

MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE UN PILOTO DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BICICLETAS ESTÁTICAS

RONALD ANDRÉS RENGIFO MEJÍA
RUSBER OCTAVIO RODRÍGUEZ VELÁSQUEZ
FERNANDO AUGUSTO RUEDA CHACÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2015

MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE UN PILOTO DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BICICLETAS ESTÁTICAS

RONALD ANDRÉS RENGIFO MEJÍA
RUSBER OCTAVIO RODRÍGUEZ VELÁSQUEZ
FERNANDO AUGUSTO RUEDA CHACÓN

Trabajo de Grado para optar el título de
Ingenieros Electricistas

Director

MSc. GERMAN ALFONSO OSMA PINTO
Ingeniero Electricista

Codirector

PhD. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA
Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRONICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

Detrás del triunfo de un hombre, hay una innumerable cantidad de personas que hicieron su triunfo posible. Es difícil en una simple hoja de papel agradecer y nombrar a todas y cada una de las personas que han participado en mi formación como persona y como ingeniero, solo me queda agradecerles de corazón por siempre estar a mi lado.

Dedico este trabajo a Dios, porque siempre he encontrado en Él la fuerza y la entereza necesaria para continuar este largo camino.

A mi madre Luz María Mejía y mi padre Gersain Antonio Rengifo, porque a pesar de las dificultades, las diferencias y los problemas siempre han estado apoyándome, para que continúe y de lo mejor de mí mismo, sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

A mis hermanos Christian Rengifo y Juliana Rengifo porque siempre han sido una fuente de inspiración para ser cada día una mejor persona y un ejemplo que ellos quieran seguir.

A mis amigos Didier Arguello, Byron Barbosa, Brandon Blandón, Duvan Barragán, Duvian Páez y todos aquellos que se me escapen, porque siempre han creído en mí, han esperado los mejores resultados de mi parte y han servido como apoyo incondicional cuando las adversidades se han hecho presentes.

A mis compañeros de proyecto de grado, Rusber Rodríguez y Fernando Rueda, porque a pesar de mis dificultades siempre me dieron todo su entendimiento, sabiendo apoyarme y presionarme para que no me doblegara ante los problemas y saliera victorioso dando lo mejor de mí.

A mis compañeros de escuela y de la universidad, especialmente Feisal Bayona, Diego Pinto, Angélica Angarita, Jhonny Turizo, Daniel Jaimes, Paula Calderón, Andrés Luna, Julián Sierra, Silvia Afanador, Dagoberto Porras, Katherin Camelo porque gracias a ellos la universidad, más que un recinto de conocimiento, fue un hogar.

A todos y cada uno de los profesores, especialmente a los profesores Carlos Fajardo y Gerardo Latorre, por haber participado y contribuido en mi desarrollo como ingeniero y como persona.

Al profesor German Osma y el profesor Gabriel Ordóñez, ya que su guía ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Ronald Andrés Rengifo Mejía

DEDICATORIA

Dedico primeramente este trabajo así como los triunfos obtenidos durante mi vida hasta ahora, a Dios todo Poderoso, quien ha guiado mis pasos para alcanzar metas extraordinarias, me fortalece cada día, me muestra la hermosura de vivir y me ha dado a conocer su palabra. Sin Él nada fuera posible.

A mi madre María Gladiz Velásquez quien ha realizado el mayor esfuerzo por mi permanencia en la Universidad y ha puesto toda su confianza en mis acciones.

A mi padre Octavio Rodríguez quien desde mi nacimiento vio en mí una persona exitosa y me ha enseñado que no existe cosa inalcanzable.

A mi hermana Tatiana Rodríguez por su inagotable colaboración y consejo, y los indescriptibles deseos de superación familiar.

A mi hermana Indira Rodríguez, fuente de amor e inspiración.

A Johanna Niño, mi novia, ha estado a mi lado en duros momentos en los que no aceptaría la compañía de otra persona.

A todas las personas que Dios ha puesto en mi camino para cumplir su voluntad.

Rusber Octavio Rodríguez Velásquez

DEDICATORIA

Inicialmente deseo dedicar este trabajo a todas las personas que siempre creyeron en mí, en mi capacidad y que estuvieron ahí cuando necesité un consejo, es grato saber la fuerza y determinación que se posee cuando queremos alcanzar algo.

A Dios por ser siempre ese sentimiento de alegría, tranquilidad y serenidad en cada momento de mi vida, sobre todo en esta etapa próxima a culminar.

A mi madre Cecilia Chacón Mujica, no hay un día en el que no le agradezca a Dios por el enorme esfuerzo y dedicación que ha tenido durante toda mi vida, la fortuna más grande es tenerla conmigo y el tesoro más valioso son todos y cada uno de los valores que me inculcó.

A mi hermano Hoover F. Rueda, gracias por servir de guía, consejero, por ser un ejemplo a seguir y por acompañarme siempre; por lo que más te agradezco es por ser mi amigo.

A Yurleidy M. Uribe, mi novia, compañera incondicional, bella persona que demuestra la sencillez sin juzgar, gracias por tu amor, cariño y apoyo durante esta etapa, factores fundamentales que me brindaron equilibrio para culminar.

A Teresa Chacón, mi tía, y Laureano Gómez, mi padrino, por los consejos y valores que me inculcaron durante toda mi vida; demuestran cada día la importancia de crecer espiritualmente y de tener presente a Dios a todo momento.

A mi padre Hoover Rueda y a toda mi familia, por sus consejos y palabras de ánimo, que aportaron la estabilidad emocional necesaria para culminar este proyecto.

Al Msc. German A. Osma, al PhD. Gabriel Ordóñez, y demás profesores, por el apoyo y orientación como persona, sobre todo, la sabiduría que me aportaron en mi crecimiento profesional.

A mis compañeros y todas aquellas personas que me apoyaron incondicionalmente de una u otra forma, fue fundamental para seguir adelante.

Fernando Augusto Rueda Chacón

AGRADECIMIENTOS

Como una unidad inquebrantable que hemos formado a través de este proceso, queremos dar nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que de una u otra manera participaron en este proyecto de investigación, haciendo posible los resultados que hoy estamos obteniendo.

Agradecemos especialmente al Msc. Germán Alfonso Osma Pinto, por confiar desde el principio en nuestras cualidades, por darnos la oportunidad de trabajar en un proyecto de esta envergadura y calibre. Agradecemos su disponibilidad ante cualquier duda y problema.

Al PhD. Gabriel Ordóñez, por orientarnos en búsqueda de los mejores resultados, por sus constantes consejos y por su apoyo y comprensión ante nuestras falencias.

Al PhD. Gerardo Latorre, por orientarnos, apoyarnos y motivar a los estudiantes de sus distintas asignaturas, a participar de las diferentes pruebas que tuvimos que realizar durante el desarrollo de este proyecto.

Al PhD. Rodolfo Villamizar, por sus constantes consejos sobre cómo realizar este trabajo y facilitar el acceso a componentes requeridos para su desarrollo.

A los Ingenieros José Durán y Algemiro Gil, por su orientación al iniciar este proyecto y por compartir con nosotros toda la información que ellos tenían disponible sobre el trabajo que habían realizado anteriormente.

Al PhD. Cesar Duarte por sus correcciones, consejos y orientaciones cuando fue asignado como nuestro calificador de plan de proyecto de grado.

A todas las personas que asistieron y participaron de las pruebas de rendimiento físico realizadas. Sin su participación no habría sido posible recolectar los datos para este estudio.

Gracias a toda la comunidad E³T y UIS.

CONTENIDO

	pag.
INTRODUCCIÓN	23
1. ESTADO DEL ARTE.....	27
1.1 CALIFORNIA FITNESS	28
1.2 THE GREEN MICROGYM	33
1.3 THE GREAT OUTDOOR GYM COMPANY	35
1.4 OTROS TRABAJOS	37
2. ANTECEDENTES.....	40
2.1 DISEÑO	40
2.2 IMPLEMENTACIÓN.....	43
2.3 LIMITANTES DEL PILOTO DE GENERACIÓN.....	48
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	50
3.1 POTENCIA MECÁNICA GENERADA POR UN TRIPULANTE.....	51
3.1.1 Población	51
3.1.2 Diseño de la prueba de potencia física.	51
3.1.3 Determinación de la muestra	54
3.2 ENCUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN FÍSICA	54
3.2.1 Preguntas.....	55
3.2.2 Valores de las respuestas:.....	55
3.3 SELECCIÓN DEL GENERADOR	56
3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA.....	58
3.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE POTENCIA MECÁNICA.....	60
CONTROLADA	
3.6 PRUEBAS DE EFICIENCIAS CON POTENCIA CONTROLADA	62
3.7 PRUEBAS DE RENDIMIENTO CON TRIPULANTES REALES	63

4. SISTEMA DE MONITORIZACIÓN.....	65
4.1 SENSADO DE SEÑALES.....	65
4.2 INSTRUMENTO VIRTUAL – VI.....	67
4.2.1 Recuperación de señales eléctricas.	67
4.2.2 Medición de parámetros eléctricos:	71
4.2.3 Medición de la velocidad el volante de inercia..	73
4.2.4 Determinación del rendimiento del sistema de generación.....	74
4.2.5 Datos almacenados	76
4.2.6 Panel frontal del VI.....	79
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	85
5.1 RESULTADOS DE LA ENCUESTA DE CONDICIÓN FÍSICA.....	85
5.2 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE POTENCIA FÍSICA.....	86
5.3 CARACTERIZACIÓN DEL MOTOR DC EMPLEADO COMO GENERADOR .	87
5.4 RESULTADO DE LA PRUEBA DE VACÍO EL MOTOR DE INDUCCIÓN	89
5.5 RESULTADO DE LA PRUEBA DE VACÍO DE LOS GENERADORES	90
5.6 CURVAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS DOS ALTERNATIVAS DE	91
GENERACIÓN	
5.7 PRUEBAS DE POTENCIA CON TRIPULANTES REALES.....	94
6. CONCLUSIONES	98
7. RECOMENDACIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS.....	109

LISTA DE FIGURAS

	pag.
Figura 1. Contadores de potencia y corriente	29
Figura 2. Baterías donde se almacena la energía generada	30
Figura 3. Regulador de Carga.....	30
Figura 4. Inversor de Potencia	31
Figura 5. Bicicletas implementadas en “California Fitness”	31
Figura 6. Bicicletas implementadas en “California Fitnes”	32
Figura 7. Elíptica ofrecida por MotorGym	32
Figura 8. Bicicleta estática ofrecida por MotorGym.....	33
Figura 9. Vista frontal del “Team Dynamo”	34
Figura 10. Centro de potencia del “Team Dynamo”	35
Figura 11. Ejemplo de instalación de “The Great Outdoor Gym Company”	36
Figura 12. Puerto USB disponible para cargar dispositivos celulares.....	36
Figura 13. Diagrama básico de los subsistemas diseñados	41
Figura 14. Plano del sistema de generación.....	42
Figura 15. Esquema de conexión del subsistema conectado a la red	43
Figura 16. Esquema de conexión del subsistema aislado	43
Figura 17. Diagrama básico del sistema de generación	44
Figura 18. Fotografía de la bicicleta spinning empleada	45
Figura 19. Tablero de control ubicado en la bicicleta.....	46
Figura 20. Diagrama unifilar del subsistema aislado y subsistema conectado a la red	47

Figura 21. Diagrama unifilar para monitorización de variables	48
Figura 22. Sistema de frenado para la prueba de potencia	52
Figura 23. Acople mecánico para el sensado de la velocidad del volante de inercia	53
Figura 24. Panel frontal de VI diseñado para la prueba de potencia	53
Figura 25. Motor DC empleado como alternativa de generación.....	58
Figura 26. Rotor, rodamientos y caja de escobillas del motor	58
Figura 27. Diseño del sistema de transmisión de potencia mecánica.....	60
Figura 28. Polea acoplada al generador en el sistema de transmisión.....	60
Figura 29. Implementación de la polea en V para el volante de inercia de la bicicleta estática	61
Figura 30. Diseño del acople mecánico del sistema de inyección de potencia mecánica	62
Figura 31. Diagrama de conexión del sistema de inyección de potencia..... mecánica	62
Figura 32. Panel frontal del VI empleado en la monitorización de las pruebas..... de potencia y rendimiento	63
Figura 33. Diagrama unifilar del sistema de monitorización.....	67
Figura 34. Programación del <i>DAQ Asssistant</i> para la adquisición de datos	68
Figura 35. División de las señales sensadas	69
Figura 36. Recuperación de la señal de tensión DC sensada	70
Figura 37. Recuperación de la señal de corriente DC sensada.....	70
Figura 38. Recuperación de la señal de tensión AC sensada	70
Figura 39. Recuperación de la señal de corriente AC sensada.....	71
Figura 40. Medición del valor medio para señales DC.....	72

Figura 41. Medición del valor eficaz para señales AC	72
Figura 42. Medición de potencia para señales DC o AC	73
Figura 43. Estructura de casos para la medición de velocidad del volante de..... inercia - case true	73
Figura 44. Estructura de casos para la medición de velocidad del volante de..... inercia - case false	74
Figura 45. Estructura de casos para la medición del rendimiento del sistema de generación - case true	75
Figura 46. Estructura de casos para la medición del rendimiento del sistema de generación - case false	75
Figura 47. Almacenamiento de los parámetros eléctricos medidos en el VI.....	78
Figura 48. Control principal del VI.....	80
Figura 49. Indicadores numéricos del rendimiento del sistema	80
Figura 50. Indicadores del consumo de la carga aislada	81
Figura 51. Indicadores de parámetros del sistema Grid Tie	81
Figura 52. Indicadores gráficos y numéricos de las tensiones del sistema..... de generación	82
Figura 53. Indicadores parámetros del generador	82
Figura 54. Indicadores del estado de la batería	83
Figura 55. Indicadores de velocidad	84
Figura 56. Tensión en bornes del motor DC en función de la corriente de rotor bloqueado	87
Figura 57. Tensión inducida en el motor DC en vacío en función de la velocidad del volante	88
Figura 58. Potencia de vacío del motor de inducción a diferentes frecuencias	89

Figura 59. Comportamiento en vacío del motor DC empleado como alternativa ...91 de generación	91
Figura 60. Curva de funcionamiento del alternador de automóvil92	92
Figura 61. Curva de funcionamiento del motor DC como generador92	92
Figura 62. Comparación de la eficiencia de las alternativas de generación93	93
Figura 63. Evolución por minuto de los tripulantes con el generador de.....94 automóvil	94
Figura 64. Evolución por minuto de los tripulantes con el motor DC como95 alternativa de generación	95
Figura 65. Prueba de potencia generada del tripulante 1 empleando el.....95 alternador de automóvil.	95
Figura 66. Prueba de potencia generada del tripulante 1 empleando el.....96 motor DC como generador.	96
Figura 67. Evolución del tripulante 1 en las pruebas de alternativas de97 generación	97
Figura 68. Fases técnicas del pedaleo 110	110
Figura 69. Punto de apoyo en el pedal 114	114
Figura 70. Esquema de Monitorización a través de DAQ. 116	116
Figura 71. Representación de una señal muestreada 121	121
Figura 72. Aliasing en una señal analógica 121	121
Figura 73. Funcionalidad del filtro Anti-Aliasing 122	122
Figura 74. Toma de muestras con el circuito Sample and Hold..... 122	122
Figura 75. Conversión de la muestra a números. 123	123
Figura 76. Elementos de un VI. Panel frontal (Izq.) y diagrama de 125 bloques (Der).	125
Figura 77. Paleta de controles del panel y paleta de funciones del diagrama 126 de bloques.	126

Figura 78. Estructura While. Tomada del software LabVIEW.....	127
Figura 79. Estructura <i>for</i> . Tomada del software LabVIEW.....	128
Figura 80. Estructura case. Tomada del software LabVIEW.	128
Figura 81. Comando DAQ-Assistant.....	129
Figura 82. Módulo NI USB 6009 (National Instruments)	131
Figura 83. Componentes del módulo NI USB 6009 (National Instruments)	132

LISTA DE TABLAS

	pag.
Tabla 1. Trabajos relacionados con generación eléctrica a partir de bicicletas	38
Tabla 2. Funciones de los interruptores del panel de control de la bicicleta	47
Tabla 3. Características de los elementos utilizados para la monitorización	49
Tabla 4. Nivel de dificultad y par de frenado	52
Tabla 5. Rangos de estado físico.....	56
Tabla 6. Descripción de los sensores del sistema de monitorización	66
Tabla 7. Resumen de resultados por niveles de la potencia entregada y velocidad de pedaleo en la prueba de potencia	86
Tabla 8. Características principales de las alternativas de generación.....	89
Tabla 9. Características principales del módulo NI USB 6009.....	130
Tabla 10. Resultados de la encuesta de condición física	135
Tabla 11. Costos de implementación.....	138

ANEXOS

	pag.
Anexo A. Fisiología del ciclista.....	109
Anexo B. Principios de monitorización.....	116
Anexo C. Hardware de adquisición empleado en el sistema de monitorización .	130
Anexo D. Formulario de la encuesta de condición física	133
Anexo E. Evaluación de la condición física.....	135
Anexo G. Costos de implementación.....	138
Anexo F. Archivos digitales.....	142

RESUMEN

TÍTULO: MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE UN PILOTO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BICICLETAS ESTÁTICAS*.

AUTORES: RONALD ANDRÉS RENGIFO MEJÍA**
RUSBER OCTAVIO RODRIGUEZ VELASQUEZ**
FERNANDO AUGUSTO RUEDA CHACÓN**.

PALABRAS CLAVES: Monitorización, Instrumento Virtual–VI, Bicicleta de Spinning, Potencia mecánica, Potencia eléctrica, Generación eléctrica, Punto de máxima potencia, Rendimiento.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de investigación presenta el mejoramiento del desempeño energético de un piloto de generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta spinning. El piloto se implementó con un generador perteneciente a un vehículo Nissan, serie Patrol; asimismo, incluyó un sistema de monitorización con una tarjeta Arduino configurada para trabajar con el software LabView. El proceso de mejoramiento parte de un análisis de la potencia mecánica suministrada por un tripulante en el volante de inercia de la bicicleta, encontrando una potencia máxima de 204 W y una potencia media de 62,13W en un periodo de seis (6) minutos de pedaleo. De acuerdo a estos resultados, se seleccionó un generador con potencia nominal de 150W de imanes permanentes. Además se implementó un sistema de sincronización para la transmisión mecánica, ya que el acople inicial presentaba pérdidas por deslizamiento y desgaste de los componentes. Respecto al sistema de monitorización, se disminuyeron los sensores empleados y se empleó un módulo NI USB 6009 para la adquisición de datos y la interfaz de LabVIEW, aumentando la compatibilidad entre los componentes, lo que mejoró el procesamiento de datos y la interfaz.

Para evidenciar la mejora del desempeño energético, se diseñó un sistema de inyección de potencia mecánica controlada, conformado por un motor de inducción de 2 HP y un variador de frecuencia. Con este sistema, se midió la potencia eléctrica que ingresaba al motor y la potencia eléctrica que fluía en las etapas del sistema generador. Al realizar pruebas con ambos generadores en las mismas condiciones, se evidenció una mejora del 60% de rendimiento, concluyendo que el generador de imanes permanentes es una opción acertada para sistemas de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Msc. German Alfonso Osma Pinto. Codirector: Dr. Gabriel Ordóñez Plata.

ABSTRACT

TITLE: IMPROVING THE ENERGY PERFORMANCE OF A PILOT POWER GENERATION FROM STATIC BIKES*.

AUTHORS: RONALD ANDRÉS RENGIFO MEJÍA**
RUSBER OCTAVIO RODRIGUEZ VELASQUEZ**
FERNANDO AUGUSTO RUEDA CHACÓN**.

KEYWORDS: Monitoring, Virtual Instrument– VI, Spinning bike, Mechanical Power, Electric Power, Electric Generation, Maximum Power Point, Performance.

DESCRIPTION:

This research presents the improvement of the energy performance of a pilot power generation from a static bikes. The pilot was implemented with a generator belonging to a Nissan Patrol vehicle; also, it included a monitoring system with Arduino card configured to work with LabView software. The improvement process begins with an analysis of the mechanical power supplied by a crew member on the flywheel of the bike, finding a maximum power of 204 W and an average power of 62,13W over a period of six (6) minutes pedaling. According to these results, a generator with nominal power of 150W permanent magnet is selected. In addition, a synchronization system for mechanical transmission is implemented, as the initial coupling showed losses sliding and component wear. With regard to the monitoring system , the sensors used is decreased and a USB NI 6009 module for data acquisition and LabVIEW interface is used , increasing the compatibility of components , improving data processing and interface.

To demonstrate the improvement of energy performance, a controlled mechanical injection system was designed, consisting of a 2 HP induction motor and a frequency converter. With this system, the electrical power that entered the engine and the electric power flowing in Steps generator system was measured. When testing with both generators under the same conditions, an improvement of 60 % yield was evident, concluding that the permanent magnet generator is a wise choice for systems generating electricity from stationary bikes.

* Bachelor Thesis

** Physic-mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering School. Director: Msc. German Alfonso Osma Pinto. Codirector: PhD. Gabriel Ordóñez Plata.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de energías alternativas es el siguiente paso en el desarrollo energético, a raíz de la escasez, altos costos, menor disponibilidad y alto impacto ambiental de los combustibles fósiles. Sólo en Colombia, el 75% de la producción de energía proviene de recursos hidráulicos, el 19% de centrales térmicas y el 6% de generación a menor escala, lo cual ocasiona un gran impacto ambiental. Dadas estas condiciones en Colombia y en todo el mundo, se han venido fomentando investigaciones sobre fuentes de energía más rentables y amigables con el medio ambiente.

Entre estas fuentes de energía, sobresalen la eólica, la hídrica, la solar y la geotérmica. En menor escala de importancia aparece el aprovechamiento de la energía cinética producida por un tripulante sobre una bicicleta *spinning*, la cual es generalmente transformada y desperdiciada en forma de calor producto de la fricción entre la transmisión, el volante y el freno de estas unidades. Su aprovechamiento se logra al convertir la energía cinética a eléctrica a través de un generador eléctrico. La energía producida de esta manera representa una fuente de energía alternativa y limpia debido a su disponibilidad, las bajas emisiones y no ser una forma de generación convencional.

Como estas máquinas son utilizadas en gimnasios y hogares, presentan una alternativa viable para generar electricidad con el fin de reducir la demanda de las redes de distribución, bajar costos por consumo e igualmente contribuir al mejoramiento del ambiente ya la sustentabilidad del lugar donde se implemente el sistema. Para lograr la generación de energía eléctrica mencionada se debe disponer de un mecanismo que permita efectuar una adecuada gestión de uso.

Aprovechando el potencial de este tipo de sistemas, Osma¹ en 2011, asociado al Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos - GISEL de la Universidad Industrial de Santander - UIS, impulsaron la iniciativa de implementar en la fase II del Edificio de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones aplicaciones energéticas sostenibles que propendieran por el uso racional de la energía. Entre estas aplicaciones, resalta el uso de bicicletas estáticas. Acorde a lo anterior, Flórez y Núñez² en 2011, proyectan el uso de un salón generador a partir de bicicletas estáticas, que consta de dieciocho (18) unidades generadoras con dos tipos de conexión, una acoplada a la red y la otra aislada con cargas.

Durán y Gil³ en 2013, implementaron un piloto generador basado en el diseño desarrollado por Flórez y Núñez, diferenciando algunos aspectos como la potencia proyectada, el uso de un generador sobredimensionado para este tipo de generación y la integración de los sistemas conectado a la red y carga aislada; ya que inicialmente se planteaban unidades separadas.

El propósito inicial de este proyecto fue identificar las ineficiencias del piloto implementado por Duran y Gil, para así llevar a cabo un mejoramiento de la eficiencia energética, además de robustecer el sistema de monitorización. Es por esto que en el capítulo 1 se exponen hallazgos de la revisión de trabajos de investigación, a partir de los cuales se definieron las mejoras potenciales que podían ser implementadas.

¹ OSMA PINTO, German Alfonso. Uso racional de la energía en el edificio de Eléctrica II a partir del diseño de aplicaciones energéticas sostenibles. Trabajo de investigación de Maestría. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica electrónica y telecomunicaciones, 2011. 253 p.

² FLÓREZ REYES, Julián Oswaldo y NÚÑEZ RODRÍGUEZ, Carlos Fabián. Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2011. 77 p.

³ DURÁN CHACÓN, José Vicente y GIL FERNÁNDEZ, Algemiro José. Generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática: montaje de una unidad piloto. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. 164 p.

En el capítulo 2 se presentan los antecedentes de este trabajo de grado, lo cuales consisten en los trabajos realizados por Flórez y Núñez y Duran y Gil. Ya en el capítulo 3 se presentan las pruebas realizadas para la mejora de la eficiencia. Este proceso de mejora partió de la realización de unas pruebas de resistencia física en los estudiantes de la Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones - E³T de la UIS. Con esto se estableció la potencia promedia generada por un estudiante común, se seleccionó y se integró un generador más conveniente acorde al umbral de potencia. Seguido de esto, se implementó un sistema de transferencia de potencia mecánica para acoplar el nuevo generador de una manera más eficiente.

Posterior a estas pruebas, se realizó una adecuación al sistema eléctrico y sistema de monitorización existentes con el fin de eliminar malfuncionamientos del piloto de generación. El diseño general del sistema eléctrico se mantuvo intacto a excepción del cambio del generador; se modificó la configuración del sistema de monitorización sin reemplazar los sensores dispuestos por Duran y Gil. Luego, se diseñó e implementó un sistema de inyección de potencia mecánica que fue alimentado por un motor asíncrono de 2 HP, el cual permitía por medio de un variador de velocidad simular el comportamiento de un tripulante de bicicleta estática. Una de las ventajas de esta implementación es la posibilidad de medir la potencia entregada.

Al final del capítulo 3, se muestran las pruebas realizadas para comprobar la mejora en la eficiencia del sistema. Estas pruebas se dividen en dos partes, la primera se realizó con potencia controlada (a través del sistema de inyección de potencia), mientras en la segunda participaron tripulantes (estudiantes de la E3T). Cabe mencionar que estas pruebas se realizaron con ambos generadores (el generador de automóvil y el motor DC de imanes permanentes), a fin de realizar una comparación adecuada.

En el capítulo 4 se detallan los cambios realizados en el sistema de monitorización, la adecuación de las conexiones, la implementación de una nueva tarjeta de adquisición de datos – DAQ debido a mayor compatibilidad con el software y los demás componentes implementados; y por último, se presenta el diseño y la programación del instrumento virtual que se empleó para la monitorización de las señales.

Después de haber realizado los cambios en el sistema y las pruebas en éste, en el capítulo 5 se analiza estadísticamente los datos recolectados, los cuales evidencian una mejora significativa en la eficiencia del sistema, además se logró brindar al usuario una sensación de pedaleo más cómoda. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones a las que se llegaron después de haber realizado el trabajo y algunas recomendaciones para futuras mejoras del sistema implementado en el capítulo 7.

1 ESTADO DEL ARTE

La idea de aprovechar la potencia mecánica entregada a una bicicleta para producir electricidad se remonta a los años 30's, donde se creó la dínamo de botella y luego la de eje, las cuales permitían aprovechar el rodamiento de la rueda de la bicicleta para producir electricidad y posteriormente alimentar luces de seguridad y señalización⁴. Estas dínamos usualmente trabajan a 5 V y permiten una salida de potencia que varía entre 3W y 15W. La baja eficiencia de estos sistemas y los pocos avances de la electrónica de potencia no permitieron emplear estos sistemas en aplicaciones de mayor potencia. Hoy en día aún se pueden ver esta clase de dispositivos en algunas bicicletas, pero no son muy utilizados, ya que aumentan considerablemente el esfuerzo al pedalear.

A lo largo de la última década se han dado varios trabajos incluyendo estudios e implementaciones de pilotos, que buscaban aprovechar esta energía. Sin lugar a dudas, dos de los trabajos⁵ más representativos en esta área han sido las implementaciones hechas en los gimnasios “*California Fitness*” de Hong Kong y “*The Green MicroGym*” de Portland, Oregon (USA).

⁴ TERRA. La bicicleta sin pilas, dinamos sin rozamiento [En línea]. 06 de mayo, 2006. [Citado: 29 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.terra.org/categorias/comunidad-ecotransporte/la-bicicleta-sin-pilas-dinamos-sin-rozamiento>>

⁵ GIBSON, Tom. Turning sweat into watts. En: IEEE Spectrum. Julio, 2011. vol 48, p. 50-55.

1.1 CALIFORNIA FITNESS⁶

“*California Fitness*” nació en 2007 como una iniciativa por parte de Steve Clinefelter, presidente de “*California Fitness*” y Lucien Gambarota, Físico y Químico inventor del sistema “*Powered by You*”, implementado en la sede principal de los gimnasios California Fitness. Steve Clinefelter quería que un día los gimnasios se basaran únicamente en energía limpia y sostenible. Según Gambarota, una persona puede generar fácilmente 50 W durante una sección de entrenamiento de baja intensidad, lo que representa un ahorro de 0,02352 kg de CO₂ liberados a la atmósfera. Si una persona se ejercita una hora diariamente, podría generar 18,2 kWh al año, lo que representaría un ahorro de 0,0085848 kg de CO₂.

