,5	338
10	/2	/2021	12:00:00	9,7	2
10	/2	/2021	13:00:00	8	2
10	/2	/2021	14:00:00	6,1	13
10	/2	/2021	15:00:00	6,1	14
10	/2	/2021	16:00:00	6,5	7
10	/2	/2021	17:00:00	6,1	22
10	/2	/2021	18:00:00	5,7	45
10	/2	/2021	19:00:00	5,5	56
10	/2	/2021	20:00:00	4,8	68
10	/2	/2021	21:00:00	5,4	77
10	/2	/2021	22:00:00	6,9	90
10	/2	/2021	23:00:00	7,5	99
11	/2	/2021	0:00:00	8,2	99
11	/2	/2021	1:00:00	8	108
11	/2	/2021	2:00:00	7,9	106
11	/2	/2021	3:00:00	8,2	98
11	/2	/2021	4:00:00	7,3	88
11	/2	/2021	5:00:00	7,1	84
11	/2	/2021	6:00:00	7,5	93
11	/2	/2021	7:00:00	7,2	101
11	/2	/2021	8:00:00	6,2	114
11	/2	/2021	9:00:00	5,7	116
11	/2	/2021	10:00:00	4,3	100
11	/2	/2021	11:00:00	5,2	106
11	/2	/2021	12:00:00	5,4	125
11	/2	/2021	13:00:00	4,9	137
11	/2	/2021	14:00:00	4,9	146
11	/2	/2021	15:00:00	4,7	144

11	/2	/2021	16:00:00	4,4	152
11	/2	/2021	17:00:00	5,2	162
11	/2	/2021	18:00:00	6,5	157
11	/2	/2021	19:00:00	6,5	157
11	/2	/2021	20:00:00	6,6	154
11	/2	/2021	21:00:00	6,3	162
11	/2	/2021	22:00:00	7,8	139
11	/2	/2021	23:00:00	8,8	126
12	/2	/2021	0:00:00	7,8	125
12	/2	/2021	1:00:00	6,4	105
12	/2	/2021	2:00:00	5,8	81
12	/2	/2021	3:00:00	6,9	104
12	/2	/2021	4:00:00	5,9	87
12	/2	/2021	5:00:00	7,5	49
12	/2	/2021	6:00:00	7,1	82
12	/2	/2021	7:00:00	6,7	76
12	/2	/2021	8:00:00	8,3	93
12	/2	/2021	9:00:00	8,5	117
12	/2	/2021	10:00:00	8,3	113
12	/2	/2021	11:00:00	7,1	90
12	/2	/2021	12:00:00	4,9	65
12	/2	/2021	13:00:00	5,9	39
12	/2	/2021	14:00:00	6,5	25
12	/2	/2021	15:00:00	6,5	22
12	/2	/2021	16:00:00	6,1	22
12	/2	/2021	17:00:00	5,6	22
12	/2	/2021	18:00:00	5,3	22
12	/2	/2021	19:00:00	5,4	22
12	/2	/2021	20:00:00	4,4	22

12	/2	/2021	21:00:00	4,6	22
12	/2	/2021	22:00:00	6,5	22
12	/2	/2021	23:00:00	7	315
13	/2	/2021	0:00:00	7,7	295
13	/2	/2021	1:00:00	9,4	294
13	/2	/2021	2:00:00	10,3	301
13	/2	/2021	3:00:00	10,5	307
13	/2	/2021	4:00:00	9,5	308
13	/2	/2021	5:00:00	9	308
13	/2	/2021	6:00:00	9,4	311
13	/2	/2021	7:00:00	9,1	310
13	/2	/2021	8:00:00	8	313
13	/2	/2021	9:00:00	6,8	326
13	/2	/2021	10:00:00	5,9	331
13	/2	/2021	11:00:00	5,2	327
13	/2	/2021	12:00:00	4,6	328
13	/2	/2021	13:00:00	3,5	331
13	/2	/2021	14:00:00	2,4	325
13	/2	/2021	15:00:00	2,2	290
13	/2	/2021	16:00:00	3,9	251
13	/2	/2021	17:00:00	4	242
13	/2	/2021	18:00:00	4,5	245
13	/2	/2021	19:00:00	4,9	230
13	/2	/2021	20:00:00	3,6	209
13	/2	/2021	21:00:00	6,6	216
13	/2	/2021	22:00:00	6,9	221
13	/2	/2021	23:00:00	6,5	227
14	/2	/2021	0:00:00	6,4	231
14	/2	/2021	1:00:00	7,1	234

14	/2	/2021	2:00:00	6,2	231
14	/2	/2021	3:00:00	3,9	229
14	/2	/2021	4:00:00	0,7	
14	/2	/2021	5:00:00	1,3	223
14	/2	/2021	6:00:00	3	309
14	/2	/2021	7:00:00	6,3	21
14	/2	/2021	8:00:00	4,7	30
14	/2	/2021	9:00:00	5	45
14	/2	/2021	10:00:00	5,8	41
14	/2	/2021	11:00:00	4,5	54
14	/2	/2021	12:00:00	4,5	47
14	/2	/2021	13:00:00	3,7	52
14	/2	/2021	14:00:00	3,5	58
14	/2	/2021	15:00:00	3,8	65
14	/2	/2021	16:00:00	4,9	61
14	/2	/2021	17:00:00	5,5	64
14	/2	/2021	18:00:00	5,1	68
14	/2	/2021	19:00:00	6,5	64
14	/2	/2021	20:00:00	6,9	66
14	/2	/2021	21:00:00	6,5	64
14	/2	/2021	22:00:00	6,9	65
14	/2	/2021	23:00:00	8,2	57
15	/2	/2021	0:00:00	9,3	58
15	/2	/2021	1:00:00	9,3	51
15	/2	/2021	2:00:00	9,7	53
15	/2	/2021	3:00:00	8,4	54
15	/2	/2021	4:00:00	8,3	48
15	/2	/2021	5:00:00	7,4	52
15	/2	/2021	6:00:00	6,7	43

15	/2	/2021	7:00:00	4,8	51
15	/2	/2021	8:00:00	4,4	31
15	/2	/2021	9:00:00	4,7	43
15	/2	/2021	10:00:00	3,3	68
15	/2	/2021	11:00:00	2,7	79
15	/2	/2021	12:00:00	1,8	97
15	/2	/2021	13:00:00	1,5	105
15	/2	/2021	14:00:00	1,9	162
15	/2	/2021	15:00:00	4,7	271
15	/2	/2021	16:00:00	5,4	261
15	/2	/2021	17:00:00	5,4	264
15	/2	/2021	18:00:00	5,3	256
15	/2	/2021	19:00:00	5	251
15	/2	/2021	20:00:00	7,9	245
15	/2	/2021	21:00:00	4,7	276
15	/2	/2021	22:00:00	2,1	306
15	/2	/2021	23:00:00	6,6	36
16	/2	/2021	0:00:00	6,9	44
16	/2	/2021	1:00:00	5,8	49
16	/2	/2021	2:00:00	4,4	55
16	/2	/2021	3:00:00	5,4	38
16	/2	/2021	4:00:00	4	1
16	/2	/2021	5:00:00	5,3	326
16	/2	/2021	6:00:00	6,3	314
16	/2	/2021	7:00:00	6	306
16	/2	/2021	8:00:00	6,4	298
16	/2	/2021	9:00:00	8,8	295
16	/2	/2021	10:00:00	6,3	276
16	/2	/2021	11:00:00	9,6	283

16	/2	/2021	12:00:00	12,1	291
16	/2	/2021	13:00:00	10,3	296
16	/2	/2021	14:00:00	6,6	297
16	/2	/2021	15:00:00	5,3	290
16	/2	/2021	16:00:00	4,6	287
16	/2	/2021	17:00:00	6,1	263
16	/2	/2021	18:00:00	6,6	257
16	/2	/2021	19:00:00	6,7	247
16	/2	/2021	20:00:00	7,5	234
16	/2	/2021	21:00:00	8,3	228
16	/2	/2021	22:00:00	8,8	223
16	/2	/2021	23:00:00	10,4	218
17	/2	/2021	0:00:00	11,2	222
17	/2	/2021	1:00:00	10,9	218
17	/2	/2021	2:00:00	10,2	226
17	/2	/2021	3:00:00	10,7	233
17	/2	/2021	4:00:00	11,1	246
17	/2	/2021	5:00:00	8,8	247
17	/2	/2021	6:00:00	8,4	255
17	/2	/2021	7:00:00	8,1	303
17	/2	/2021	8:00:00	7	322
17	/2	/2021	9:00:00	5,4	324
17	/2	/2021	10:00:00	4	307
17	/2	/2021	11:00:00	3,6	296
17	/2	/2021	12:00:00	4	290
17	/2	/2021	13:00:00	4,3	264
17	/2	/2021	14:00:00	5,4	242
17	/2	/2021	15:00:00	8,2	246
17	/2	/2021	16:00:00	8,2	246

