

MONTAJE Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE CARGA EN UN BANCO
DE PRUEBAS PARA ANÁLISIS DE FALLAS EN RUEDAS DENTADAS

CRISTIAN CAMILO JARAMILLO LONDOÑO
MIGUEL ANTONIO CRUZ MONTOYA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2014

MONTAJE Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE CARGA EN UN BANCO
DE PRUEBAS PARA ANÁLISIS DE FALLAS EN RUEDAS DENTADAS

CRISTIAN CAMILO JARAMILLO LONDOÑO
MIGUEL ANTONIO CRUZ MONTOYA

Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR:
Juan Fernando López López
Ingeniero Mecánico, M.Sc.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2014

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Pereira 4 de marzo del 2014

DEDICATORIA

MIQUEL ANTONIO CRUZ MONTOYA

Este trabajo de grado se lo dedico con mucho amor y cariño a Dios, quien permitió constantemente a mis padres darme el estudio con gran esfuerzo.

A mi familia quienes por fortuna estuvieron conmigo a lo largo de mi vida apoyándome incondicionalmente en los buenos y malos momentos. Gracias Papá y Mamá por darme la posibilidad de dar este gran paso, y que sin duda lo sabré aprovechar para mi futuro. Y a mi hermano que desde pequeño ha estado compartiendo conmigo los pequeños y grandes momentos.

CRISTIAN CAMILO JARAMILLO LONDOÑO

Este trabajo es dedicado en primer lugar a mi señora madre, la persona más importante en mi vida, apoyo incondicional y constante, amor infinito y empuje con sabiduría, acciones de este gran ser humano, que sin ella a mi lado no hubiese dado frutos, a mi hermana, mi señor padre, abuelos, tíos y amigos que estuvieron siempre presentes a lo largo de este proceso en los buenos momentos y quienes también atendieron al llamado de los momentos difíciles. Este es un gran paso en mi vida para la construcción de un futuro pretendido. Gracias doy a todas estas personas por ser mi pilar y a Dios que siempre me escuchó y ayudó cuando lo necesite.

AGRADECIMIENTOS

MIQUEL ANTONIO CRUZ MONTOYA

Doy gracias a todas las persona que hicieron posible la realización de esta obra, en especial a mi familia quienes me apoyaron en todo momento, a mi compañero de trabajo de grado Cristian Camilo Jaramillo por su inteligencia y su constante perseverancia, al director de grado Juan Fernando López López quien nos ayudó incondicionalmente. De igual manera con los profesores Héctor Fabio Quintero, Andrés Paneso, Wilson Pérez, Juan Felipe Arroyave y Carlos Alberto Romero por sus oportunos aportes para la culminación de esta obra.

CRISTIAN CAMILO JARAMILLO LONDOÑO

Agradezco primeramente a mi compañero de trabajo de grado Miguel Antonio Cruz Montoya por su apoyo, inteligencia y tolerancia, al director Juan Fernando López López por servir de guía y soporte, a los docentes Andrés Paneso, Juan Felipe Arroyave, Gustavo Betancur, Carlos Alberto Romero, Héctor Fabio Quintero, Yamal Mustafá Iza y Wilson Pérez por servir y atender muy comedidamente cada vez necesitamos de ellos, al estudiante de maestría y monitor del laboratorio de motores Olmedo Arias, pachito y don Mario almacenistas de los laboratorios de la facultad de Ingeniería Eléctrica, Rolando y Diego encargados del Taller de máquinas herramientas de la facultad de Ingeniería Mecánica, mil y mil gracias.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES.....	19
1.1 DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO DE VIBRACIONES MECÁNICAS	19
1.1.1 Motor eléctrico de inducción.....	22
1.1.2 Caja reductora de engranajes	23
1.1.3 Acoples mecánicos	26
1.1.4 Generador eléctrico síncrono	28
1.1.5 Banco de resistencias	30
1.1.6 Variador de velocidad.....	33
1.1.7 Fuente de corriente directa.....	34
1.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES	34
1.2.1 Selección del generador eléctrico	34
1.2.2 Selección del banco de resistencias eléctricas	36
1.2.3 Selección de los acoples mecánicos.....	38
2. MONTAJE DE LOS EQUIPOS	40
2.1 ALINEACIÓN DE EQUIPOS.....	40
2.1.1 Alineación por el método del indicador inverso	41
2.2 EQUIPO DE ALINEACIÓN	53
2.2.1 Marco de alineación	53
2.2.2 Comparador de caratula.....	54

2.2.3 Base magnética.....	55
2.2.4 Láminas shim	56
2.3 MONTAJE DE CONEXIONES ELÉCTRICAS	56
2.3.1 Conexión eléctrica motor eléctrico-variador de velocidad	56
2.3.2 Conexión eléctrica generador eléctrico- banco de resistencias.....	57
3. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE FRENADO	58
3.1 INSTRUMENTOS PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS	59
3.1.1 Pinza amperimétrica.....	59
3.1.2 Multímetro	60
3.1.3 Tacómetro	61
3.2 PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE FRENADO.....	62
3.2.1 Etapa 1: pruebas con el conjunto motor – reductor – generador.....	63
3.2.2 Etapa 2: prueba del módulo de vibraciones sin la caja de engranajes	73
3.2.3 Etapa 3: evaluación del módulo de vibraciones con el equipo de análisis de calidad de energía	77
3.3 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS	79
3.3.1 Resultados de pruebas en vacío	79
3.3.2 Resultados de las pruebas primera etapa	80
3.3.3 Resultados de las pruebas segunda etapa	86
3.3.4 Resultados de las pruebas tercera etapa.....	90
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	91
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PRIMERA ETAPA	91
4.1.1 Gráficas de la primera etapa a 1800 min ⁻¹	91

4.1.2	Gráficas de la primera etapa a 1600 min ⁻¹	95
4.1.3	Gráficas de la primera etapa a 1400 min ⁻¹	99
4.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGUNDA ETAPA	102
4.2.1	Gráficas de la segunda etapa, procedimiento 1	102
4.2.2	Gráficas de la segunda etapa, procedimiento 2	106
4.2.3	Gráficas de la segunda etapa, procedimiento 3	109
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS TERCERA ETAPA	112
4.3.1	Gráficas tercera etapa, caja de engranajes acoplada	113
4.3.2	Gráficas tercera etapa, caja de engranajes sin acoplar	118
5.	CONCLUSIONES	124
6.	RECOMENDACIONES.....	126
	BIBLIOGRAFÍA.....	127

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ficha técnica del motor eléctrico.....	23
Tabla 2. Ficha técnica del generador síncrono	29
Tabla 3. Valores de las resistencias	31
Tabla 4. Hoja de datos del indicador inverso - vertical.....	43
Tabla 5. Hoja de datos del indicador inverso – vertical, parte superior.....	44
Tabla 6. Sección de lecturas verticales hoja de datos	45
Tabla 7. Hoja de datos del indicador inverso - horizontal	46
Tabla 8. Formato de lectura vertical.....	49
Tabla 9. Datos técnicos pinza amperimétrica	59
Tabla 10. Condiciones de operación.....	66
Tabla 11. Condiciones de operación sin caja de engranajes.....	74
Tabla 12. Resumen de pruebas.....	78
Tabla 13. Comportamiento del generador en pruebas en vacío, con caja de engranajes	79
Tabla 14. Comportamiento del generador en pruebas en vacío, sin caja de engranajes	80
Tabla 15. Resultados obtenidos primera etapa a 1800 rpm	9
Tabla 16. Resultados obtenidos primera etapa a 1600 rpm	10
Tabla 17. Resultados obtenidos primera etapa a 1400 rpm	11
Tabla 18. Resultados obtenidos segunda etapa a 1800 rpm, procedimiento 1	78
Tabla 19. Resultados obtenidos segunda etapa a 1800 rpm, procedimiento 2	79
Tabla 20. Resultados obtenidos segunda etapa a 1800 rpm, procedimiento 3	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Banco de pruebas con el sistema de carga antiguo	20
Figura 2. Módulo para el análisis de vibraciones mecánicas	21
Figura 3. Variador de velocidad	21
Figura 4. Motor eléctrico gobernado por el variador de frecuencia	23
Figura 5. Caja reductora de engranajes.....	24
Figura 6. Transmisión de engranajes sección interna.....	25
Figura 7. Juego de ruedas dentadas de dientes rectos, en buen estado.....	25
Figura 8. Juego de ruedas dentadas de dientes helicoidales	26
Figura 9. Juegos de ruedas dentadas con falla en un diente.....	26
Figura 10. Acople Tyreflex TY 40.....	27
Figura 11. Acople tipo araña	28
Figura 12. Generador sincrónico conectado con la fuente dc.....	29
Figura 13. Banco de resistencias.....	30
Figura 14. Circuito eléctrico del banco de resistencias	31
Figura 15. Banco de resistencias.....	32
Figura 16. Estructura y ventilación del banco de resistencias	33
Figura 17. Variador de velocidad	33
Figura 18. Fuente de corriente directa	34
Figura 19. Circuito eléctrico equivalente	36
Figura 20. Par – Velocidad de un motor de inducción	37
Figura 21. Alineación de los equipos	41
Figura 22. Verificación de Horizontalidad	42
Figura 23. Símbolos de blanco y mira.....	44
Figura 24. Montaje de equipo de alineación	47
Figura 25. Calibración de dial	48
Figura 26. Medición de la lectura total TIR	48