Inicialmente, se implementaron dieciocho (18) máquinas (5 bicicletas estáticas, 8 caminadoras y 5 elípticas), cuyos generadores producían una tensión entre 15 y 70V, conectados a un inversor AC/DC que entregaba una tensión constante de 25V (independientemente de la tensión del generador) lo único que variaba era la corriente. Este inversor estaba conectado directamente a una batería de 24V y capacidad de 150 Ah, luego se usaba un inversor de 24V_{DC}/230V_{AC} y 1,2 kW que alimentaban tubos de luces fluorescentes conectados en paralelo.

Las pruebas iniciales se realizaron con las cinco (5) bicicletas estáticas, cuatro (4) de éstas conectadas a una batería y una (1) conectada directamente a tres (3) luces fluorescentes de 20W, 45W y 100W. Después de las pruebas realizadas con varios usuarios del gimnasio, se concluyó que el esfuerzo mecánico necesario para cargar la batería era demasiado alto para un usuario normal, por lo que se decidió implementar un sistema de regulación de carga para disminuir dicho esfuerzo,

⁶ GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

además el sistema conectado directamente a las bombillas presentaba intermitencias en la intensidad lumínica debido a la variabilidad del pedaleo.

Después de llevar a cabo la conexión de las cinco (5) elípticas y las ocho (8) caminadoras, se realizaron pruebas en el sistema, dando como resultado que las máquinas elípticas son la mejor opción para la generación de electricidad, ya que la máquina usa el peso completo del cuerpo, generando un mayor torque y haciendo que la persona fácilmente genere entre 80W y 100W. Las bicicletas estáticas y las caminadoras son diferentes, ya que en el diseño de la máquina la energía es convertida primero en energía mecánica, haciendo el sistema menos eficiente, lo que lleva a un mayor esfuerzo por parte del tripulante en la generación.

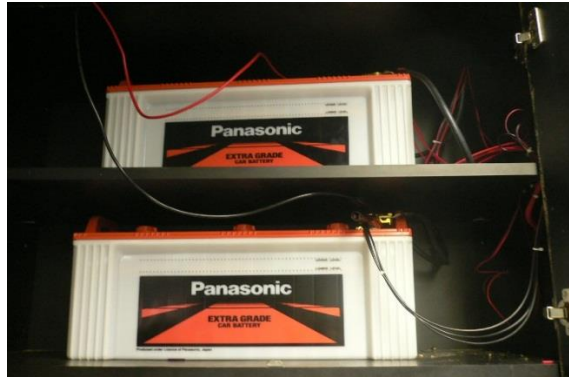
En las Figura 1 -Figura 6, se muestran algunas imágenes de la instalación realizada en el gimnasio “*California Fitness*”. En la Figura 1 se puede apreciar los contadores instalados para medir la energía entregada por el sistema y la intensidad eléctrica de la misma; en la Figura 2 las baterías utilizadas para almacenar la energía generada; en la Figura 3 el regulador de carga utilizado; en la Figura 4 el inversor implementado en la instalación y en las Figuras 5 y 6 las bicicletas estáticas utilizadas en la implementación.

Figura 1. Contadores de potencia y corriente



Fuente: GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

Figura 2. Baterías donde se almacena la energía generada



Fuente: GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

Figura 3. Regulador de Carga



Fuente: GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

Figura 4. Inversor de Potencia



Fuente: GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

Figura 5. Bicicletas implementadas en “California Fitness”



Fuente: GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

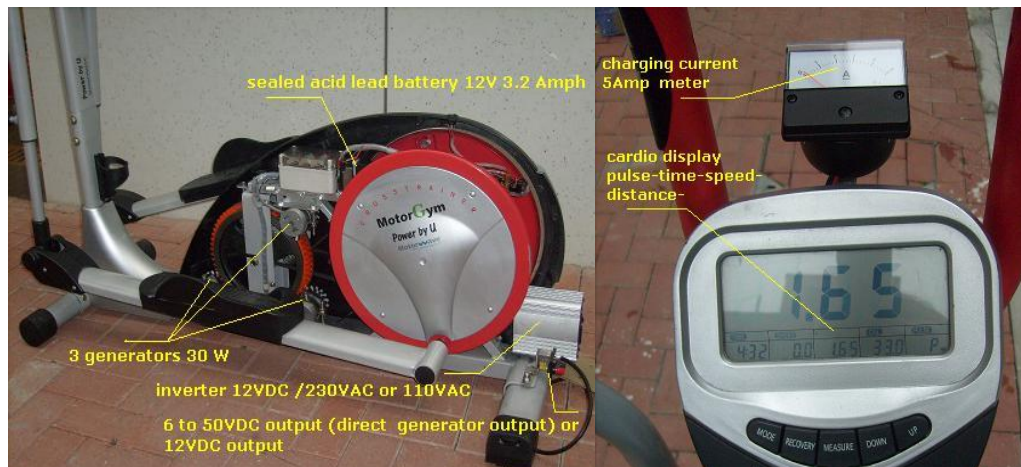
Figura 6. Bicicletas implementadas en “California Fitnes”



Fuente: GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

Después del trabajo realizado en “California Fitness”, Lucien Gambarota decidió lanzar su propia línea de máquinas para ejercicio con la capacidad de generar energía eléctrica, esta línea es promocionada por “MotorGym Co Ltd”, empresa filial a “MotorWave Co Ltd”. En la Figura 7 se puede apreciar el sistema ofrecido para una máquina elíptica y en la Figura 8 el sistema ofrecido para una bicicleta estática.

Figura 7. Elíptica ofrecida por MotorGym



Fuente: GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

Figura 8. Bicicleta estática ofrecida por MotorGym



Fuente: GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

1.2 THE GREEN MICROGYM⁷

“*The Green MycroGym*” es un gimnasio situado en Portland Oregon, Estados Unidos. Fue inventado por Adam Boesel en 2008. Adam Boesel es profesor y entrenador personal, quién un día se preguntó “¿No sería genial si los miembros del gimnasio pudieran generar electricidad cuando ellos se ejercitan?”. Después de esto encuentra que hay muchas investigaciones, especulaciones y experimentos al respecto, pero muy pocas o ninguna implementación de un gimnasio que generara su propia electricidad. Debido a esto contacta con Mike Tagget de “*Human Dynamo*” para así diseñar el sistema “*Team Dynamo*”, creado específicamente para esta tarea.

Según Boesel, un ciclista profesional puede producir más de 400 W, pero la persona promedio en un buen estado físico, puede generar solo entre 50W y 150 W, durante

⁷ HUMAN DYNAMO. Technical Info. [En línea] [Citado: 29 de Noviembre de 2014] Disponible en internet: <http://www.humandynamo.com/technical_info.html>

una hora de ejercicio⁸, esto podría alimentar un televisor durante una hora. Si una máquina se utiliza durante 5 horas por día, los 365 días del año y cada persona genera 100 W mientras la usa, la máquina generará 183 kWh al año. Es por esto que acompañado a las bicicletas estáticas se decidió implementar un sistema de generación con paneles solares. Se estima que “*The Green MicroGym*” genera un 36% de la energía eléctrica que consume.

Desafortunadamente, no se encuentran disponibles muchos detalles técnicos del sistema “*Team Dynamo*”, solamente que el generador utilizado tiene una eficiencia del 70% y que se conectan varias máquinas a un solo generador. En la Figura 9 se puede ver el “*Team Dynamo*” y en la Figura 10 el centro de potencia del sistema, donde se encuentran alojados el generador, la batería y el inversor de potencia.

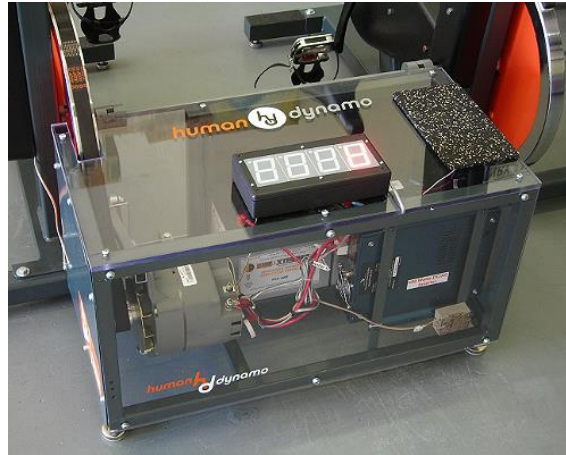
Figura 9. Vista frontal del “*Team Dynamo*”



Fuente: HUMAN DYNAMO. Technical Info. [En línea] [Citado: 29 de Noviembre de 2014] Disponible en internet: <http://www.humandynamo.com/technical_info.html>

⁸ Citado por: GIBSON, Tom. Turning sweat into watts. En: IEEE Spectrum. Julio, 2011. vol 48, p. 50-55.

Figura 10. Centro de potencia del “Team Dynamo”



Fuente: HUMAN DYNAMO. Technical Info. [En línea] [Citado: 29 de Noviembre de 2014] Disponible en internet: <http://www.humandynamo.com/technical_info.html>

1.3 THE GREAT OUTDOOR GYM COMPANY⁹

“*The Great Outdoor Gym Company*” es una empresa de Reino Unido, dedicada a la fabricación e implementación de gimnasios al aire libre los cuales permiten generar electricidad mientras se utilizan. Para este propósito se utilizan máquinas elípticas, bicicletas reclinadas, bicicletas de spinning y bicicletas de mano. Se estima que cada persona puede generar en estos equipos una potencia promedio entre 50 W y 100 W. En la Figura 11 se puede apreciar uno de estos gimnasios al aire libre; en la imagen se puede apreciar un dispositivo en el centro el cual permite medir la potencia generada en cada momento.

⁹ THE GREAT OUTDOOR GYM COMPANY. Green energy [En línea]. 2013. [Citado: 05 de abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.tgogc.com/Green-Energy.html>>

Figura 11. Ejemplo de instalación de “The Great Outdoor Gym Company”



Fuente. THE GREAT OUTDOOR GYM COMPANY. Green energy [En línea]. 2013. [Citado: 05 de abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.tgogc.com/Green-Energy.html>>

Además cada máquina cuenta con una salida USB, que permite cargar dispositivos electrónicos, especialmente celulares. En la Figura 12 se puede apreciar esta característica.

Figura 12. Puerto USB disponible para cargar dispositivos celulares



Fuente. THE GREAT OUTDOOR GYM COMPANY. Green energy [En línea]. 2013. [Citado: 05 de abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.tgogc.com/Green-Energy.html>>

“*The Great Outdoor Gym Company*” se encarga de la fabricación y de la implementación de los gimnasios al aire libre, por este motivo no se encuentra

disponible información técnica sobre los generadores, elementos de electrónica de potencia y demás dispositivos utilizados en este sistema.

1.4 OTROS TRABAJOS

En el 2010 la organización Working Bikes, exhibió en la “*Midwest Renewable Energy Fair*” dos aplicaciones de aprovechamiento de la potencia humana, como son el uso de una bicicleta de montaña y la utilización de una dinamo de botella sobre una bicicleta, para aplicaciones de baja potencia¹⁰.

Asimismo, en el año 2011 la empresa Finlandesa NOKIA desarrolló el Nokia DC-14, el cual es un kit de accesorios acoplables a una bicicleta común que permite cargar el teléfono móvil a 5 V y entrega una potencia máxima de 6 W¹¹.

Además del interés comercial de estos sistemas, un gran número de universidades alrededor del mundo como la “*California Polytechnic State University*”¹² y “*Amrita Vishwa Vidyapeetham University*”¹³, han incorporado en sus trabajos investigativos la implementación de este tipo de sistemas. Debido a este interés y al uso de la bicicleta como principal medio de transporte en India, en el año 2012 Megalingam, Sreedharan, Murali y Katoch, propusieron un sistema de generación a base de pedales para suministrar energía eléctrica a zonas no interconectadas al sistema de

¹⁰ WORKING BIKES COOPERATIVE. Human powered machine innovations exhibited at the 2010 Midwest Renewable Energy Fair [En línea] 2010. [Citado: 29 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.workingbikes.org/human-powered-machine-innovations-exhibited-at-the-2010-midwest-renewable-energy-fair-by-working-bikes-cooperative/>>

¹¹ NOKIA. Manual de usuario NOKIA bicycle charger kit DC-14. Finlandia: 2010.

¹² ROUNSEVELL, Jared, et al. Harvesting human exercise at the Cal Poly Rec center: Exercise bike power generator II. Trabajo de pregrado. San Luis Obispo, Estados Unidos: California Polytechnic State University. Mechanical Engineering Department, 2009. 92 p.

¹³ MEGALINGAM, Rajesh Kannan, et al. Pedal Power Generation. En: Internal Journal of Applied Engineering Research. 2012. vol. 7, no. 11. ISSN 0973-4562

potencia. En este estudio evidenciaron que la generación a través de un alternador era mejor para aplicaciones de gran potencia y que la dinamo era apropiada para aplicaciones de baja potencia, además, concluyeron que era una solución viable para la crisis energética que se aproxima.

Otro estudio interesante es el de Sanjay Samuel¹⁴, quien en 2014 diseñó un sistema electromagnético, el cuál aprovecha el giro del volante de inercia presente en una bicicleta estática, para generar energía eléctrica. Dicho proyecto está encaminado en diseñar un prototipo energético ajustable a cualquier bicicleta presente en un gimnasio. Al final del estudio se concluyó que la potencia generada por un único dispositivo no era significativa, pero al implementarse en un gimnasio donde el número de máquinas es mayor, podría generar beneficios económicos y ambientales. La

Tabla 1 presenta un resumen de estos trabajos y otros más que se han consultado.

Tabla 1. Trabajos relacionados con generación eléctrica a partir de bicicletas

Año	Lugar	Tipo de Máquina	Tipo de Trabajo	Carácter del Estudio	Comentarios
2008	Hong Kong, China	Spinning y Elíptica	Implementación	Comercial	Implementación en 18 máquinas para cargar una batería y alimentar luces Fluorescentes (Gibson, 2011).
2008	Portland, Oregon USA	Spinning	Implementación	Comercial	Implementación mixta con paneles solares, que logró generar un 36% de la energía consumida por el gimnasio (Gibson, 2011).
2008	Portland, Oregon, USA	Spinning	Implementación	Comercial	Se diseñó un grupo de bicicletas estáticas, conectadas a un único generador para generar potencia en el gimnasio <i>The Green MycroGym</i> (Human Dynamo, 2014), (Gibson, 2011).
2009	San Luis Obispo, USA	Bicicleta estática	Diseño y fabricación	Investigativo	Se construyó un nuevo tipo de máquina para hacer ejercicio, el cual se construyó especialmente para generar electricidad. Esta generaba fácilmente 100 W a 70 rpm (Rounsevell <i>et al.</i> , 2009).

¹⁴ SANJAY, Samuel David. Harvesting electrical energy from a stationary bike: An experimental approach. Tesis de maestría. Palmerston North, Nueva Zelanda: Massey University. School of engineering and advanced technology, 2014. 163 p.

Tabla 1. Trabajos relacionados con generación eléctrica a partir de bicicletas (continuación)

Año	Lugar	Tipo de Máquina	Tipo de Trabajo	Carácter del Estudio	Comentarios
2009	San Diego, USA	Bicicleta estática	Simulación	Investigativo	Simulación de los componentes eléctricos que se utilizarían para generar energía eléctrica a partir de una bicicleta estática. (Huber, Sanchez, & Sato, 2009).
2010	Wisconsin, Estados Unidos	Bicicleta de Montaña	Implementación	Investigativo	Utilizaron una polea en V, para conectar el generador con la rueda. Estimaron una potencia generada entre 0 y 200 W (Working Bikes Cooperative, 2010)
2010	Wisconsin, Estados Unidos	Bicicleta con Dinamo de botella	Implementación	Investigativo	Utilizaron una dinamo de botella con potencia nominal 6 W, para cargar un dispositivo electrónico de 5 V (Working Bikes Cooperative, 2010).
2011	Bucaramanga, Colombia	Bicicleta estática	Diseño	Investigativo	Diseño realizado para una posterior implementación de 18 máquinas generadoras, se contemplaron 3 subsistemas eléctricos que permitían entregar potencia a la red, a una carga aislada y almacenar en una batería. (Flórez Reyes & Núñez Rodríguez, 2011)
2013	Bucaramanga, Colombia	Bicicleta estática	Implementación de un piloto	Investigativo	Implementación de un piloto del diseño establecido en (Flórez Reyes & Núñez Rodríguez, 2011). En el cual se utilizó un alternador de carro para generar la potencia Eléctrica (Durán Chacón & Gil Fernández, 2013)
2013	Bogotá, Colombia	Bicicleta estática	Estudio de factibilidad	Investigativo	Un estudio realizado para analizar la cantidad de energía disponible en esta clase de sistemas y su posterior aprovechamiento, pensando en posibles aplicaciones de generación distribuida. (Benitez R., González H., & Rosero G., Diciembre 2013)
2014	Palmerston North, Nueva Zelanda	Bicicleta estática	Diseño e implementación	Investigativo	Se diseñó e implementó un sistema electromagnético que aprovecha el giro del volante de inercia de una bicicleta estática, para generar energía eléctrica. Se logró un máximo de generación 3,76 W a una velocidad del volante de 110 rpm (Sanjay, 2014)

2 ANTECEDENTES

Los antecedentes principales de este trabajo de investigación son el diseño del sistema de generación eléctrica a partir de bicicletas estáticas propuesto por Núñez y Flórez en 2011 y la implementación del piloto por Durán y Gil en 2013, donde se validan las consideraciones del diseño. En esta sección se presentan aspectos claves del diseño y la implementación que facilitan la comprensión de las estrategias de mejoras.

2.1 DISEÑO (NUÑEZ Y FLORES, 2011)

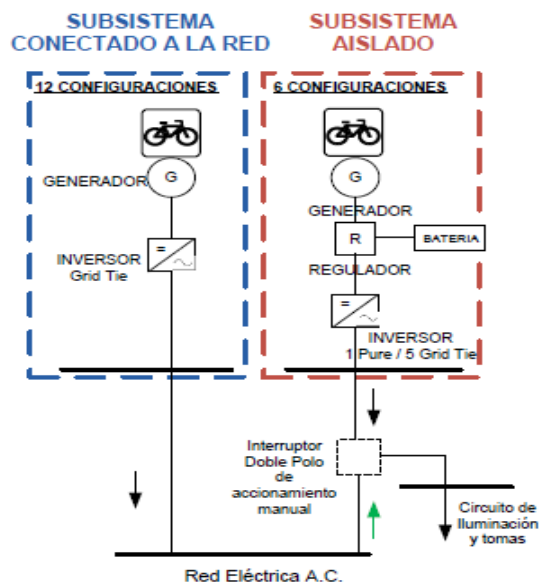
En 2011, Núñez y Flórez presentaron el diseño de un sistema para el aprovechamiento de la energía cinética desarrollada por las piernas de un tripulante sobre una bicicleta *spinning*. Este diseño cuenta con dieciocho (18) configuraciones bicicleta – generador, agrupadas en dos sub sistemas, doce (12) en un subsistema conectado a la red y seis (6) en un subsistema aislado tal como lo muestra la Figura 13. La totalidad de configuraciones se determinó con base en el área del recinto (aproximadamente 54 m²) donde se plantea la implementación. La disposición de las configuraciones en el recinto se presenta en la Figura 14.

Los parámetros eléctricos de diseño se establecieron con base en la velocidad desarrollada por un tripulante en el volante de una bicicleta estática por ser el factor más determinante en los generadores eléctricos comerciales. Mediante mediciones de velocidad a tres participantes de una clase de *indoor cycling* de 50 minutos en el Centro Médico Deportivo BODYTECH, de la ciudad de Bucaramanga, se determinó una velocidad media de 242 rpm. Según la curva de operación del generador

seleccionado (Pedal Power, valores de placa: 300W, 15V, 20A, 2.800 rpm), se estimó una potencia efectiva de 270 W por unidad de generación.

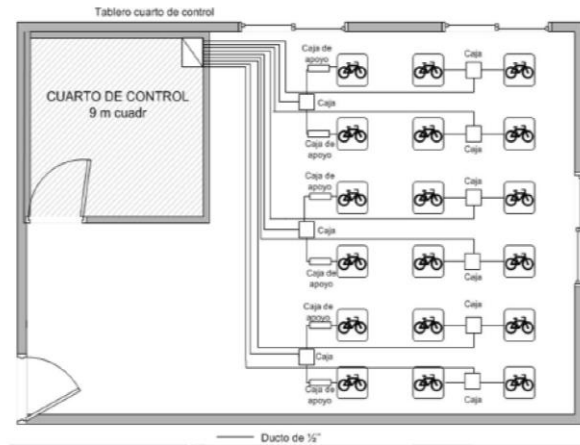
Para el acople mecánico entre la bicicleta y el generador, se seleccionó en 16 configuraciones el acople directo por presentar mayor facilidad en la implementación y por ser adecuado para cualquier modelo de bicicleta estática, en las dos configuraciones restantes se seleccionó “acople por rodillo” y “acople tipo llanta”.

Figura 13. Diagrama básico de los subsistemas diseñados



Fuente: FLÓREZ REYES, Julián Oswaldo y NÚÑEZ RODRÍGUEZ, Carlos Fabián. Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2011. p. 27.

Figura 14. Plano del sistema de generación

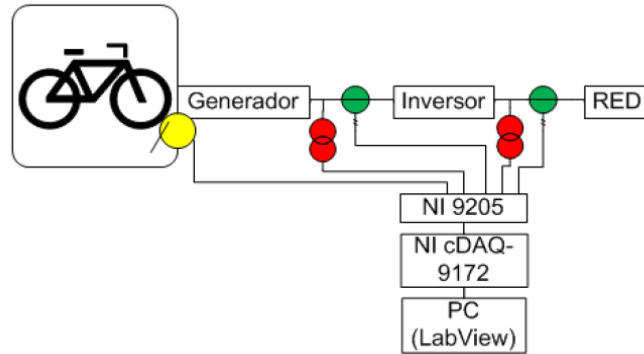


Fuente: FLÓREZ REYES, Julián Oswaldo y NÚÑEZ RODRÍGUEZ, Carlos Fabián. Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2011. p. 29.

En el sistema conectado a la red, la etapa de gestión de energía se realiza por medio de un (1) inversor *Grid Tie* para cada configuración (12 en total) que conecta el generador con la red eléctrica del recinto. En el sistema aislado se adiciona una (1) batería a cada configuración para almacenamiento de energía. La etapa de gestión de energía consiste en un (1) inversor de potencia tipo *Pure* que establece la tensión y frecuencia de la red aislada y cinco (5) Inversores *Grid Tie* que se sincronizan con ella. La carga aislada está conformada por iluminación y tomacorrientes con demanda instalada de 1,8 kW (Flórez Reyes & Núñez Rodríguez, 2011).

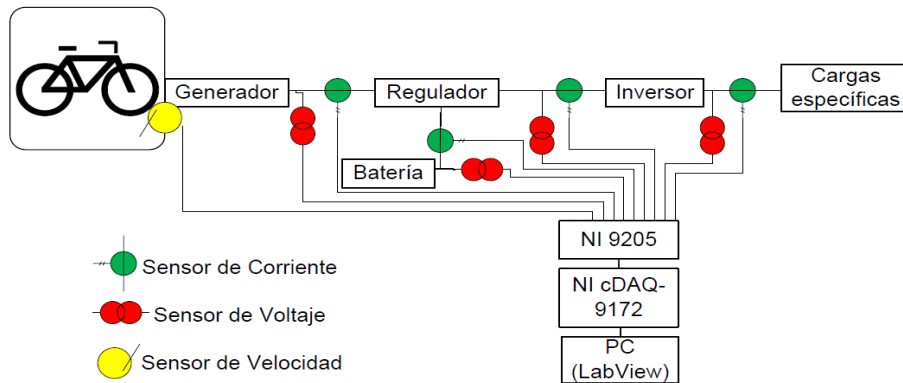
La monitorización del sistema de generación se diseñó mediante el software LabVIEW de National Instruments empleando para la adquisición de datos un (1) chasis NI CompactDAQ-9178 con la adición de ocho (8) módulos E/S NI 9205, cada uno con disponibilidad de 16 entradas analógicas diferenciales con un rango de entrada de ± 200 mV a ± 10 V, de las cuales se emplean 122 entradas entre señales de tensión, corriente y velocidad adaptadas por medio de sensores. Las figuras 15 y 16 presentan la conexión de los sensores del subsistema conectado a la red y el subsistema aislado respectivamente.

Figura 15. Esquema de conexión del subsistema conectado a la red



Fuente: FLÓREZ REYES, Julián Oswaldo y NÚÑEZ RODRÍGUEZ, Carlos Fabián. Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2011. p. 31.

Figura 16. Esquema de conexión del subsistema aislado



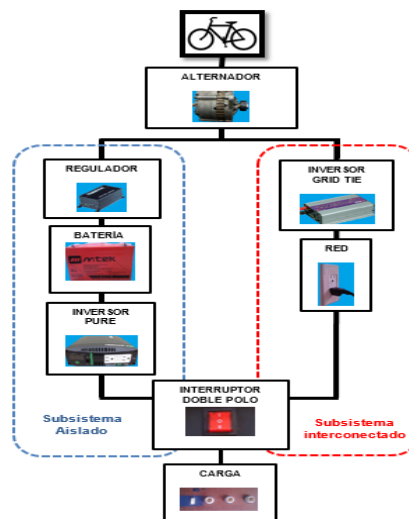
Fuente: FLÓREZ REYES, Julián Oswaldo y NÚÑEZ RODRÍGUEZ, Carlos Fabián. Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2011. p. 31.

2.2 IMPLEMENTACIÓN (DURAN Y GIL, 2013)

Con base en el diseño expuesto por Núñez y Flórez, Durán y Gil implementaron un piloto de generación a partir de una bicicleta estática. El piloto consta de la unión mecánica de un generador (alternador) al volante de inercia de la bicicleta, para lo cual se diseñó una base metálica de soporte adicionada al marco de la bicicleta y se empleó un acople directo por tuerca de goma que permite una relación de velocidad de 11,06 entre el volante y el generador.

El alternador empleado corresponde al de un automóvil (Nissan Patrol) cuya potencia nominal es de 600 W y un margen de operación de 1 800 rpm a 6 000 rpm, además tiene un sistema de rectificación interno que entrega tensión DC en los terminales. El sistema mencionado cuenta con dos subsistemas, uno aislado y otro conectado a la red tal como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Diagrama básico del sistema de generación



Fuente: DURÁN CHACÓN, José Vicente y GIL FERNÁNDEZ, Algemiros José. Generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática: montaje de una unidad piloto. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. p. 19.

El funcionamiento sólo se da con un subsistema a la vez. La carga específica a alimentar por el subsistema aislado consta de tres (3) bombillas incandescentes de 60 W. La Figura 18 muestra una fotografía de la bicicleta estática empleada en el piloto de generación.

Figura 18. Fotografía de la bicicleta spinning empleada



Fuente: DURÁN CHACÓN, José Vicente y GIL FERNÁNDEZ, Algemiro José. Generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática: montaje de una unidad piloto. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. p. 20.

La transformación de energía de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) se realiza con inversores de potencia. En el sistema aislado se emplea un inversor *Pure* marca *XANTREX* modelo *PROwatt SW 600W* que origina una onda de salida altamente sinusoidal. Su rango de operación en tensión de entrada DC es de 10,5 V a 15,5 V, y salida AC de 104 V a 127 V, con frecuencias desde 59,5Hz a 60,5Hz.

El subsistema conectado a la red emplea un inversor *Grid Tie* modelo *SUN-300G* con potencia máxima de 300 W de salida AC correspondientes a frecuencias desde 46 Hz a 65 Hz que van ligadas a un factor de potencia de 0,99, una distorsión armónica en corriente menor del 5% con consumo de energía menor de 0,5 W y una escala de temperatura de -10°C a 40 °C para su funcionamiento. El rango de

trabajo es entre 90 V a 130 V. Una de las características destacadas de este inversor es que incorpora la función MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) que permite extraer la máxima potencia del sistema.

Esta función es especialmente útil para la eficiencia de la generación ya que permite trabajar a la máxima potencia posible (según la capacidad del tripulante) y mitiga los problemas de regulación de tensión en la etapa de generación¹⁵.

El funcionamiento del sistema de generación se controla mediante un tablero de interruptores ubicado en el panel frontal de la bicicleta estática, el cual se presenta en la Figura 19. La Tabla 2 muestra la descripción de los interruptores de este tablero. Las Figuras 20 y 21 presentan los diagramas unifilares de los subsistemas del piloto y el sistema de monitorización respectivamente.

Figura 19. Tablero de control ubicado en la bicicleta



Fuente: DURÁN CHACÓN, José Vicente y GIL FERNÁNDEZ, Algemiro José. Generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática: montaje de una unidad piloto. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. p. 20.