17	/2	/2021	17:00:00	8,5	246
17	/2	/2021	18:00:00	6,8	254
17	/2	/2021	19:00:00	11	250
17	/2	/2021	20:00:00	13,3	248
17	/2	/2021	21:00:00	13,3	236
17	/2	/2021	22:00:00	12,5	231
17	/2	/2021	23:00:00	14,6	227
18	/2	/2021	0:00:00	14,1	226
18	/2	/2021	1:00:00	12,9	244
18	/2	/2021	2:00:00	11,6	257
18	/2	/2021	3:00:00	14	269
18	/2	/2021	4:00:00	12,9	286
18	/2	/2021	5:00:00	11,4	358
18	/2	/2021	6:00:00	11,6	12
18	/2	/2021	7:00:00	12,5	16
18	/2	/2021	8:00:00	11,6	22
18	/2	/2021	9:00:00	12,1	21
18	/2	/2021	10:00:00	14,5	24
18	/2	/2021	11:00:00	16,5	24
18	/2	/2021	12:00:00	14,3	23
18	/2	/2021	13:00:00	13,4	25
18	/2	/2021	14:00:00	13,1	28
18	/2	/2021	15:00:00	11,6	22
18	/2	/2021	16:00:00	11,4	21
18	/2	/2021	17:00:00	11,2	21
18	/2	/2021	18:00:00	10,2	21
18	/2	/2021	19:00:00	8,2	22
18	/2	/2021	20:00:00	5,4	17
18	/2	/2021	21:00:00	3,5	23

18	/2	/2021	22:00:00	2,5	55
18	/2	/2021	23:00:00	4	113
19	/2	/2021	0:00:00	5,3	136
19	/2	/2021	1:00:00	5,6	158
19	/2	/2021	2:00:00	4,9	164
19	/2	/2021	3:00:00	5,3	163
19	/2	/2021	4:00:00	5,8	171
19	/2	/2021	5:00:00	7,4	183
19	/2	/2021	6:00:00	7,8	199
19	/2	/2021	7:00:00	8,1	211
19	/2	/2021	8:00:00	8,7	207
19	/2	/2021	9:00:00	9,7	202
19	/2	/2021	10:00:00	8,5	192
19	/2	/2021	11:00:00	10,6	194
19	/2	/2021	12:00:00	11,1	199
19	/2	/2021	13:00:00	11,3	200
19	/2	/2021	14:00:00	11,4	202
19	/2	/2021	15:00:00	10,7	192
19	/2	/2021	16:00:00	12,2	189
19	/2	/2021	17:00:00	12,7	187
19	/2	/2021	18:00:00	13,3	184
19	/2	/2021	19:00:00	13,2	184
19	/2	/2021	20:00:00	11,5	181
19	/2	/2021	21:00:00	11,7	176
19	/2	/2021	22:00:00	13,5	176
19	/2	/2021	23:00:00	14	178
20	/2	/2021	0:00:00	15	184
20	/2	/2021	1:00:00	13,8	189
20	/2	/2021	2:00:00	11,6	183

20	/2	/2021	3:00:00	14,1	193
20	/2	/2021	4:00:00	15,5	192
20	/2	/2021	5:00:00	14,7	193
20	/2	/2021	6:00:00	15,1	194
20	/2	/2021	7:00:00	17	196
20	/2	/2021	8:00:00	15,6	191
20	/2	/2021	9:00:00	15,3	192
20	/2	/2021	10:00:00	15,6	192
20	/2	/2021	11:00:00	16	190
20	/2	/2021	12:00:00	17	186
20	/2	/2021	13:00:00	17,4	184
20	/2	/2021	14:00:00	16,9	184
20	/2	/2021	15:00:00	15,7	177
20	/2	/2021	16:00:00	16	176
20	/2	/2021	17:00:00	15,3	173
20	/2	/2021	18:00:00	14,1	172
20	/2	/2021	19:00:00	13,9	168
20	/2	/2021	20:00:00	13,6	166
20	/2	/2021	21:00:00	13,7	163
20	/2	/2021	22:00:00	14	167
20	/2	/2021	23:00:00	11,9	167
21	/2	/2021	0:00:00	8,1	167
21	/2	/2021	1:00:00	0,7	203
21	/2	/2021	2:00:00	8,8	178
21	/2	/2021	3:00:00	5,8	119
21	/2	/2021	4:00:00	10,0	138
21	/2	/2021	5:00:00	3,1	55
21	/2	/2021	6:00:00	10,2	86
21	/2	/2021	7:00:00	4,2	166

21	/2	/2021	8:00:00	4,3	71
21	/2	/2021	9:00:00	11,0	39
21	/2	/2021	10:00:00	6,5	218
21	/2	/2021	11:00:00	10,8	203
21	/2	/2021	12:00:00	3,6	75
21	/2	/2021	13:00:00	10,0	241
21	/2	/2021	14:00:00	3,7	65
21	/2	/2021	15:00:00	5,4	132
21	/2	/2021	16:00:00	7,8	127
21	/2	/2021	17:00:00	7,4	90
21	/2	/2021	18:00:00	10,7	118
21	/2	/2021	19:00:00	6,0	115
21	/2	/2021	20:00:00	7,3	186
21	/2	/2021	21:00:00	4,5	219
21	/2	/2021	22:00:00	7,6	188
21	/2	/2021	23:00:00	3,1	93
22	/2	/2021	0:00:00	5,9	225
22	/2	/2021	1:00:00	6,0	32
22	/2	/2021	2:00:00	7,2	220
22	/2	/2021	3:00:00	11,5	107
22	/2	/2021	4:00:00	11,1	44
22	/2	/2021	5:00:00	11,7	32
22	/2	/2021	6:00:00	6,0	179
22	/2	/2021	7:00:00	6,9	84
22	/2	/2021	8:00:00	4,3	128
22	/2	/2021	9:00:00	8,9	65
22	/2	/2021	10:00:00	4,8	65
22	/2	/2021	11:00:00	3,9	152
22	/2	/2021	12:00:00	1	6

22	/2	/2021	13:00:00	0,7	129
22	/2	/2021	14:00:00	0,5	100
22	/2	/2021	15:00:00	0,8	317
22	/2	/2021	16:00:00	1,3	150
22	/2	/2021	17:00:00	1,8	145
22	/2	/2021	18:00:00	2	152
22	/2	/2021	19:00:00	2,6	115
22	/2	/2021	20:00:00	3,5	98
22	/2	/2021	21:00:00	3,9	120
22	/2	/2021	22:00:00	3,9	155
22	/2	/2021	23:00:00	4,5	182
23	/2	/2021	0:00:00	4,9	175
23	/2	/2021	1:00:00	5,8	180
23	/2	/2021	2:00:00	6,3	200
23	/2	/2021	3:00:00	5	214
23	/2	/2021	4:00:00	6,3	225
23	/2	/2021	5:00:00	7,4	231
23	/2	/2021	6:00:00	5,4	231
23	/2	/2021	7:00:00	5,5	231
23	/2	/2021	8:00:00	5,3	249
23	/2	/2021	9:00:00	6,9	232
23	/2	/2021	10:00:00	7,9	222
23	/2	/2021	11:00:00	7,2	222
23	/2	/2021	12:00:00	6,6	228
23	/2	/2021	13:00:00	6,3	250
23	/2	/2021	14:00:00	6,5	238
23	/2	/2021	15:00:00	6,4	227
23	/2	/2021	16:00:00	7,6	222
23	/2	/2021	17:00:00	9	214