Figura 27. Lectura de desviación del dial ubicado en el generador	49
Figura 28. Solución gráfica alineación vertical	50
Figura 29. Posición de comparador de caratula para alineación horizontal.....	52
Figura 30. Equipo completo de alineación	53
Figura 31. Marco de alineación con palpador	54
Figura 32. Comparadores de carátula	55
Figura 33. Base magnética	55
Figura 34. Laminas Shim	56
Figura 35. Conexión eléctrica motor-variador de velocidad	57
Figura 36. Cables TFF 16 AWG Cv 600 V y 75 \square C Procables Colombia.....	57
Figura 37. Pinza amperimétrica	59
Figura 38. Multímetro Fluke 289	60
Figura 39. Ficha técnica multímetro FLUKE 289	61
Figura 40. Tacómetro.....	62
Figura 41. Módulo de vibraciones mecánicas completo	63
Figura 42. Posiciones del interruptor	67
Figura 43. Conexión eléctrica de la excitación.....	68
Figura 44. Conexión banco de resistencias	69
Figura 45. Ajuste de voltaje en la salida de generador con la fuente de excitación	70
Figura 46. Selectores del banco de resistencias.....	71
Figura 47. Medición de la frecuencia angular del motor eléctrico y generador eléctrico	71
Figura 48. Medición del voltaje del generador	72
Figura 49. Medición de voltaje y corriente de la fuente de excitación	72
Figura 50. Prueba sin caja de engranajes	73
Figura 51. Ajuste de la tensión generada por medio del voltaje dc de excitación..	75
Figura 52. Equipo para análisis de calidad de energía	77
Figura 53. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1800 min ⁻¹ - Corriente vs Resistencia.....	92
Figura 54. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1800 min ⁻¹ - Par vs Resistencia.....	92

Figura 55. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1800 min ⁻¹ - Par vs Corriente.....	93
Figura 56. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1800 min ⁻¹ - Par y corriente vs Resistencia	93
Figura 57. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1600 min ⁻¹ – Corriente vs resistencia eléctrica	96
Figura 58. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1600 min ⁻¹ – Par vs Resistencia eléctrica.	96
Figura 59. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1600 min ⁻¹ – Par vs Corriente eléctrica	97
Figura 60. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1600 min ⁻¹ – Par y Corriente vs Resistencia eléctrica	97
Figura 61. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1400 min ⁻¹ – Corriente vs Resistencia eléctrica	99
Figura 62. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1400 min ⁻¹ – Par vs Resistencia eléctrica	100
Figura 63. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1400 min ⁻¹ – Par vs Corriente eléctrica ..	100
Figura 64. Gráfica pruebas 1 ^{ra} etapa a 1400 min ⁻¹ – Par y Corriente vs Resistencia eléctrica	101
Figura 65. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 1 – Corriente vs Resistencia eléctrica	103
Figura 66. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 1 – Par vs Resistencia eléctrica	103
Figura 67. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 1 – Par vs corriente eléctrica.....	104
Figura 68. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 1 – Par y corriente vs resistencia eléctrica	104
Figura 69. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 2 – Corriente vs Resistencia eléctrica	106
Figura 70. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 2 – Par vs Resistencia eléctrica	107
Figura 71. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 2 – Par vs corriente eléctrica.....	107

Figura 72. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 2 – Par y corriente vs resistencia eléctrica	108
Figura 73. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 3 – Corriente vs Resistencia eléctrica	110
Figura 74. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 3 – Torque vs Resistencia eléctrica	110
Figura 75. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 3 – Par vs corriente eléctrica.....	111
Figura 76. Gráfica pruebas 2 ^{da} etapa a 1800 min ⁻¹ procedimiento 3 – Par y corriente vs resistencia eléctrica	111
Figura 77. Comportamiento de la corriente del motor eléctrico.....	113
Figura 78. Comportamiento del voltaje del motor eléctrico	114
Figura 79. Comportamiento de la potencia eléctrica del motor	114
Figura 80. Comportamiento de la corriente del generador eléctrico	115
Figura 81. Comportamiento del voltaje del generador eléctrico	115
Figura 82. Comportamiento de la potencia del generador	116
Figura 83. Corriente del generador en función de la carga resistiva	116
Figura 84. Potencia generada en función de la carga resistiva	117
Figura 85. Comportamiento de la corriente del motor eléctrico.....	118
Figura 86. Comportamiento del voltaje del motor eléctrico	119
Figura 87. Comportamiento de la potencia del motor eléctrico	119
Figura 88. Comportamiento de la corriente eléctrica generada	120
Figura 89. Comportamiento de la corriente eléctrica generada	120
Figura 90. Comportamiento de la potencia eléctrica generada.....	121
Figura 91. Comportamiento de la corriente eléctrica generada en función de la carga resistiva.....	121
Figura 92. Comportamiento de la potencia eléctrica generada en función de la carga resistiva.....	122

RESUMEN

Las vibraciones mecánicas en la industria son de gran importancia, ya que su utilización permite la detección de fallas tempranas en las máquinas. Esta área es la base principal del mantenimiento predictivo y mantenimiento basado en la confiabilidad en conjunto con otros métodos. Para hacer uso de ellas es necesario conocer la condición operativa de las máquinas, es decir, la frecuencia de rotación, par torsor (carga) y potencia.

En el módulo de pruebas para el análisis de fallas en ruedas dentadas del laboratorio de vibraciones mecánicas se requirió implementar un mecanismo de frenado para generar carga al sistema, el cual fue resuelto instalando un freno electromagnético (generador eléctrico en conjunto con un banco resistivo). Con el objetivo de ver cómo se comporta el conjunto, se realizaron diferentes tipos de pruebas a diferentes condiciones de cargas y a distintas velocidades de operación. Por tanto, para recopilación de resultados fue de importancia plantear tres etapas donde, la primera consiste en operar el módulo de vibraciones mecánicas a distintas velocidades, en la segunda etapa se realizan pruebas desacoplando la caja de engranajes para acoplar el motor y el generador directamente con el objetivo de trabajar a valores nominales, y la tercera se ejecutó con el concepto de validar las dos etapas anteriores con el equipo de calidad de energía. Las prácticas de estas tres etapas dieron como resultado curvas de comportamiento del par torsor, corriente y potencia cuando el módulo es sometido a diferentes valores de carga, además permitió la creación de ecuaciones matemáticas que modelen estas.

Se describe en el documento las consideraciones que se tomaron en cuenta en la selección del banco de resistencia donde finalmente se cumplió con los requerimientos para su apropiado funcionamiento.

En este trabajo se presenta el montaje de los equipos que conforman el módulo y el método e instrumentación empleado para una adecuada alineación.

INTRODUCCIÓN

Una máquina eléctrica, térmica o hidráulica, están diseñadas con el propósito de transformar energía, pero el comportamiento de cada una es diferente y único. Las curvas de funcionamiento de un sistema mecánico son obtenidas mediante distintas pruebas, que predeterminadamente tuvieron que ser planeadas.

Cuando se habla de una máquina, el parámetro principal de ésta es la potencia capaz de entregar. Con esta variable, y conociendo la velocidad angular, es posible hallar el par motor que tiene que vencer la máquina para generar el movimiento, el cual es de importancia en el presente. El objetivo principal de este proyecto consiste en la caracterización y control del sistema de frenado en el módulo para análisis de fallas en ruedas dentadas. Este está conformado por un motor eléctrico, una caja reductora de engranajes, un generador eléctrico y un banco de resistencias eléctricas. Este módulo es usado en el laboratorio de vibraciones mecánicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Como se mencionó anteriormente el par torsor (carga) es un parámetro de gran importancia, debido a que condiciona el funcionamiento del sistema, lo cual hace que sea controlarlo y medirlo. En un principio el módulo para el análisis de fallas en ruedas dentadas tenía como sistema generador de carga un freno de disco de bicicleta, el cual era accionado por un sistema hidráulico con servomotor de aeromodelismo para controlar posición, pero éste no permitía un control preciso del par aplicado al sistema. En consecuencia se hizo necesario buscar diferentes alternativas y escoger la que se ajustara mejor con relación al costo, robustez y efectividad.

Una de las propuestas para mejorar esta situación fue incorporar un sistema de frenado asistido hidráulicamente, pero esta solución es costosa y demasiado robusta, lo cual hace poco atractivo e ineficiente si se mira desde el punto de vista energético. De igual manera sucede con un sistema neumático. En busca de una

solución adecuada, y con el objetivo de cumplir con las condiciones requeridas, se analizó la posibilidad de implementar el control de carga por medio de un generador eléctrico y un banco de resistencias eléctricas. En sí, esta técnica consiste en frenar el módulo electromecánicamente, generando una carga al sistema.

Los sistemas de cargas efectuadas en otros ámbitos, implementan procedimientos similares alpropuesto, por ejemplo, en el laboratorio de investigaciones aplicadas de la Universidad Estatal de Pennsylvania, se utiliza un sistema de frenado por medio de un generador eléctrico y un banco de resistencias.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera, en primera instancia se observa la selección de los nuevos componentes que se implementaron en el módulo de vibraciones mecánicas, sustentando el porqué de cada uno de ellos, luego, se muestra todo lo que tiene que ver con el montaje y alineación de los componentes, y el método que se usó. Posteriormente, se explica cómo se realizaron las pruebas y se justifica las condiciones de la prueba, a su vez, se exponen los resultados que se obtuvieron con el nuevo sistema de carga. En principio el sistema generador de carga utilizado para las pruebas, fue el banco de resistencias del laboratorio de máquinas eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Posteriormente, se realiza la compra del nuevo banco, similar en sus características. Y finalmente se divide el compendio de todas las pruebas anteriores en modelos matemáticos, que lo llevará a tener un indicio del comportamiento del banco frente a una condición operativa requerida.