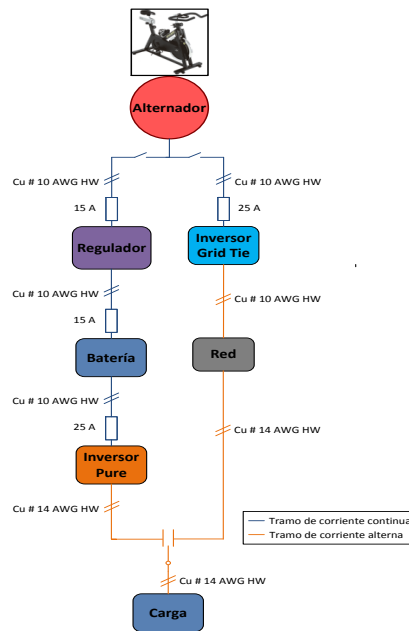
¹⁵ TING-CHUNG, Yu y YU-CHENG, Lin. Fuzzy controller for a voltage-regulated solar-powered MPPT system for hybrid power system applications. En: *Energies*, 2015. vol 8, p. 3292-3312. ISSN 1996-1073

Tabla 2. Funciones de los interruptores del panel de control de la bicicleta

Interruptor	Función
Campo	Se encarga de energizar el alternador permitiendo el paso de la corriente al campo de excitación del mismo. Es accionado una vez se inicie el pedaleo en la bicicleta.
Regulador	Permite encender o apagar el regulador de tensión que está conectado con la batería. Se utiliza para el funcionamiento del subsistema aislado, al momento de cargar la batería.
Grid Tie	Implementado para energizar el Inversor <i>Grid Tie</i> directamente de los terminales de salida del alternador. Activa el funcionamiento del subsistema conectado a la red.
Interruptor de 3 (tres) posiciones - doble polo Pure/Red	En posición neutra, no hay paso de corriente hacia la carga; en posición Pure, permite que la corriente fluya de la salida del Inversor <i>PURE</i> hacia la carga. En la posición Red, se habilita el paso de corriente desde la red hasta la carga.

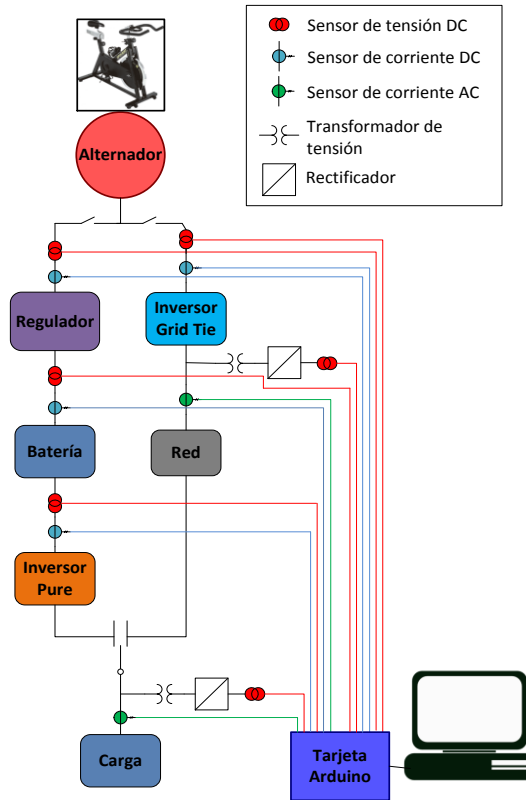
Fuente: DURÁN CHACÓN, José Vicente y GIL FERNÁNDEZ, Algemiro José. Generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática: montaje de una unidad piloto. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. p. 21.

Figura 20. Diagrama unifilar del subsistema aislado y subsistema conectado a la red



Fuente: DURÁN CHACÓN, José Vicente y GIL FERNÁNDEZ, Algemiro José. Generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática: montaje de una unidad piloto. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. p. 25.

Figura 21. Diagrama unifilar para monitorización de variables



Fuente: DURÁN CHACÓN, José Vicente y GIL FERNÁNDEZ, Algemiro José. Generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática: montaje de una unidad piloto. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. p. 39.

2.3 LIMITANTES DEL PILOTO DE GENERACIÓN

El principal limitante de la eficiencia del piloto implementado por Duran y Gil en 2013, es el empleo de un alternador con potencia nominal de 600 W y pérdidas por alimentación del campo. Otro factor importante es la transmisión de potencia mecánica por acople directo (fricción entre la tuerca de goma del generador y el volante de inercia de la bicicleta), ya que, en cambios bruscos del par aplicado por el tripulante se produce deslizamiento provocando pérdidas de potencia y desgaste en el acople.

Adicional a las dificultades de eficiencia, no se cuenta con un sistema de monitorización robusto, debido principalmente a poca compatibilidad entre la tarjeta de adquisición de datos (Arduino) y el software utilizado (LabVIEW) para el desarrollo del instrumento virtual (VI). Además se emplea un transformador de potencia y una etapa de rectificación AC-DC para adecuar los datos de medición de tensión alterna, generando pérdida de información en las señales sensadas.

Tabla 3. Características de los elementos utilizados para la monitorización

Computador Toshiba	El PC utilizado tiene memoria RAM de 5GB, disco duro de 300GB y un procesador CORE i3.
Tarjeta Arduino Mega 2560	Este tipo de tarjeta consta de un procesador <i>ATmega 2560</i> con CPU @16Mhz. Está constituida por 16 entradas analógicas y 54 salidas digitales en rangos de tensión de operación de 5 V. Trabaja a una tasa de baudios máxima de 115.200 unidades de señal por segundo con comunicación USB/Serial.
Sensor de tensión DC0-25V	La tensión máxima de entrada analógica que este módulo puede alcanzar es de 25 V, con una resolución de 0,00489 V correspondiente a los 5 V con que se debe alimentar, sobre la conversión de los 10 bits que la tarjeta Arduino maneja ($2^{10} = 1.023$). Este módulo posee 3 (tres) terminales entre los cuales está la señal de salida S, alimentación VCC y tierra GND.
Sensor de corriente ACS712-30A	Ofrece medidas de corrientes en AC o DC entre los -30 A y los +30 A en un ancho de banda de 80 kHz. Tiene tres pines entre los cuales se encuentran el VCC, OUT y GND, indicando alimentación positiva, señal de salida y tierra, respectivamente.
Software LabVIEW	Es una plataforma de programación en un entorno de Instrumentos Virtuales, utilizado para el desarrollo de sistemas de medición y control mediante el desarrollo de interfaces. Emplearon la versión 2011, tipo educativa sin ningún costo y con permiso de seis (6) meses.
Software Arduino	Es una plataforma de electrónica abierta que permite la creación de prototipos electrónicos basados en hardware y software muy fáciles de utilizar..
Archivo LIFA_Base.ino	Este archivo permite la conexión del puerto serial entre la tarjeta Arduino Mega 2560 y LabVIEW. Debe ser cargado en la tarjeta mediante el software Arduino.

Fuente: DURÁN CHACÓN, José Vicente y GIL FERNÁNDEZ, Algemiros José. Generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática: montaje de una unidad piloto. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. p. 28.

3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo de grado realizado comprende cuatro etapas básicas, (i) Hallazgo experimental de la capacidad (potencia) de un tripulante promedio, (ii) Determinación e implementación de mejoras, (iii) Selección de un generador que satisfaga las condiciones de operación de un tripulante promedio y (iv) Pruebas de eficiencia.

Con el fin de encontrar el valor medio y límites de generación de un tripulante, se diseñó una prueba de condición física que medía en tiempo real la potencia mecánica de un tripulante en la bicicleta estática empleada en la implementación de Duran y Gil.. Conociendo las principales restricciones del sistema y encontrados los límites de potencia de un tripulante, se empleó como alternativa de generación un motor DC y se diseñó un sistema de transmisión de potencia más eficiente. Para determinar la eficiencia del sistema de transmisión se diseñó un sistema de inyección de potencia mecánica conformado por un motor de inducción acoplado al volante de la bicicleta y un variador de frecuencia que permite controlar la velocidad del motor.

Finalmente, se realizaron pruebas de generación con tripulantes reales y se comparan las curvas de potencia para evidenciar el rendimiento de los dos sistemas. La descripción de las etapas de investigación y las pruebas realizadas se muestran a continuación.

3.1 POTENCIA MECÁNICA GENERADA POR UN TRIPULANTE

Se diseñó una prueba de condición física empleando la bicicleta estática del piloto de generación de Duran y Gil, en la cual se midió la potencia mecánica de los participantes y la velocidad media del volante de inercia de la bicicleta. Los criterios y parámetros que intervienen en el análisis estadístico de la prueba se describen a continuación.

3.1.1 Población. La población analizada son los estudiantes pertenecientes a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones – E3T en la Universidad Industrial de Santander. El número de estudiantes asociados a la E3T en el primer periodo académico de 2014 fue de 1 344, siendo 648 del programa de Ingeniería Eléctrica y 696 de Ingeniería Electrónica, para el segundo periodo académico de 2014, el número de asociados fue de 1359, donde 665 pertenecían a Ingeniería Eléctrica y 694 a Ingeniería Electrónica.

3.1.2 Diseño de la prueba de potencia física. La prueba de rendimiento consistió en hacer girar continuamente el plato de la bicicleta durante seis (6) minutos empleando las extremidades inferiores apoyadas en los pedales. El tripulante debe permanecer sentado en el sillín de la bicicleta en la totalidad de la prueba. Se consideran seis niveles de dificultad (del 8 al 3 según indica la bicicleta) en los cuales se varía el par de frenado cada minuto, la prueba inicia en el nivel 8 de máximo par de frenado.

Los niveles de dificultad se determinaron mediante mediciones directas con un dinamómetro. Se registró el valor del par de frenado estático en seis (6) posiciones

angulares del volante de inercia por cada nivel y se obtuvo el promedio. La Figura 22 muestra el freno mecánico empleado para generar el par de fricción y la Tabla 4 presenta el par de frenado promedio para cada nivel de dificultad.

Figura 22. Sistema de frenado para la prueba de potencia



Tabla 4. Nivel de dificultad y par de frenado

Nivel de dificultad	Par de frenado [Nm]
8	5,83
7	4,07
6	3,38
5	2,61
4	2,21
3	1,66

La velocidad se midió sobre el volante de inercia de la bicicleta, acoplado un motor de corriente continua y un sensor de tensión. Para la adquisición de datos se empleó un módulo NI USB 6009. La monitorización de la velocidad del volante, la velocidad de pedaleo y la potencia generada se realizaron en el software LabVIEW. La Figura 23 presenta el acople del motor DC al volante de inercia de la bicicleta, y la Figura 24 muestra el panel frontal del VI diseñado para la prueba de rendimiento.

Figura 23. Acople mecánico para el sensado de la velocidad del volante de inercia

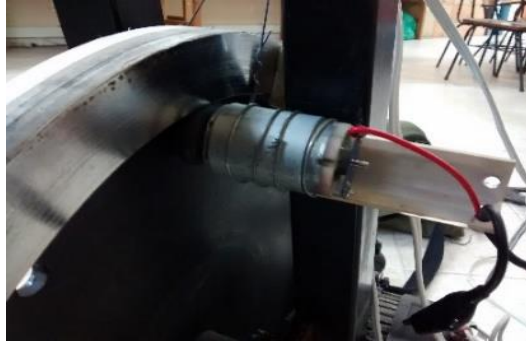
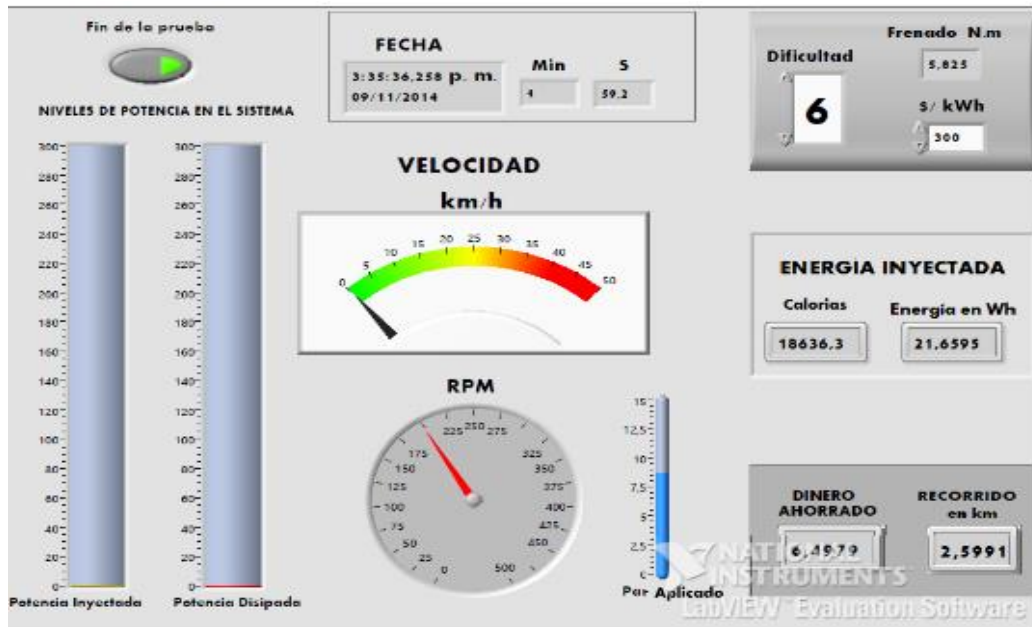


Figura 24. Panel frontal de VI diseñado para la prueba de potencia



La potencia mecánica generada se disipa en forma de calor por la fricción entre el freno mecánico y el volante de la bicicleta y se determina mediante la ecuación:

$$P_{perd} = \tau \cdot \omega \quad (1)$$

Donde τ es el par de frenado para cada nivel de dificultad y ω es la velocidad angular desarrollada en el volante de inercia.

3.1.3 Determinación de la muestra. Para determinar el tamaño apropiado de la muestra se realizó un muestreo previo de treinta y un (31) participantes. Se consideró una población normalmente distribuida, encontrando una desviación estándar de 17,5 W; con un nivel de confianza del 97% y error de 5 W en la potencia media, se determinó una muestra aleatoria apropiada de cincuenta y ocho (58) tripulantes¹⁶.

El objetivo de esta evaluación fue diagnosticar la condición física de los estudiantes de la E³T, principales participantes de esta prueba, y el impacto de esta condición aplicada a las energías renovables, más específicamente, al sistema de generación a partir de bicicletas estáticas.

3.2 ENCUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN FÍSICA

Con el fin obtener datos históricos relacionados al estilo de vida de los tripulantes de la prueba de potencia, se implementó una encuesta empleando un formulario de *Google Inc* en la que se relacionan preguntas sobre los hábitos de consumo y las actividad física desempeñadas por cada uno de ellos.

La evaluación se realizó con lineamientos del Manual de Evaluación de la Actividad Física (Departamento De Salud Y Asistencia Pública De Los Estados Unidos, 2006), que da a conocer las principales características que afectan a la condición física y los pasos a seguir para dar un diagnostico real. El sistema de evaluación consiste en dar una calificación numérica a cada tipo de actividad hecha por los participantes, al final, la suma de esta calificación se comparará con una tabla de rango de valores, donde los posicionará en el estado físico en que se encuentran.

¹⁶ MONTGOMERY, Douglas. C. y RUNGER, George. C. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. México: McGRAW-HILL, 1996. 834 p.

3.2.1 Preguntas de la encuesta

- Preguntas abiertas:
 - ¿Qué deporte practica con mayor frecuencia?
 - ¿Cuántos días a la semana practica deporte?
- Preguntas cerradas:
 - ¿Regularmente consume bebidas alcohólicas?
 - ¿Regularmente consume tabaco?
 - ¿Regularmente consume sustancias alucinógenas?

Para las preguntas cerradas, las respuestas habilitadas en esta sección son:

- Diariamente
- Ocasionalmente
- Nunca

3.2.2 Valores de las respuestas. Se dará 1 punto si la respuesta es la práctica de cualquier tipo de deporte. Aquellos que no respondan o respondan negativamente no sumarán puntos. Se dará 1 punto por cada día que practica deportes a la semana, es decir, si practica 3 días a la semana, obtendrá 3 puntos. Aquellos que no respondan o respondan negativamente no sumarán puntos. En las preguntas cerradas, la calificación será la siguiente:

- Nunca (adiciona 1 punto)
- Ocasionalmente (no adiciona nada)
- Diariamente (sustraer un punto)

La calificación de los puntos se da por desarrollo que tienen estas actividades en el cuerpo humano, y como afectan en su condición física. Un hábito diario negativo (fumar, consumo de bebidas o sustancias) afecta negativamente el rendimiento de

las personas. La calificación estará entre un rango de valores de 0 a 6 tal como muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Rangos de estado físico

Rango	Estado físico
0	Muy malo
1 y 2	Malo
3	Regular
4 y 5	Bueno
Mayor a 6	Muy bueno

En el *ANEXO D* se presenta el formulario empleado para la encuesta de condición física.

3.3 SELECCIÓN DEL GENERADOR

La selección del generador se condicionó según la disponibilidad de componentes en los centros de reciclaje masivo de la ciudad de Bucaramanga (Colombia) y el cumplimiento de características eléctricas como nivel de tensión, potencia nominal y tipo de campo (imanes permanentes). En trabajos de investigación y lineamientos técnicos, se ha evidenciado que la reutilización de equipos eléctricos impacta positivamente el medio ambiente, favorece económicamente los proyectos de este tipo y permite mayor tolerancia a fallas emergentes durante las pruebas¹⁷.

La opción más factible era el empleo del alternador trifásico de una motocicleta, caracterizado por tener un volante de imanes permanentes que rodea las bobinas, las cuales se comportan como eje; tienen alta comercialización y variedad, por lo

¹⁷ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE; VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Lineamientos técnicos para el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Bogotá, D.C., 2009.100 p. ISBN: 978-958-8491-48-6

cual presentan bajos costos y suelen reemplazarse en buen estado, por lo que se reutilizan totalmente funcionales. Esta opción no fue empleada por el requerimiento de velocidades superiores a 4 000 rpm, lo que representa riesgos por su alta velocidad y requiere etapas adicionales de elevación de velocidad y por ende, aumento de pérdidas por rozamiento.

Como alternativa de generación se recicló un motor DC de imanes permanentes perteneciente a la bomba de aspersión de un equipo de compactación Dinapac. El motor presentaba daños en el rodamiento y desgaste en las escobillas los cuales fueron reparados. Por no presentar datos de placa fue necesario caracterizar el motor DC en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la UIS.

En la caracterización se midió el calibre del conductor del devanado, determinando la capacidad de corriente. Se determinó la resistencia del devanado mediante la inyección de corriente con una fuente de corriente controlada y la medición de la tensión en bornes del motor; y se estableció la curva de velocidad – tensión inducida impulsando el motor a velocidades controladas y midiendo la tensión inducida en bornes. Los resultados de la caracterización se presentan en el Capítulo 5. La Figura 25 presenta una fotografía del motor DC empleado como generador y la Figura 26 muestra el motor desarmado.

Figura 25. Motor DC empleado como alternativa de generación



Figura 26. Rotor, rodamientos y caja de escobillas del motor



3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA

Para la transmisión de potencia mecánica del volante de inercia al motor DC, se implementó inicialmente un sistema piñón cadena. Este sistema consistía en el empleo de platos, piñones y cadenas de bicicletas de montaña que garantizaban la facilidad de adquisición y reemplazo de componentes. Para la transmisión, se

sujetaba concéntricamente un plato de 53 dientes al volante de la bicicleta, con una cadena se unía el plato del volante a una etapa de elevación de velocidad dada por la unión concéntrica de un plato de 36 dientes y un piñón de 13 dientes. Finalmente se acoplaba el plato de 36 dientes a un piñón de nueve dientes sujeto al motor DC.

El sistema de transmisión piñón cadena fracasó durante la pruebas de funcionamiento, producía un ruido excesivo y presentó daños mecánicos en los dientes de los platos y piñones, acompañado de múltiples desacoplamientos de las cadenas, lo cual representaba riesgo por posibles daños de la integridad física del personal a cargo del proyecto y de los participantes de las pruebas.

Por sugerencia de docentes de la escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS y mecánicos empíricos de la ciudad de Bucaramanga, se dispuso para el acople del motor DC y el volante, un sistema de sincronización (poleas dentadas). El generador se situó sobre rieles que permiten tensar de manera adecuada la correa, garantizando una transmisión de potencia óptima. Se empleó una correa marca *Powersinc* referencia 660L la cual presenta entre sus características principales 176 dientes, un paso de 9,525 mm, un perímetro de 1 676,40 mm y un ancho de 25 mm.

La polea acoplada al generador se fabricó por fresado (en un taller de la ciudad de Bucaramanga) con un total de 12 dientes. Para evitar dentar del volante de inercia de la bicicleta, se recubrió con caucho, aumentando el coeficiente de rozamiento entre el volante y la correa; esto asociado a una extensa superficie de contacto. La relación de velocidad obtenida entre el volante de bicicleta y el generador DC es de 12,68. La Figura 27 muestra el diseño del sistema de transmisión mecánica y la Figura 28 presenta la polea dentada. Las dimensiones de los elementos que intervienen en el sistema de transmisión de potencia mecánica se presentan en el archivo digital *Planos sistema mecánico.pdf*.

Figura 27. Diseño del sistema de transmisión de potencia mecánica

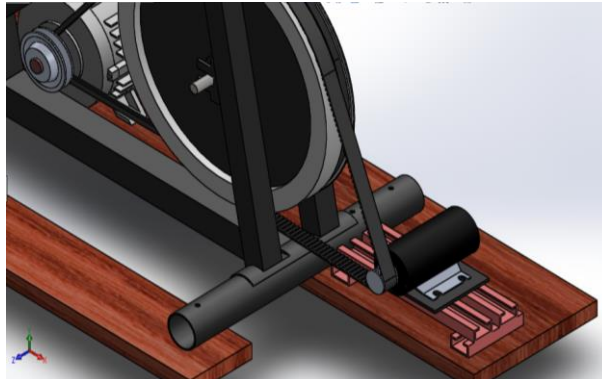


Figura 28. Polea acoplada al generador en el sistema de transmisión



3.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE POTENCIA MECÁNICA CONTROLADA

Para la inyección de potencia mecánica se empleó un motor de inducción trifásico marca Siemens de 2,0 HP, 1 700 rpm y 220 V, controlado por un variador de frecuencia marca Eurotherm. El motor de inducción se acopló al volante de inercia de la bicicleta por medio de una correa en V marca Super Star de referencia A-72. La polea del volante se implementó con un aro de bicicleta número 24 reusado de una bicicleta de montaña dada de baja por daños mecánicos el cual se adhirió al volante empleando remaches de aluminio.

En la Figura 29 se presenta el aro de bicicleta implementado como polea. En la transmisión de potencia se empleó una relación de velocidad de 4,64 acorde a la velocidad desarrollada por un tripulante. El motor de inducción y la bicicleta estática se montaron sobre una base de madera para facilitar el acople mecánico. El diseño del acople mecánico se muestra en la Figura 30 el diagrama de conexiones del sistema de inyección de potencia se presenta en la Figura 31. Las dimensiones de los elementos que intervienen en el sistema de transmisión de potencia mecánica se presentan en el archivo digital *Planos sistema mecánico.pdf*.

Figura 29. Implementación de la polea en V para el volante de inercia de la bicicleta estática



Figura 30. Diseño del acople mecánico del sistema de inyección de potencia mecánica

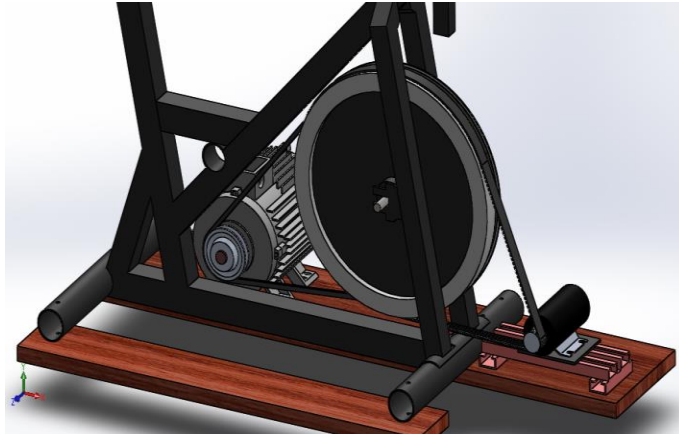
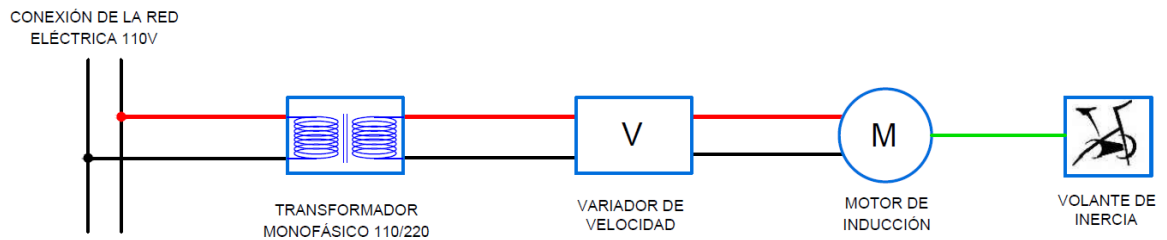


Figura 31. Diagrama de conexión del sistema de inyección de potencia mecánica



3.6 PRUEBAS DE EFICIENCIAS CON POTENCIA CONTROLADA

En el desarrollo de las pruebas de eficiencia, se caracterizó el funcionamiento en vacío del motor de inducción variando la frecuencia entre 15 Hz y 60 Hz con paso de 3 Hz, por ser los límites recomendados para el funcionamiento de un sistema motor – variador¹⁸. Seguidamente, se acoplaron los generadores dispuestos (de manera individual) para caracterizar la potencia empleada al impulsarlos en vacío y el rendimiento del acople mecánico.

¹⁸ EUROTHERM DRIVES. Product manual 601. Inglaterra: Eurotherm Drives Ltd.

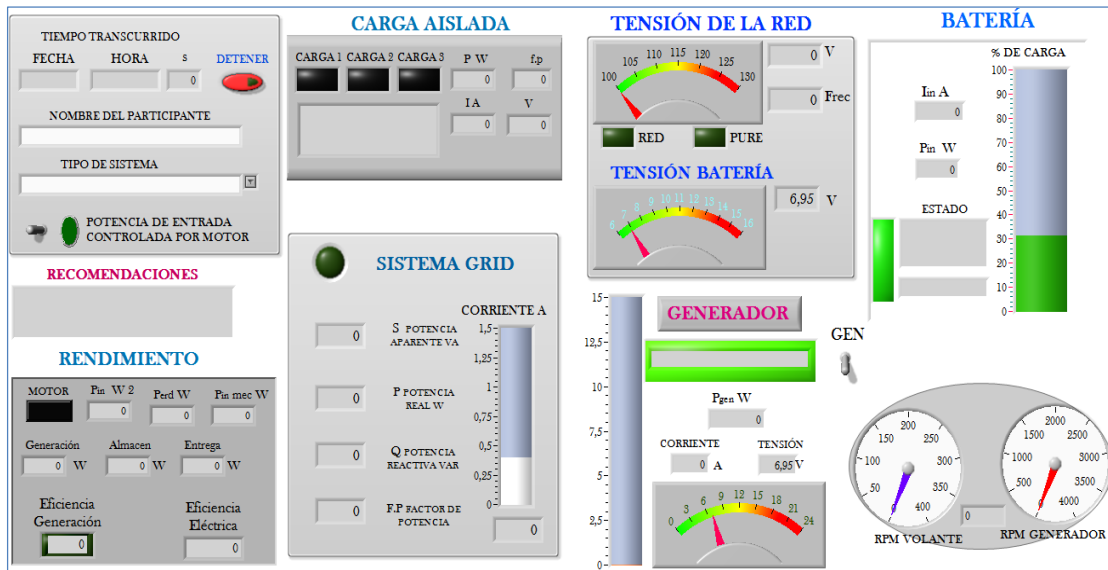
En la prueba de eficiencia de transmisión mecánica se empleó el sistema conectado a la red (inversor *Grid Tie*) por ser independiente del banco de baterías y tener mayor eficiencia que el sistema. En esta prueba se conectó el generador (acoplado al volante) al inversor *Grid Tie* y se incrementó la frecuencia del variador con pasos de 3 Hz empezando en 15 Hz hasta que la potencia generada alcanzó un valor superior a una desviación estándar de potencia media generada por un tripulante la cual se determinó en la prueba de potencia mecánica.

3.7 PRUEBAS DE RENDIMIENTO CON TRIPULANTES REALES

Para validar los resultados obtenidos en las pruebas de eficiencia con potencia controlada, se realizaron pruebas con participantes reales, las cuales consistieron en tripular el sistema bicicleta – generador por un periodo de cinco (5) minutos, en los cuales el tripulante podía pedalear al ritmo más adecuado para él. El fin de esta prueba es visualizar la evolución de la velocidad y la potencia generada y determinar la potencia neta entregada al inversor *Grid Tie*.

Finalmente, se compararon los resultados de potencia con las dos alternativas de generación para determinar la más eficiente. La monitorización de las pruebas de potencia controlada por el sistema motor – variador y las pruebas de potencia con tripulantes reales se realizaron mediante el entorno virtual de LabVIEW. El panel frontal del VI dispuesto en la monitorización se presenta en la Figura 32.

Figura 32. Panel frontal del VI empleado en la monitorización de las pruebas de potencia y rendimiento



4 SISTEMA DE MONITORIZACIÓN

Para el sistema de monitorización se emplearon los sensores dispuestos por Duran y Gil para la adecuación de las señales; así como un transformador para adecuar los niveles de la tensión de la red a los valores nominales de los sensores de tensión (menor a 25V). La adquisición de datos se realizó con un módulo NI USB 6009; el procesamiento y presentación de resultados se implementó en el software LabVIEW. En el *ANEXO B* se presentan los principios de monitorización relacionados con la conversión análoga – digital y el empleo de LabVIEW para la adquisición y procesamiento de datos. El *ANEXO C* contiene las principales características del hardware de adquisición.

La descripción de los sensores se encuentra en la Tabla 3. A continuación se presenta la disposición de los sensores, la transmisión de señales, las características del DAQ y el desarrollo del VI implementado en LabVIEW.