23	/2	/2021	18:00:00	9,4	203
23	/2	/2021	19:00:00	9,4	185
23	/2	/2021	20:00:00	10,9	178
23	/2	/2021	21:00:00	11,4	177
23	/2	/2021	22:00:00	13,3	186
23	/2	/2021	23:00:00	14	192
24	/2	/2021	0:00:00	14,1	191
24	/2	/2021	1:00:00	13,3	195
24	/2	/2021	2:00:00	12,3	194
24	/2	/2021	3:00:00	12,6	194
24	/2	/2021	4:00:00	11,9	193
24	/2	/2021	5:00:00	12,1	194
24	/2	/2021	6:00:00	10,3	200
24	/2	/2021	7:00:00	9	209
24	/2	/2021	8:00:00	10,1	228
24	/2	/2021	9:00:00	10	241
24	/2	/2021	10:00:00	7,9	259
24	/2	/2021	11:00:00	5,3	286
24	/2	/2021	12:00:00	5,3	313
24	/2	/2021	13:00:00	4,9	9
24	/2	/2021	14:00:00	6,7	46
24	/2	/2021	15:00:00	8,8	49
24	/2	/2021	16:00:00	10,2	45
24	/2	/2021	17:00:00	12,4	37
24	/2	/2021	18:00:00	13,5	39
24	/2	/2021	19:00:00	13,1	42
24	/2	/2021	20:00:00	12,5	38
24	/2	/2021	21:00:00	14,1	46
24	/2	/2021	22:00:00	15,5	46

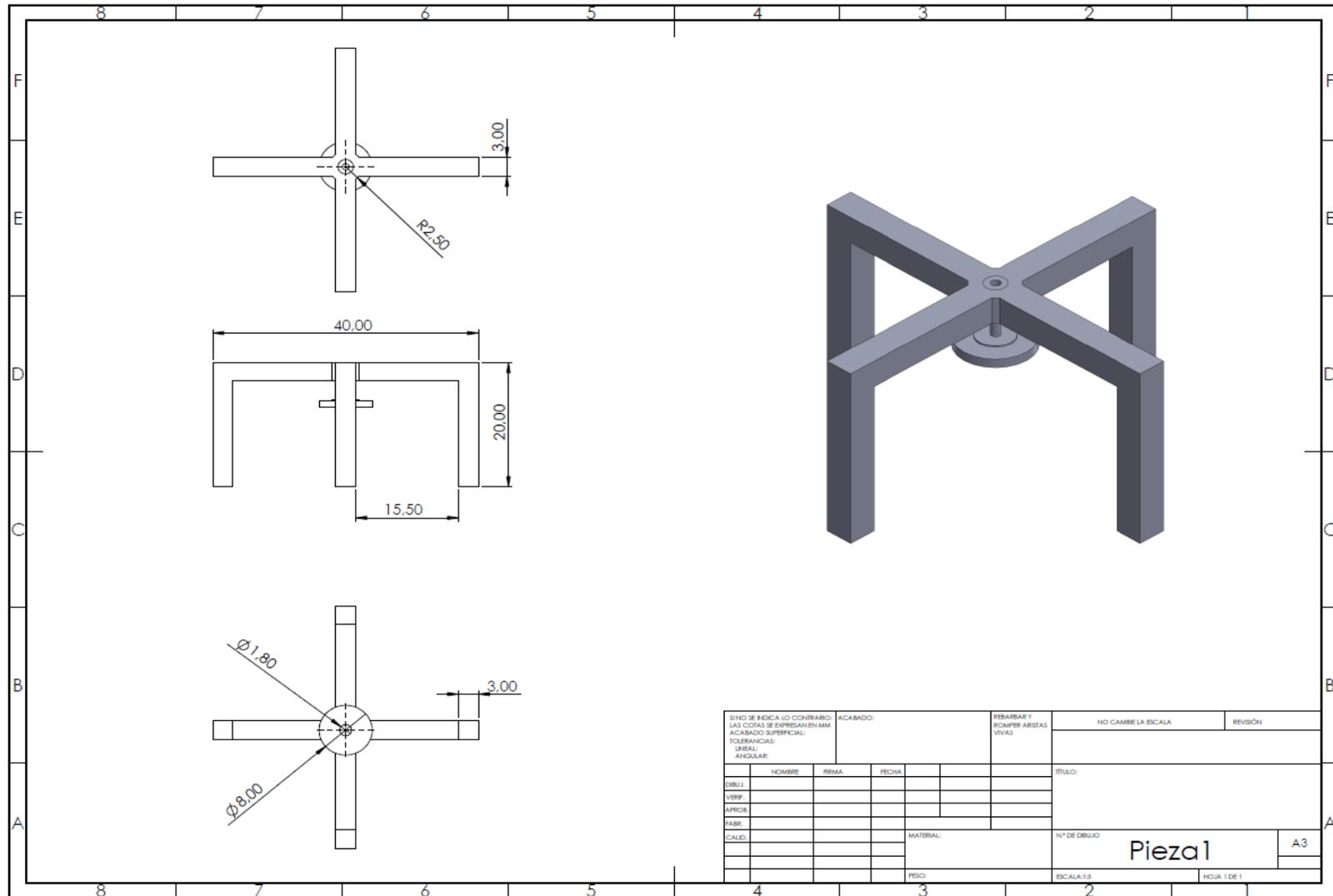
24	/2	/2021	23:00:00	15,5	43
25	/2	/2021	0:00:00	15,1	47
25	/2	/2021	1:00:00	15,8	46
25	/2	/2021	2:00:00	14,5	40
25	/2	/2021	3:00:00	16	46
25	/2	/2021	4:00:00	17,7	49
25	/2	/2021	5:00:00	18,5	47
25	/2	/2021	6:00:00	20,7	46
25	/2	/2021	7:00:00	20,5	44
25	/2	/2021	8:00:00	20,4	44
25	/2	/2021	9:00:00	20,3	42
25	/2	/2021	10:00:00	20,8	40
25	/2	/2021	11:00:00	20,5	35
25	/2	/2021	12:00:00	21,5	33
25	/2	/2021	13:00:00	23,5	32
25	/2	/2021	14:00:00	21,8	30
25	/2	/2021	15:00:00	20,8	28
25	/2	/2021	16:00:00	19,9	24
25	/2	/2021	17:00:00	18,8	22
25	/2	/2021	18:00:00	17,9	27
25	/2	/2021	19:00:00	16	32
25	/2	/2021	20:00:00	14	32
25	/2	/2021	21:00:00	12,9	31
25	/2	/2021	22:00:00	10	26
25	/2	/2021	23:00:00	10,5	24
26	/2	/2021	0:00:00	10,5	13
26	/2	/2021	1:00:00	10,8	1
26	/2	/2021	2:00:00	10,2	8
26	/2	/2021	3:00:00	9,5	7