El objetivo general consiste en realizar el montaje y caracterización del sistema de frenado en el módulo de pruebas para análisis de fallas en ruedas dentadas.

Los objetivos específicos a desarrollar en este trabajo son:

- Seleccionar los componentes mecánicos que conforman el módulo y los componentes eléctricos del sistema de carga.

- Realizar el montaje de los componentes mecánicos que conforman el módulo y su posterior alineación.
- Instalar el sistema de carga en el módulo de pruebas de vibraciones mecánicas.
- Caracterizar el sistema de frenado del módulo de vibraciones mecánicas mediante pruebas de fallas a diferentes velocidades de operación.
- Modelar matemáticamente el comportamiento del sistema de carga compuesto por el generador síncrono y el banco de resistencias, basándose en la caracterización y empleando medios estadísticos.

1. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES

Esta etapa del proyecto es parte fundamental y decisiva, puesto que una buena selección permite trabajar satisfactoriamente obteniendo buenos resultados con una buena relación costo – beneficio. Aunque esto no es una aplicación industrial, en donde la administración de los recursos es de suma importancia, es importante asumirla ya que se dispone de un capital limitado.

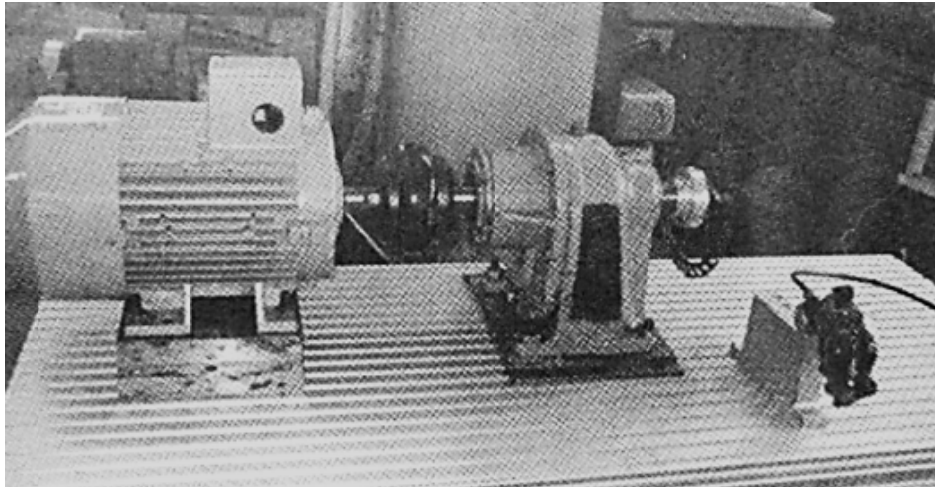
En este capítulo se hace una descripción detallada de cómo está conformado el módulo de vibraciones mecánicas y cuáles son las nuevas incorporaciones realizadas sobre éste, explicando el motivo por el cual fueron reemplazados estos elementos del módulo original.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO DE VIBRACIONES MECÁNICAS

El módulo o banco de pruebas, está a disposición del laboratorio de vibraciones mecánicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica, de la Universidad Tecnológica de Pereira. Este fue diseñado para ampliar al estudio de este campo, y en consecuencia al área del mantenimiento predictivo; su función principal es estudiar el comportamiento de los engranajes de un reductor mecánico frente a una condición operativa, y así, determinar la detección de fallas tempranas de estos por medio de las vibraciones mecánicas.

Inicialmente el banco de pruebas contaba con un sistema de carga el cual consistía en un freno de disco de bicicleta accionado con servomotor de aeromodelismo para controlar posición, pero éste no permite controlar el par motor, ya que sólo se estaba controlando la posición del freno y era difícil relacionar la posición del mismo con el par motor, puesto que éste se desgasta, lo cual hace que sea un sistema inexacto e ineficiente. En la figura 1, se puede apreciar la condición anterior del banco, donde de izquierda a derecha, se ubica el motor eléctrico, la caja reductora de engranajes y el freno de disco.

Figura 1. Banco de pruebas con el sistema de carga antiguo

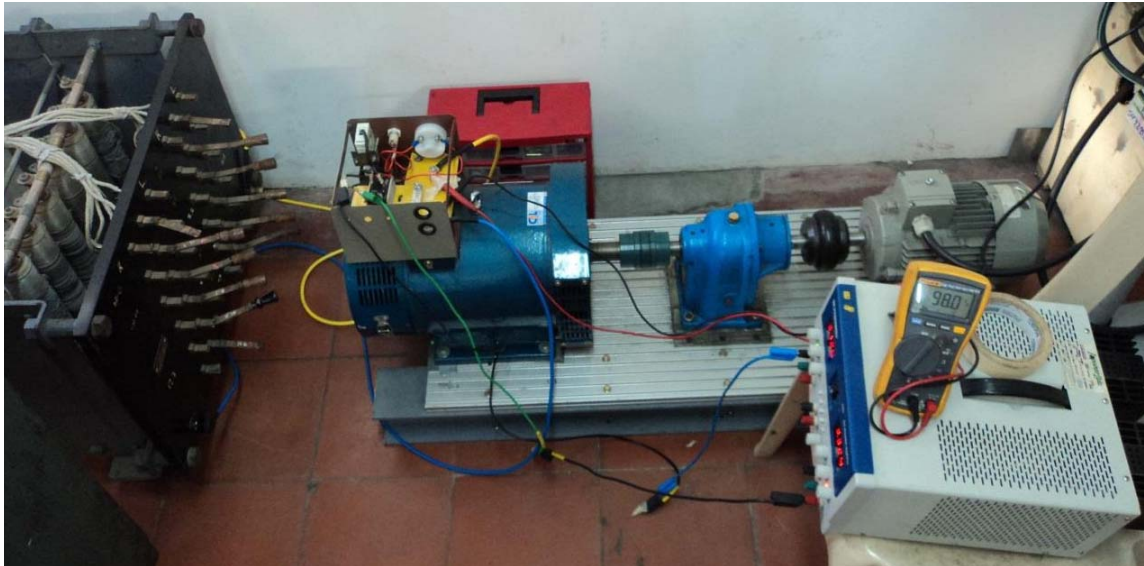


Fuente: del Libro, *Vibración – identificación en línea de modos tempranos de fallas dinámicas en máquinas rotativas*. Universidad tecnológica Pereira

Actualmente, el módulo está conformado por un motor eléctrico de 2 hp de potencia conectado por medio de un acople a un reductor de engranajes de juegos intercambiables, contiguo a éste, se encuentra acoplado a un generador eléctrico concapacidad de 2 kW de potencia. Este último está conectado a un banco de resistencias, las cuales son las que van a disipar la potencia entregada por el generador en forma de calor y al mismo tiempo son las encargadas de frenar el sistema planteado (ver figura 2).

También se tiene un variador de frecuencia, que permite obtener diversos valores de velocidades de operación en el motor eléctrico (ver figura 3), y una fuente de corriente dc, la cual es utilizada para la excitación del generador eléctrico (figura 2); el papel que juega estos dos elementos en el módulo se explicaran en detalle más adelante.

Figura 2. Módulo para el análisis de vibraciones mecánicas



(De izquierda a derecha: banco de resistencias eléctricas, generador eléctrico, caja de reductora de engranajes, motor eléctrico. En la parte inferior derecha se ubica la fuente de corriente directa.)

Fuente: Autores.

Figura 3. Variador de velocidad



Fuente: Autores.

Todo el conjunto que conforma el módulo está soportado sobre una placa de aluminio ranurada y a su vez ésta se encuentra sujeta a dos vigas de acero de perfil W, que van finalmente anclados al suelo.

Los equipos del módulo están unidos por medio de acoples mecánicos como se observa en la figura 2. De izquierda a derecha, se ubica el acople tipo araña que

une al generador con la caja de engranajes, éste permite una pequeña desalineación entre ambos, en otras palabras, es un acople semirrígido el cual obliga a que se tenga especial cuidado en la alineación, de lo contrario se podría tener graves problemas mecánicos como daños en rodamientos, desajuste entre la base de los equipos y la placa que los soporta y, mala interpretación de las lecturas por interferencia en las señales de vibraciones (cuyas señales son tomadas con un acelerómetro¹ sobre la caja reductora de engranajes).

Luego, el elemento que permite la unión entre la caja reductora de engranajes y el motor eléctrico es el acople flexible, éste permite un mayor rango de desalineación en comparación con el anterior. Sin embargo, aunque el fabricante especifique en el catálogo una amplia tolerancia, es necesario alinear los equipos lo más preciso posible ya que así, se evitan los mismos inconvenientes que suceden con el acople rígido. Si bien no se van a medir vibraciones mecánicas, es necesario garantizar que el módulo quede en óptimas condiciones para que en el futuro se puedan realizar las mediciones pertinentes.

El banco de resistencias que se observa al lado izquierdo de la figura 2, fue un banco que sirvió para la realización de pruebas y como guía para la selección del mismo, como se apreciará en la sección 1.3.