4.1 SENSADO DE SEÑALES

En la adecuación de las señales eléctricas del sistema de generación se emplearon tres (3) sensores de tensión y cinco (5) sensores de corriente de acuerdo a la capacidad del hardware de adquisición empleado (8 entradas analógicas diferenciales). En la 33 se muestra la ubicación de los sensores y la Tabla 6 describe el funcionamiento de cada uno de ellos.

La tensión de la red se adecuó antes de conectarla al sensor de tensión con un transformador que reduce el nivel de la red 17,47 veces y se conectó en serie con la batería para agregar el nivel de DC a la señal sensada, asegurando valores

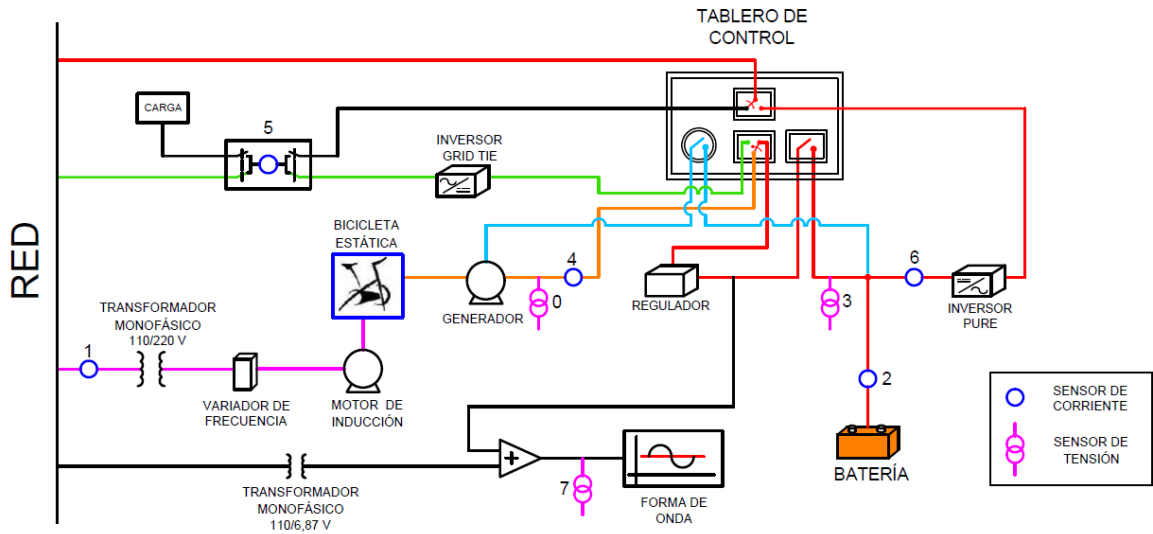
positivos. Posteriormente se invirtieron las operaciones realizadas dentro del entorno de LabVIEW.

Por la disposición de las entradas analógicas del hardware de adquisición (NI USB 6009) fue necesario implementar una etapa de conmutación para el sensor 5 (sensor de corriente), la cual se implementó con un interruptor doble polo de dos posiciones. En la posición 1 el sensor de corriente se conecta en serie con la carga aislada y la conexión del inversor Grid Tie con la red queda abierta, en la posición 2 el sensor de corriente queda en serie con el inversor Grid Tie y la red eléctrica, y la carga aislada queda en circuito abierto.

Tabla 6. Descripción de los sensores del sistema de monitorización

Sensor	Descripción
0	Sensor de tensión: Sensa la tensión (DC) en terminales del generador.
1	Sensor de corriente: Sensa la corriente (AC) inyectada desde la red eléctrica local (120 V _{AC}) al sistema de inyección de potencia mecánica controlada.
2	Sensor de corriente: Sensa la corriente (DC) inyectada a la batería del sistema, un valor negativo de esta señal indica que la batería entrega potencia.
3	Sensor de tensión: Sensa la tensión (DC) de la batería.
4	Sensor de corriente: Sensa la corriente (DC) generada.
5	Sensor de corriente: Corriente AC, según la posición del conmutador <i>Carga / Grid</i> sensa la corriente inyectada a la red eléctrica (120 V _{AC}) por el inversor <i>Grid Tie</i> o la corriente entregada a la carga aislada ya sea por el inversor <i>Pure</i> o por la red.
6	Sensor de corriente: Sensa la entrada de corriente (DC) al inversor <i>Pure</i> .
7	Sensor de tensión: Sensa la tensión (AC) de la red eléctrica escalada 0,05722 veces y con nivel de tensión DC equivalente a la tensión de la batería.

Figura 33. Diagrama unifilar del sistema de monitorización



4.2 INSTRUMENTO VIRTUAL-VI

Para el procesamiento de los datos se desarrolló un VI en el entorno de LabVIEW que permite adquirir las señales sensadas (según la caracterización de los sensores), procesarlas, presentar resultados en tiempo real y almacenarlos para un posterior análisis. La adquisición de las señales se desarrolló según la caracterización realizada por Duran y Gil, donde se establece una ecuación para los sensores de corriente y se emplea el escalamiento sugerido por el fabricante en los sensores de tensión.

4.2.1 Adquisición de señales eléctricas. Para la adquisición de datos se programó el *DAQ Assistant* tal como muestra la Figura 34. Las señales se adquieren en forma de tensión con un nivel permitido entre -10V y 10 V según la capacidad de la tarjeta de adquisición, se adquieren 8 señales en forma referencial a una tasa de 6ks/s

para cada señal y se toman 300 muestras por ciclo de muestreo, lo cual equivale a tres (3) ciclos de la señal de corriente de la red eléctrica local (50 ms).

Una vez adquiridas las señales de los sensores, es necesario separarlas para hacer un procesamiento independiente. En la Figura 35 se presenta la división de las ocho (8) señales sensadas y la identificación correspondiente a cada una de ellas.

Figura 34. Programación del *DAQ Assistant* para la adquisición de datos

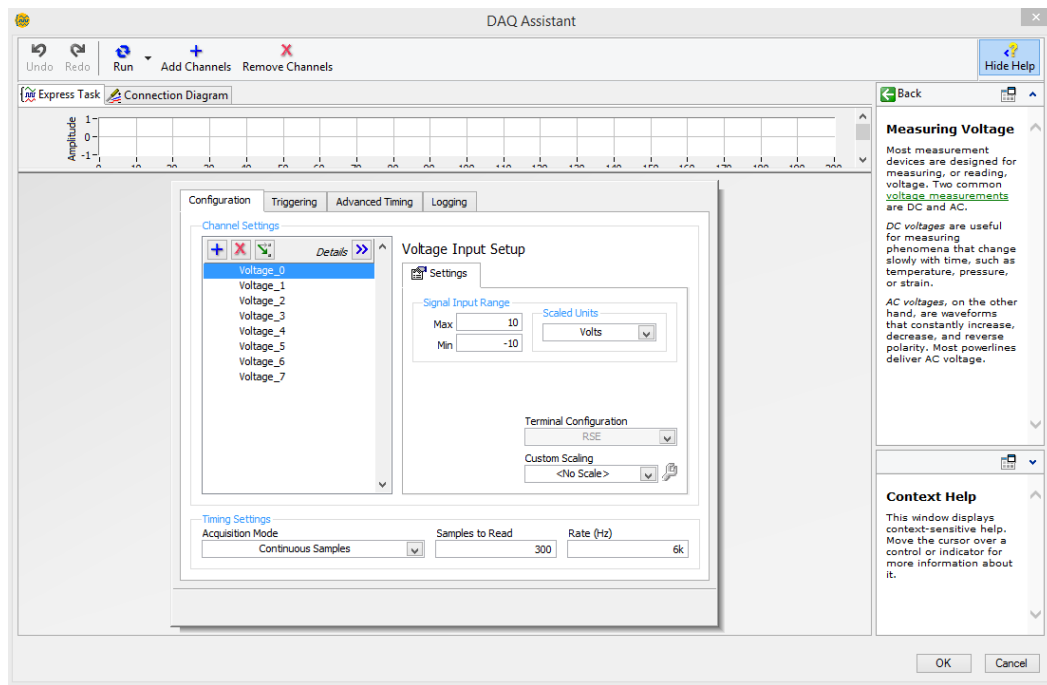
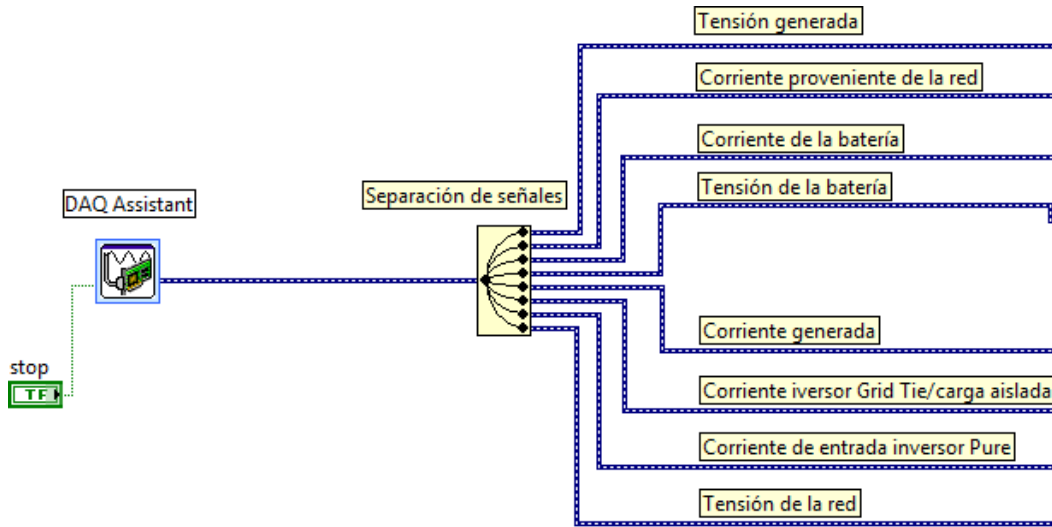


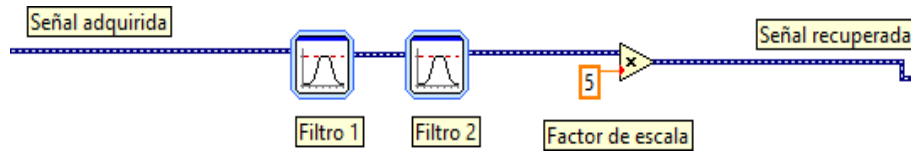
Figura 35. División de las señales sensadas



Una vez divididas las señales adquiridas, se aplican las ecuaciones correspondientes según el tipo de sensor y de señal para recuperar la señal eléctrica sensada. A continuación se presentan las operaciones realizadas para recuperar las señales eléctricas sensadas.

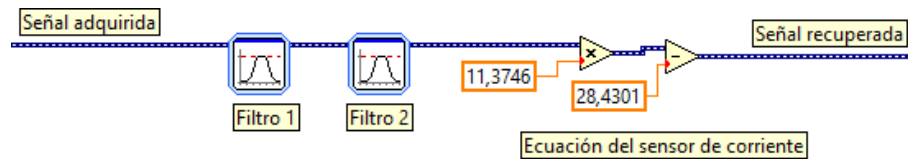
En la recuperación de las señales de tensión DC (Figura 36) se emplean dos filtros elimina bandas conectados directamente a las señales adquiridas de los sensores con el fin de evitar ruido producido por la red eléctrica. El filtro 1 elimina las frecuencias comprendidas entre 55Hz y 65Hz correspondientes a la frecuencia fundamental; el filtro 2 elimina frecuencias comprendidas entre 175 Hz y 185Hz correspondientes al tercer armónico. Ya filtrada la señal adquirida se multiplica por el factor de escala del sensor de tensión (5) para obtener el valor real de la señal de tensión eléctrica.

Figura 36. Recuperación de la señal de tensión DC sensada



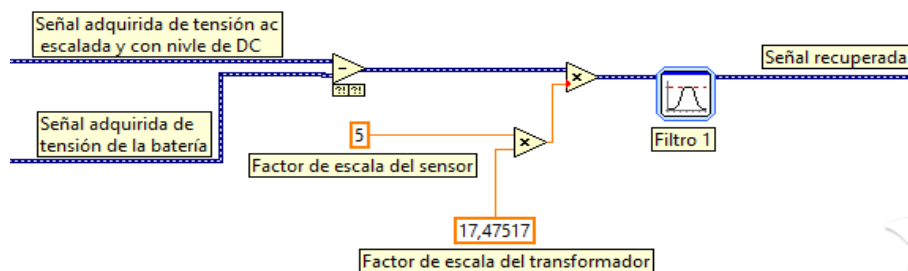
Para recuperar las señales de corriente DC (Figura 37) se emplean los dos filtros elimina bandas ya mencionados (55 Hz – 65 Hz y 175 Hz – 185 Hz) y posteriormente se aplica la ecuación obtenida en la caracterización de los sensores de corriente.

Figura 37. Recuperación de la señal de corriente DC sensada



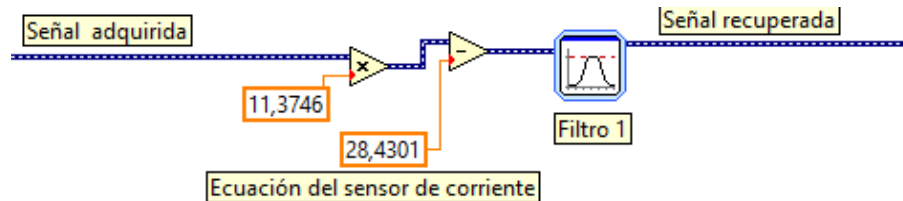
Para recuperar la señal de tensión AC (Figura 38) se elimina el nivel DC introducido para el sensado correspondiente a la tensión de la batería y se aplica el escalamiento correspondiente al sensor de tensión y la relación de transformación del transformador. Posteriormente se emplea un filtro pasa bandas, el cual permite el paso de frecuencias comprendidas entre 55 y 185 Hz evitando contenidos DC en la señal recuperada y permitiendo sensar armónicos de tercer orden.

Figura 38. Recuperación de la señal de tensión AC sensada



En la recuperación de la señal de corriente AC (Figura 39) se aplica la ecuación característica del sensor de corriente a la señal adquirida y posteriormente se pasa por un filtro pasa bandas, el cual permite el paso de frecuencias comprendidas entre 55 y 185 Hz.

Figura 39. Recuperación de la señal de corriente AC sensada

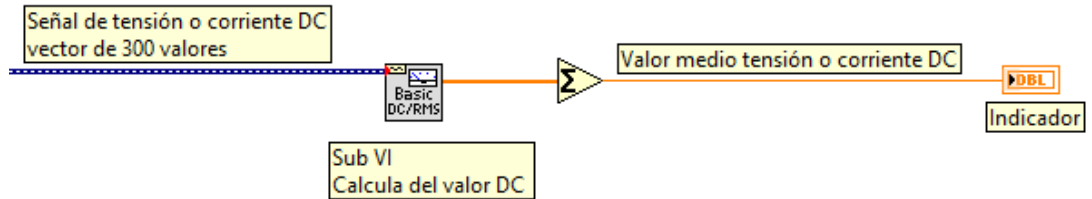


4.2.2 Medición de parámetros eléctricos. Las señales eléctricas medidas dentro del VI se almacenan en arreglos numéricos de 300 componentes correspondientes a las muestras tomadas, estos valores se actualizan cada 50ms según la configuración del *DAQ Assistant*. Ya que presentar todos los datos en tiempo real y almacenarlos resulta ineficiente por la capacidad de visualización humana y el alto empleo de espacio en disco, se emplean bloques de medición para determinar los valores medios en el caso de señales DC y valores eficaces en caso de las señales AC. Para la medición de los parámetros de potencia eléctrica, se empleó la paleta *electrical power*, a la cual ingresan los vectores de las señales eléctricas de tensión y corriente y se obtienen los valores de los parámetros de la potencia para cada ciclo de muestreo. La programación gráfica para la obtención de los parámetros eléctricos del sistema se presenta a continuación.

Para obtener el valor medio de las señales de corriente y tensión DC se emplea un Sub-VI programado para tal fin tal como se muestra en la Figura 40. Al Sub-VI ingresa el vector de 300 muestras correspondientes a 50ms de la señal sensada, este arroja un vector de 300 valores de los cuales el primer valor corresponde al valor medio de los 300 valores de ingreso y los demás componentes son cero, por

esta razón se emplea el bloque suma, que devuelve la sumatoria de todos los componentes de un vector y finalmente el valor medio se presenta en pantalla en un indicador numérico o gráfico.

Figura 40. Medición del valor medio para señales DC



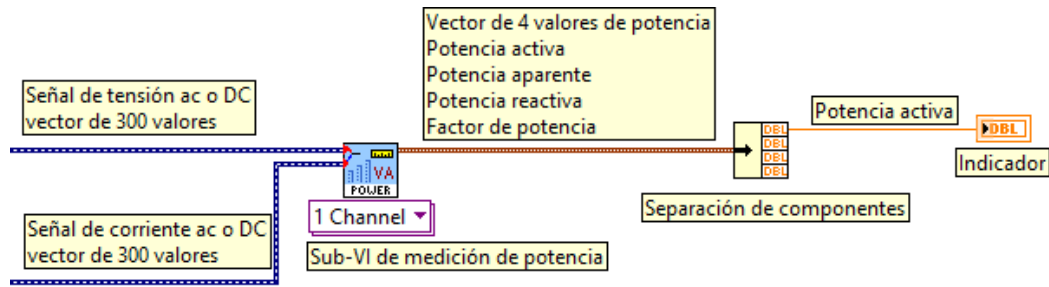
Para determinar el valor eficaz de las señales de corriente alterna, se emplea el sub-VI RMS de la paleta *electrical power* mostrado en la Figura 41, el cual devuelve el valor eficaz de la señal de ingreso. Finalmente se presenta el resultado en un indicador numérico o gráfico.

Figura 41. Medición del valor eficaz para señales AC



La medición de potencia eléctrica se realiza mediante el empleo del sub-VI *Power* de la paleta *electrical power* (Figura 42). Para la medición se ingresan las señales de tensión y corriente en el orden que presenta la Figura 42, el sub-VI devuelve un vector con 4 valores de potencia por lo que se separan los elementos para extraer únicamente el valor de la potencia activa, el cual se presenta en un indicador numérico o gráfico.

Figura 42. Medición de potencia para señales DC o AC



4.2.3 Medición de la velocidad el volante de inercia. La velocidad del volante de inercia de la bicicleta estática se determinó mediante la tensión inducida en la etapa de generación, ya que existe la posibilidad de emplear el generador implementado por Duran y Gil, y el motor DC como alternativa de generación. Se utilizó, dentro de la programación gráfica, una estructura de casos que permite indicar la opción de generación. Las Figuras 43 y 44 presentan la estructura de caso para la medición de la velocidad del volante de inercia.

Figura 43. Estructura de casos para la medición de velocidad del volante de inercia - *case true*

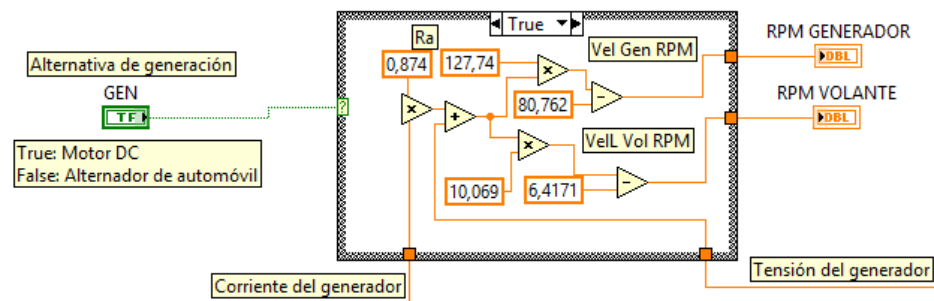
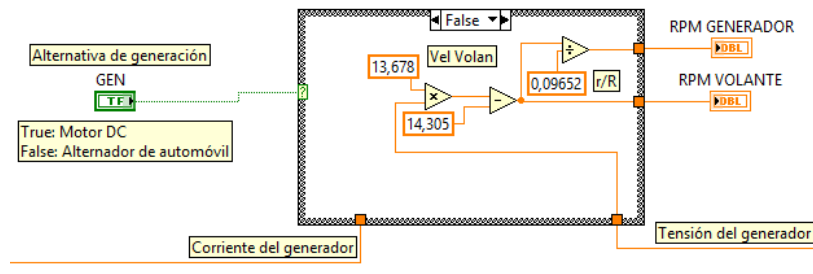


Figura 44. Estructura de casos para la medición de velocidad del volante de inercia - *case false*



A la estructura de casos ingresan las señales de tensión y corriente generada, en el caso del motor DC como generador se utiliza la corriente generada y la resistencia eléctrica interna del motor para determinar la tensión inducida, seguidamente se aplica la ecuación de velocidad, obteniendo la velocidad en revoluciones por minuto para el generador y para el volante de inercia las cuales se presentan en un indicador gráfico. Las ecuaciones presentadas en la Figura 43 corresponden a resultados de la caracterización del motor DC como generador, los cuales se presentan en el Capítulo 5.

La indicación del tipo de generador se realiza mediante un control booleano, que permite escoger entre dos posiciones, *true* (on) para el empleo del motor DC como alternativa de generación y *false* (off) para el empleo del alternador de automóvil.

4.2.4 Determinación del rendimiento del sistema de generación. Para determinar el rendimiento del sistema de generación, se emplea una estructura de caso que permite indicar el empleo, o no, del motor de inducción – variador de frecuencia para la inyección de potencia mecánica controlada. Las Figuras 45 y 46 presentan los casos para la determinación del rendimiento del sistema de generación.

Figura 45. Estructura de casos para la medición del rendimiento del sistema de generación - case true

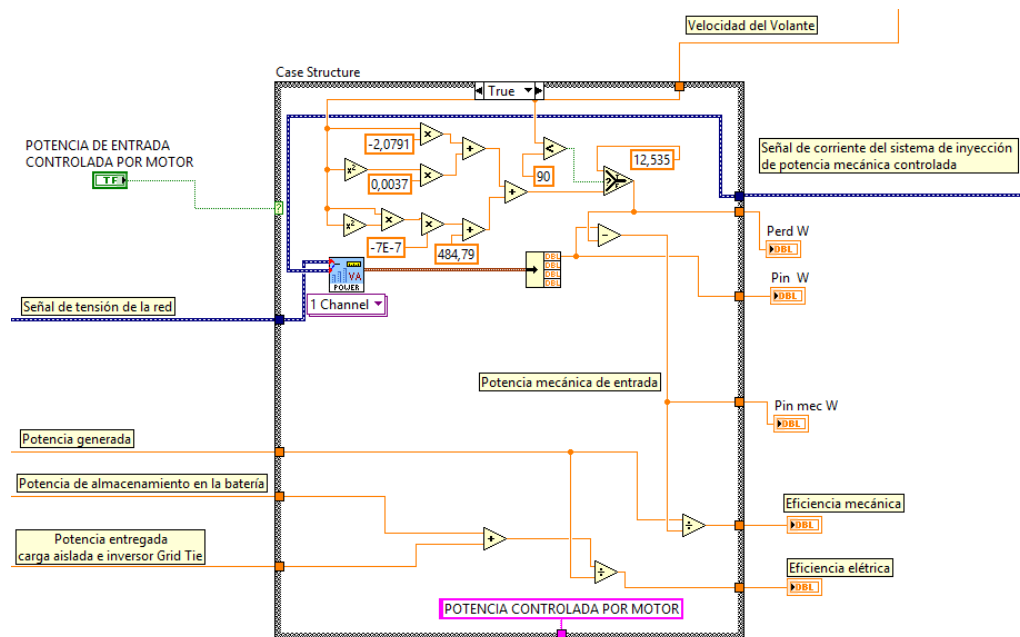
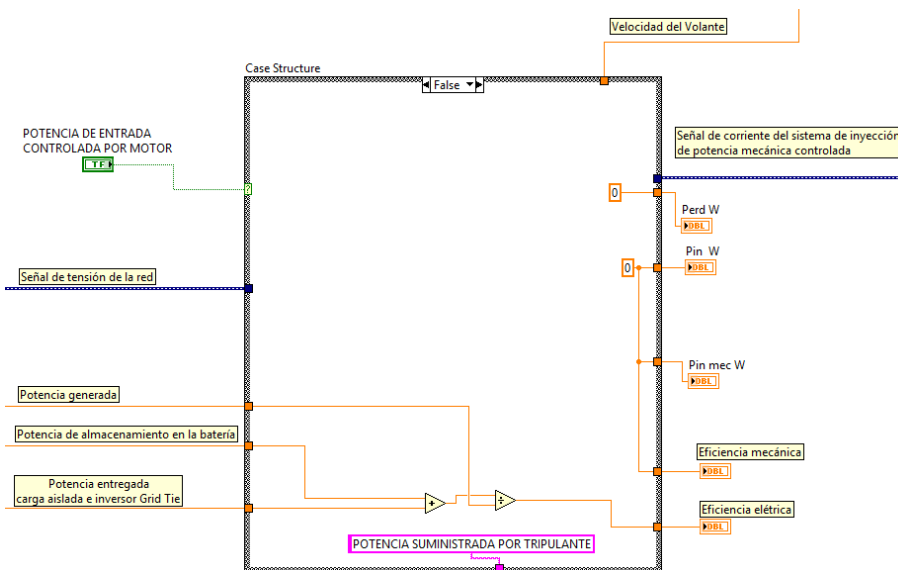


Figura 46. Estructura de casos para la medición del rendimiento del sistema de generación - case false



Para determinar la eficiencia del sistema de generación, se ingresa a la estructura de caso la velocidad del volante (en rpm), ya que las pérdidas del sistema motor – variador se caracterizan según la velocidad del volante (ver Capítulo 5). También se requiere el ingreso de los valores de potencia generada, potencia entregada a la batería y potencia entregada a la red o a la carga aislada. Las señales de tensión y corriente del sistema de inyección de potencia mecánica controlada ingresan directamente a la estructura de casos donde se realiza la medición de potencia.

La determinación de la potencia mecánica suministrada al sistema, se realiza mediante la relación entre la potencia que ingresa al sistema motor de inducción-variador y la potencia de pérdidas del mismo. El rendimiento mecánico se determina como la relación de la potencia generada y la potencia mecánica inyectada. La eficiencia eléctrica se determina como la relación entre la suma de la potencia eléctrica entregada a la batería y la potencia entregada a la red o la carga aislada, con la potencia generada. Los valores de eficiencia se presentan en un indicador numérico

En caso de activarse el indicador booleano (*case true*), indica que se emplea el sistema de inyección de potencia mecánica controlada. En caso contrario (*case false*), la potencia mecánica es suministrada por un tripulante. Pero, no se implementó un sistema que permita determinar dicha potencia en tiempo real y con precisión.

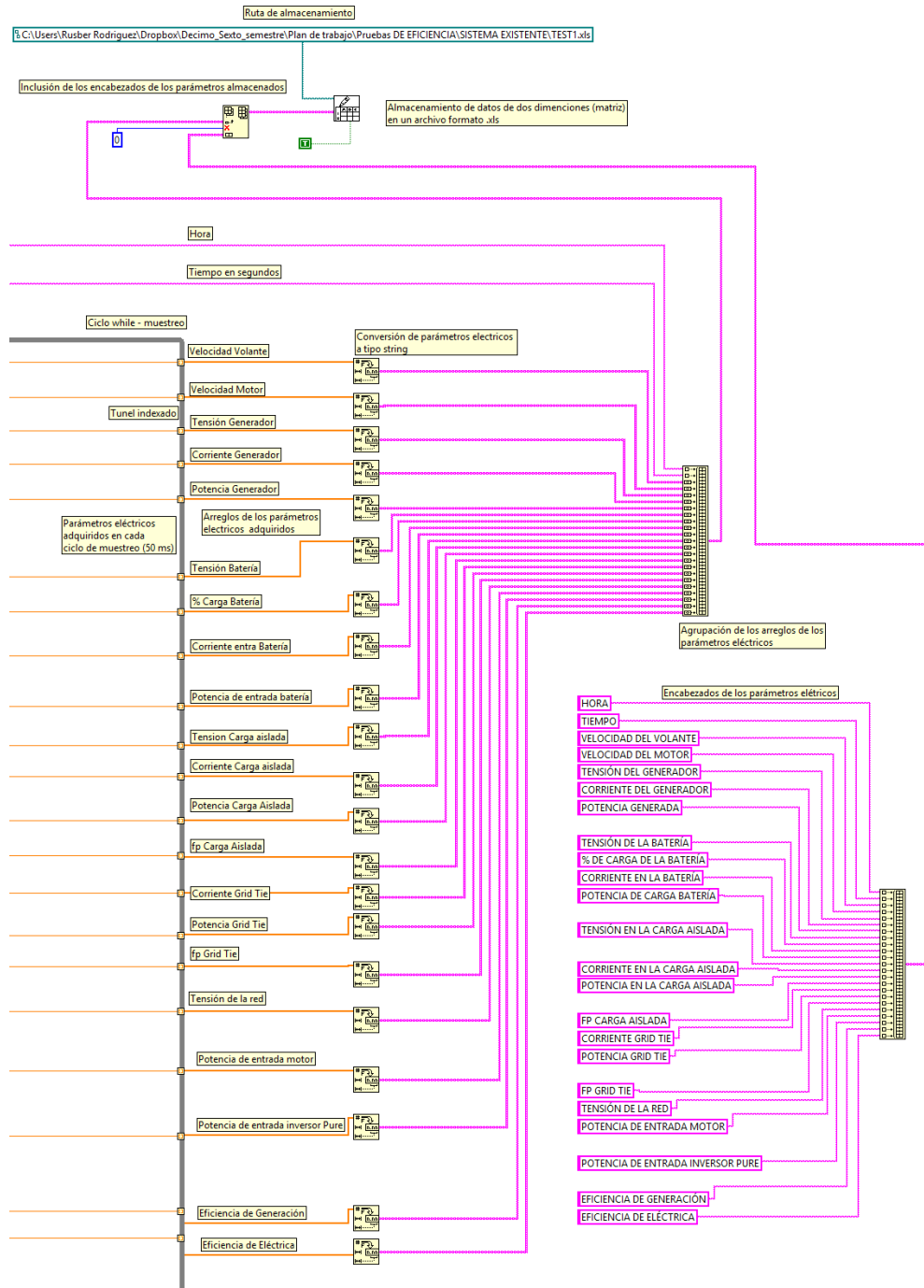
4.2.5 Datos almacenados. Para almacenar los parámetros eléctricos procesados dentro del VI se emplea el sub-VI *Write to Spreadsheet File*, el cual permite guardar los valores en una hoja de cálculo en la ruta especificada. Es necesario adecuar los

valores a almacenar para una correcto post-proceso. La Figura 47 presenta el proceso de adecuación de las señales almacenadas.