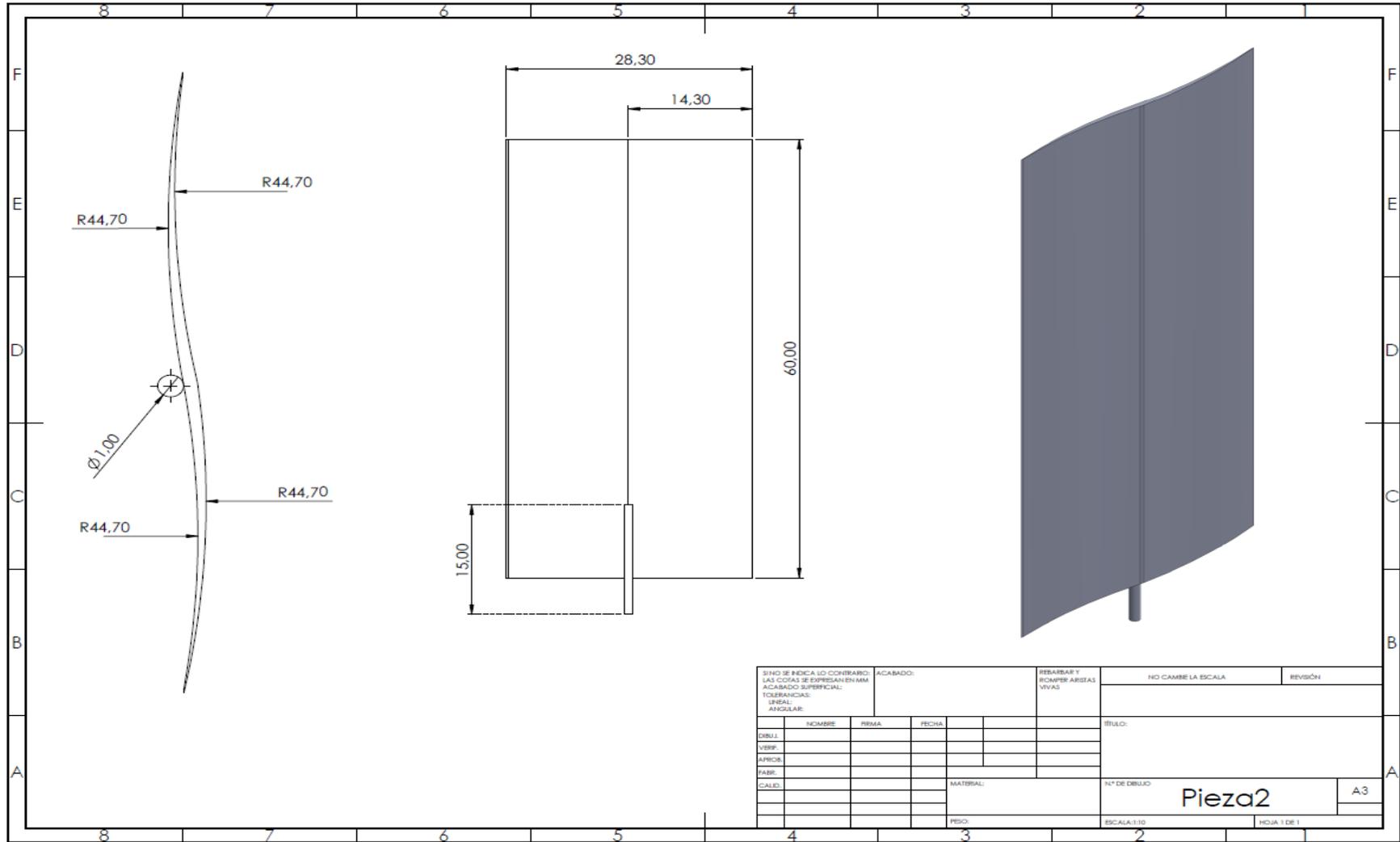
26	/2	/2021	4:00:00	9	5
26	/2	/2021	5:00:00	7,5	1
26	/2	/2021	6:00:00	7,9	15
26	/2	/2021	7:00:00	7,4	14
26	/2	/2021	8:00:00	7,1	334
26	/2	/2021	9:00:00	8	343
26	/2	/2021	10:00:00	6,1	359
26	/2	/2021	11:00:00	4,9	10
26	/2	/2021	12:00:00	3,9	12
26	/2	/2021	13:00:00	1,9	359
26	/2	/2021	14:00:00	0,9	302
26	/2	/2021	15:00:00	1,2	242
26	/2	/2021	16:00:00	3,1	179
26	/2	/2021	17:00:00	3,3	140
26	/2	/2021	18:00:00	6,1	125
26	/2	/2021	19:00:00	7,5	89
26	/2	/2021	20:00:00	6,3	81
26	/2	/2021	21:00:00	4,6	69
26	/2	/2021	22:00:00	3,8	60
26	/2	/2021	23:00:00	4,1	65
27	/2	/2021	0:00:00	5,7	12
27	/2	/2021	1:00:00	6,6	336
27	/2	/2021	2:00:00	9,1	336
27	/2	/2021	3:00:00	8,6	347
27	/2	/2021	4:00:00	9,8	8
27	/2	/2021	5:00:00	11,4	18
27	/2	/2021	6:00:00	9,7	10
27	/2	/2021	7:00:00	11	8
27	/2	/2021	8:00:00	12,5	5

27	/2	/2021	9:00:00	11,8	8
27	/2	/2021	10:00:00	11	9
27	/2	/2021	11:00:00	12,4	16
27	/2	/2021	12:00:00	13,2	15
27	/2	/2021	13:00:00	12,5	19
27	/2	/2021	14:00:00	12,8	16
27	/2	/2021	15:00:00	10,4	16
27	/2	/2021	16:00:00	10,4	17
27	/2	/2021	17:00:00	10,2	26
27	/2	/2021	18:00:00	7,4	35
27	/2	/2021	19:00:00	7,2	34
27	/2	/2021	20:00:00	5,2	16
27	/2	/2021	21:00:00	4,3	8
27	/2	/2021	22:00:00	4	5
27	/2	/2021	23:00:00	4,3	359
28	/2	/2021	0:00:00	4,2	6
28	/2	/2021	1:00:00	4,8	357
28	/2	/2021	2:00:00	5,5	338
28	/2	/2021	3:00:00	5,5	343
28	/2	/2021	4:00:00	5,8	8
28	/2	/2021	5:00:00	5,4	10
28	/2	/2021	6:00:00	6,1	358
28	/2	/2021	7:00:00	7	347
28	/2	/2021	8:00:00	6,8	355
28	/2	/2021	9:00:00	6,6	354
28	/2	/2021	10:00:00	6,6	349
28	/2	/2021	11:00:00	5,6	348
28	/2	/2021	12:00:00	4,7	342
28	/2	/2021	13:00:00	5	334

28	/2	/2021	14:00:00	4,8	327
28	/2	/2021	15:00:00	4	321
28	/2	/2021	16:00:00	3,6	285
28	/2	/2021	17:00:00	3,2	253
28	/2	/2021	18:00:00	2,4	317
28	/2	/2021	19:00:00	5,8	23
28	/2	/2021	20:00:00	2,9	300
28	/2	/2021	21:00:00	5,1	270
28	/2	/2021	22:00:00	6,8	275
28	/2	/2021	23:00:00	6,5	279

7.2 Anexo A-II Planos del prototipo de Aerogenerador Savonius





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL - ANGULAR				ACABADO:		REBARBAR Y ECAMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DIBUJ				NOMBRE		FECHA		MATERIAL		N° DE DIBUJO	
VERIF				FIRMA						Pieza2	
APROB										A3	
FABR										ESCALA: 1:10	
CALC										HOJA 1 DE 1	

7.3 Anexo A-III Tabulación de Distribución Weibull

Distribución Weibull y Densidad de Potencia de Datos Obtenidos

V	Weibull	Porcentaje	CDF	Pd/A
0,70	0,00854495	0,11933899	0,00267388	687,522645
1,10	0,01489626	0,20804157	0,00734215	
1,30	0,01826366	0,25507066	0,01065643	
1,80	0,02702986	0,37749971	0,02196341	
2,50	0,039652	0,55378078	0,04529619	
2,70	0,04324371	0,6039427	0,05358622	
2,90	0,04680081	0,65362112	0,06259137	
3,00	0,04856187	0,67821624	0,06735961	
3,10	0,05030897	0,70261616	0,07230328	
3,30	0,05375445	0,75073591	0,08271077	
3,50	0,05712409	0,79779635	0,0938	
3,90	0,063586	0,88804355	0,11795541	
4,00	0,06513511	0,90967837	0,1243917	
4,00	0,06513511	0,90967837	0,1243917	
4,10	0,06665487	0,93090345	0,13098145	
4,30	0,06960114	0,97205106	0,14460918	
4,40	0,07102512	0,99193843	0,15164078	
4,60	0,07376882	1,03025696	0,16612254	
4,70	0,07508628	1,04865671	0,1735656	
4,90	0,07760717	1,08386352	0,18883753	
5,00	0,07880863	1,10064315	0,19665865	
5,10	0,07996954	1,11685646	0,2045979	
5,20	0,08108905	1,13249146	0,21265118	
5,40	0,08320065	1,16198223	0,22908301	

5,60	0,08513763	1,18903408	0,2459198	
5,70	0,08603904	1,20162321	0,25447901	
5,80	0,08689499	1,21357746	0,26312609	
6,10	0,08918549	1,2455666	0,28954864	
6,30	0,0904777	1,26361364	0,30751812	
6,40	0,09105256	1,27164214	0,31659503	
6,50	0,09157969	1,27900404	0,32572704	
6,60	0,09205898	1,28569785	0,33490937	
6,70	0,09249039	1,29172284	0,34413724	
6,80	0,0928739	1,29707901	0,35340585	
6,90	0,09320958	1,30176712	0,36271042	
7,00	0,09349753	1,30578865	0,37204618	
7,30	0,09407685	1,31387944	0,40019296	
7,60	0,09423534	1,31609291	0,42845019	
7,70	0,09419643	1,31554954	0,43787216	
7,80	0,09411245	1,31437664	0,44728797	
7,90	0,09398394	1,31258179	0,45669316	
8,00	0,09381147	1,31017317	0,4660833	
8,10	0,09359569	1,30715956	0,47545401	
8,20	0,09333726	1,30355028	0,48480101	
8,30	0,09303688	1,29935523	0,49412007	
8,30	0,09303688	1,29935523	0,49412007	
8,40	0,09269531	1,2945848	0,50340702	
8,50	0,09231332	1,28924992	0,51265778	
8,60	0,09189173	1,28336199	0,52186836	
8,70	0,09143139	1,27693287	0,53103483	
8,80	0,09093318	1,26997487	0,54015338	