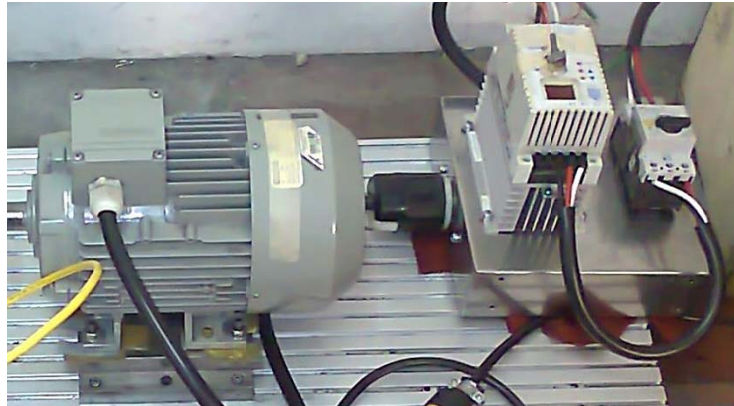
A continuación se mostrará cada uno de los elementos que lo conforman describiendo técnicamente sus características más relevantes.

1.1.1 Motor eléctrico de inducción

Esta máquina rotativa representa la fuerza motriz del módulo y es elemento principal del mismo, porque marca la condición de operación. Éste es gobernado directamente por el variador de frecuencia que permite definir diferentes valores de velocidad en el eje del motor.

¹ Instrumento destinado para medir aceleraciones. El acelerómetro piezoeléctrico es el más común y el más usado en la toma de datos de vibraciones mecánicas. También se encuentran acelerómetros mecánicos, de condensador, y los más sofisticados en pastillas de silicio (chip) para la utilización de celulares y tablets.

Figura 4. Motor eléctrico gobernado por el variador de frecuencia



(A la izquierda se ubica el motor eléctrico asíncrono trifásico y a la derecha está el modulador o variador de frecuencias)

Fuente: Autores.

Este equipo es un motor eléctrico de inducción (o asíncrono) de 2 hp de potencia y una frecuencia de rotación de 1800 min^{-1} nominalmente, con conexión trifásica, fabricado por la casa alemana Siemens. Dependiendo de las conexiones de su devanado, se puede conectar a la red eléctrica a 220 V y 440 V. En la tabla 1 se puede observar la ficha técnica del motor para mayor comprensión.

Tabla 1. Ficha técnica del motor eléctrico

SIEMENS		3~ MOTOR 1LA7090 - 4YA60	
		2.0 HP $T_a - 15/40 \text{ }^\circ\text{C}$ FS L. 15	
S1	IP55	220 Y Y / 440 Y V	1000 msnm
60 Hz	IMB3	7.0 / 3.5 A.	12.1 Kg
AISL.F	η 69.9	COS ϕ . 0.80	BG 090L
IEC 34	Ia 4.4 In	Tn/Ta 8.38/18.4 Nm	1700 rpm

Fuente: Placa impresa en el motor eléctrico

1.1.2 Caja reductora de engranajes

Este elemento mecánico de reducción de velocidad es aquel al cual se le toman las señales de vibración por medio de un acelerómetro, es decir, es el elemento clave del módulo y es al que se le tiene especial fijación. Esta pequeña caja de reducción de velocidad, comparada con las industriales, es la que se une con el

motor de inducción y al mismo tiempo con el generador síncrono mediante acoples, como se explicó anteriormente.

Figura 5. Caja reductora de engranajes



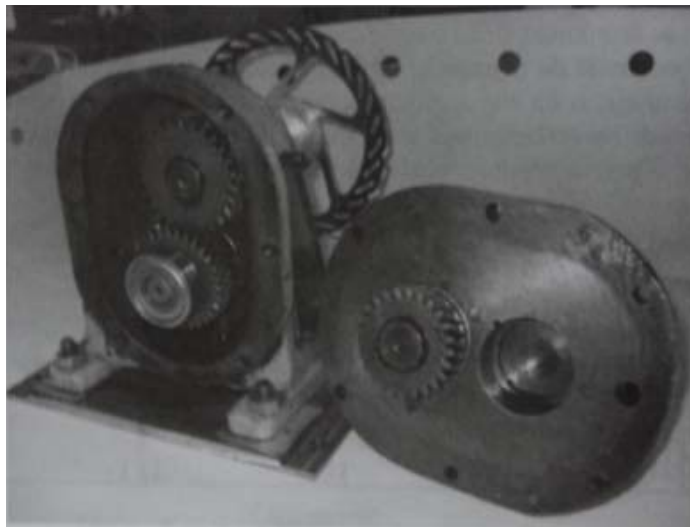
Fuente: Autores

La transmisión de engranajes cuenta con tres juegos de ruedas dentadas, los cuales permiten una serie de reducciones de velocidades y esto depende de acuerdo como se acomoden. El primer juego consta de engranajes de dientes rectos en buen estado (ver figura 7), el segundo juego de engranajes de dientes helicoidales (ver figura 8) y el último juego es un par de ruedas dentadas con falla en los dientes para la realización de las pruebas² (ver figura 9).

Cada juego de ruedas dentadas es utilizado para la realización de las prácticas de laboratorio y con éstas se obtendrán las señales de vibraciones para determinar el comportamiento del módulo según el tipo de ruedas dentadas utilizadas. El uso del juego de ruedas dentadas con falla en un diente es colocado intencionalmente para obtener una señal de vibración de falla y de esta manera compararla con la vibración de engrane.

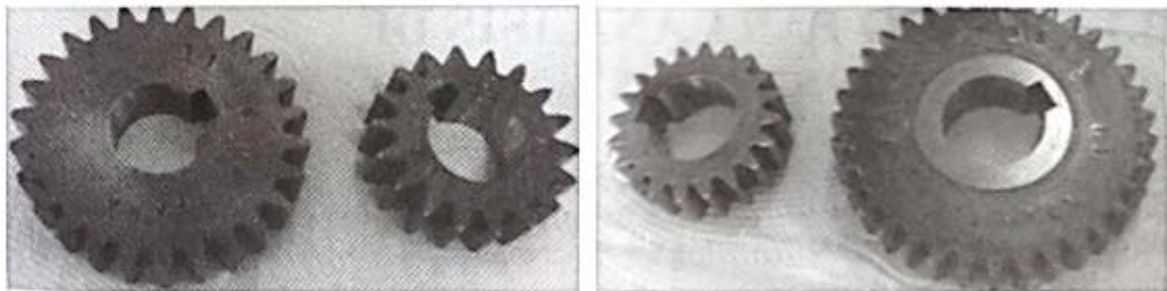
² Ver el libro *Vibración – identificación en línea de modos tempranos de fallas dinámicas en máquinas rotativas*. Universidad tecnológica de Pereira. Pág. 212.

Figura 6. Transmisión de engranajes sección interna



Fuente: del Libro, *Vibración – identificación en línea de modos tempranos de fallas dinámicas en máquinas rotativas.* Universidad tecnológica Pereira

Figura 7. Juego de ruedas dentadas de dientes rectos, en buen estado

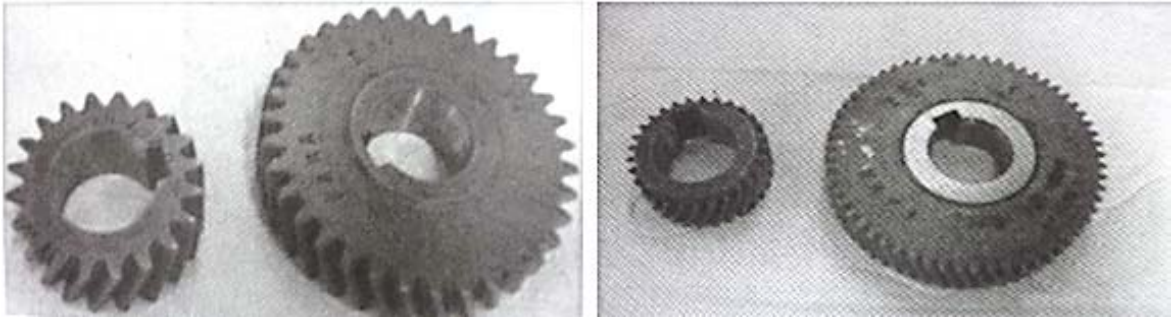


a) 28 y 18 dientes

b) 35 y 20 dientes

Fuente: del Libro, *Vibración – identificación en línea de modos tempranos de fallas dinámicas en máquinas rotativas.* Universidad tecnológica Pereira

Figura 8. Juego de ruedas dentadas de dientes helicoidales



a) 20 y 35 dientes

b) 29 y 58 dientes

Fuente: del Libro, *Vibración – identificación en línea de modos tempranos de fallas dinámicas en máquinas rotativas*. Universidad tecnológica Pereira