Los parámetros obtenidos en cada ciclo de muestreo se almacenan de forma continua como vectores unidimensionales en un túnel indexado (para cada señal), ubicados en la periferia del ciclo *While* que representa el muestreo. La dimensión de los vectores depende del tiempo transcurrido (un componente por cada 50ms de muestreo); al finalizar los ciclos de muestreo, por detenimiento del VI, los vectores almacenados en los túneles indexados pasan a través del bloque *Number to fractional String* para ser convertidos en formato *string* y facilitar el almacenamiento. Seguidamente se agrupan las señales en una configuración bidimensional.

Para agregar encabezado e identificación a los parámetros almacenados se añade un grupo de constantes tipo *string* que se insertan en la primera fila de la configuración bidimensional de parámetros eléctricos. Finalmente la configuración modificada se conecta al sub-VI *Write to Spreadsheet File* para el almacenamiento y se especifica la ruta y el nombre de almacenamiento.

Figura 47. Almacenamiento de los parámetros eléctricos medidos en el VI



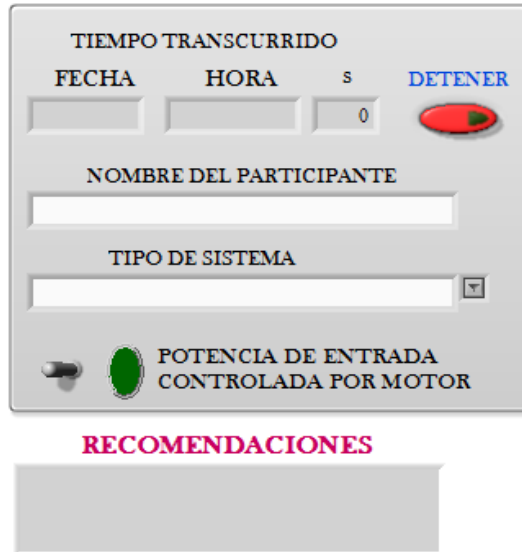
4.2.6 Panel frontal del VI. La Figura 24 presenta el panel frontal del VI empleado para el sistema de monitorización, en él se observa los parámetros de visualización y los controles para el procesamiento de las señales adquiridas. Seguidamente se detallan los componentes que conforman el panel frontal.

En el cuadro de control principal del VI mostrado en la Figura 48, se presenta información de la fecha, la hora y el tiempo transcurrido en segundos. Tiene el pulsador *Detener* que, al accionarse y estar el VI en ejecución detiene el programa una vez terminado un ciclo de muestreo. En la casilla *Nombre del participante* se debe ingresar manualmente el nombre de la persona que impulsa el sistema de generación o el nombre del sistema de inyección de potencia mecánica.

La casilla *Tipo de sistema* contiene una lista de validación que permite escoger entre las opciones: *Carga aislada sin generación*, *Sistema aislado sin carga*, *Sistema aislado con carga (pure)* y *Sistema conectado a la red*; dependiendo de la selección se ofrece unas recomendaciones en la casilla *Recomendaciones* acerca de las conexiones físicas de los sensores y los equipos de gestión de energía.

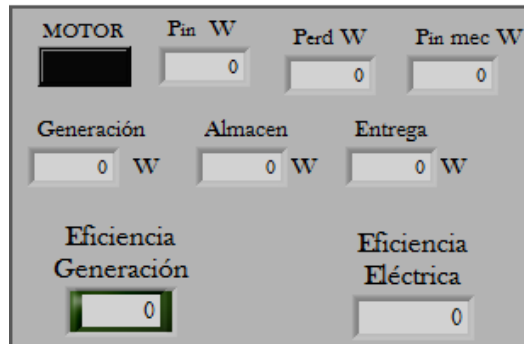
El interruptor cercano al led *Potencia de entrada controlada por motor* sirve para indicar el empleo del sistema de inyección de potencia mecánica controlada, al encenderse este interruptor el led se enciende y modifica instrucciones de la programación.

Figura 48. Control principal del VI



Los indicadores de la etapa de rendimiento, mostrados en la Figura 49, se activan si está encendido el led *Potencia de entrada controlada por motor* de la Figura 48. En caso contrario, sólo funciona el indicador *Eficiencia eléctrica* y los demás indicadores estarán en ceros.

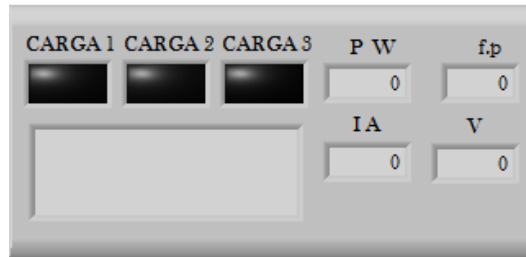
Figura 49. Indicadores numéricos del rendimiento del sistema



Los leds de carga (Figura 50) indican el número de resistencias incluidas en la carga aislada, según sea la intensidad eléctrica, los indicadores numéricos presentan los parámetros eléctricos de la carga aislada siempre y cuando se haya seleccionado

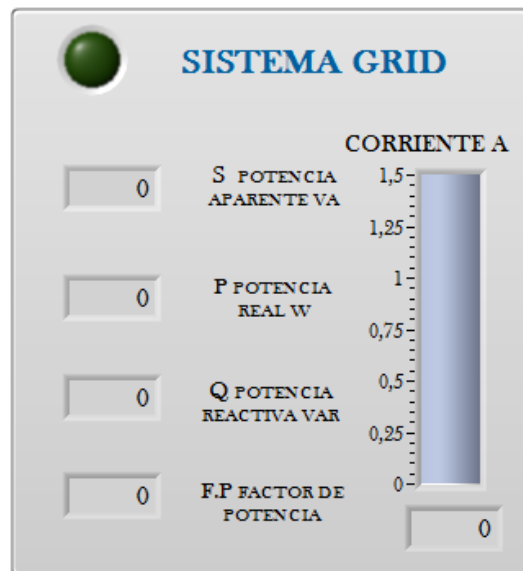
la opción *Carga aislada sin generación* ó *Sistema aislado con carga (pure)*. En caso contrario, este bloque se desactiva.

Figura 50. Indicadores del consumo de la carga aislada



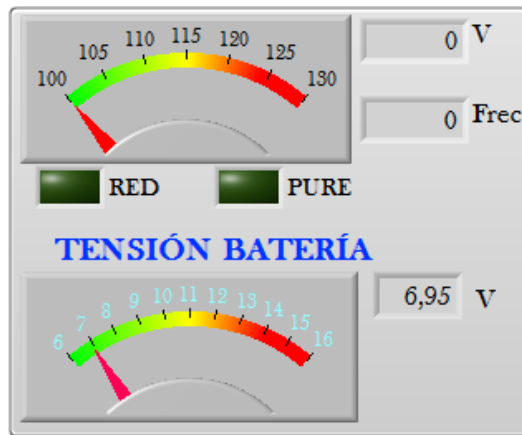
La monitorización del sistema *Grid Tie* (Figura 51), se activa al seleccionar la opción *Sistema conectado a la red* en el control principal de VI. Presenta parámetros de potencia y corriente inyectada a la red.

Figura 51. Indicadores de parámetros del sistema Grid Tie



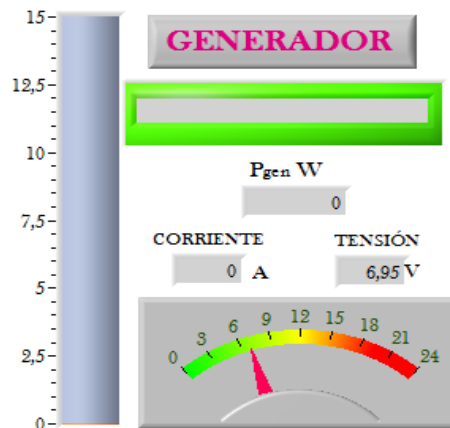
El primer indicador de la Figura 52, presenta el valor RMS de la tensión de la red, así como la frecuencia. El segundo indicador presenta gráfica y numéricamente el valor DC de la tensión de la batería.

Figura 52. Indicadores gráficos y numéricos de las tensiones del sistema de generación



El bloque de indicadores de generación (Figura 53), presenta los valores de tensión y corriente generada. El led ubicado debajo del texto *Generación* se enciende cuando la corriente generada es diferente de cero y positiva indicando que se genera energía eléctrica.

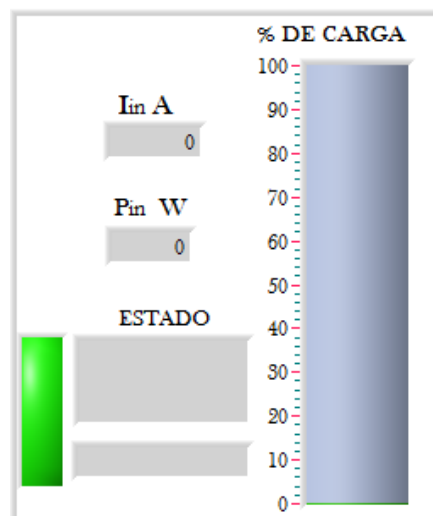
Figura 53. Indicadores parámetros del generador



El bloque de indicadores de la batería (Figura 54), presenta el porcentaje de carga de la batería según la caracterización realizada por Duran y Gil en 2013. También presenta la corriente y la potencia que ingresa a la batería. En caso de presentar valores negativos, significa que la batería entrega potencia.

El led de este bloque se enciende en verde cuando la batería almacena energía y se enciende en rojo cuando entrega energía indicando que se está descargando.

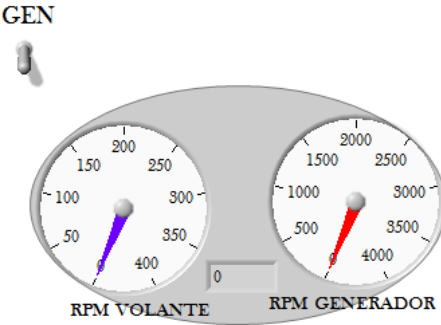
Figura 54. Indicadores del estado de la batería



Los indicadores de velocidad de la Figura 55, presentan gráficamente la velocidad en rpm del generador y del volante de inercia de la bicicleta estática. La velocidad del volante también se presenta de forma numérica.

En la parte superior izquierda de este bloque se visualiza un interruptor que permite indicar la alternativa de generación utilizada. En la posición superior, indica que se emplea el motor DC como alternativa de generación; en la parte inferior, indica que se emplea el alternador de automóvil.

Figura 55. Indicadores de velocidad



5 RESULTADOS Y ANÁLISIS (INCERTIDUMBRE)

En esta sección se presentan los resultados de mayor relevancia de las pruebas realizadas, tales como la potencia mecánica humana, la caracterización del motor DC como generador, el comportamiento de los dos generadores como alternativas a diferentes velocidades y la comparación entre ellos.

5.1 RESULTADOS DE LA ENCUESTA DE CONDICIÓN FÍSICA

Los resultados obtenidos de la prueba de condición física, detallan la cualidad motriz y la calidad energética que pueden aportar los estudiantes de la E³T al sistema de generación actual. La encuesta realizada a los practicantes fue de vital importancia para la obtención de datos históricos relacionados con su estilo de vida. Los resultados de la encuesta se encuentran en el *ANEXO E* donde se visualiza la calificación obtenida por cada participante, acorde a los datos suministrados, y se posicionan en la escala del rendimiento físico.

Para el total de 58 participantes (11 mujeres y 47 hombres), el puntaje promedio en la calificación del estado físico es 4,33; por lo cual, la condición es “*Buena*”, es decir, se encuentran óptimos para tripular la bicicleta y aportar, energéticamente, un potencia constante y elevada.

5.2 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE POTENCIA FÍSICA

En la prueba de potencia se determinó la potencia media entregada por la totalidad de los participantes en 62,13 W con una desviación estándar de 17,76 W, y una velocidad media del volante de inercia de 185,44 rpm con una desviación estándar de 47,97 rpm. Se encontró que la potencia pico entregada en el volante de inercia de la bicicleta es de 204 W. El 81,03% de los participantes fueron hombres y el 18,97% mujeres. En la Tabla 7 se presenta el resumen de resultados de los valores medios por nivel de dificultad.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que con una probabilidad del 99,7% la potencia media entregada por un tripulante asociado a la E³T está en el intervalo de 8,8 W a 116 W. La potencia máxima que entrega una persona en un instante de tiempo menor a 500 ms es de 204W, por lo que un generador de potencia nominal entre 150W y 200W es apropiado para la implementación de generación de energía eléctrica en una bicicleta estática.

Tabla 7. Resumen de resultados por niveles de la potencia entregada y velocidad de pedaleo en la prueba de potencia

Género		Masculino (47 participantes)		Femenino (11 participantes)	
		Potencia [W]	Velocidad [rpm]	Potencia [W]	Velocidad [rpm]
Nivel de dificultad	VIII	115,09	197,36	67,03	137,18
	VII	75,43	173,91	50,44	137,69
	VI	61,02	170,66	41,88	128,58
	V	52,51	186,90	38,76	140,68
	IV	48,74	205,42	37,86	149,72
	III	43,25	235,18	37,46	176,02
Promedio por genero		66,01	194,90	45,57	144,98
Desviación estándar por Genero		17,10	47,75	8,96	20,11
Potencia media global		60,12		Des. estándar	17,76
Velocidad media global		185,44		Des. estándar	47,97

5.3 CARACTERIZACIÓN DEL MOTOR DC EMPLEADO COMO GENERADOR

En la caracterización del motor DC como generador se determinó la capacidad de corriente en 8,6A según conductor del rotor calibre 19 AWG (doble conductor). La resistencia del rotor se midió indirectamente mediante mediciones de corriente y tensión con rotor bloqueado. La tensión inducida según la velocidad del volante se estableció mediante mediciones directas de la velocidad del volante y la tensión inducida. La Figura 56 presenta la línea de tendencia de la tensión del rotor bloqueado en función de la corriente, la Figura 57 presenta la tendencia de la tensión de vacío inducida en función de la velocidad del volante.

Figura 56. Tensión en bornes del motor DC en función de la corriente de rotor bloqueado

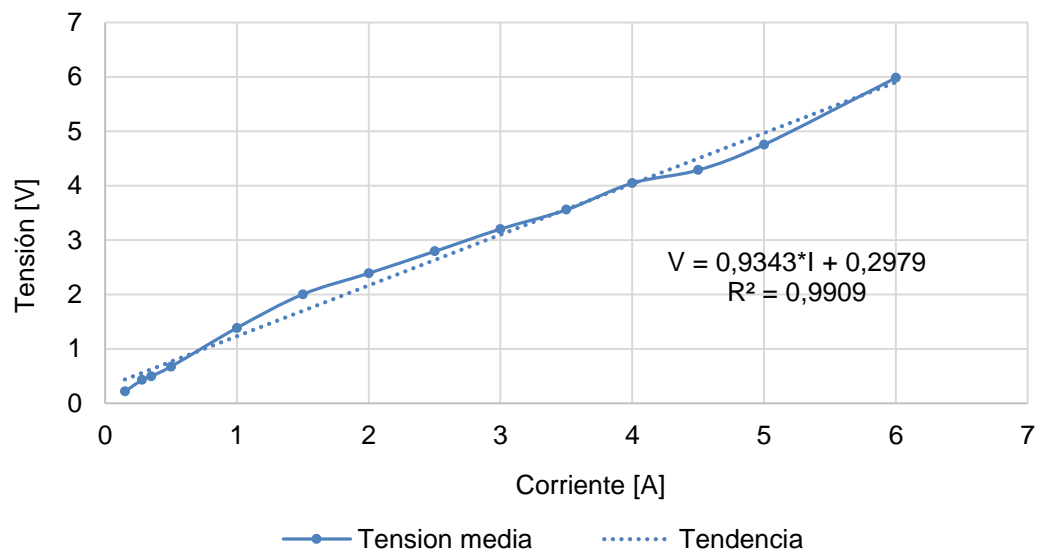
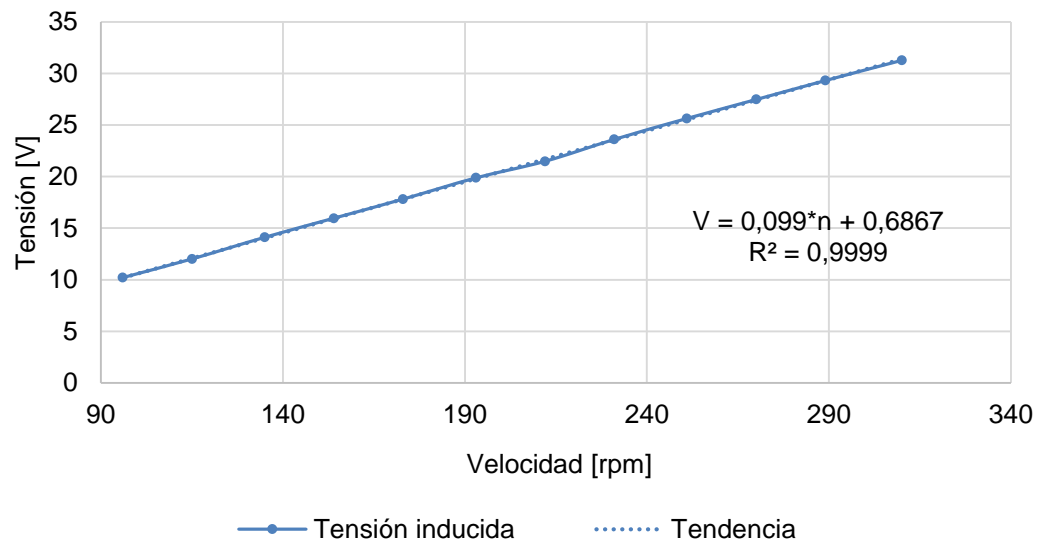


Figura 57. Tensión inducida en el motor DC en vacío en función de la velocidad del volante



De la Figura 56 se concluye que la resistencia de devanado del motor DC es $0,9343 \pm 0,1612 \Omega$ y la caída de tensión en las escobillas es aproximadamente 0,3 V. La tensión inducida en el motor DC en función de la velocidad del volante está dada por la ecuación:

$$T = 0,099n_{volante} + 0,6867 \quad (2)$$

Donde T es la tensión inducida del generador en vacío y $n_{volante}$ es la velocidad del volante acoplado al generador. La relación de velocidad del motor DC y el volante de la bicicleta es de 12,68. El rango de velocidad apropiada para el motor DC es de 1 500 rpm a 3 500 rpm. En la Tabla 8 se presentan las características principales de los dos generadores. Se aprecia que el alternador de automóvil está sobre dimensionado para la aplicación de generación eléctrica a partir de bicicletas estáticas.

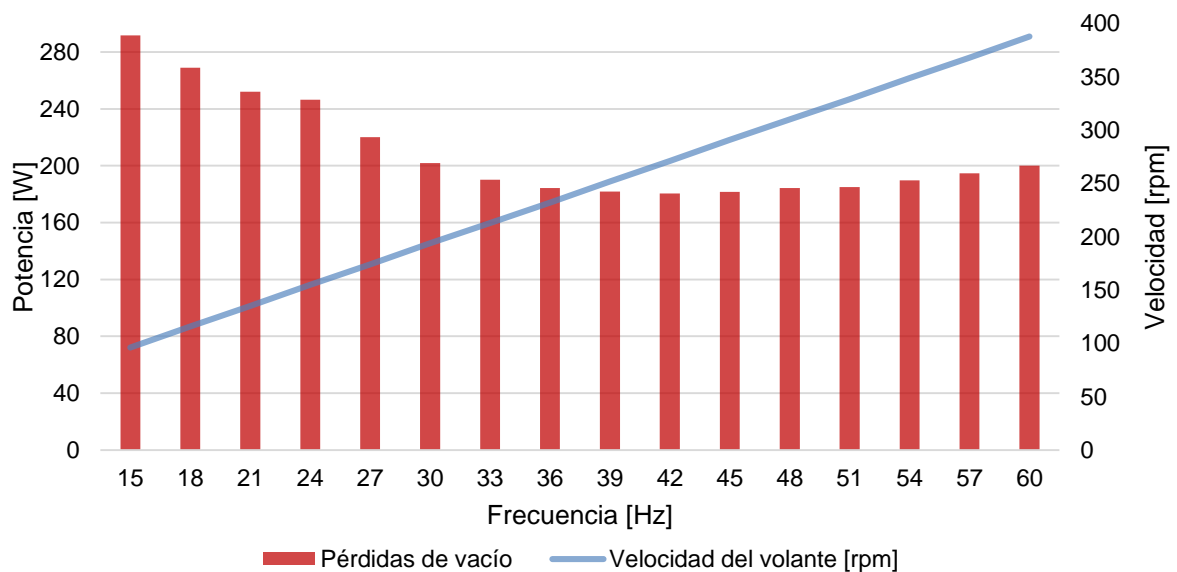
Tabla 8. Características principales de los dos generadores

	Alternador de automóvil (Durán Chacón & Gil Fernández, 2013)	Motor DC como generador
Corriente nominal	55 A	8,6 A
Rango de velocidad	1.800 - 6.000 rpm.	1.500 - 3.500 rpm.
Ecuación de tensión inducida	$0,07311n_{volante} + 1,0458$	$0,099n_{volante} + 0,6867$
Relación de velocidad (generador/volante)	11,057	12,68
Potencia de excitación de campo	20 W	0 W
Acople mecánico	Directo por fricción	Polea de sincronización

5.4 RESULTADO DE LA PRUEBA DE VACÍO EL MOTOR DE INDUCCIÓN

En la prueba de vacío del sistema de inyección de potencia mecánica se determinó la potencia necesaria para alimentar el motor de inducción en vacío a diferentes frecuencias y la velocidad del volante de la bicicleta sin carga (con los generadores desacoplados). El resumen de resultados se presenta en la Figura 58.

Figura 58. Potencia de vacío del motor de inducción a diferentes frecuencias



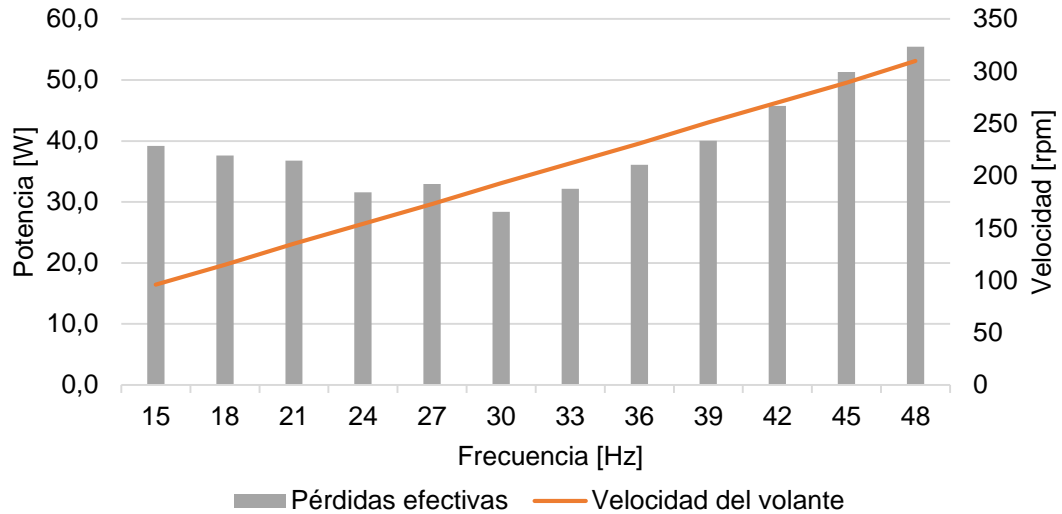
Se aprecia que el sistema de inyección de potencia mecánica controlada en vacío, requiere de mayor potencia a bajas frecuencias; una vez superados los 33 Hz el variador de velocidad, la potencia de pérdida se mantienen cercana a 200 W. La velocidad del volante de inercia presenta un comportamiento lineal respecto a la frecuencia del motor de inducción, evidenciando el control de potencia mecánica. Los valores de potencia en vacío se asumen como pérdidas constantes para las pruebas de eficiencia de los generadores.

5.5 RESULTADO DE LA PRUEBA DE VACÍO DE LOS GENERADORES

Teniendo en cuenta las pérdidas de vacío del motor de inducción, se midió la potencia necesaria para accionar el generador DC acoplado al volante de la bicicleta, los resultados se muestran en la Figura 59. En las pruebas realizadas se llevó de 15 a 45 Hz la frecuencia del variador, cubriendo el rango de velocidad apropiado del motor DC. Se observa que la velocidad del volante adecuada para esta alternativa está entre 150 rpm y 230 rpm, lo cual es acorde a la velocidad media desarrollada por un tripulante promedio.

A manera de observación se realizó una prueba de vacío del alternador de automóvil a una frecuencia de 30 Hz donde las pérdidas registradas del generador DC son mínimas. Se encontró que se requiere una potencia de 65,6 W para impulsar el alternador en vacío y sin excitación del campo. La excitación del campo aumenta las pérdidas mecánicas de vacío en un 30%, además que incluye pérdidas eléctricas equivalentes a 18,5 W, las cuales son asumidas por la batería.

Figura 59. Comportamiento en vacío del motor DC empleado como alternativa de generación

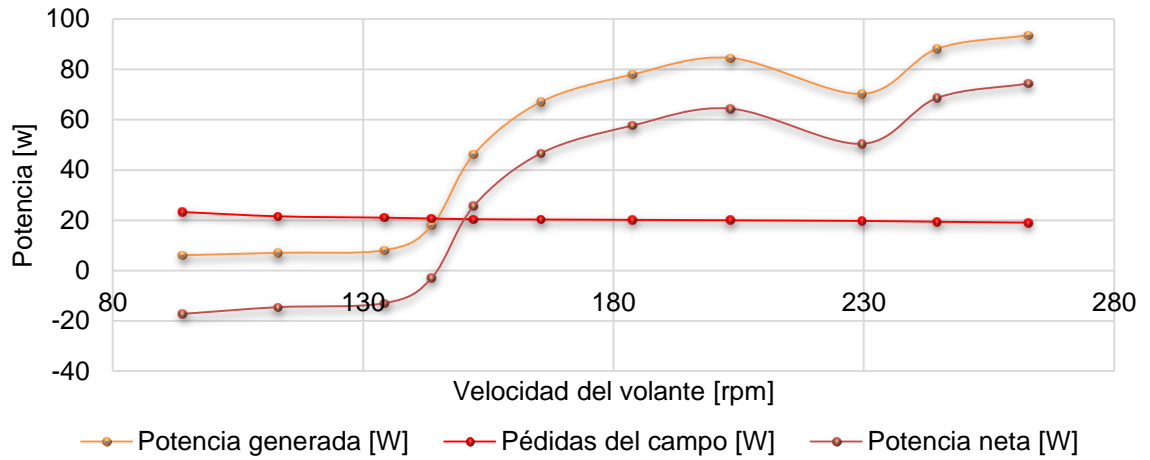


5.6 CURVAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS DOS ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN

Para generar las curvas de funcionamiento se varió la frecuencia del motor de inducción hasta alcanzar potencias de generación de 90 W, lo cual supera la potencia media de un tripulante (62,3 W). Las Figuras 60 y 61 muestran respectivamente las curvas de potencia en función de la velocidad del volante para el alternador de automóvil y el motor DC empleado como generador.