8,90	0,09039801	1,2625007	0,54922024	
9,00	0,08982682	1,25452348	0,55823178	
9,10	0,08922058	1,2460567	0,56718444	
9,30	0,08790693	1,22771013	0,58489939	
9,40	0,08720156	1,21785894	0,59365508	
9,50	0,08646523	1,20757536	0,60233867	
9,60	0,08569901	1,19687437	0,61094713	
9,70	0,084904	1,18577117	0,61947751	
9,80	0,08408129	1,17428117	0,627927	
9,90	0,08323199	1,16241994	0,63629288	
10,00	0,08235725	1,1502032	0,64457255	
10,10	0,08145818	1,13764682	0,65276352	
10,20	0,08053594	1,12476674	0,66086342	
10,30	0,07959166	1,11157899	0,66886997	
10,40	0,07862651	1,09809967	0,67678105	
10,50	0,07764164	1,08434489	0,68459462	
10,60	0,07663819	1,07033077	0,69230876	
10,70	0,07561734	1,05607343	0,69992168	
10,90	0,07352797	1,02689328	0,71483722	
11,00	0,07246175	1,01200242	0,72213681	
11,10	0,07138268	0,99693217	0,72932914	
11,20	0,0702919	0,98169824	0,73641296	
11,30	0,06919051	0,96631619	0,74338716	
11,40	0,06807961	0,95080143	0,75025074	
11,50	0,06696031	0,93516919	0,75700281	
11,60	0,06583367	0,91943449	0,76364256	
11,80	0,0635626	0,88771675	0,77658254	

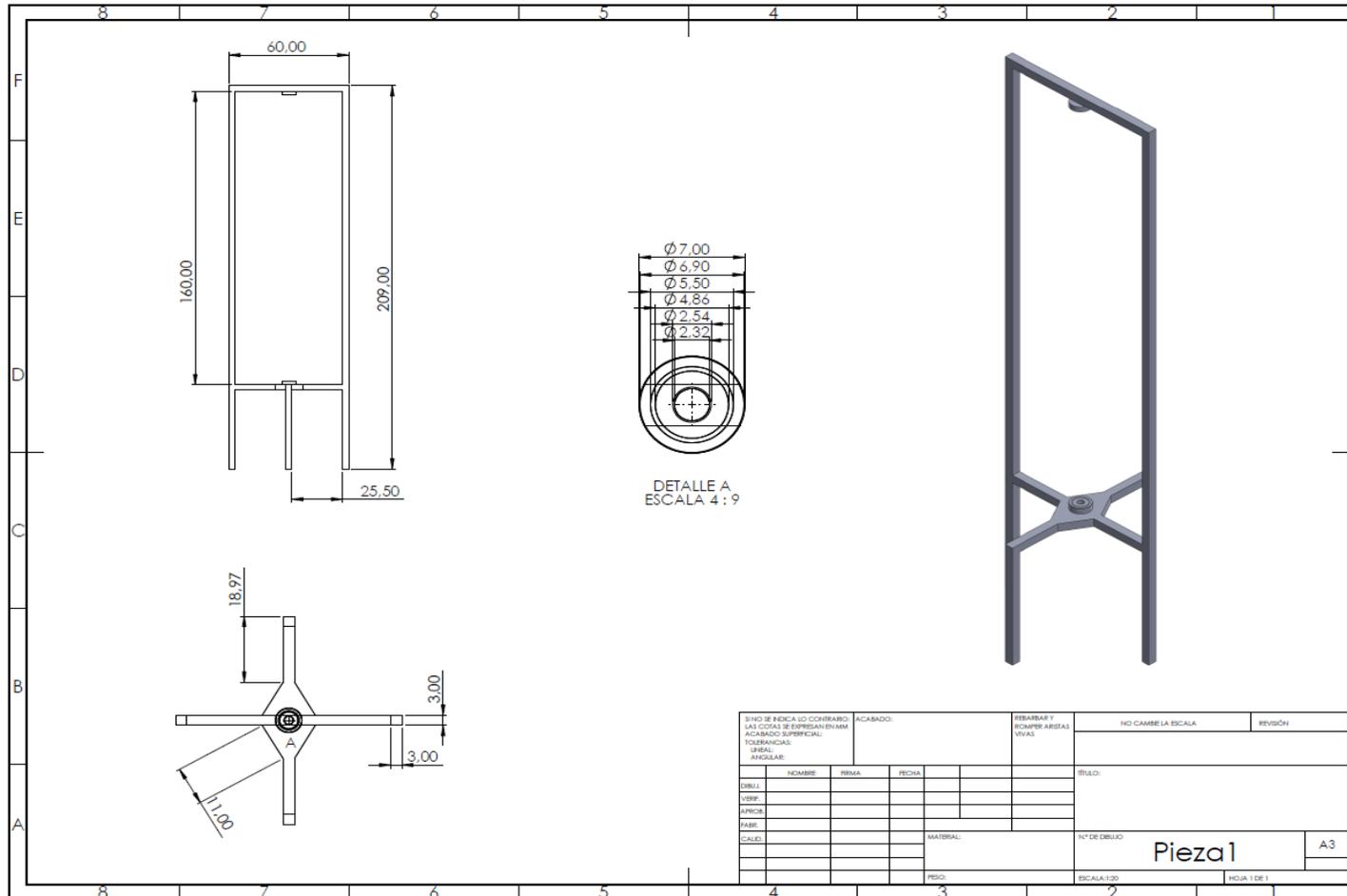
11,90	0,06242025	0,87176264	0,78288171	
12,00	0,0612747	0,85576388	0,78906648	
12,10	0,06012695	0,8397343	0,79513658	
12,30	0,05782866	0,80763641	0,80693216	
12,40	0,05668	0,79159423	0,81265758	
12,60	0,05438816	0,75958631	0,82376424	
12,70	0,05324671	0,74364472	0,82914595	
12,80	0,05210934	0,72776025	0,83441372	
12,90	0,05097687	0,7119441	0,83956798	
13,00	0,04985006	0,6962071	0,84460928	
13,10	0,04872967	0,68055973	0,84953821	
13,20	0,04761642	0,66501206	0,85435545	
13,30	0,04651101	0,64957381	0,85906175	
13,40	0,0454141	0,63425431	0,86365794	
13,50	0,04432633	0,61906249	0,86814488	
13,60	0,04324831	0,6040069	0,87252353	
13,70	0,04218063	0,5890957	0,87679489	
13,80	0,04112385	0,57433666	0,88096002	
14,00	0,03904506	0,54530415	0,88897611	
14,30	0,03602087	0,50306827	0,90023307	
14,40	0,03503957	0,48936341	0,90378597	
14,60	0,03311933	0,4625453	0,91060091	
14,70	0,03218103	0,44944104	0,9138658	
14,90	0,03034951	0,42386189	0,92011784	
15,00	0,02945676	0,41139384	0,92310803	
15,30	0,02687304	0,37530951	0,93155392	
16,60	0,01737056	0,2425976	0,96001208	