Figura 9. Juegos de ruedas dentadas con falla en un diente



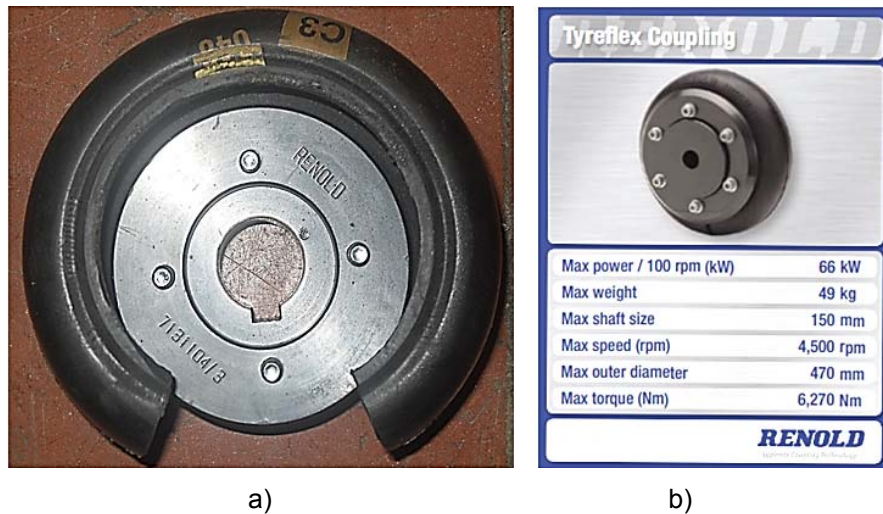
Fuente: del Libro, *Vibración – identificación en línea de modos tempranos de fallas dinámicas en máquinas rotativas*. Universidad tecnológica Pereira

1.1.3 Acoples mecánicos

Los acoples mecánicos desarrollan un papel vital en el funcionamiento del conjunto, puesto que estos permiten la unión entre los elementos mecánicos. Una correcta alineación entre los equipos genera que los acoples funcionen adecuadamente y que cumplan con las exigencias de operación del módulo, sin nombrar que se eliminan otro tipo de problemas como ruido y vibraciones, donde esta última tiene directa incidencia en la interpretación de las lecturas tomadas con el acelerómetro sobre la caja de engranajes.

La figura 10 muestra un acople flexible marca Renold con sus respectivas características, éste es el que se encarga de unir el motor eléctrico con la caja de engranajes. Este tipo de acople permite un amplio rango de desalineación entre equipos comparado con otros existentes en el mercado y es de importancia tener en cuenta este factor, ya que es indispensable eliminar las vibraciones.

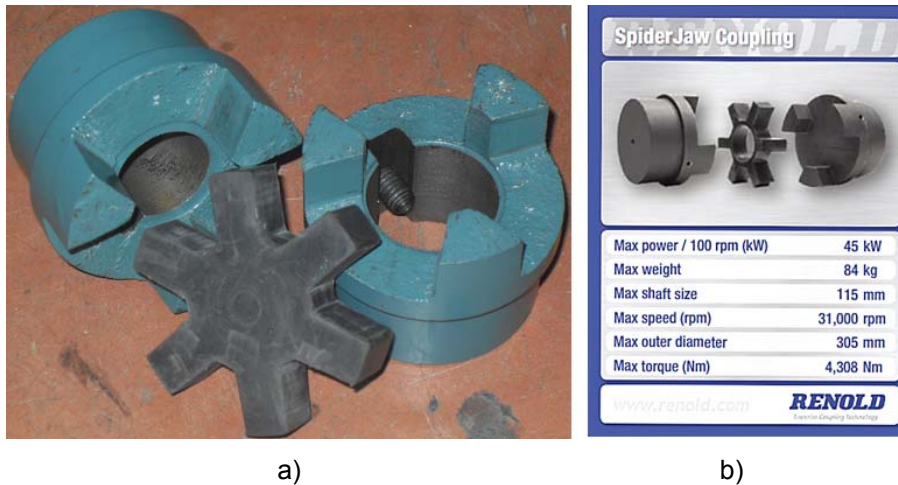
Figura 10. Acople TyreflexTY 40



Fuente: a) autores, b) Catálogo *RENOLD*, disponible online: <http://www.renold.com>

En la figura 11 se observa un acople rígido tipo araña marca Renold con sus respectivas características, este acople permite un menor rango de desalineación comparado con el anterior, es decir la alineación debe ser rigurosa para garantizar óptimas condiciones de operación entre los equipos que se encuentren interconectados mediante este acople.

Figura 11. Acople tipo araña



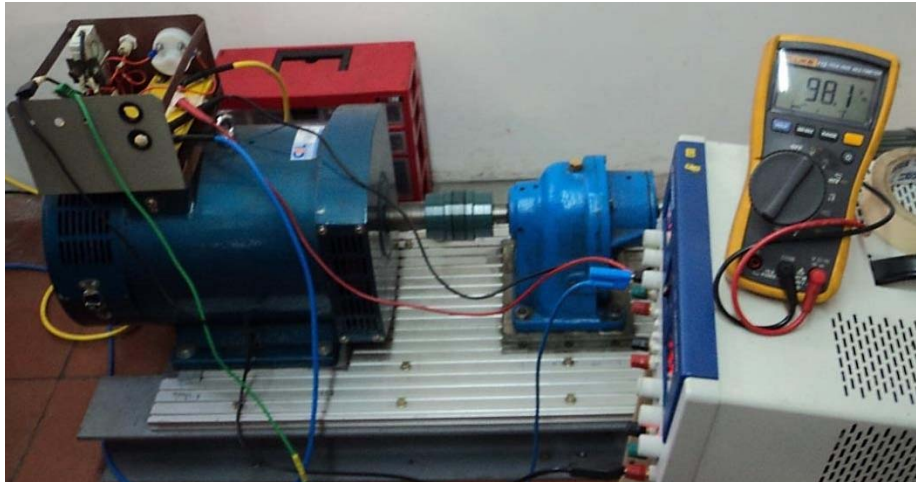
Fuente: a) Autores, b) Catálogo *RENOLD*, disponible online: <http://www.renold.com>

1.1.4 Generador eléctrico síncrono

El generador eléctrico, es una máquina rotativa que convierte la energía mecánica (potencia en el eje) en energía eléctrica (potencia eléctrica en los bornes). La potencia de eje en el módulo es accionada por el motor eléctrico.

El generador utilizado en el módulo es de tipo síncronico, es decir, que la velocidad del rotor es igual a la velocidad de campo magnético y su deslizamiento es cero. Para que esta clase de generadores funcionen es indispensable excitar el devanado del rotor con una fuente de corriente DC. Existen dos maneras de hacerlo: La primera consiste en instalar una fuente de corriente DC dentro del generador aprovechando parte de la energía producida por él mismo y, mediante electrónica de potencia eliminar el rizado de la señal y producir corriente DC. La otra manera es instalar una fuente de corriente DC externamente y conectarla al regulador del generador, donde internamente por medio de escobillas le transmite la excitación al rotor. El generador síncrono trabajado en el módulo no tiene fuente de corriente DC en el interior, por tanto fue necesario instalarle una, como se muestra en la figura 12.


Figura 12. Generador sincrónico conectado con la fuente de dc



Fuente: Autores

El generador utilizado fue construido por Fujian Yihua Electric Machine co., Ltd, de tipo sincrónico con capacidad de generar una potencia nominal de 2 kW trabajando a 1800 min^{-1} . Este modelo, de acuerdo como se excite el devanado del rotor, puede entregar valores entre 110 V y 220 V, pero también es posible que entregue valores inferiores a estos si la frecuencia angular es inferior a 1800 min^{-1} . El voltaje y la corriente DC que se necesita para excitar el devanado del rotor es de 40 V y 2 A respectivamente. En la tabla 2 se observa en más detalle sus características.

Tabla 2. Ficha técnica del generador síncrono

 A.C. SYNCHRONOUS GENERATOR			
TYPE:	ST-2	No:	1110381
P	2 KW	COS ϕ :	1.0
	110/220 V	EXCIT. VOLT	40 V
	18.2/9.1 A	EXCIT. CURR.	2 A
	60 Hz	RAT.	S1
	1800 r/min		Kg
INS.CL	B IP 21	DATE:	2011 . 10
STANDARD JB/T3320.2-2000			
FUJIAN YIHUA ELECTRIC MACHINE CO.,LTD.			

Fuente: Placa impresa en el generador eléctrico

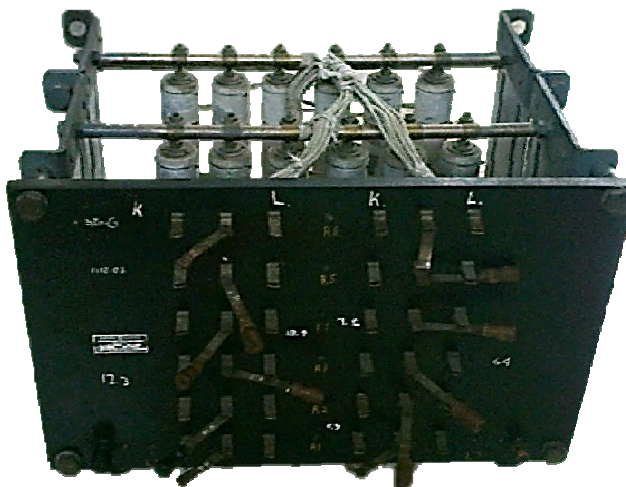
1.1.5 Banco de Resistencias

Al igual que en la mayoría de los equipos que contiene el módulo de vibraciones mecánicas, el banco de resistencias es un elemento eléctrico que se encarga en disipar toda la corriente eléctrica proveniente del generador en forma de calor. Este componente, al igual que el generador, son los encargados de frenar el sistema.

Como se dijo anteriormente, el banco de resistencias que sirvió en principio para realizar las pruebas de caracterización del sistema, fue suministrado por la facultad de ingeniería eléctrica, por tanto, se muestran las características de éste, puesto que el banco instalado finalmente se construyó de manera similar.