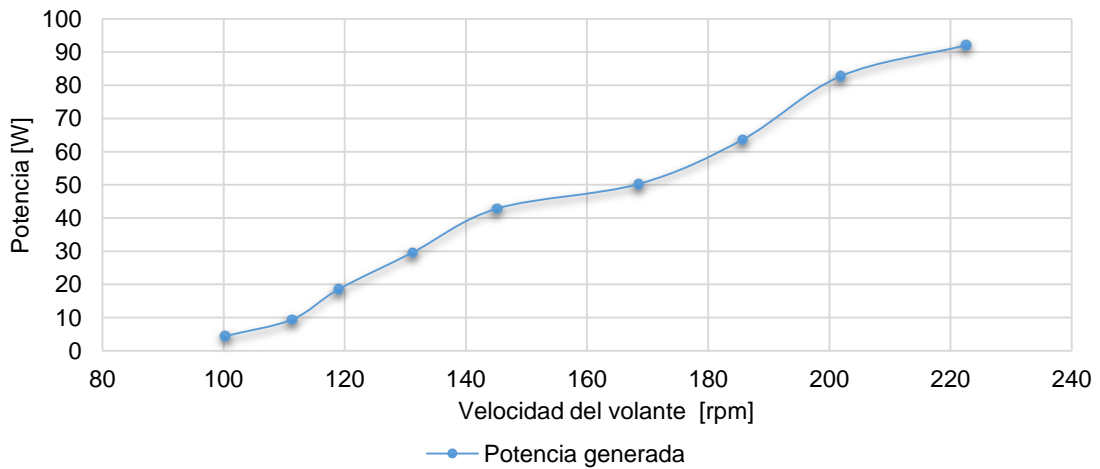
Cabe resaltar que las curvas obtenidas en estas mediciones obedecen a condiciones específicas de potencia del motor de inducción. Ya que el inversor *Grid Tie* (al cual se conectaron los generadores durante la prueba) incorpora la función MPPT asegura la máxima exigencia de potencia sin superar los límites propios, por lo cual no es posible prever la potencia generada para una velocidad específica del volante.

Figura 60. Curva de funcionamiento del alternador de automóvil



En la Figura 60 se observa una caída de potencia en las cercanías de 230 rpm, lo cual se presenta por deslizamiento del acople directo, generando pérdidas y desgastes significativos en la superficie del volante y de la tuerca de goma, además las pérdidas por alimentación de campo se mantienen casi constantes en 20 W y en caso de generarse una potencia inferior a ésta, el sistema consumiría energía

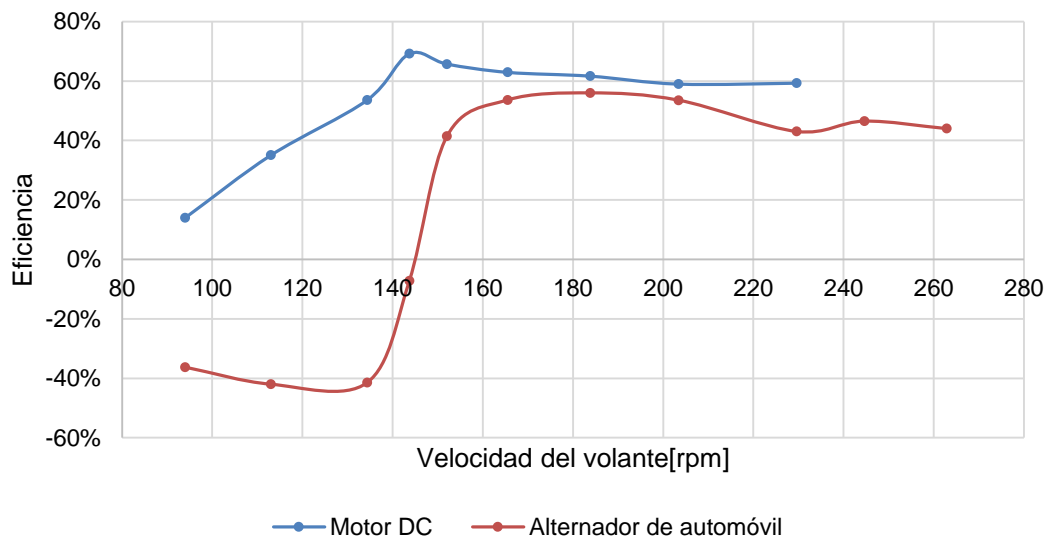
Figura 61. Curva de funcionamiento del motor DC como generador



La curva de generación del motor DC muestra mayor regularidad con una tendencia casi lineal, lo cual obedece al funcionamiento del variador de frecuencia que modifica la velocidad y mantiene constante el par de torsión del motor de inducción.

En la Figura 62 se presenta la comparación entre el rendimiento de los dos generadores. Se aprecia que la eficiencia del alternador de automóvil es negativa para velocidades del volante de inercia inferiores a 143 rpm, debido a que la potencia generada es inferior a la potencia consumida por el campo, la eficiencia del motor DC es superior en todo momento a la eficiencia del alternador y se estabiliza en un valor cercano al 60%.

Figura 62. Comparación de la eficiencia de las alternativas de generación



5.7 PRUEBAS DE POTENCIA CON TRIPULANTES REALES

Se realizaron cuatro (4) pruebas de potencia con tripulantes para cada generador, de los cuales dos (2) tripulantes participaron en las dos alternativas. En las Figuras 65 y 66 se presenta la evolución por minuto de la potencia generada con el alternador de automóvil y el motor DC respectivamente. La potencia registrada por tripulante, corresponde al valor entregado en terminales del generador respectivo.

En la Figura 63 se observa que con el alternador de automóvil la potencia generada supera en poco la alimentación del campo, en ocasiones las pérdidas en el campo son mayores a la potencia generada, además de esto la potencia máxima registrada es de 46,5 W, lo cual equivale al 70% del valor máximo por minuto encontrado en la prueba de potencia con tripulantes del motor DC.

La evolución de potencia por minuto para los tripulantes empleando el motor DC como generador es estable y presenta similitud entre los tripulantes, además la potencia generada está comprendida entre 20 W y 65 W, añadiendo que no existen pérdidas por excitación de campo.

Figura 63. Evolución por minuto de los tripulantes con el generador de automóvil

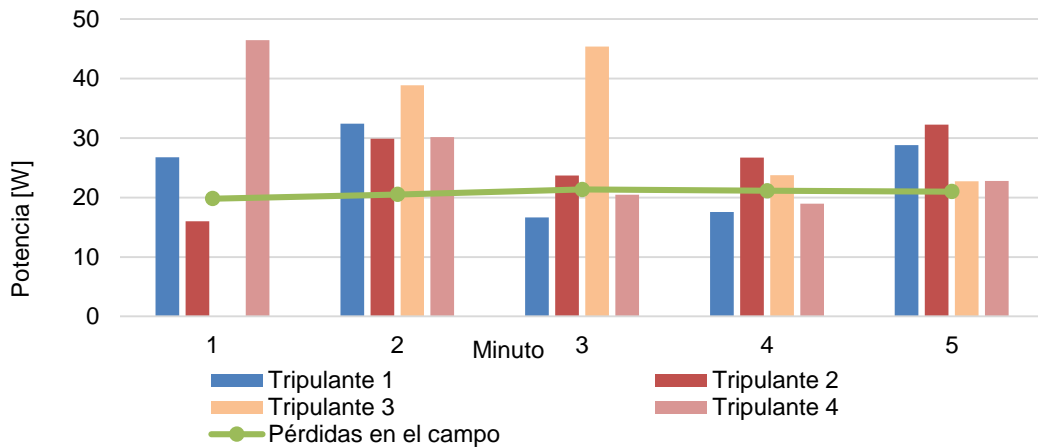
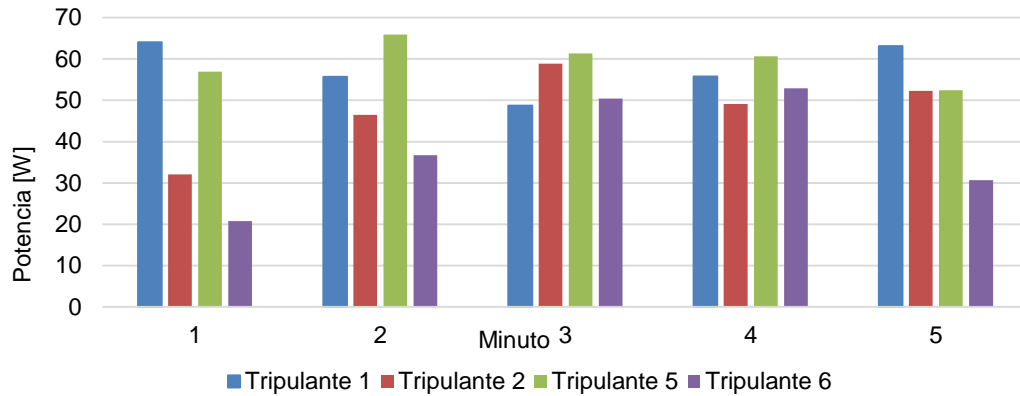


Figura 64. Evolución por minuto de los tripulantes con el motor DC como alternativa de generación



Las Figuras 65 y 66 muestran la evolución de un participante en las pruebas de potencia realizadas. Con el alternador, la mayor parte del tiempo la potencia generada está por debajo de la potencia de alimentación del campo, generando de esta manera una potencia media de 1,7 W lo cual resulta inadecuado para un sistema de generación. Al emplear el motor DC como alternativa de generación, el tripulante 1 genera una potencia media de 56,4 W lo cual es congruente con los resultados de la prueba de potencia mecánica y las cifras expuestas por Duran y Gil en 2013 y Human Dynamo en 2014.

Figura 65. Prueba de potencia generada del tripulante 1 empleando el alternador de automóvil.

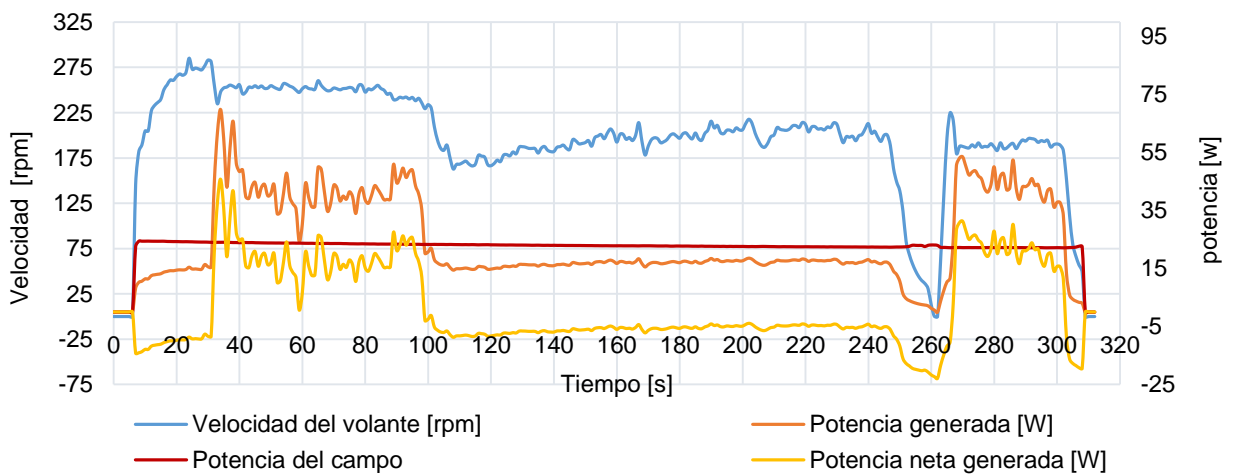
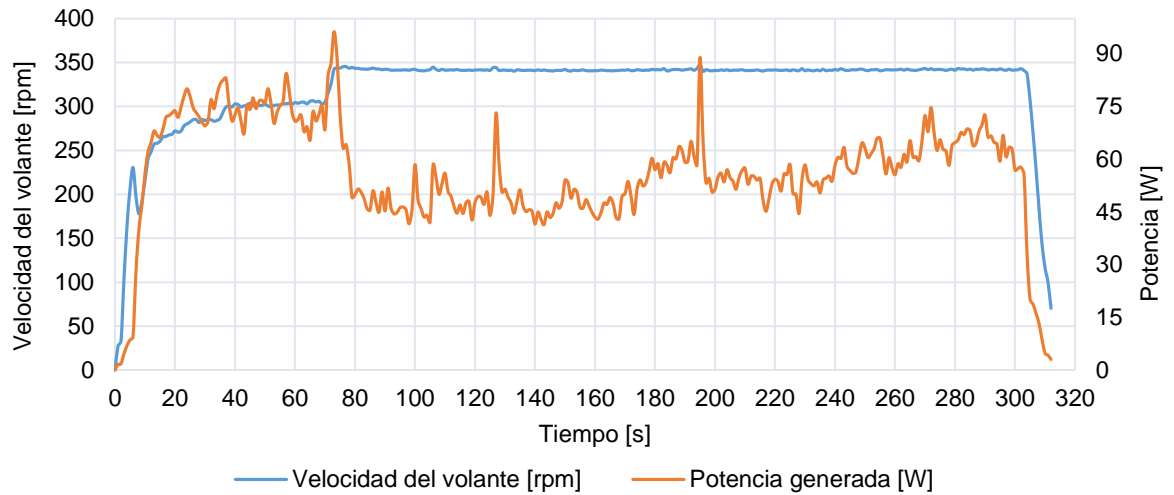


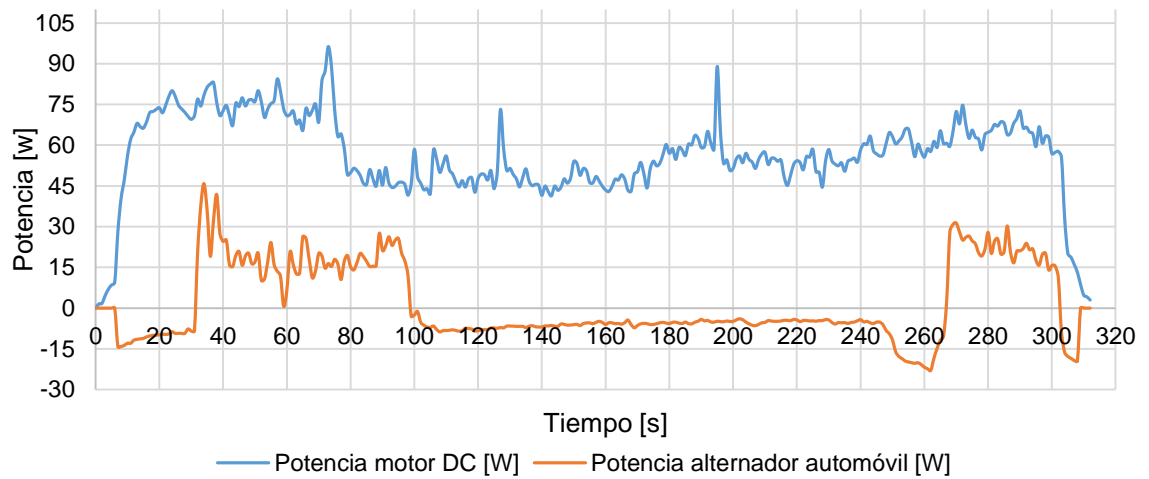
Figura 66. Prueba de potencia generada del tripulante 1 empleando el motor DC como generador.



En la Figura 65 se identifica una potencia pico generada de 70 W. Se observa como el tripulante 1 inicia con un alto desempeño y cerca del segundo 100 disminuye la velocidad, lo cual se refleja en una caída significativa de la potencia generada debido a la función MPPT presente en el inversor Grid Tie. Cerca del segundo 260 se detiene e inicia nuevamente. En la Figura 66, el tripulante 1 mantiene la velocidad estable y la potencia generada conserva valores superiores a 40W, por lo cual presenta un mayor rendimiento con el motor DC como alternativa de generación.

En la Figura 67 se presenta la comparación de la potencia neta generada con los dos generadores. La energía desarrollada con el motor DC por el tripulante 1 es 4,9 Wh, por el contrario, al emplear el generador de automóvil produce 2,07 Wh de los cuales, el 93% es consumido en la excitación del campo, entregando una energía neta de 0,24 Wh.

Figura 67. Evolución del tripulante 1 en las pruebas de alternativas de generación



Es evidente que la potencia producida con el alternador de automóvil no es adecuada para el sistema, por lo cual el empleo del motor DC como alternativa de generación representa una mejor opción.

6 CONCLUSIONES

Un tripulante promedio está en capacidad de generar cerca de 200 W en periodo no superior a 30 s y su potencia disminuye drásticamente al realizar grandes esfuerzos, por lo cual es recomendable controlar la potencia entre 40W y 70W para garantizar un ritmo constante y mayor desempeño del tripulante.

En las pruebas de potencia mecánica se determinó que la potencia media de un tripulante es de 66 W en un periodo de 6 minutos, después de este tiempo se presume que el rendimiento del tripulante disminuirá por el agotamiento físico.

En las pruebas de potencia mecánica se consideró un par de frenado constante para cada nivel de dificultad, para determinar con mayor confiabilidad y precisión la potencia entregada por un tripulante es necesario implementar una prueba con sensores dinámicos que permitan medir el par de torsión transmitido en tiempo real.

De los diferentes acoples mecánicos entre el alternador y el volante de inercia, se usó la correa sincrónica con polea dentada, ya que otorga la resistencia y flexibilidad requerida para la velocidad del generador. Además, reduce el ruido y evita el deslizamiento, aumentando la eficiencia. Por el contrario el acople tipo piñón-cadena, es inestable a grandes velocidades y produce ruidos incómodos alrededor del sistema.

La reutilización de componentes minimiza los costos de adquisición y en muchas ocasiones los elementos reciclados pertenecen a maquinaria robusta que ofrece alta calidad y durabilidad; el motor DC empleado como alternativa de generación pertenece a un equipo de maquinaria pesada diseñado para jornadas de trabajo extendidas y vida útil prolongada, lo cual da mayor confiabilidad al sistema de generación.

La función MPPT con la que cuenta el inversor Grid Tie (300W Power Inverter, Grid-Tie Inverter (SUN-300G) - China Grid-Tie Inverter, Grid Inverter) asegura la entrega de la potencia máxima del tripulante y evita cambios bruscos en la velocidad del volante, de esta manera es posible controlar la intensidad del ejercicio en la bicicleta estática disminuyendo el par aplicado en los pedales, lo cual beneficia la comodidad durante el entrenamiento.

Los sensores de corriente en el sistema de monitorización tienen un rango elevado, de -25A a 25 A, para las intensidades encontrada en el sistema de generación (de 0 a 15A en DC y de -2,36 a 2,36A en AC), lo cual incrementa la incertidumbre en la estimación de los parámetros evaluados.

En la reorganización de los sensores, se dispuso de tres (3) sensores de tensión y cinco (5) sensores de corriente, evitando redundancia en medición de señales eléctricas y mitigando el empleo de recursos del hardware de adquisición y el software de procesamiento de datos.

La estrategia de sensar la tensión de la red a través de un transformador de potencia adicionando contenido DC, permitió adquirir la señal sinusoidal, conocer el desfase respecto a la corriente y medir la potencia activa y reactiva en las etapas de corriente alterna.

En el sensado de la tensión de la red existe la posibilidad de conectar directamente el transformador de potencia a los bornes del módulo NI USB 6009, ya que, éste tiene capacidad de entrada de -10 a 10 V y la tensión transformada tiene un valor pico de 9,72 V; ésta posibilidad no se implementó por seguridad del módulo de adquisición.

El módulo NI USB 6009 es compatible con los sensores de corriente y de tensión. La tasa de muestreo de cada señal se configuró directamente en el entorno de LabVIEW a una frecuencia de 6 ks/s, lo cual equivale a 100 veces la frecuencia fundamental de la red (60 Hz) y permite identificar las variaciones de las señales DC, producidas principalmente por la discontinuidad del pedaleo de los tripulantes.

El hardware de adquisición y el software de procesamiento pertenecen a un mismo fabricante (National Instrument), lo cual brinda mayor compatibilidad en la adquisición de datos y en la programación del procesamiento de los mismos

Para la obtención de parámetros eléctricos se empleó la *paleta de potencia* especializada para éste tipo de mediciones, garantizando resultados confiables.

El sub-VI *Write to Spreadsheet File* permite almacenar los datos procesados directamente en archivos .xls, facilitando el análisis de resultados.

La potencia empleada en la excitación del campo, por parte del alternador de automóvil, representa entre el 70% y 93% de la potencia generada, por lo cual el generador de imanes permanentes es más adecuado para este sistema de baja potencia.

7 RECOMENDACIONES

En cuanto a la bicicleta, la comodidad del tripulante es indispensable para que aporte su máxima capacidad energética; por esta razón, es importante adaptar un sistema ergonómico a la bicicleta, que ayude a la estabilización y rigidez de la misma, para evitar movimientos secundarios que incomoden al tripulante, lo que ocasionaría cansancio y pérdidas de fuerza al momento de pedalear. Este sistema se debe encargar de ajustar la altura y posición de los elementos de la bicicleta a la anatomía del participante; así como también, de proporcionar un ambiente apropiado para la actividad realizada (spinning).

Para mejorar el rendimiento y la fluidez al pedalear, se podría implementar un sistema mecánico en el plato de la bicicleta que ayude a evitar el punto muerto (posición de las bielas y el plato en el cual las fuerzas aplicadas por las piernas se cancelan). Se conocen numerosos sistemas para evitarlo, siendo los más conocidos el sistema Rotor y el sistema Q-Rings. Según Del Coso, Lozano, y Mora en (Lozano, Del Coso, & Mora Rodriguez, 2006) la eficiencia del pedaleo al utilizar el sistema rotor puede aumentar hasta en un 20%. Una mejora de esta magnitud impactaría positivamente en la potencia generada. Como contrapartida cabe mencionar, que esta clase de sistemas son costosos y requieren un especialista para su implementación.

El diseño de un generador específico para la generación eléctrica a partir de bicicletas estáticas podría mitigar los limitantes y brindar un control de la potencia generada que favorezca la comodidad de los tripulantes y permita la posibilidad de realizar una actividad física personalizada; el diseño de este generador debe incluir un análisis económico que determine la viabilidad de su implementación.

Al emplear sensores con dimensiones cercanas a los valores de medición, disminuiría la incertidumbre y por consiguiente aumentaría la fiabilidad de los datos obtenidos, lo cual otorga resultados más eficientes.

BIBLIOGRAFÍA

300W Power Inverter, Grid-Tie Inverter (SUN-300G) - China Grid-Tie Inverter, Grid Inverter [En línea]. [Citado: 21 de Agosto de 2014]. Disponible en internet: <<http://sunshine.en.made-in-china.com/product/koxJOCSrLKVe/China-300W-Power-Inverter-Grid-Tie-Inverter-SUN-300G-.html>>

ANGEL, Michael Andrew. Clinical guide to sport injuries. McKenson Health Solution. LLC, 2002. 54 p.

ATLANTA, GEORGIA. DEPARTAMENTO DE SALUD Y ASISTENCIA PÚBLICA DE LOS ESTADOS UNIDOS. Manual de evaluación de la actividad física, 2006.

BENITEZ R., Yenniffer D., GONZÁLEZ H., Juan B. y ROSERO G., Javier. Producción energética en un modelo para gimnasios colombianos. En: Visión Electrónica. Julio-diciembre, 2013, vol. 7, no. 2, p. 125-134.

CARRIÓN, Diego y ORTÍZ, Leony. Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos. En: INGENIUS. Julio-diciembre, 2013, no. 10, p. 44-48.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE; VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Lineamientos técnicos para el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Bogotá, D.C., 2009. 100 p. ISBN: 978-958-8491-48-6

DURÁN CHACÓN, José Vicente y GIL FERNÁNDEZ, Algemiro José. Generación de energía eléctrica a partir de una bicicleta estática: montaje de una unidad piloto. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2013. 164 p.

ECHAVARRÍA PEREZ, C. y ABOITIZ CATALAPIEDRA, J. Bases científicas para el diseño de un programa de ejercicios para la artrosis de rodilla. Unidad de Rehabilitación del Hospital Fundación Alcorcón. Madrid, España, 2010.

EUROTHERM DRIVES. Product manual 601. Inglaterra: Eurotherm Drives Ltd.

FERNANDEZ OREA, Luis. Antonio. Control y monitorización remota de instalaciones eléctricas residenciales mediante instrumentación virtual con LabVIEW. Trabajo de pregrado. Mexico: Universidad de Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 2012. 80 p.

FLÓREZ REYES, Julián Oswaldo y NÚÑEZ RODRÍGUEZ, Carlos Fabián. Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas. Trabajo de pregrado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2011. 77 p.

GALLARDO, Adrián; SANCHEZ, José Luis y CEVALLOS, Holger. Monitorización y control remoto de la planta HAMBURG RT 450 vía internet a través del server de LabVIEW. Trabajo de pregrado. Ecuador: Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2011.

GAMBAROTA, Lucien. Exercisers & Equipments, Motor Gym. [En línea]. [Citado: 05 de Abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.motorwavegroup.com/Motorgym/>>

GIBSON, Tom. Turning sweat into watts. En: IEEE Spectrum. Julio, 2011. vol 48, p. 50-55.

HOYOS ARBELÁEZ, Juan Carlos. Desarrollo y aplicación de un modelo de simulación de un sistema de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos asociados a las TIC en Colombia para analizar su viabilidad tecnológica y financiera. Trabajo de grado de Maestría. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011. 73 p.

HUBER, Elizabeth; SANCHEZ, Richie y SATO, Shin. The Power Workout: Converting Exercise into Electrical Energy. San Diego: Universidad de San Diego, 2009. 59 p.

HUMAN DYNAMO. Technical Info. [En línea] [Citado: 29 de Noviembre de 2014] Disponible en internet: <http://www.humandynamo.com/technical_info.html>

LABANDERIA, Xavier; LINARES, Pedro y WÜRZBURG, Klass. Energías renovables y cambio climático. En: Economics for Energy. 2012. 22 p. ISSN 2172/8437

LOZANO, Rubén; COSO, Juan del y MORA RODRIGUEZ, Ricardo. Eficiencia de pedaleo utilizando el sistema de bielas Rotor; Efectos de variaciones en la carga inercial. En: Archivos de medicina del deporte. 2006. vol. 23, no. 150, p. 351-357.

MEGALINGAM, Rajesh Kannan, *et al.* Pedal Power Generation. En: Internal Journal of Applied Engineering Research. 2012. vol. 7, no. 11. ISSN 0973-4562

MONTGOMERY, Douglas. C. y RUNGER, George. C. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. México: McGRAW-HILL, 1996. 834 p.

NATIONAL INSTRUMENTS. Información de Producto: ¿Qué es Adquisición de Datos? [En línea]. [Citado: 13 de Junio de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.ni.com/labview/whatis/esa/>>

----- . User guide and specification, NI USB 6008/6009. [En línea]. [Citado: 22 de diciembre de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>>

NOKIA. Manual de usuario NOKIA bicycle charger kit DC-14. Finlandia: 2010.

OSMA PINTO, German Alfonso. Uso racional de la energía en el edificio de Eléctrica II a partir del diseño de aplicaciones energéticas sostenibles. Trabajo de investigación de Maestría. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica electrónica y telecomunicaciones, 2011. 253 p.

PADILLA, Sebastian y CUESTA, Gerardo. Adaptaciones al entrenamiento de ciclismo en ruta [En línea]. 12 de junio, 2012. [Citado: 30 de julio del 2014]. Disponible en internet: <<http://www.entrenamientos.org/entrenamientodeportivo/item/90entrenamientociclismo>>

PÉREZ CALLEJA, David. Creación de un sistema de control en LabVIEW para un banco de ensayos. Tesis de maestría. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 2010. 104 p.

RAMIREZ NEYRA, Fernando. Sistema de adquisición de datos de sensores analógicos y digitales. Trabajo de pregrado. Ciudad de México D.F., México: Instituto Politécnico Nacional. Departamento de Ingeniería en control y Automatización, 2009. 175 p.

RIOZ ZORRILLA, Marco Antonio. Análisis, desarrollo y evaluación de un plan de entrenamiento sobre bicicletas estáticas “E.S.B.E.”. Trabajo de grado de maestría. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata. Facultad de humanidades y ciencias de la educación, 2013. 145 p.

ROUNSEVELL, Jared, *et al.* Harvesting human exercise at the Cal Poly Rec center: Exercise bike power generator II. Trabajo de pregrado. San Luís Obispo, Estados Unidos: California Polytechnic State University. Mechanical Engineering Department, 2009. 92 p.

SANJAY, Samuel David. Harvesting electrical energy from a stationary bike: An experimental approach. Tesis de maestría. Palmerston North, Nueva Zelanda: Massey University. School of engineering and advanced technology, 2014. 163 p.

SCHNEIDDER, Stephen H.; EASTERLING, William E. y MEARNS, Linda O. Adaptation: Sensitivity to natural variability, agents assumptions and dynamic climate changes. En: Climatic Change, 2000. vol. 45, p. 203-221.

SHUSMITA, Rahman; SULTANA ONI, Nadia y IBN, Quazi. Design of a charge controller circuit with maximum power point tracker (MPPT) for photovoltaic system. Trabajo de Pregrado. Dakha, Bangladesh: Brac University. Department of electrical & electronic engineering, 2012. 70 p.

TERRA. La bicicleta sin pilas, dinamos sin rozamiento [En línea]. 06 de mayo, 2006. [Citado: 29 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.terra.org/categorias/comunidad-ecotransporte/la-bicicleta-sin-pilas-dinamos-sin-rozamiento> >

THE GREAT OUTDOOR GYM COMPANY. Green energy [En línea]. 2013. [Citado: 05 de abril de 2015]. Disponible en internet: <<http://www.tgogc.com/Green-Energy.html>>

TING-CHUNG, Yu y YU-CHENG, Lin. Fuzzy controller for a voltage-regulated solar-powered MPPT system for hybrid power system applications. En: Energies, 2015. vol 8, p. 3292-3312. ISSN 1996-1073

WORKING BIKES COOPERATIVE. Human powered machine innovations exhibited at the 2010 Midwest Renewable Energy Fair [En línea] 2010. [Citado: 29 de noviembre de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.workingbikes.org/human-powered-machine-innovations-exhibited-at-the-2010-midwest-renewable-energy-fair-by-working-bikes-cooperative/>>

ANEXOS

ANEXO A. FISIOLÓGÍA DEL CICLISTA

Las bicicletas estáticas proporcionan un gran entrenamiento físico y son bastante fáciles de usar. Sólo se debe mover las piernas para impulsar los pedales. El movimiento implica poco desgaste mental, así que mientras se está pedaleando puede realizar otras actividades como lectura o ver televisión.