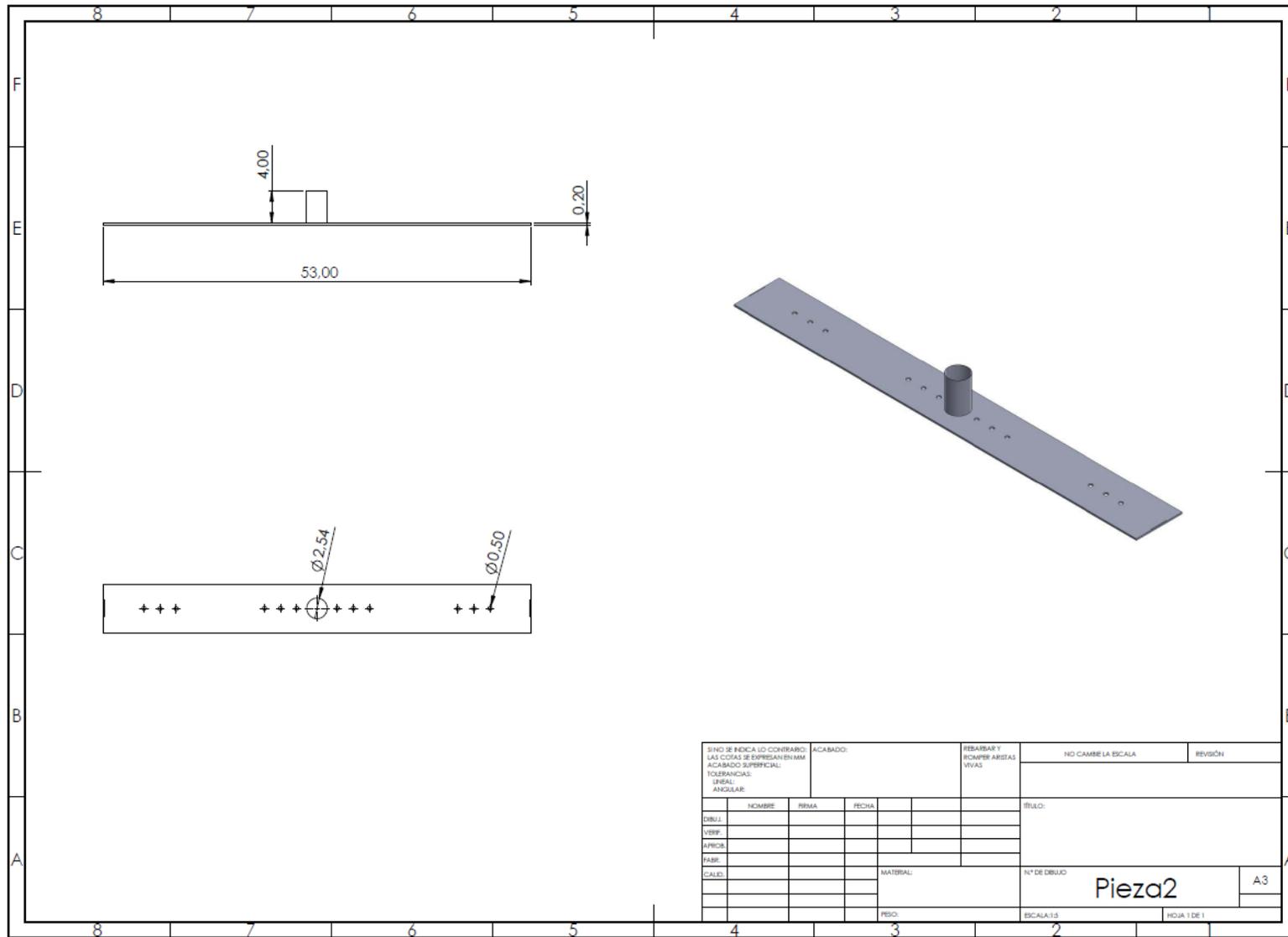
7.4 Anexo A-IV Potencias con/sin Distribución Weibull

Cálculo de potencias con y sin la distribución de Weibull con los datos obtenidos

	Fórmula	Valor
Potencia P_{sup}	$\frac{\rho \times v^3}{2}$	356,808 W/m ²
Potencia P_{betz, sup}	0,593 x P _{sup}	211,587 W/m ²
Potencia P_{mec, Savonius, sup}	0,13 x P _{sup}	46,385 W/m ²
Potencia eléctrica útil Pel, sup	0,54 x P _{mec, savonius, sup}	25,048 W/m ²
Potencia P_{sub, wb}	$\int_0^{4s} P(v) \times P_{sup} \cdot dv$	432 W/m ²
Potencia P_{betz, sup, wb}	0,593 x P _{sup, wb}	256,17 W/m ²
Potencia P_{mec, Savonius, sup, wb}	0,13 x P _{sup, wb}	56,16 W/m ²
Potencia eléctrica útil Pel, sup, wb	0,54 x P _{mec, savonius, sup, wb}	30,32 W/m ²

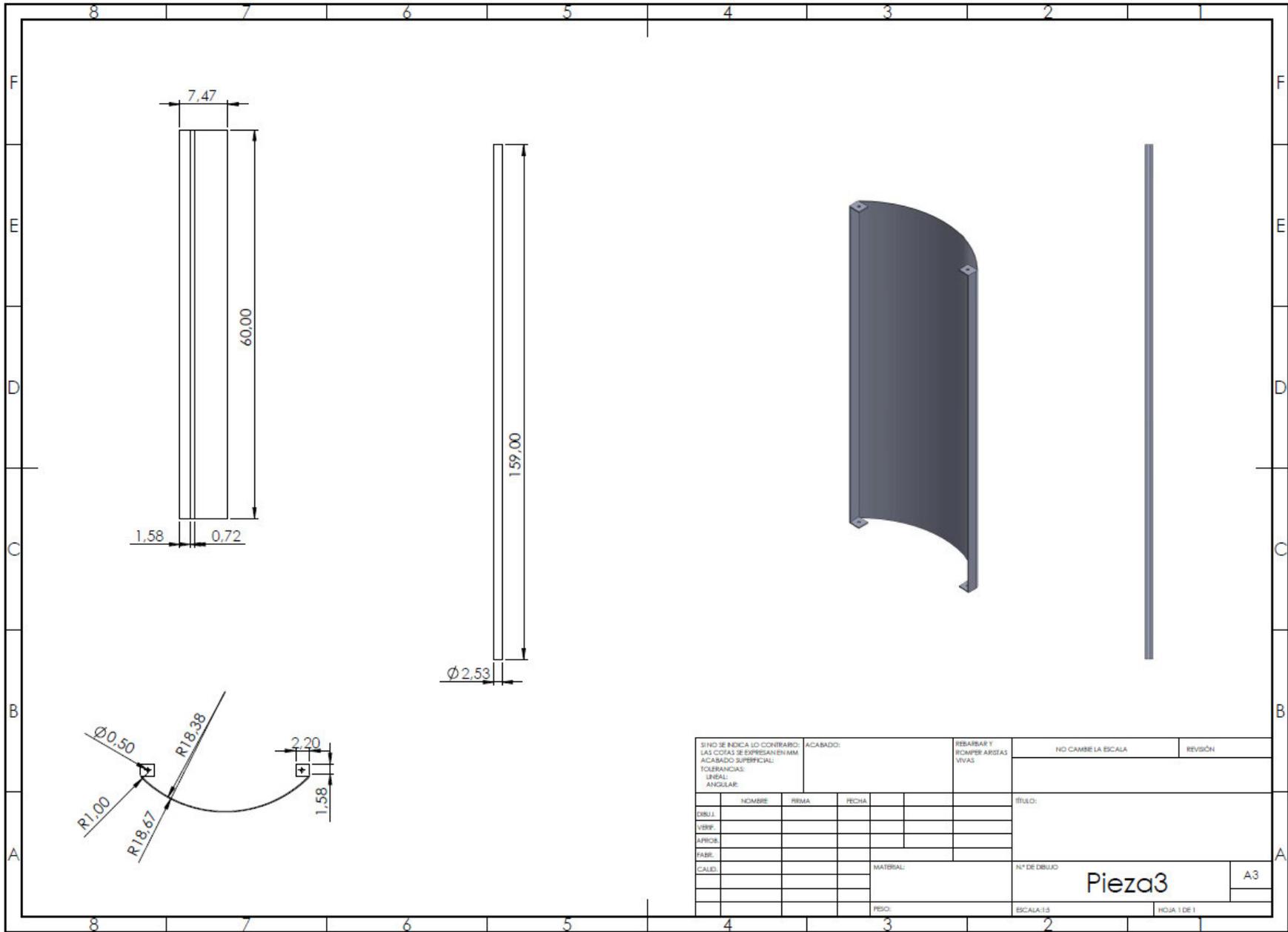
7.5 Anexo A-V Planos del diseño final de Aerogenerador Savonius





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: TOL. COJAS SE SUPLENEN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NO.</th> <th>NOMBRE</th> <th>FECHA</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	NO.	NOMBRE	FECHA																																																																																						TÍTULO:				Nº DE DIBUJO		A3
NO.	NOMBRE	FECHA																																																																																													
MATERIAL:				ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1																																																																																									

Pieza2



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBE LA ESCALA		REVISIÓN	
ACABADO SUPERFICIAL:											
TOLERANCIAS:											
LINEAL:											
ANGULAR:											
DIBUJANTE		NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
VERIFICADOR											
APROBADO											
FABRICADO											
CALIFICADO								MATERIAL:		Nº DE DIBUJO	
										Pieza3	
										A3	
								ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1	