El banco consiste en 6 resistencias cada una con valor nominal de 42 Ohmios, además 6 cuchillas conmutables, siendo sus tres posiciones Neutro, K y L. La descripción anterior corresponde a uno de los dos bancos que posee el carro básico (ver figura 13). La figura 14 muestra el circuito correspondiente a un banco de resistencias.

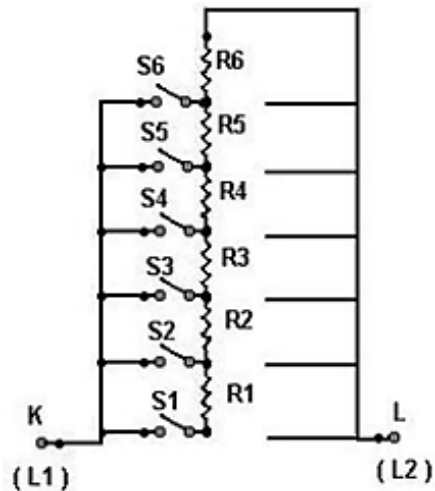
Figura 13. Banco de resistencias



Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 14, dependiendo de la posición de las cuchillas se puede obtener diversos valores de resistencias eléctricas; donde estos valores se muestran en la tabla 3.

Figura 14. Circuito eléctrico del banco de resistencias



Fuente: manual, *laboratorio de máquinas –ingeniería eléctrica*, Luis Alfonso Suarez et al.

Tabla 3. Valores de las resistencias

Ohmios	Posición de cuchillas
252.00	-----R1K
210.00	-----R2K
168.00	-----R3K
126.00	-----R4K
84.00	-----R5K
56.00	-----R5K;R1L
50.40	-----R5K;R2L
42.00	----- R6K
35.00	-----R6K;R1L
33.60	-----R6K;R2L
31.50	-----R6K;R3L
28.00	-----R6K;R4L
21.00	-----R6K;R5L
18.66	-----R1K;R2L;R3K
14.00	-----R1K;R2L;R3K;R4L
12.60	-----R1L;R2K;R3L;R4K
10.50	-----R1L;R2K;R3L;R4K;R5L
8.40	-----R1K;R2L;R3K;R4L;R5K;R6L
7.00	-----R1L;R2K;R3L;R4K;R5L;R6K

Fuente:manual, *laboratorio de máquinas –ingeniería eléctrica*, Luis Alfonso Suarez et al.

Los valores de resistencias varían desde 252 ohmios hasta 7 ohmios, pero en la toma de datos se ha trabajado con resistencias de 3,5 ohmios, por tanto, para obtener este último es necesario que funcione el otro banco configurándolo de igual manera con la resistencia de 7 ohmios, ya que ambos están conectados en paralelo.

1.1.5.1 Banco de resistencias seleccionado

Se presenta a continuación el banco de resistencias construido (ver figura 15). De izquierda a derecha se puede observar los seis selectores de tres posiciones neutro, K y L para la conexión de cada resistencia de 42Ω y un séptimo selector con un valor de resistencia de 7 ohm, siendo ferroníquel el material de las resistencias y con una resistividad de $0.086 \Omega \cdot \text{mm}/\text{m}^2$, el tablero metálico terminado con pintura industrial, Breaker de protección hasta 16 A, Voltímetro de 0 – 300 V, amperímetro de 0 – 80 A análogos, y un ventilador para refrigerar mediante convección forzada el sistema durante el tiempo de operación (ver figura 15).

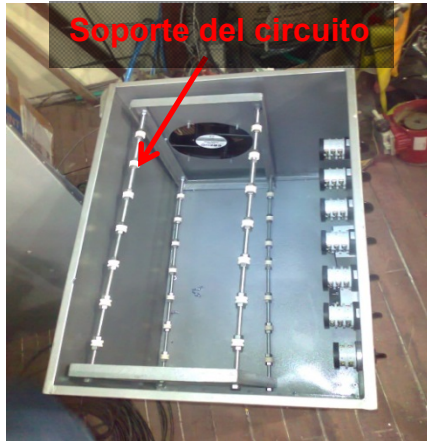
Figura 15. Banco de resistencias



Fuente: Autores

El circuito de resistencias eléctricas viene soportado sobre una estructura metálica independiente a la carcasa del banco, lo cual hace fácil su mantenimiento ya que se puede retirar, ver figura 16.

Figura 16. Estructura y ventilación del banco de resistencias



a) Estructura



b) Sistema de refrigeración

1.1.6 Variador de velocidad.

Este dispositivo gobierna el motor eléctrico de inducción y cumple un papel fundamental para la caracterización del módulo en la elaboración de las diferentes pruebas, éste permite variar la frecuencia de operación del motor y por ende su velocidad de rotación(Ver figura 17).

Figura 17. Variador de velocidad



Fuente: Autores.

1.1.7 Fuente de corriente directa

Es la responsable de excitar el embobinado que contiene el rotor del generador ya su vez afecta el comportamiento de la carga en el sistema. Ésta puede entregar hasta 60 V y 4 A de corriente, (ver figura 18).

Figura 18. Fuente de corriente directa



Fuente: Autores

1.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES

La selección de los componentes que conforman el módulo de vibraciones mecánicas depende de las magnitudes físicas que se vayan a manipular y el objetivo que va a cumplir cada equipo. Por tal motivo se describe a continuación el proceso de selección de cada equipo utilizado en las pruebas.

1.2.1 Selección del generador eléctrico

El generador eléctrico es una máquina rotativa que transforma energía mecánica (potencia en el eje) en energía eléctrica (Potencia eléctrica en los bornes), esto sucede haciendo uso de la ley de Faraday, que consiste básicamente, en crear un campo magnético para inducir un voltaje en un devanado.

Prácticamente en el campo de la generación de energía como las hidroeléctricas, termoeléctricas, plantas nucleares entre otros, la selección de un generador está

limitada a la frecuencia de red del sitio, por tanto, es común ver valores entre 50 Hz (Europa y algunos países de América Latina) y 60 Hz (Estados Unidos, Colombia entre otros), lo cual hace que estos generadores requieran girar a una frecuencia de rotación entre 1500 min^{-1} y 1800 min^{-1} , respectivamente. Al establecer estos valores globalizados causa que en el mercado se encuentren con mayor facilidad estas dos frecuencias de operación, pero sin embargo, es posible encontrar generadores que trabajen a distintas velocidades de rotación.

En el módulo de vibraciones mecánicas, el motor eléctrico es la máquina que gobierna su comportamiento (éste opera nominalmente a 1800 min^{-1}), por tanto es necesario que el generador eléctrico opere a su misma frecuencia de rotación. Si se requiere generar una corriente eléctrica a una frecuencia de 60 Hz con esta velocidad angular, hay que tener en cuenta el número de polos que posee. Por otro lado, un parámetro importante a tener en cuenta es la potencia a la que se va a trabajar y esta también es determinada por el motor eléctrico, el cual suministra un valor nominal de 2 hp (1492 W).

Se debe considerar qué tipo de generador es el adecuado para esta aplicación y que posibilidades se encuentran en el mercado. En gran mayoría, en la industria de generación de energía, se utilizan generadores síncronos porque permiten mayor estabilidad dinámica en caso de una perturbación en comparación con los generadores asíncronos, es decir, su velocidad angular es constante.

Estos argumentos fueron los necesarios para escoger o seleccionar el generador eléctrico síncrono con valores nominales de 2 kW y 1800 min^{-1} .

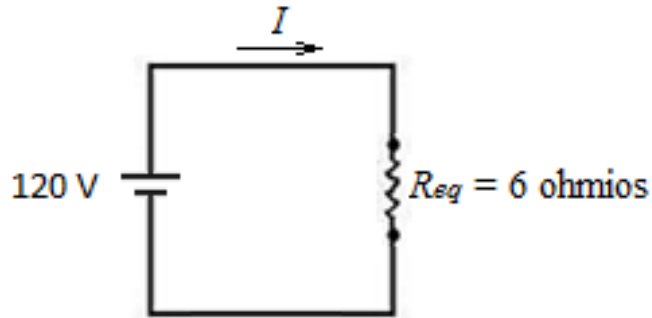
Describiendo brevemente, un generador síncrono es una máquina rotativa que para generar una tensión en el devanado del estator, es necesario crear un campo magnético en el devanado del rotor y esto se logra conectado a éste una fuente de corriente directa (esta corriente que se utiliza para alimentar el campo es denominada corriente de excitación). Este campo inducirá una tensión en el devanado de la armadura por lo que se tiene una corriente alterna fluyendo a través de él.

1.2.2 Selección del banco de resistencias eléctricas

El módulo de vibraciones mecánicas es necesario implementar un sistema de carga (o de frenado) de manera electromecánicamente, para eso ya se describió el conjunto que lo conforma que es el generador eléctrico y el banco de resistencias.

Se sabe que el generador eléctrico tiene valores nominales de 2 kW @ 1800 min⁻¹ entregando 120 V y una corriente máxima de 18,2 A, por tanto, utilizando la ley de Ohm, es fácil deducir que con una resistencia equivalente de 6 ohmios se disipa esta potencia.