Usar la bicicleta estática se considera un ejercicio de bajo impacto, ya que su uso no ejerce presión considerable sobre las articulaciones, por lo que puede ser un gran sustituto para un entrenamiento pasivo, que se necesite bajo esfuerzo físico o si se tiene dolor en las rodillas.

Existen muchas ventajas de la incorporación de la bicicleta estática en los entrenamientos. Proporcionan un gran ejercicio cardiovascular que ayudará a quemar muchas calorías, una de las claves para una vida saludable¹⁹.

A.1 ANATOMÍA EJERCITADA EN BICICLETAS ESTÁTICAS

Durante el entrenamiento sobre las bicicletas estáticas la musculatura usada comúnmente es el tren inferior del cuerpo, los miembros inferiores y el pie, ellos ejercen la fuerza necesaria para accionar los pedales, que a su vez dan movimiento al volante de inercia; pero aplicando ciertas técnicas en las posturas y la forma de

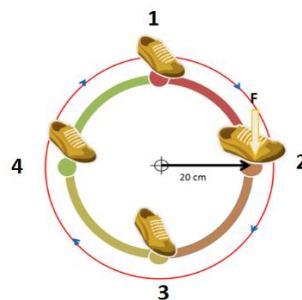
¹⁹ ECHAVARRÍA PEREZ, C. y ABOITIZ CATALAPIEDRA, J. Bases científicas para el diseño de un programa de ejercicios para la artrosis de rodilla. Unidad de Rehabilitación del Hospital Fundación Alcorcón. Madrid, España, 2010.

acomodarse sobre la bicicleta permite ejercitar todo el cuerpo, incluyendo el cuello y las extremidades superiores. A continuación se describen los músculos trabajados al momento de ejercitarse sobre una bicicleta estática:

A.1.1 Miembros inferiores²⁰. Extremidades unidas al tronco en la pelvis, entre los músculos entrenados se encuentran los de la zona de la pelvis, el muslo, la pierna y el pie. Las fases del pedaleo involucra la acción de cada uno de los músculos, los cuales se ejercitan conjuntamente, otorgando la acción motora que requiere las extremidades para fortalecerse.

La técnica más eficiente de pedaleo del ciclismo en general consiste en efectuar una rotación de 360° en torno al eje de las bielas, transmitiendo fuerza a través de los pedales. Esta rotación permite el avance del volante de inercia de la bicicleta por medio de un sistema de transmisión (plato-piñón) el cual está relacionado por una cadena metálica acondicionada para tal fin. Esta rotación de 360° se divide en 4 fases de pedaleo (Figura 68), cada una en un intervalo de 90°. Estos puntos se irán cubriendo de forma progresiva las acciones musculares generadas por los distintos grupos que intervienen en esta acción propulsora.

Figura 68. Fases técnicas del pedaleo



²⁰ RIOZ ZORRILLA, Marco Antonio. Análisis, desarrollo y evaluación de un plan de entrenamiento sobre bicicletas estáticas "E.S.B.E.". Trabajo de grado de maestría. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata. Facultad de humanidades y ciencias de la educación, 2013. 145 p.

Cada distancia de rotación recorrida ejerce contracción en cierta zona corporal, específicamente de las extremidades inferiores y ejercita los músculos ubicados allí, tomando como referencia, estudios y pruebas realizadas en la Universidad Nacional de La Plata, se describe a continuación las partes del cuerpo que se entrena en cada fase del pedaleo:

- Del punto 1 al 2 se hace fuerza para adelante y para abajo: Trabajan los cuádriceps, el vasto interno y externo, el recto femoral y el tensor de la fascia lata para adelante, y para abajo los músculos glúteo mayor, medio y menor con el cuadrado crural. De la rodilla para abajo se puede hacer mención directa al músculo gastrocnemio*.

- Del 2 al 3 se hace fuerza para atrás y para abajo: Trabajan el semitendinoso y el bíceps femoral para atrás, y para abajo los músculos glúteo mayor, medio y menor con el cuadrado crural. De la rodilla para abajo se involucra mucho el músculo gastrocnemio.

- Del 3 al 4 se hace fuerza para atrás y para arriba: Trabajan el semitendinoso y el bíceps femoral para atrás, y para arriba trabajan el psoas mayor e ilíaco. De la rodilla para abajo, el tibial anterior y el peroneo mayor.

- Del 4 al 1, se hace fuerza hacia arriba y adelante Trabajan el psoas mayor e ilíaco para arriba y el cuádriceps, vasto interno, externo, recto femoral y tensor de la fascia lata para adelante. De la rodilla para abajo, el tibial anterior y el peroneo mayor.

A.1.2 Miembros superiores (Padilla & Cuesta, 2012). Además de pedalear correctamente, el practicante debe adoptar una postura eficiente, para que el cuerpo no se canse rápidamente, además evita futuros sufrimientos en las musculaturas. En estas posturas se incluye el cuello, las extremidades superiores y el tronco (conformado por tórax, abdomen y cadera).

- Trabajo del tronco: Conformado por el tórax, el abdomen y la cadera, es la unión a las articulaciones inferiores y está sometido a constantes fuerzas. Su estabilidad es esencial para un buen rendimiento muscular y para evitar alteraciones de la columna vertebral. Además, citando a los entrenadores profesionales Padilla y Cuesta, “El movimiento alternado de las piernas al pedalear tiende a desviar la columna y crestas ilíacas, además de la pelvis, sobre todo en la primera parte del pedaleo, al apoyar y empujar”. Una buena postura ayuda a tener eficacia en el pedaleo.

- Trabajo del cuello: Los músculos extensores del cuello deben estar siempre en contracción, puesto que el centro de gravedad de la cabeza está situado más adelante. Este desequilibrio provoca sobrecargas y fatiga.

- Trabajo de las extremidades superiores: Conformados por el tríceps, el bíceps y el deltoides, que proporcionan la fuerza de acción y empuje alternados de las fases del pedaleo. Las manos deben estar apoyadas sobre el manubrio, para apoyar el movimiento de tracción y empuje alternado y sincronizado con las fases del pedaleo, especialmente en trabajos de fuerza.

El brazo y el antebrazo realizan diversas acciones; evitan la flexión del tronco, dando colaboración al trabajo de la zona lumbar y facilitando la técnica de pedaleo; colaboran con la estabilidad, principalmente cuando se trabaja de pie sobre los pedales.

A.2 TÉCNICAS PARA EL CORRECTO ENTRENAMIENTO SOBRE LA BICICLETA:

Para un perfecto entrenamiento, sin afectar la integridad del cuerpo y permitiéndole efectuar el máximo rendimiento posible, se debe considerar algunas adaptaciones ergonómicas esenciales que permitirá al practicante la mejor postura y la menor fatiga al momento de entrenar²¹:

-Poner el sillín a tal altura sobre los pedales y con tal retroceso que permita pedalear suave y eficazmente en posición sentada, es decir con la pierna totalmente extendida.

- Una altura del manubrio igual a la del sillín y una posición sobre el manubrio donde la parte superior del cuerpo quede adaptada a la flexibilidad y anatomía del usuario, permitiendo un pedaleo efectivo cuando se carga todo el peso sobre los pedales.

- Los componentes deben proporcionar suficiente flexibilidad para adaptarse a las características físicas de hombres y mujeres.

A.2.1 Pedaleo uniforme. Consiste en trabajar coordinadamente todos los músculos involucrados en cada fase del pedaleo (sección 3.1) para evitar los puntos muertos, es decir, sectores de la circunferencia que pueda provocar sobrecargas, propiciando lesiones.

A.2.2 Apoyo del pie en el pedal. El pie debe apoyarse en el metatarso, punto de transmisión de la fuerza ejercida por la pierna al pie. Este punto permite mantener la posición anatómica correctamente durante el entrenamiento. No apoyar el pie

²¹ RIOZ ZORRILLA, Marco Antonio. Análisis, desarrollo y evaluación de un plan de entrenamiento sobre bicicletas estáticas "E.S.B.E.". Trabajo de grado de maestría. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata. Facultad de humanidades y ciencias de la educación, 2013. 145 p.

correctamente puede inflamar la planta del pie. Dicho punto se puede observar en la Figura 69.

Figura 69. Punto de apoyo en el pedal



Fuente: PADILLA, Sebastian y CUESTA, Gerardo. Adaptaciones al entrenamiento de ciclismo en ruta [En línea]. 12 de junio, 2012. [Citado: 30 de julio del 2014]. Disponible en internet: <<http://www.entrenamientos.org/entrenamientodeportivo/item/90entrenamientociclismo>>

La posición de los pies deben tener la misma dirección y paralelas entre ellos, esto mejora la postura y el bajo desgaste de las rodillas, de lo contrario puede sufrir en los ligamentos cruzados situado en ellas. Las rodillas deben estar proyectadas hacia el frente y recordar que ellas solo cumplen con la función de extensión y no de rotación.

A.2.3 Zona superior. Se recomienda posicionar la cadera paralelamente al piso, esto proporciona la estabilidad de las piernas, lo que disminuye la sobrecarga en las piernas, además reduce la tensión en la columna y los músculos de la espalda. En los miembros superiores, los hombros deben estar a una misma altura y paralelos entre sí; la cabeza con vista siempre al frente apoyada por el cuello los cuales deben estar lo más relajado posible; las muñecas dependerán del entrenamiento que se esté realizando, si se encuentra sentado, se deben apoyar en la parte baja del manubrio, si se trabaja de pie deben estar en la parte alta del este.

Esto ayuda a la nivelación del peso, lo cual evita la sobrecarga sobre los hombros y favorece la estabilidad axial²².

Para finalizar el Entrenador y ciclista profesional Ángel McCormack recomienda un proceso para el inicio del entrenamiento en bicicletas. Para dar inicio al entrenamiento se debe adecuar la bicicleta a la anatomía del usuario (altura y retroceso del sillín, posición del manubrio) y recordar la importancia de las correas que dan ajuste al calzado. Se debe realizar una “activación articular” de 3 minutos a 5 minutos, que consiste en rotaciones en una dirección y otra de las articulaciones del cuello, hombros, muñecas, cadera y tobillos; por ultimo dar inicio al calentamiento, con bajas restricciones, a velocidades bajas²³.

²² PADILLA, Sebastian y CUESTA, Gerardo. Adaptaciones al entrenamiento de ciclismo en ruta [En línea]. 12 de junio, 2012. [Citado: 30 de julio del 2014]. Disponible en internet: <<http://www.entrenamientos.org/entrenamientodeportivo/item/90entrenamientociclismo>>

²³ ANGEL, Michael Andrew. Clinical guide to sport injuries. McKenson Health Solution. LLC, 2002. 54 p.

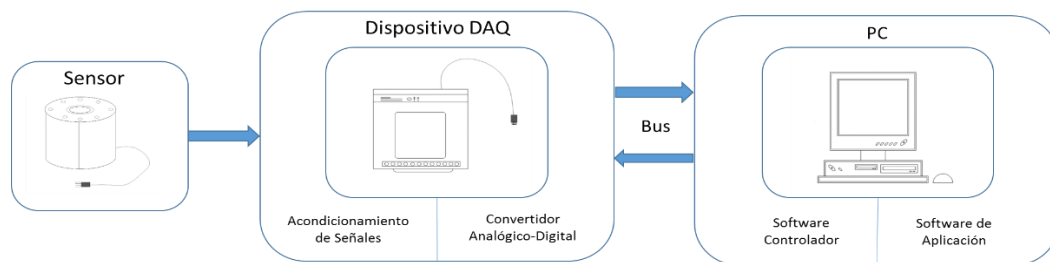
ANEXO B. PRINCIPIOS DE MONITORIZACIÓN

La monitorización es el proceso de medición que se encarga de registrar variables analógicas y convertirlas a formato digital, son almacenadas en un computador y procesadas finalmente para su visualización. Permite la lectura en tiempo real de los parámetros del sistema como la tensión, corriente y potencia²⁴.

B.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

Es el proceso de describir un fenómeno físico a través de un computador. Los sensores son los encargados de interpretar dichos fenómenos y crear una señal eléctrica que posteriormente son adaptadas para su lectura digital. Cuenta con un hardware de adquisición de datos (DAQ) que transfiere la lectura digital al PC por medio de un bus de datos para la interpretación mediante el software programable (National Instruments). En la Figura 70 se muestra el esquema general de un sistema de monitorización a través de DAQ.

Figura 70. Esquema de Monitorización a través de DAQ.



²⁴ RAMIREZ NEYRA, Fernando. Sistema de adquisición de datos de sensores analógicos y digitales. Trabajo de pregrado. Ciudad de México D.F., México: Instituto Politécnico Nacional. Departamento de Ingeniería en control y Automatización, 2009. 175 p.

Para entender el funcionamiento del dispositivo DAQ es necesario conocer los procesos y cambios que pasa la señal desde su magnitud física hasta su visualización digital, a continuación se detalla cada etapa del sistema de monitorización:

B.1.1 Sensores. Son dispositivos con la capacidad de convertir una magnitud física (temperatura, presión, tensión, corriente) en una diferencia de potencial, es decir, una variación en la intensidad. Realizan una conversión de energías y suministran información sobre el estado y el tamaño de la magnitud. Las señales analógicas varían continuamente en el tiempo, por lo que deben ser procesadas para convertirlas en datos digitales²⁵.

B.1.2 Acondicionamiento de señales. El objetivo del acondicionamiento es generar una señal, proveniente de los sensores, que sea aceptable por la tarjeta de adquisición de datos. Las funciones principales que realiza el acondicionador de señales son.

- Transformación: Cuando los sensores proporcionen una variación de intensidad, esta debe ser convertida en una diferencia de potencial proporcional para que sea admitido por la tarjeta de adquisición de datos.

- Amplificación: Las señales proporcionadas por los sensores suelen ser de valor pequeño, por el orden de los mV, las cuales deben ser amplificadas para que sean percibidas por la tarjeta. La señal debe recorrer todo el margen de la tarjeta de adquisición de datos, generalmente de -10 V a 10 V. Esto reduce el ruido que se produce en el momento de transmisión hacia el PC.

²⁵ FERNANDEZ OREA, Luis. Antonio. Control y monitorización remota de instalaciones eléctricas residenciales mediante instrumentación virtual con LabVIEW. Trabajo de pregrado. Mexico: Universidad de Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 2012. 80 p.

- Filtrado: Se eliminan ruidos de alta frecuencia que puede hacer perder la exactitud de la medición. Lo ideal es transportar la señal limpia para su lectura en la tarjeta de adquisición de datos.

- Linealización: Algunos sensores no tienen una variación lineal, lo que se hace necesario convertir la respuesta del sensor en lineal.

B.1.3 Convertidor Analógico-Digital (ADC). Las señales analógicas que llegan al dispositivo DAQ, son convertidas a través de un chip ADC en señales digitales. En la práctica las señales analógicas varían con el tiempo, por lo que el chip toma muestras de la señal, las transfiere al PC y luego el PC reconstruye esta señal original a través de las muestras.

B.1.4 Transmisión de datos. La transmisión de datos se hace a través de un BUS, es la conexión entre la tarjeta y el PC, permite transmitir las señales digitales muestreadas al PC. Existen distintos tipos de buses, el BUS de direcciones, vincula el bloque de control de la CPU para colocar datos durante procesos de cómputo. El BUS de control, transporta datos respecto de las operaciones que se encuentra realizando el CPU. El BUS de datos, transporta información entre dispositivos de hardware como teclado, mouse, impresora, monitor y también de almacenamiento como el disco duro o memorias móviles²⁶.

²⁶ NATIONAL INSTRUMENTS. Información de Producto: ¿Qué es Adquisición de Datos? [En línea]. [Citado: 13 de Junio de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.ni.com/labview/whatis/esa/>>

B.2 DISPOSITIVO DAQ²⁷

La tarjeta de adquisición de datos se encarga de las conversiones de señales analógica a digital y de la comunicación con el PC. Se deben conocer las características más relevantes de la tarjeta para saber las cualidades de transmisión que tendrá esta; esto nos permite tener referencia para escoger un dispositivo DAQ que mejor se adapte al sistema utilizado. Estas características son:

B.2.1 Número de canales analógicos. Indica la cantidad de magnitudes distintas que se pueden adquirir con la misma tarjeta. Esto proporciona una restricción, ya que con una sola tarjeta se puede medir el número de fenómenos físicos como entradas tenga el dispositivo. Se dispone de un único ADC y los diferentes canales se generan por medio de un multiplexor analógico.

B.2.2 Frecuencia de muestreo. Es la velocidad del ADC para realizar muestras de la señal analógica, cuanto mayor sea esta velocidad, mejor representación digital se obtendrá de esta señal. Para poder replicar con exactitud la forma de onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear, según lo demostrado en el teorema de Nyquist. Si se utiliza una frecuencia menor, se produce distorsión conocida como *aliasing*, lo que impide recuperar correctamente la señal cuando se obtiene a intervalos de tipo muy largos.

B.2.3 Resolución. Constituye el número de bits del ADC que se utilizan para representar cada muestra, a mayor número de bits, la tarjeta será capaz de detectar variaciones menores en la señal.

²⁷ PÉREZ CALLEJA, David. Creación de un sistema de control en LabVIEW para un banco de ensayos. Tesis de maestría. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 2010. 104 p.

B.2.4 Rango de entrada. Indica los márgenes entre los que debe estar la señal de entrada para que pueda ser convertida. Cada tarjeta tiene características para determinar la capacidad y precisión para la adquisición de datos; a menor rango de entrada, mayor es la precisión, ya que con los mismos bits de resolución se tendrá que representar un menor rango.

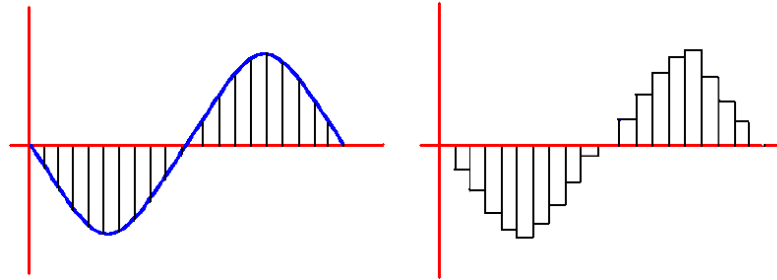
B.3 FUNDAMENTOS DE PROCESAMIENTO DE SEÑAL

El proceso de digitalizar una señal comprende una serie de pasos adaptativos para cada una de las fases de conversión. Desde la muestra analógica de la señal hasta la visualización final en el PC, se aplican estos cambios para que la secuencia de digitalización se realice lo más limpio posible. Este proceso se describe a continuación:

B.3.1 Muestreo de señales analógicas. Para obtener datos digitales a partir de señales analógicas, la señal debe ser muestreada. Esto significa tomar el valor instantáneo de la señal en un momento determinado. Para una señal continua, las muestras se toman a intervalos regulares, generalmente con un periodo de muestreo fijo entre medidas.

El Teorema de Nyquist indica que la frecuencia de muestreo mínima que tenemos que utilizar debe ser mayor al doble de la frecuencia máxima de la señal. Si utilizamos esa frecuencia de muestreo, podremos reproducir posteriormente la señal a partir de las muestras tomadas. En la Figura 71 se puede observar la digitalización de una señal analógica.

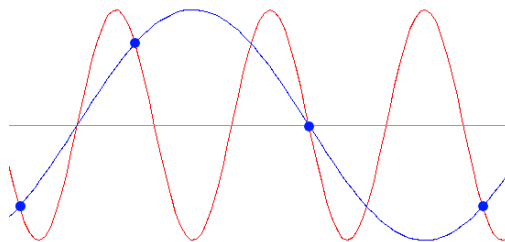
Figura 71. Representación de una señal muestreada



Si se utiliza una frecuencia más alta que la de Nyquist se obtendrá una representación más exacta de la señal de entrada. Sin embargo, se debe tener en cuenta que cuanto más alta es la frecuencia de muestreo más alto es el número de muestras por segundo que se deberán procesar, por lo que el procesador de señal deberá ser más potente.

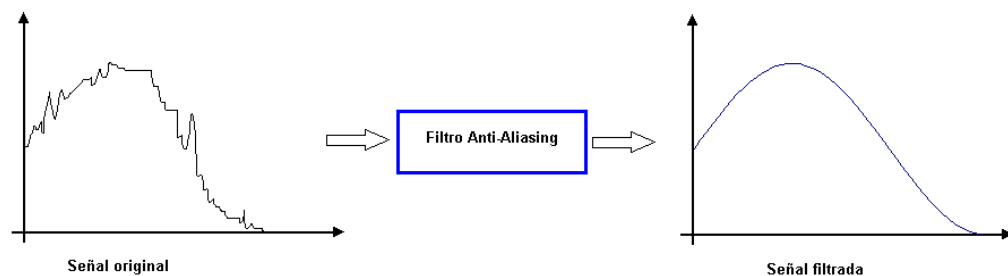
Por otro lado, al usar una frecuencia inferior aparece un fenómeno llamado *Aliasing*. Esto significa que cuando intentamos reconstruir la señal aparece una onda de frecuencia más baja. Este fenómeno se presenta por el hecho de que las muestras se pueden unir para crear una forma de onda de frecuencia más baja que es totalmente diferente de la onda original. En la Figura 72 Se puede observar la discrepancia entre la señal original (Roja) y la señal muestreada (Azul), dando como resultado una representación incoherente de la medición realizada.

Figura 72. Aliasing en una señal analógica



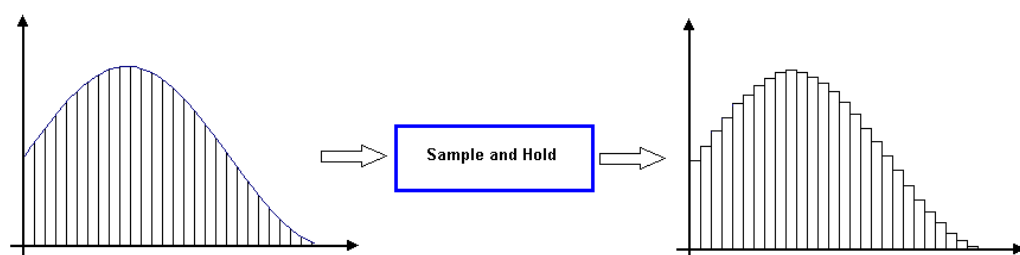
B.3.2 Proceso de obtención de la señal digital. Para comenzar se debe eliminar primero las componentes de la señal por encima de la frecuencia de Nyquist ya que estas, no deben ser muestreadas. Esto se consigue usando un usando un filtro *anti-aliasing*. El cual funciona como un filtro paso-bajo analógico. En la Figura 73 Se observa la funcionalidad del filtro, lo que da como resultado una señal limpia, lo que facilita la toma de muestras.

Figura 73. Funcionalidad del filtro Anti-Aliasing



La señal de entrada continua se pasa entonces a un circuito *sample and hold*. Este circuito toma muestras a un ritmo fijo y mantiene el valor hasta que se toma la muestra siguiente, dando como resultado una forma de onda escalonada. En Figura 74 Se ve la ejecución del circuito y el resultado de su trabajo.

Figura 74. Toma de muestras con el circuito Sample and Hold

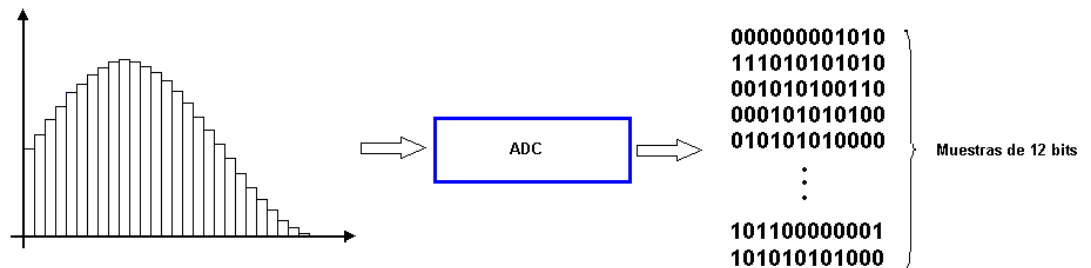


Los valores muestreados se deben convertir en números que puedan ser procesados por el PC. En este proceso actúa el conversor analógico/digital (ADC)

el cual se encarga de la cuantificación de la muestra. La Figura 75 representa la conversión de la señal a números por medio del conversor.

Para cuantificar la señal, se utiliza un número de niveles que representan escalones de amplitud de entrada; para cada muestra ADC devuelve un valor que representa el nivel más cercano al valor de la muestra. Esto implica inevitablemente un “Error de Cuantificación”. Cuantos más niveles de cuantificación utilizemos, podremos representar más exactamente la señal analógica.

Figura 75. Conversión de la muestra a números.



Adaptada de: GALLARDO, Adrián; SANCHEZ, José Luis y CEVALLOS, Holger. Monitorización y control remoto de la planta HAMBURG RT 450 vía internet a través del server de LabVIEW. Trabajo de pregrado. Ecuador: Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2011.

B.4 PROGRAMACIÓN EN LABVIEW

LabVIEW es un programa de desarrollo de aplicaciones creado por la empresa National Instruments. La importante diferencia con otros programas es que LabVIEW usa un lenguaje de programación gráfica, G, en cambio las otras aplicaciones usan un lenguaje basado en instrucciones de texto. Por lo tanto, esta diferencia hace que LabVIEW sea fácil de programar, incluso para personas con poca experiencia. La terminología usada por LabVIEW son iconos agrupados en

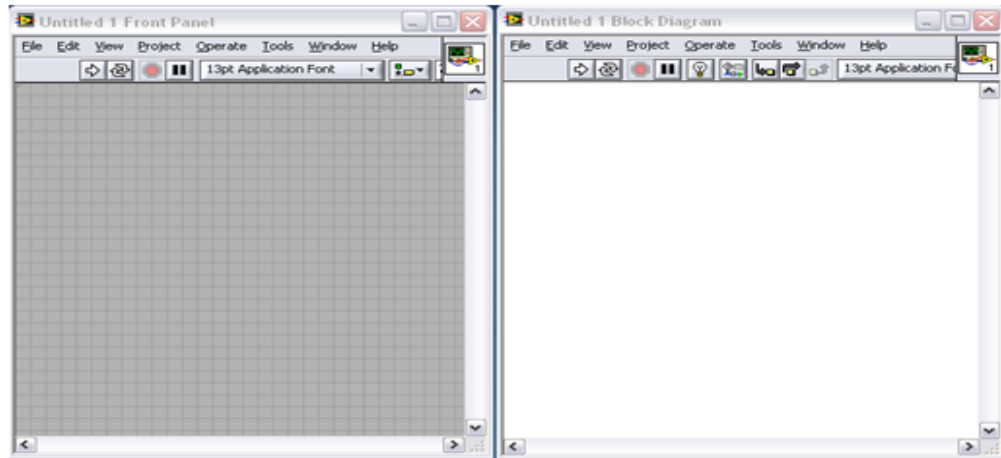
paletas, de tal manera que estos iconos sean tan familiares a los utilizados en ingeniería, como interruptores, indicadores o gráficas.

B.4.1 Programación gráfica. Los programas creados bajo el entorno gráfico en LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales (VI's) ya que simulan un instrumento de medida real. Los Instrumentos Virtuales constan de tres formas básicas: Panel Frontal, diagrama de bloques e icono/conector.

B.4.2 Panel Frontal. El Panel frontal es la interfaz del usuario, a través de él se introducen valores de entrada y se logran monitorear las variables del sistema. Debido a que en el panel frontal de un VI es análogo al panel frontal del instrumento real, las entradas de datos son llamadas controles y las salidas de datos indicadores.

B.4.3 Diagrama de bloques. Por cada panel frontal de un programa de LabVIEW existe un diagrama a bloques, el cuál es el programa del instrumento virtual. El diagrama a bloques se construye por medio de un lenguaje G. Los elementos del diagrama a bloques representan nodos del programa; por ejemplo, el ciclo For, estructuras del tipo Case y funciones aritméticas. Los componentes están "cableados" para definir el flujo de datos dentro del diagrama a bloques.

Figura 76. Elementos de un VI. Panel frontal (Izq.) y diagrama de bloques (Der).



B.4.4 Icono/Conector. El icono/conector se usa para convertir un Instrumento Virtual a un objeto que pueda ser utilizado como una “subrutina” (subVI) en el diagrama a bloques de otro VI. El icono representa gráficamente el instrumento virtual en el diagrama a bloques de otro VI.