7.6 Anexo A-VI Análisis detallado control de estados

7a) Corriente del inductor del interruptor

$$VL = V1 = L \frac{diL}{dt}$$

$$is = iL = \frac{1}{L} \int_0^t VL dt + iL(0) = \frac{V1}{L} t + iL(0)$$

$$iL(DT) = \frac{V1DT}{L} + iL(0) = \frac{V1D}{fsL} + iL(0)$$

$$\Delta iL = iL(DT) - iL(0) = \frac{V1D}{fsL}$$

$$Mvdc = \frac{V0}{V1} = \frac{I1}{I0} = \frac{D}{1-D}$$

$$Vd = -(V1 - V0) = -V0 \left(\frac{1}{Mvdc} + 1 \right) = \frac{-V0}{D}$$

$$Ism = IL(pico) = I1 + I0 + \frac{\Delta iL}{2} = \frac{I0}{1-D} + \frac{\Delta iL}{2}$$

7b) Modelo matemático del generador

$$Vg = P_{00} + P_{10}w + P_{01}I + P_{11}wI + P_{02}I^2 + P_{12}wI^2 + P_{03}I^3 + P_{13}wI^3 + P_{04}I^4$$

Donde:

$$P_{00} = -28,97$$

$$P_{10} = 0,02956$$

$$P_{01} = -10,38$$

$$P_{11} = 0,006691$$

$$P_{02} = 11,69$$

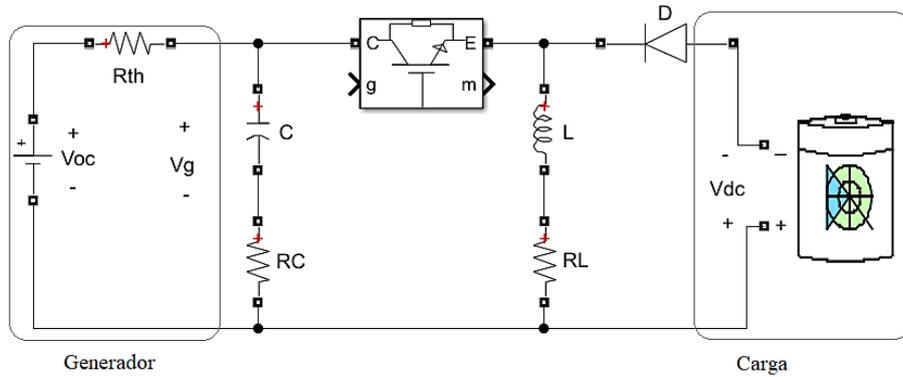
$$P_{12} = -0,008907$$

$$P_{03} = -2,299$$

$$P13 = 0,001859$$

$$P04 = -0,08704$$

- *Análisis dinámico del Sistema*



Cuando el interruptor está cerrado se obtiene la ecuación para corriente del capacitor.

$$-VRC - VC + VL + VRL = 0$$

$$VL = iC \times RC + VC - iL \times RL$$

$$iC = \frac{VOC - Vg}{RTh} - iL$$

$$Rth \times iC = VOC - Vg - RTh \times iL$$

$$iC = \frac{VOC - VC - Rth \times iL}{RTh + RC}$$

Cuando el interruptor está abierto se obtiene igualmente la ecuación de corriente del capacitor mostrada en.

$$VL = L \times \frac{diL}{dt} = -VDC - iL \times RL$$

$$iC = \frac{VOC - Vg}{RTh}$$

$$iC = \frac{VOC - VC}{RTh + RC}$$

Modelo Conmutado Completo

Se obtiene las ecuaciones de análisis completo y de los componentes.

$$L \times \frac{diL}{dt} = (iC \times Rc + VC)\delta - iL \times RL - Vdc(1 - \delta)$$

$$C \times \frac{dVC}{dt} = \frac{Voc - VC - Rth \times iL \times \delta}{Rth + RC} \quad ($$

Donde:

δ = Es el valor para la condición de conmutación del interruptor llamado relación de trabajo.

iC = Es el valor de la corriente que pasa por el capacitor [A].

Vg = Es el valor del voltaje sin tomar en cuenta la caída en la resistencia del equivalente Thévenin [V].

Vdc = Es el valor del voltaje de salida en corriente continua [V].

- *Análisis en estado estable*

Con las condiciones iniciales en las ecuaciones a continuación.

$$VC = Vmpp$$

$$iL\delta = Impp$$

Se tiene que de 2.69, en estado estable se tiene la ecuación:

$$Vmpp\delta - iL \times RL - Vdc(1 - \delta) = 0$$

Donde:

$Vmpp\delta$ = Es el valor del voltaje para la condición de estado estable [V].

Reemplazando la ecuación se obtiene la expresión:

$$Vmpp\delta - \frac{Impp}{\delta} \times RL - Vdc(1 - \delta) = 0$$

$$\delta = \frac{Vdc + \sqrt{Vdc^2 + 4(Vmpp + Vdc) \times Impp \times RL}}{2 \times (Vmpp + Vdc)} = 0,5897$$

7c) Análisis de Matrices A, B, C, D

A continuación, se presentan las derivadas para formar la matriz A y B

$$A_{00} = -\frac{RC \times Rth \times \delta}{L(Rth + Rc)} - RL$$

$$A_{01} = \frac{\delta - \frac{RC \times \delta}{Rth + Rc}}{L}$$

$$A_{10} = \frac{-Rth \times \delta}{C \times (Rth + Rc)}$$

$$A_{11} = \frac{-1}{C \times (Rth + Rc)}$$

$$B_{00} = \frac{(iC \times RC + VC) + Vdc}{L}$$

$$B_{01} = \frac{-1 + \delta}{L}$$

$$B_{02} = \frac{RC \times \delta}{L \times (Rth + Rc)}$$

$$B_{10} = \frac{-Rth \times iL}{C \times (Rth + Rc)}$$

$$B_{11} = 0$$

$$B_{12} = \frac{1}{C \times (Rth + RC)}$$

A partir de las ecuaciones y considerando que se va a controlar la corriente en el inductor se tiene la ecuación y las matrices de condiciones iniciales:

$$B = \begin{bmatrix} B_{00} & B_{01} & B_{02} \\ B_{10} & B_{11} & B_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(iC \times RC + VC) + Vdc}{L} & \frac{-1 + \delta}{L} & \frac{RC \times \delta}{L \times (Rth + Rc)} \\ \frac{-Rth \times iL}{C \times (Rth + Rc)} & 0 & \frac{1}{C \times (Rth + RC)} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

$$D = [0 \quad 0 \quad 0]$$

Teniendo en cuenta, que el sistema se controla con la relación de trabajo delta (δ) y de este parámetro depende tanto el voltaje de entrada como el voltaje de salida, entonces el sistema queda descrito por las ecuaciones y condiciones iniciales.

$$X = \begin{bmatrix} iL \\ VC \end{bmatrix}$$

$$U = [\delta]$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{00} & A_{01} \\ A_{10} & A_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{RC \times Rth \times \delta}{Rth + Rc} - RL & \frac{\delta - \frac{RC \times \delta}{Rth + Rc}}{L} \\ \frac{-Rth \times \delta}{C \times (Rth + Rc)} & \frac{-1}{C \times (Rth + Rc)} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{00} \\ B_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{[(iC \times RC + VC) + Vdc]}{L} \\ \frac{-Rth \times iL}{C \times (Rth + Rc)} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

Diseño control PI lazo de Corriente

El controlador de lazo de corriente corresponde a la ecuación G y que se traduce en la ecuación Gc.

$$G = 11586 \times \frac{s + 2148}{(s + 2146)(s + 32.86)}$$

$$ts = 400 \mu S$$

$$Mp = 0,1$$

$$ts = \frac{4}{\sigma}$$

$$\sigma = 10000$$

$$Mp = 0,1$$

$$Mp = 0,1$$

$$Wd = 13643,76 \text{ rad/s}$$

$$Sd = -10000 + j13643,76$$

$$Gc = K \times \frac{s + a}{s}$$

Ángulos de los polos y ceros de la planta respecto al polo deseado en la ecuación.

$$\theta_1 = 126.24^\circ$$

$$\theta_2 = 126.15^\circ$$

$$\theta_3 = 119.93^\circ$$

$$\beta_1 = 129.92^\circ$$

$$\sum \text{ceros} - \sum \text{polos} = -180^\circ$$

Angulo de aporte del controlador con respecto al polo y tangente del ángulo para hallar el ángulo a .