Figura 19. Circuito eléctrico equivalente



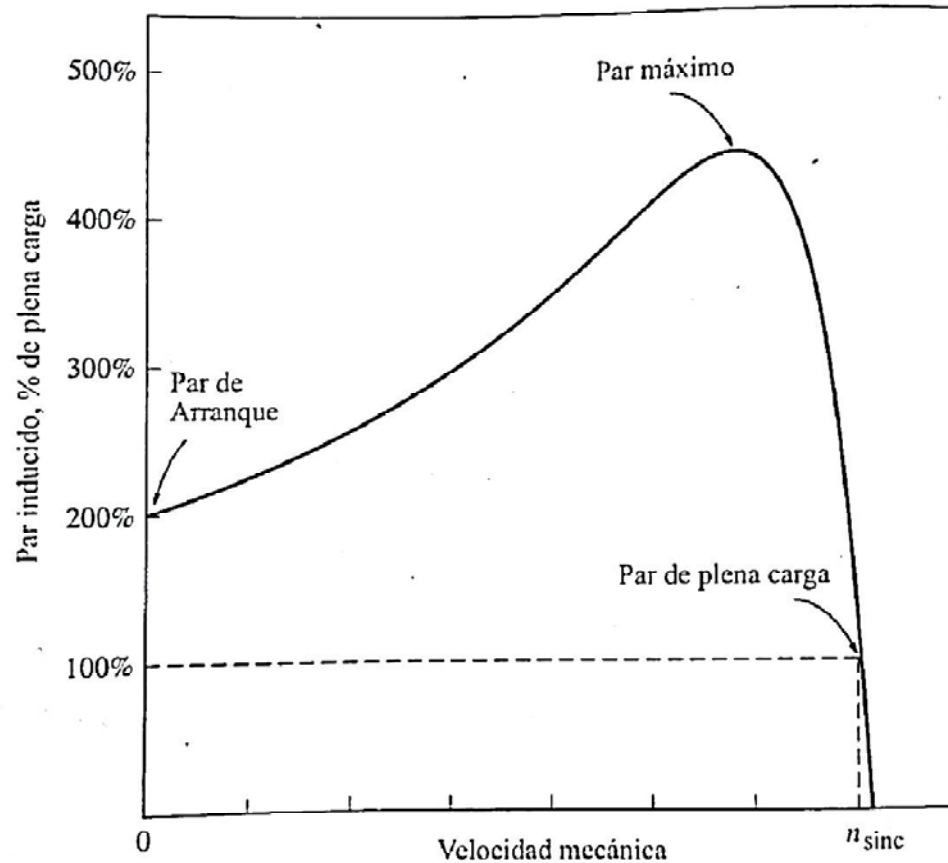
Fuente: autores

Lograr que el sistema consuma 2 kW significa que el mecanismo que hace girar el generador sea capaz de, por lo menos, producir esta magnitud, lo cual no es así, porque hay que recordar que el motor eléctrico tiene una potencia nominal 2 hp (1,492 kW). Por otro lado, el generador es de tipo síncrono y para su funcionamiento es indispensable una fuente de corriente directa (voltaje de excitación) que, como se comentará más adelante, a medida como aumente la carga, el voltaje de salida en los bornes del generador caerá. Como medida para compensar esta caída de tensión se aumentará el voltaje de excitación.

Los motores de inducción tiene la característica que a mayor carga (par torsor) menor será su velocidad y, aunque esa es la idea (ver figura 20), no permite que el generador trabaje con valores nominales, esto sin nombrar que este no está

acoplado directamente al motor, sino a la caja de engranajes lo cual reduce aún más su velocidad de operación.

Figura 20. Par – Velocidad de un motor de inducción



Fuente: CHAPMAN, Stephen J. Máquinas eléctricas.

Como puede ver, el análisis de carga se hace complejo a medida que se toman ciertas consideraciones, pero hay que notar que lo importante es frenar el sistema parcialmente más no totalmente. El detener completamente la máquina se podría ocasionar otro tipo de problemas no deseados, a tal punto de dañar los equipos.

Es importante mencionar, la capacidad que debe tener cada resistencia para disipar la potencia que el generador eléctrico le entrega, es decir la corriente y el voltaje que circulan a través de éstas. Por lo anterior es de importancia

implementar un sistema de ventilación, un aislamiento eléctrico y térmico en el interior del banco, para así, evitar daños en elementos eléctricos y accidentes por incremento excesivo en la temperatura o descargas de corriente eléctrica.

Si se desea cargar un sistema por medio de un elemento eléctrico (banco de resistencias), la corriente que fluye a través de éste, debe ser alta. Para lograr esta corriente se requiere que la resistencia equivalente sea mínima, por tanto, a menor valor de resistencia mayor será la corriente.

Tomando como referencia la magnitud de resistencia equivalente de 6 Ohmios para disipar la potencia, se selecciona el banco de resistencias que incluya este valor. El banco del laboratorio de máquinas de la facultad de Ingeniería Eléctrica cumple con dicho fin, éste banco tiene un rango de resistencia desde 252 hasta 3,5 ohmios y permite hasta 125 voltios y una corriente hasta 16 Amperios. Por tanto, se utilizó este banco aprovechando su amplio rango de resistencias para realizar pruebas preliminares y observar el comportamiento del sistema.

La utilización de este banco permitió obtener buenos resultados a tal punto, de encontrar una trazabilidad del comportamiento del módulo operando bajo carga a diversas frecuencias de operación. Estos fueron los argumentos para la selección y construcción del banco de resistencias que finalmente se instaló en el módulo de vibraciones mecánicas.

1.2.3 Selección de los acoples mecánicos

La selección de los acoples se encuentra en función de la potencia, velocidad angular, par máximo de operación del módulo y de las dimensiones de los ejes de los equipos que va a acoplar. También se deben tener en cuenta el peso de estos y la inercia que generan al operar y determinar si afecta el proceso a realizar.

Para el módulo de vibraciones se requiere de dos acoples, el primero para la unión entre el motor eléctrico de inducción y la caja reductora de engranajes, y el segundo para la unión de esta última con el generador eléctrico.

Haciendo uso de los elementos que componían el modulo anteriormente, se dispone del acople flexible *RENOLD*, el cual acopla el motor eléctrico y la caja reductora de engranajes. Al implementar el generador eléctrico como sistema de carga, fue necesario instalar un acople más para unirlo con la caja reductora de engranajes. Se decide hacer uso del acople tipo araña debido a la facilidad de adquisición en el mercado, sin contar con las ventajas de un cómodo mecanizado para obtener los diámetros y cuñeros especificados a bajo costo.

2. MONTAJE DE LOS EQUIPOS

Un correcto montaje de los equipos de cualquier máquina permite un buen funcionamiento de los mismos, por tanto, este proceso es de suma importancia y está ligado que exista una excelente alineación de los elementos del conjunto y que sus elementos eléctricos cumplan con la normatividad, como la RETIE (reglamento técnico de instalaciones eléctricas) que es usada en nuestro país. Un buen montaje también permite que los equipos trabajen con normalidad y evita que exista un desgaste prematuro de las piezas por exceso de vibraciones. Las vibraciones mecánicas, son un fenómeno inherente de la operación de una máquina, pero se pueden reducir considerablemente si se realiza un correcto montaje. El minimizar este fenómeno facilita tomar lecturas correctas de vibraciones mecánicas, ya que sólo se observaría el efecto causado por la operación del engranaje (en la caja de engranajes) y no el efecto de la desalineación, eso sin nombrar otros fenómenos como desbalanceo, fricción excesiva de los rodamientos, entre otros. La función principal del módulo es recolectar información del comportamiento de los engranajes por medio de las vibraciones mecánicas y, por ende, a través del montaje se desea garantizar que esto se cumpla. Por tanto se muestra el método y los instrumentos utilizados para la alineación de los equipos que componen el módulo. También se describe las conexiones eléctricas instaladas en cada uno de los equipos.

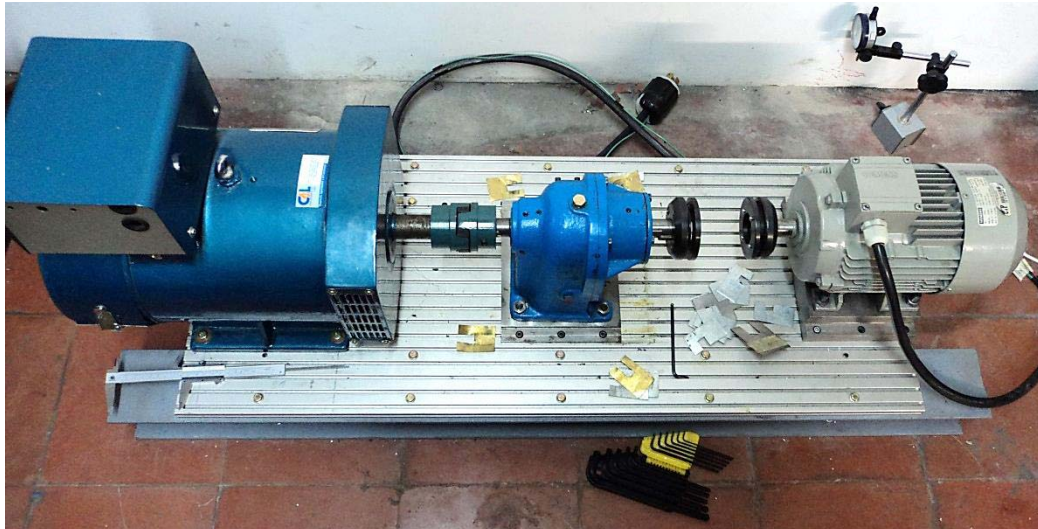
ALINEACIÓN DE EQUIPOS

Una correcta alineación permite un excelente rendimiento de los equipos y es de especial cuidado. El método empleado es el de indicador inverso por comparadores de carátula ya que los equipos disponibles son de este tipo.