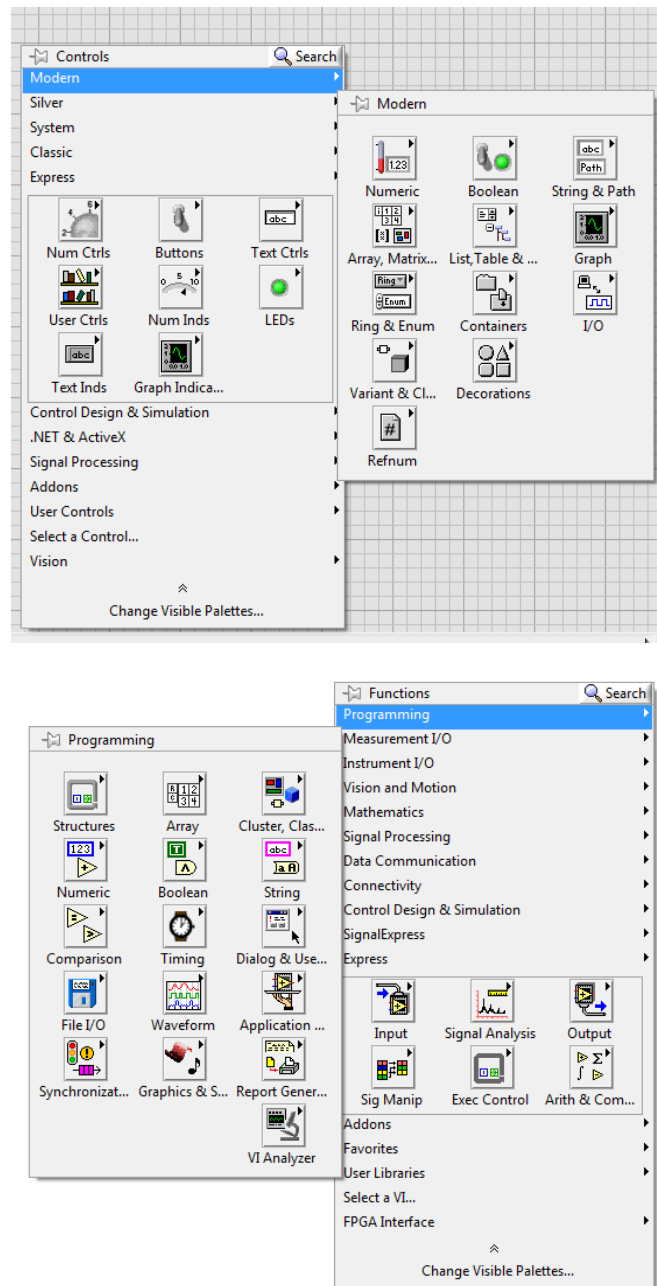
B.4.5 Interfaz virtual. La interfaz de la instrumentación virtual es el panel de control donde están ubicados los controles e indicadores para que las señales del sistema sean manipuladas y observadas por el usuario. Los elementos de ejecución del programa (Iniciar, Iniciar Continuamente, Abortar ejecución y pause) se encuentra en ambas ventanas del VI; esto significa que se puede dar inicio al programa desde ambas herramientas.

Los elementos de programación de LabVIEW se encuentran ubicados dentro de paletas: en el panel frontal, paleta de controles; y para el diagrama de bloques, paleta de funciones.

Se muestran los iconos de los controles: de botones, perillas, LEDs, indicadores, gráficas, arreglos y demás elementos, algunos similares que puede ver y operar el usuario como si fueran elementos físicos. Mientras que en el diagrama de bloques

se realizan las conexiones (para el flujo de datos) de los iconos presentados en el panel frontal. Los elementos de ambas paletas están clasificados por su estilo en submenús, y éstos a su vez organizados por el tipo que operen.

Figura 77. Paleta de controles del panel y paleta de funciones del diagrama de bloques.



B.4.6 Estructuras. Las estructuras permiten controlar el flujo de datos dentro del programa (VI). Las básicas son: *While*, *For*, *Case* y *Flat Sequence*. En LabVIEW las estructuras encierran los comandos gráficos que se quieren ejecutar.

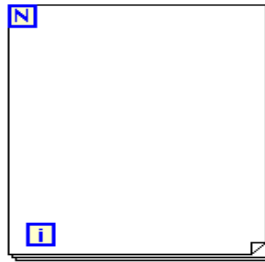
El bucle *while* (mientras) ejecutará el código dentro de él hasta que se cumpla una condición, la cual se evalúa en cada iteración. En la Figura 78 se observa la estructura *while*, dentro de este bucle en la parte inferior derecha está la condición *stop* para detener el programa; así como el índice, *i*, para indicar el número de iteraciones que se realizan.

Figura 78. Estructura While. Tomada del software LabVIEW.



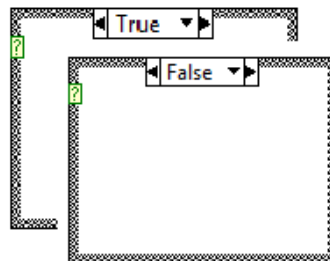
El bucle *for*, similar al *while*, ejecuta el código dentro de él. La diferencia entre ambos es que el ciclo *for* necesita que se le indique el número de veces que se repetirá, el número se fija previamente y sin poder cambiarse en la ejecución. En la Figura 79 se muestra la estructura *for*. En la parte superior izquierda, *N*, es donde se asigna el número de veces que se ejecuta el código dentro de él y el índice, *i*, indica el número de veces que se ha ejecutado el código.

Figura 79. Estructura *for*. Tomada del software LabVIEW.



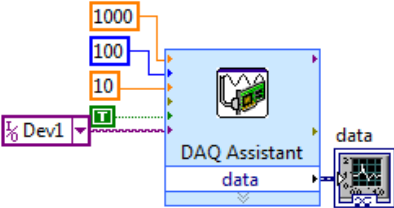
La estructura *case* es igual a las instrucciones de texto *if*, *switch* y *try*. Se aplica para ejecutar un código u otro al cumplirse alguna condición predeterminada para cada caso. En la parte superior de la Figura 80 se tiene un menú para identificar el código de cada caso, la terminal “?” en el lado izquierdo es el selector, cada valor que llega a esta terminal es la condición que se evalúa para elegir el subdiagrama a ejecutar.

Figura 80. Estructura *case*. Tomada del software LabVIEW.



B.4.7 Tarjeta de adquisición de datos (DAQ Assistant) (Gallardo, Sanchez, & Cevallos, 2011). En la paleta de Measurement I/O se encuentra la opción DAQ-Assistant es la representación digital de la tarjeta de adquisición de datos; la opción *NI-DAQmx*, es el comando útil para enlazar la aplicación física que se desea controlar a través del instrumento virtual desarrollado en LabVIEW. La DAQ cuenta con la opción de ejecutarse de manera virtual para fines de simulación. En la Figura 81 se puede apreciar el icono de la *DAQ-Assistant*, al ejecutar este comando se tiene que realizar la configuración del mismo.

Figura 81. Comando DAQ-Assistant



ANEXO C. HARDWARE DE ADQUISICIÓN EMPLEADO EN EL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN

Para la adquisición de datos se empleó el módulo NI USB-6009 de National Instrument, el cual permite 8 entradas referenciales ó 4 entradas diferenciales de tensión con una resolución de 14 bits, un rango de -10V a 10 V y precisión de 7,73mV. Las características principales de este módulo se presentan en la Tabla 9. La Figura 82 presenta una imagen del módulo NI-USB 6009 y la Figura 83 los componentes externos del mismo. Para mayor información puede consultarse la guía de usuario (National Instruments). En el sistema de monitorización se emplearon la totalidad de 8 entradas analógicas referenciales conectadas por medio de un cable UTP entre los sensores de corriente y tensión, ya mencionados, y las borneras de la tarjeta de adquisición. La identificación de los sensores corresponde a la las etiquetas de las señales de entrada del módulo NI USB 6009.

Tabla 9. Características principales del módulo NI USB 6009

General	
Familia de Productos	DAQ Multifunción
Tipo de Medida	Voltaje
Form Factor	USB
Sistema Operativo / Objetivo	Linux, Mac, OS, Pocket PC, Windows
Compatible con RoHS	Sí
Tipo de Aislamiento	Ninguno
Entrada Analógica	
Canales de un solo terminal	8
Canales Diferenciales	4
Resolución de Entrada Analógica	14 bits
Rango de Voltaje Máximo	
Rango	-10 V - 10 V
Precisión	7.73 mV
Rango de Voltaje Mínimo	
Rango	-1 V - 1 V

Precisión	1.53 mV
Número de Rangos	8
Muestreo Simultáneo	No
Memoria Interna	512 B
Contadores / Temporizadores	
Temporizador Watchdog	No
Contadores	1
Operaciones a Búfer	No
Debouncing / Glitch Removal	No
Frecuencia Máx. de la Fuente	5 MHz
Generación de Pulso	No
Tamaño	32 bits
Estabilidad de Tiempo	50 ppm
Niveles Lógicos	TTL

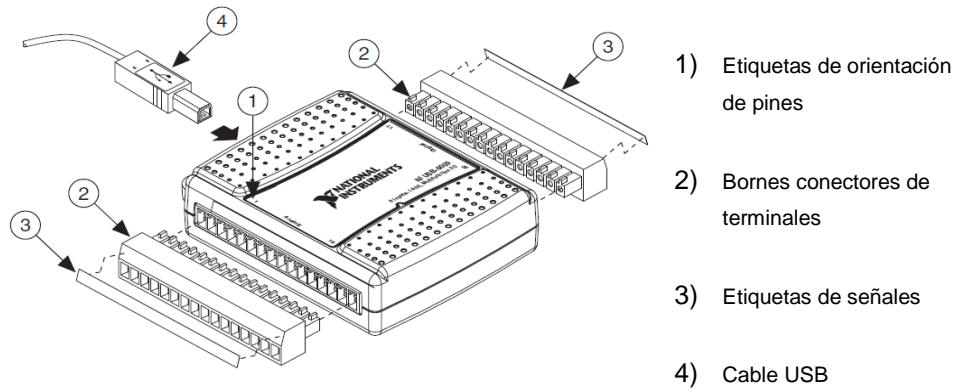
Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. User guide and specification, NI USB 6008/6009. [En línea]. [Citado: 22 de diciembre de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>>

Figura 82. Módulo NI USB 6009



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. User guide and specification, NI USB 6008/6009. [En línea]. [Citado: 22 de diciembre de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>>

Figura 83. Componentes del módulo NI USB 6009



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. User guide and specification, NI USB 6008/6009. [En línea]. [Citado: 22 de diciembre de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>>

ANEXO D. FORMULARIO DE LA ENCUESTA DE CONDICIÓN FÍSICA

La encuesta sobre la condición física realizada a los participante de la prueba de potencia mecánica humana se desarrolló por medio de un formulario de Google Inc, el formulario se puede diligenciar en el link <http://goo.gl/forms/GecjrTY5mP> y a continuación se presenta una impresión de pantalla de dicho formulario.

CONDICIÓN FÍSICA

Se establece algunas preguntas para estimar la condición física de los tripulantes de una bicicleta estática destinada a generación de energía eléctrica.

* Required

Nombre(s) *

Apellidos *

Código

Programa académico *

Género *

- Masculino
 Femenino

Edad *

Que deporte practica con mayor frecuencia *

Cuantos días en la semana practica deporte *

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

Regularmente consume bebidas alcoholicas *

- Nunca
- 1 vez al año
- 1 vez al mes
- 1 vez a la semana
- Diariamente

Regularmente consume tabaco *

- Nunca
- Ocasionalmente
- Diariamente

Regularmente consume sutancias alucinógenas

- Nunca
- Ocasionalmente
- Diariamente

Asignatura recomendada

Grupo

Submit

Never submit passwords through Google Forms.

100%: You made it.

ANEXO E. EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN FÍSICA

En la siguiente tabla se presenta la tabulación de las respuestas de la encuesta de condición física y la respectiva valoración.

Tabla 10. Resultados de la encuesta de condición física

Part.	Género	Edad	Que deporte practica con mayor frecuencia	Cuantos días en la semana practica deporte	Regularmente consume bebidas alcohólicas	Regularmente consume tabaco	Regularmente consume sustancias alucinógenas	Puntuación	Estado físico
PartF 1	F	17	Trotar	2	1 vez al año	Nunca	Nunca	5	Regular
PartF 2	F	23	Correr	3	1 vez al mes	Nunca	Nunca	6	Bueno
PartF 3	F	27	Ciclismo	3	1 vez al año	Nunca	Nunca	6	Bueno
PartF 4	F	20	Elíptica	1	Nunca	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartF 5	F	21	Voleibol	1	Nunca	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartF 6	F	25	Atletismo	2	1 vez al mes	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartF 7	F	23	Baloncesto	1	1 vez al año	Nunca	Nunca	4	Bueno
PartF 8	F	18	Atletismo	2	1 vez al año	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartF 9	F	21	Ciclismo	3	Nunca	Nunca	Nunca	7	Muy Bueno
PartF 10	F	22	Voleibol	2	1 vez a la semana	Nunca	Ocasionalmente	4	Bueno
PartF 11	F	18	Baloncesto	2	1 vez al mes	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartM 1	M	21	Fútbol	2	1 vez al mes	Nunca	Nunca	5	Regular
PartM 2	M	22	Fútbol	1	1 vez al mes	Nunca	Nunca	4	Bueno
PartM 3	M	22	Ninguno	0	1 vez al año	Nunca	Nunca	2	Malo
PartM 4	M	22	Microfútbol	2	1 vez al mes	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartM 5	M	22	Microfútbol	1	1 vez a la semana	Ocasionalmente	Nunca	3	Regular
PartM 6	M	22	Ninguno	0	1 vez al año	Nunca	Nunca	2	Malo
PartM 7	M	22	Fútbol	1	1 vez al mes	Ocasionalmente	Nunca	3	Regular
PartM 8	M	20	Ninguno	0	1 vez a la semana	Ocasionalmente	Nunca	1	Malo
PartM 9	M	23	Fútbol	1	1 vez al mes	Nunca	Nunca	4	Bueno
PartM 10	M	23	Fútbol	1	1 vez al año	Nunca	Nunca	4	Bueno
PartM 11	M	25	Microfútbol	1	Nunca	Nunca	Nunca	5	Regular

Tabla 10. Resultados de la encuesta de condición física (continuación)

Part.	Género	Edad	Que deporte practica con mayor frecuencia	Cuantos días en la semana practica deporte	Regularmente consume bebidas alcohólicas	Regularmente consume tabaco	Regularmente consume sustancias alucinógenas	Puntuación	Estado físico
PartM 12	M	24	Fútbol	1	1 vez al mes	Nunca	Nunca	4	Regular
PartM 13	M	19	Ninguno	1	Nunca	Nunca	Nunca	3	Regular
PartM 14	M	29	Ninguno	1	1 vez a la semana	Ocasionalmente	Nunca	1	Malo
PartM 15	M	22	Microfútbol	1	1 vez a la semana	Ocasionalmente	Ocasionalmente	1	Malo
PartM 16	M	22	Fútbol	2	1 vez al año	Nunca	Nunca	5	Regular
PartM 17	M	27	Voleibol	2	1 vez al mes	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartM 18	M	23	Trotar	1	Nunca	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartM 19	M	24	Ciclismo	2	1 vez a la semana	Diariamente	Nunca	3	Regular
PartM 20	M	25	Trotar	1	1 vez al mes	Ocasionalmente	Nunca	3	Regular
PartM 21	M	24	Ciclismo	3	1 vez al año	Nunca	Nunca	6	Muy Bueno
PartM 22	M	24	Ciclismo	2	1 vez al mes	Nunca	Nunca	6	Bueno
PartM 23	M	25	Ciclismo	5	1 vez al año	Nunca	Nunca	8	Regular
PartM 24	M	26	Microfútbol	2	1 vez al mes	Ocasionalmente	Nunca	4	Bueno
PartM 25	M	22	Fútbol	1	1 vez al mes	Nunca	Nunca	4	Regular
PartM 26	M	21	Fútbol	1	1 vez al mes	Nunca	Nunca	4	Bueno
PartM 27	M	24	Fútsala	2	1 vez al mes	Ocasionalmente	Nunca	4	Regular
PartM 28	M	25	Fútbol	2	1 vez al mes	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartM 29	M	21	Ninguno	0	1 vez al mes	Nunca	Nunca	2	Malo
PartM 30	M	23	Ninguno	1	1 vez a la semana	Nunca	Nunca	3	Regular

Tabla 10. Resultados de la encuesta de condición física (continuación)

Part.	Género	Edad	Que deporte practica con mayor frecuencia	Cuantos días en la semana practica deporte	Regularmente consume bebidas alcohólicas	Regularmente consume tabaco	Regularmente consume sustancias alucinógenas	Puntuación	Estado físico
PartM 31	M	20	Aeróbicos	2	1 vez al año	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartM 32	M	20	Fútbol	1	1 vez a la semana	Diariamente	Nunca	2	Malo
PartM 33	M	25	Taekwondo	3	1 vez al mes	Nunca	Nunca	6	Muy Bueno
PartM 34	M	26	Ciclismo	3	1 vez al año	Nunca	Nunca	6	Regular
PartM 35	M	34	<i>Wushu</i>	3	1 vez al mes	Nunca	Nunca	6	Muy Bueno
PartM 36	M	23	Fútsala	3	1 vez al mes	Nunca	Nunca	6	Muy Bueno
PartM 37	M	22	Gimnasio	2	1 vez al mes	Nunca	Nunca	5	Bueno
PartM 38	M	24	<i>Fitness</i>	3	Nunca	Nunca	Nunca	7	Muy Bueno
PartM 39	M	25	Pesas	3	1 vez al año	Nunca	Nunca	6	Muy Bueno
PartM 40	M	25	Gimnasio	3	1 vez al mes	Ocasionalmente	Ocasionalmente	4	Malo
PartM 41	M	34	Ninguno	0	Nunca	Nunca	Nunca	3	Bueno
PartM 42	M	25	Caminata	1	1 vez a la semana	Diariamente	Ocasionalmente	1	Malo
PartM 43	M	21	Ciclismo	3	1 vez a la semana	Ocasionalmente	Nunca	5	Bueno
PartM 44	M	21	Microfútbol	1	1 vez al mes	Nunca	Nunca	3	Regular
PartM 45	M	21	Gimnasia	2	Nunca	Nunca	Nunca	6	Muy Bueno
PartM 46	M	20	<i>Ultimate</i>	3	1 vez al mes	Nunca	Nunca	6	Muy Bueno
PartM 47	M	19	Ninguno	1	1 vez al mes	Nunca	Nunca	4	Regular

ANEXO F. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

En este anexo se presentan los costos de implementación de mejoras aplicada al piloto de generación. Se contemplan elementos que no hacen parte de la implementación final por presentar fallos en el desarrollo o invalidación de la propuesta.

En la tabla 11 se relacionan las etapas implementadas con sus respectivos valores. La totalidad de los costos fue asumida por los estudiantes responsables de este proyecto. Los elementos no descritos en la tabla 11, hacen parte de la implantación de Duran y Gil en (Durán Chacón & Gil Fernández, 2013) y se emplean como recursos previos.

El total de la inversión asciende a \$848.261; aunque únicamente el 69% hace parte de la implantación final. El acondicionamiento del motor DC como generador, y la implementación del sistema de transmisión de potencia mecánica tienen un costo de \$284.200; estos últimos representan las mejoras necesarias en un sistema comercial.

Tabla 11. Costos de implementación

Cant	Descripción	Proveedor	Valor	Imp. final
Prueba de potencia mecánica			\$115.509,00	---
	Aceite lubricante Simpar	Servi-Repuestos la 33	\$3.000,00	SI
	Alquiler de herramienta de mano	Taller el Ancla	\$10.000,00	SI
1	Amplificador de instrumentación AD620 8 DIP	Dynamo Electronics SAS	\$10.345,00	NO
1	Celda de carga 50kg Presión	Dynamo Electronics SAS	\$22.414,00	NO
	Elementos electrónicos adicionales	Electronica Especial	\$16.750,00	NO
	Refrigerios (Bocadillo y leche)	Supermercado Más por Menos	\$48.000,00	SI
1	Motor DC 12V 13W	Centro comercial las pulgas	\$5.000,00	SI

Tabla 11. Costos de implementación (continuación)

Cant	Descripción	Proveedor	Valor	Imp. final
Motor DC como generador			\$123.500,00	---
	Alquiler de herramienta de mano	Taller el Ancla	\$10.000,00	SI
1	Generador de motocicleta	Centro de reciclaje	\$40.000,00	NO
1	Juego de escobillas	Contactores y Breakers Industriales	\$7.000,00	SI
1	Motor DC 12 V	Centro de reciclaje	\$40.000,00	SI
1	Pegante SinteSolda	Ferreteria El Martillo LTDA.	\$6.500,00	SI
2	Balineras	Rodillos S.A	\$20.000,00	SI
Sistema de transmisión de potencia			\$374.700,00	---
	Acople piñon cadena	Torno Castillo	\$70.000,00	NO
	Alquiler de herramienta de mano	Taller el Ancla	\$15.000,00	SI
	Base de motor DC	Torno Castillo	\$20.000,00	SI
	Brocas y remaches (1/8)	Ferreteria San Francisco Construcciones	\$6.600,00	SI
	Cadenas, Calapias, llaves y extractor cadena	Import Ciclista S.A.S	\$30.000,00	NO
2	Chumacera 1/2 in	Rodillos S.A	\$24.000,00	NO
1	Correa sincronica 660 L100	Cadenas y Bandas Ltda	\$79.000,00	SI
	Fabricación de polea dentada	Torno Castillo	\$40.000,00	SI
	Montaje motor y base	Torno Castillo	\$20.000,00	SI
1	Piñón 13 dientes	Bicicletas Nuevo Milenio	\$30.000,00	NO
1	Plato 53, piñones y relaciones	Centro de reciclaje	\$15.000,00	NO
	Relación Compacd Acero 36	Import Ciclista S.A.S	\$5.000,00	NO
	Tornilleria acople modular	Ferreteria el tornillo	\$20.100,00	SI

Tabla 11. Costos de implementación (continuación)

Cant	Descripción	Proveedor	Valor	Imp. final
Sistema de inyección de potencia controlada			\$87.552,00	---
2	Abrazaderas 4 in	Almacen Proveedora Agricola Ltda	\$8.000,00	SI
	Adecuación polea en V	Torno Castillo	\$5.000,00	SI
	Alquiler de herramienta de mano	Taller el Ancla	\$25.000,00	SI
	Base de madera	Carpintería Moreno	\$12.000,00	SI
1	Correa A-72 Dongil	Cadenas y Bandas Ltda	\$12.931,00	SI
1	kg Alambre dulce #16	Ferretería la Marca	\$5.900,00	SI
1	Motor de inducción trifásico 2Hp, 1.700 rpm	UIS	\$0,00	SI
1	Polea 4 x 1A x 5/8	Cadenas y Bandas Ltda	\$8.621,00	SI
	Tornillería	Ferretería San Francisco Construcciones	\$10.100,00	SI
1	Transformador de potencia 110/220V	UIS	\$0,00	SI
1	Variador de frecuencia Eurotherm	UIS	\$0,00	SI

Tabla 11. Costos de implementación (continuación)

Cant	Descripción	Proveedor	Valor	Imp. final
Reorganización de la instalación electrica			\$893.261,00	---
	Alquiler de herramienta de mano	Taller el Ancla	\$5.000,00	SI
2	caja de derivación	Ferreteria Josase	\$11.000,00	SI
1	Caja de Derivación	Almacén Alto Voltaje	\$3.600,00	SI
1	Caja de tomacorriente	Ferreteria Josase	\$3.800,00	SI
1	Canaleta guarda cable	Ferreteria Josase	\$6.000,00	SI
1	Cinta aislante	Ferreteria SURTIGAS Construrama	\$2.000,00	SI
7	Fusibles y porta-fusibles	Servi-Repuestos la 33	\$5.500,00	SI
	Molex Tool126, R20W	Electrónica Especial	\$10.600,00	SI
37	mtrs alambre Centelsa # 12	Ferreteria SURTIGAS Construrama	\$23.000,00	SI
3	mtrs cable duplex	Ferreteria SURTIGAS Construrama	\$900,00	SI
2	mtrs cable Trenz	Ferreteria SURTIGAS Construrama	\$600,00	SI
3	mts cable polarizado	Servi-Repuestos la 33	\$1.500,00	SI
	Soldadura de estaño	Ferretería en la 15	\$7.000,00	SI
2	switch Balansin	Servi-Repuestos la 33	\$2.400,00	SI
1	switch de paso	Servi-Repuestos la 33	\$800,00	SI
1	switch doble polo	Electronica Ayma	\$1.800,00	SI
50	Terminales electricos	Servi-Repuestos la 33	\$7.500,00	SI
2	Tomacorriente	Ferreteria Josase	\$9.000,00	SI
Sistema de monitorización			\$23.500,00	---
15	Cable UTP	Servi-Repuestos la 33	\$15.000,00	SI
1	Fuente de tensión 5V, 2Amp	Electronica Bucaramanga S.A.S.	\$6.000,00	SI
1	Módulo NI USB 6009	UIS	\$0,00	SI
10	Terminales de conexión	Electronica Bucaramanga S.A.S.	\$2.500,00	SI
Papelería			\$21.500,00	---
	Bisturi scanbrik	Papalería Bocetos	\$2.000,00	SI
	Bisturi y Tijeras	Papalería Bocetos	\$4.500,00	SI
	Fotocopias e Impresiones	---	\$15.000,00	SI
Total			\$848.261,00	---

ANEXO G. ARCHIVOS DIGITALES

Los archivos que por su tamaño o compatibilidad no es posible incorporar al libro del trabajo de grado se anexan al DVD adjunto; éstos se enlistan a continuación.

Resultados de las pruebas de rendimiento físico en la bicicleta estática.xlsx: Este archivo contiene los valores de los resultados obtenidos en la prueba de rendimiento físico. Se encuentra la información del género, edad y estado físico de cada participante. En las tablas se encuentran los promedios de los valores de cada etapa del pedaleo y por ultimo una tabla resumen de todos los resultados.

Resistencia del devanado del motor DC.xlsx: Los valores medidos en la caracterización de la resistencia del motor DC se encuentran en este archivo, así como la gráfica y la linealización de la misma para su posterior análisis.

Sistema de monitorización.vi: El software LabVIEW da apertura a este archivo, donde se encuentra el VI del sistema de monitorización empleado para medir los parámetros de tensión y corriente del montaje. La carpeta *Paleta de Potencia*, contiene los archivos complementarios para abrir el VI.

M. Prueba de potencia mecánica.vi: VI implementado en el software LabVIEW para la monitorización de las pruebas de potencia mecánica generada por un tripulante.

Pérdidas de vacío del motor de inducción.xlsx: En el archivo se encuentran los resultados de las pruebas de vacío del motor de inducción, perdidas en el volante y las gráficas correspondientes a estas pruebas.

Pruebas de vacío del motor DC.xlsx: Los resultados de la prueba de vacío del motor DC se presentan en este archivo, así mismo, los promedios y la linealización respectiva a estas mediciones.

Prueba de vacío del alternador a 30Hz del variador de velocidad.xlsx: Pruebas de potencia del alternador de automóvil con una velocidad constante; resultados de las pérdidas por alimentación y conclusión de la generación neta.

Pruebas de eficiencia del generador DC con potencia controlada.xlsx: Las pruebas del generador DC variando la frecuencia del motor de inducción desde 15 Hz hasta 39 Hz, con paso de 3 Hz; administrando los resultados y graficando para obtener la curva de eficiencia de este generador.

Pruebas de eficiencia del alternador de automóvil con potencia controlada.xlsx: Las pruebas del alternador de automóvil variando la frecuencia del motor de inducción desde 15 Hz hasta 39 Hz, con paso de 3 Hz; administrando los resultados y graficando para obtener la curva de eficiencia del alternador.

Pruebas de eficiencia del alternador de automóvil con tripulantes reales.xlsx: En estas pruebas se cuenta con la participación de 4 tripulantes para la representación real de la generación del alternador de automóvil. Los resultados de cada uno de ellos se encuentran en las tablas con hojas independientes. Por último se realiza una tabla resumen de los resultados de cada participante y se grafica estos valores para su visualización.

Pruebas de eficiencia del generador DC con tripulantes reales.xlsx: En estas pruebas se cuenta con la participación de 4 tripulantes para la representación real de la generación del motor DC. Los resultados de cada uno de ellos se encuentran en las tablas con hojas independientes. Por último se realiza una tabla resumen de los resultados de cada participante y se grafica estos valores para su visualización.

Planos sistema mecánico.pdf: En este archivo se encuentran medidas de las piezas implementadas y visualizaciones de cómo se acoplaron a la bicicleta. Además se agregan medidas de las piezas más importantes utilizadas durante el mejoramiento del piloto de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas.

Modelo Solidworks (Carpeta): En esta carpeta se encuentran los planos generales del sistema mecánico (1. *Planos sistema mecánico.SLDDRW*) en formato .SLDDRW (plancha de dibujo de solidwork). Además se encuentran las piezas utilizadas para el modelo 3D y el ensamble de estas piezas. Las piezas están en formato .SLDPRT y los ensamblajes en formato .SLDASM.

Videos (carpeta): Cuenta con dos subcarpetas que comprueban los montajes realizados durante el trabajo y las pruebas realizadas en el VI. Éstas evidencian la monitorización de la prueba de los participantes y los resultados en tiempo real de cada uno de ellos.

Imágenes (carpeta): La carpeta contiene las imágenes correspondientes a las etapas ejecutadas durante el trabajo de grado. Se cuenta con un registro fotográfico que evidencia las actividades realizadas en cada etapa y se establece detalladamente los elementos utilizados en el montaje. Entre ellas se encuentran: *Adecuación Sistema de inyección de potencia, Adecuación volante de inercia con rin de bicicleta, Adecuación Sistema Eléctrico, Medidas torque preliminares a las pruebas de resistencia mecánica, Prueba Resistencia Mecánica, Pruebas finales con ambos generadores, Reparación e implementación Motor DC.*