$$\beta = \sum \text{polos} - 180^\circ - \sum \text{ceros} = 72,4^\circ$$

$$tg(\beta) = \frac{13643,76}{a - 10000}$$

$$a = 14328,89$$

Con todos los ángulos obtenidos es posible expresar la ganancia como la ecuación

$$Gc = K \times \frac{s + 14328,89}{s}$$

Ganancia del controlador de Corriente

Finalmente, con las ecuaciones expuestas se puede encontrar la constante K y se determina la ganancia del controlador de corriente mostrado en la ecuación

$$|Gc(s)G(s)| = 1$$

$$K = \frac{1}{|Gc(s)G(s)|} = 1,724$$

$$Gc = 1,724 \times \frac{s + 14328,89}{s}$$

Controlador de Voltaje

El controlador de voltaje dará la referencia para el controlador de corriente y este último se encargará que la corriente en el inductor alcance la corriente de referencia, por ende:

$$iR = iL$$

$$ig = \delta iL = \delta iR$$

Considerando

$$Vg = iC \times RC + VC$$

$$ig = \frac{Voc - iC \times RC - VC}{Rth}$$

$$iC = \frac{Voc - iC \times RC - VC}{Rth} - \delta iR$$

Usando las ecuaciones anteriores se obtiene la corriente del capacitor.

$$iC = \frac{Voc - \delta iRth - VC}{Rth + Rc} - \delta iR$$

Los espacios de estados mostrados en las ecuaciones anteriores se interpretan como las siguientes ecuaciones:

$$X = [Vc]$$

$$U = \begin{bmatrix} ig \\ Vdc \end{bmatrix}$$

$$Y = [Vg]$$

$$Am = \left[\frac{-1}{C * (Rth + Rc)} \right]$$

$$Bm = \left[\frac{-\delta Rth}{C * (Rth + Rc)} \quad \frac{1}{C * (Rth + Rc)} \right]$$

$$Cm = \left[1 - \frac{RC}{Rth + RC} \right]$$

$$D = \left[\frac{-RC * \delta Rth}{Rth + RC} \quad \frac{RC}{Rth + RC} \right]$$

Diseño control PI lazo de voltaje

La ganancia del lazo de voltaje se muestra en la ecuación G_{vi} y que se traduce en la ecuación G_c .

$$G_{vi} = -0,071034 \times \frac{s + 56590}{s + 2127}$$

$$ts = 2 \text{ mS}$$

$$Mp = 0,05$$

$$ts = \frac{4}{\sigma}$$

$$\sigma = 2000$$

$$Mp = 0,1$$

$$Wd = 2097,38 \text{ rad/s}$$

$$Sd = -2000 + j2097,38$$

$$G_c = K \times \frac{s + a}{s}$$

Ángulos de los polos y ceros de la planta respecto al polo.

$$\theta_1 = 133,64^\circ$$

$$\theta_2 = 86,53^\circ$$

$$\beta_1 = 2,2^\circ$$

$$\sum \text{ceros} - \sum \text{polos} = -180^\circ$$

Angulo de aporte del controlador con respecto al polo mostrado en la ecuación y la tangente del ángulo β para obtener el ángulo a .

$$\beta = \sum \text{polos} - 180^\circ - \sum \text{ceros} = 37,97^\circ$$

$$\text{tg}(\beta) = \frac{2097,38}{a - 2000}$$

$$a = 4687,11$$

Con todos los ángulos obtenidos es posible expresar la Ganancia como la ecuación.

$$G_c = K \times \frac{s + 4687,11}{s}$$

Ganancia del controlador de Voltaje

Con las ecuaciones mostradas se puede encontrar la constante K y se determina la ganancia del controlador de voltaje mostrado en la ecuación.

$$|G_c(s)G(s)| = 1$$

$$K = \frac{-1}{|G_c(s)G(s)|} = -0,46035$$

$$G_c = -0,46035 \times \frac{s + 4687,11}{s}$$

7.8 Anexo A-VIII Códigos de Arduino para la Calibración & Implementación del control de estados

Código de Calibración

```
float sensi=0.180, Ig=0, Il=0;
float GCS=0, ICS=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  GCS=analogRead(A0) * (5.0/1023.0); //Generator current sensor
  ICS=analogRead(A1) * (5.0/1023.0); // Inductor current sensor

  Ig=(GCS-2.5)/sensi; //Corriente del generador
  Il=(ICS-2.5)/sensi; //Corriente del inductor

  Serial.print("Ig: ");
  Serial.print(Ig,2);
  Serial.print("    Il: ");
  Serial.println(Il,2);
}
```

Código de PWM

```
#define f 15000 // Defino mi frecuencia de trabajo en 20 KHz //
interrupción cada 20 KHz

unsigned int conv=0; // 16 bits
unsigned int máximo=0; // 16 bits

void setup () {
  pinMode (9,OUTPUT);
  TCCR1A=0B10000000; // TIMER 1 como PWM FFC y habilito el pin OC1A
  como salida PWM
  TCCR1B=0B00010001; // Reloj del timer de 16MHz ftimer=fsys/1

  máximo=(16000000 / (2*f))-1; // fPWM=ftimer/(2*(MAX+1))// máximo=399;
  ICR1=máximo;
  OCR1A=máximo >> 1; // PWM de 50 %
  TIMSK1=0B00100000; // Activo interrupción comparación con ICR1

  sei(); // Habilita interrupciones globales
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}

ISR (TIMER1_CAPT_vect)
{
```

```

conv=analogRead(A0);
conv=map(conv,0,1023,0,maximo);
OCR1A=conv;
}

                                Código de Control de Estados
#define f 15000                    // Defino mi frecuencia de trabajo en 15 KHz //
interrpcion cada 15 KHz

#define vmax 25
#define vmin 4.85
#define vinicio 11.3
#define delta 0.01

float sensi=0.18,Ig=0,I1=0,vref=0,vold,iold,vrefold,dv,di,v,e,et=0,m;
float GCS=0,ICS=0;

unsigned int conv=0;              // 16 bits
unsigned int maximo=0;           // 16 bits

void setup() {
  // Comunicacion Serial
  Serial.begin(9600);

  // Timer
  TCCR1A=0B10000000;             // TIMER 1 como PWM FFC y habilito el pin OC1A
  como salida PWM
  TCCR1B=0B00010001;           // Reloj del timer de 16MHz ftimer=fsys/1

  maximo=(16000000 / (2*f))-1;    // fPWM=ftimer/(2*(MAX+1))// maximo=399;
  ICR1=maximo;
  OCR1A=maximo >> 1;             // PWM de 50 %
  TIMSK1=0B00100000;           // Activo interrupcion comparacion con ICR1

  sei();                         // Habilita interrupciones globales
}

void loop() {
  GCS=analogRead(A0) * (5.0/1023.0); // Generator current sensor
  ICS=analogRead(A1) * (5.0/1023.0); // Inductor current sensor
  v=analogRead(A2) * (20/1023.0); // Generator voltage sensor

  Ig=(GCS-2.5)/sensi; // Corriente del generador
  I1=(ICS-2.5)/sensi; // Corriente del inductor

  dv=v-vold;
  di=Ig-iold;

  if(abs(dv<=0.001)) {
    if(abs(di<=0.001)) {
      vref=vrefold;
    } else {
      if(di>0) {
        vref=vrefold+delta;
      } else {
        vref=vrefold-delta;
      }
    }
  }
}

```

```

    }
  }else{
    if(abs((di/dv)+Ig/v)<=0.001){
      vref=vrefold;
    }else{
      if((di/dv)>(-Ig/v)){
        vref=vrefold+delta;
      }else{
        vref=vrefold-delta;
      }
    }
  }
}

if((vref>=vmax)|| (vref<=vmin)){
  vref=vrefold;
}
vrefold=vref;
vold=v;
iold=Ig;

Serial.print("Ig: ");
Serial.print(Ig,2);
Serial.print("    I1: ");
Serial.println(I1,2);
}

ISR (TIMER1_CAPT_vect)
{
  e=vref-v;
  et=et+e;
  m=(-57.78*et+0.43*I1+0.23*v)*100;
  if(m<0){
    m=0;
  }
  if(m>100){
    m=100;
  }

  conv=map(conv,0,100,0,maximo);
  OCR1A=conv;
}

```