La figura 21 muestra el conjunto que se requiere alinear, en primera instancia se alineó los equipos que comprenden el generador y la caja reductora, y esto se

tomó como punto de partida para realizar dicho procedimiento. También se realizó la alineación entre la caja reductora y el motor eléctrico.

Figura 21. Alineación de los equipos



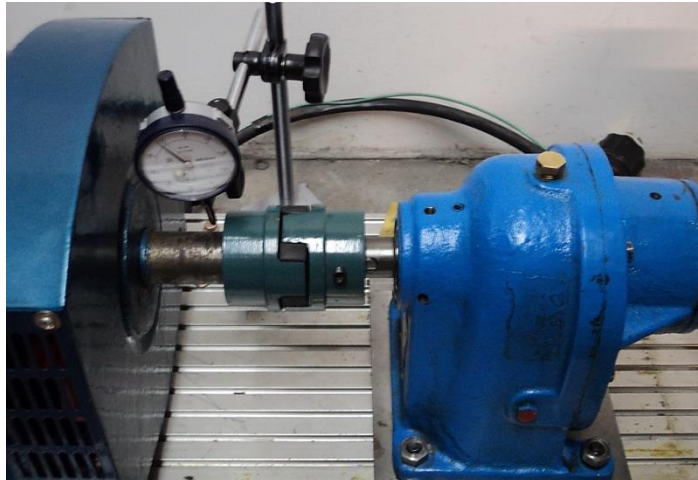
Fuente: Autores

En todo tipo de alineación de equipos es indispensable garantizar la horizontalidad de los mismos, ya que así se procede a una correcta alineación. Para esto se emplea un comparador de carátula soportado sobre una base magnética, en el que se verifica la diferencia de altura entre dos puntos del eje del equipo, éste procedimiento se puede observar en la figura 22.

0.1.1 Alineación por el método del indicador inverso

Posterior al ajuste de horizontalidad, se procede a ejecutar la alineación de los equipos por el método del indicador inverso, éste se divide en dos partes: alineación vertical y alineación horizontal, donde ambos se procede de igual forma pero en distintos planos.

Figura 22. Verificación de Horizontalidad



Fuente: Autores

Cuando se usa el método del indicador inverso, existen ciertas convenciones que se deben adoptar para hacer fácil y práctico la alineación. Una de las convenciones es el uso de la hoja de datos de indicador inverso(ver tabla 4), y sirve para documentar el registro permanente de la alineación.

Durante la primera parte de la etapa de alineamiento se hace uso de la parte superior de la hoja de datos (ver tabla 5) y muestra espacios en blanco para diligenciar como: el nombre de quien realizó la alineación, fecha, lugar, etc. Más abajo muestra espacios en blanco para completar información específica de la alineación como expansión térmica, compensación y las correspondientes distancias que existen entre diferentes puntos, ya sean los soportes de los equipos o los comparadores de caratula.

En la alineación el método de indicador inverso, consiste en alinear la mira apuntándole al blanco, de modo que el equipo que sea el blanco permanecerá fijo y el que sea la mira se moverá hasta que esté alineado respecto al equipo denominado blanco.

Tabla 4. Hoja de datos del indicador inverso - vertical

HOJA DE DATOS DEL INDICADOR INVERSO - Vertical

Alineado por _____ Fecha _____ Lugar _____

Referencia No. _____ Máquina Blanco _____ Máquina Vista _____

Dirección Cuadrado en grías ESCALA HORIZONTAL: (1 CUADRADO) = _____

Lecturas Deseadas Finales de Indicador

<p>HUNDIMIENTO + <input type="text"/></p> <p><input type="text"/> → COMIENZO</p> <p>Multiplicado x 2 <input type="text"/></p> <p>Lecturas Deseadas Finales de Indicador</p>	<p>En los planos de los indicadores mida la distancia y dirección (+ 0 -) desde la Línea de Alineamiento Frio de Blanco a la Línea de Alineamiento Frio de Vista</p>	<p>HUNDIMIENTO + <input type="text"/></p> <p><input type="text"/> → COMIENZO</p> <p>+/- <input type="text"/></p> <p>Multiplicado x 2 <input type="text"/></p> <p>Lecturas Deseadas Finales de Indicador</p>
---	--	---

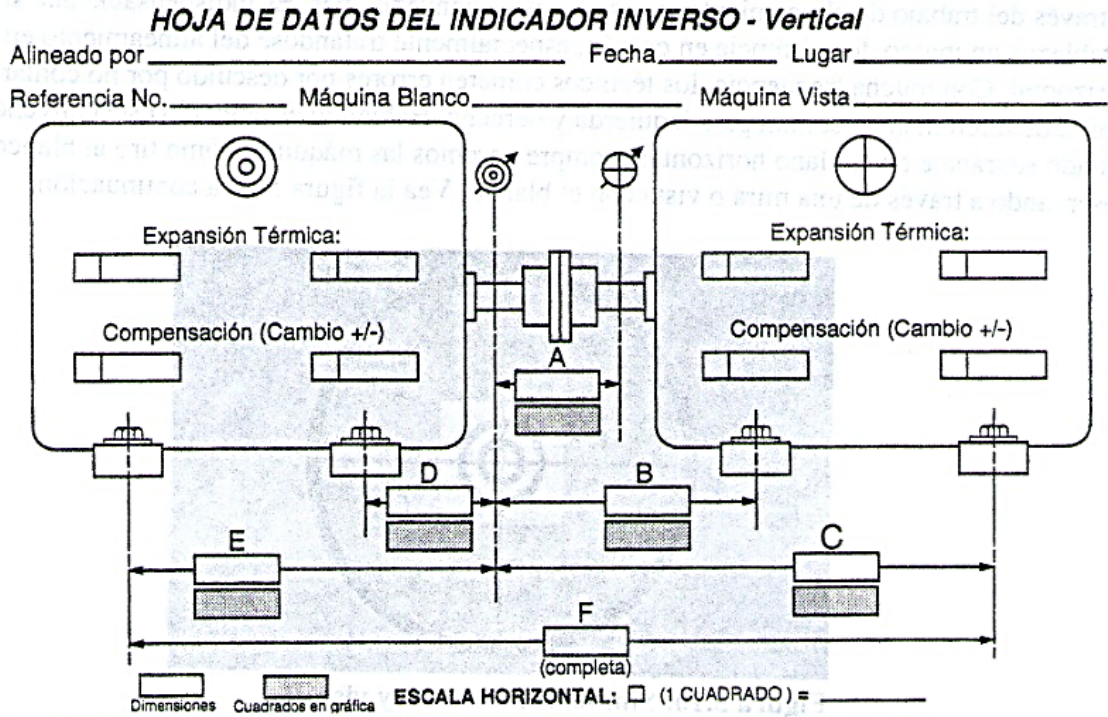
	1as Lecturas		2as Lecturas		3as Lecturas	
Lecturas Verticales	HUNDIMIENTO + <input type="text"/>	HUNDIMIENTO + <input type="text"/>	HUNDIMIENTO + <input type="text"/>	HUNDIMIENTO + <input type="text"/>	HUNDIMIENTO + <input type="text"/>	HUNDIMIENTO + <input type="text"/>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>
	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>
	Trazado <input type="text"/>	Trazado <input type="text"/>	Trazado <input type="text"/>	Trazado <input type="text"/>	Trazado <input type="text"/>	Trazado <input type="text"/>
	+/- <input type="text"/>	+/- <input type="text"/>	+/- <input type="text"/>	+/- <input type="text"/>	+/- <input type="text"/>	+/- <input type="text"/>

	1os Movimientos		2os Movimientos		3os Movimientos	
Movimientos	Interior <input type="text"/>	Exterior <input type="text"/>	Interior <input type="text"/>	Exterior <input type="text"/>	Interior <input type="text"/>	Exterior <input type="text"/>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

© 1993, Update International, Inc. • 2152 South Wadsworth Boulevard • Denver, Colorado 80227 USA • Teléfono 303-955-6751 • Telex 4901999 UPD UF • Fax 303-955-9990

Fuente: del manual, *alineamiento de precisión "la primera vez"*, Update international, inc.

Tabla 5. Hoja de datos del indicador inverso – vertical, parte superior



Fuente: del manual, *alineamiento de precisión "la primera vez"*, Update international, inc.







Figura23. Símbolos de blanco y mira



Fuentes: autores

En la sección siguiente de la hoja de datos (ver tabla 6) se usa para anotar las lecturas totales del indicador **TIR**, tomadas para determinar el desalineamiento en el plano de trabajo.

Tabla 6. Sección de lecturas verticales hoja de datos

Lecturas Verticales	1as Lecturas		2as Lecturas		3as Lecturas	
	HUNDIMIENTO	HUNDIMIENTO	HUNDIMIENTO	HUNDIMIENTO	HUNDIMIENTO	HUNDIMIENTO
	+ <input type="text"/>	+ <input type="text"/>	+ <input type="text"/>	+ <input type="text"/>	+ <input type="text"/>	+ <input type="text"/>
						
	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>	TIR <input type="text"/>
	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>	1/2 TIR <input type="text"/>
	Trazado		Trazado		Trazado	
		+/- <input type="text"/>		+/- <input type="text"/>		+/- <input type="text"/>
		Trazado		Trazado		Trazado

Fuente: del manual, *alineamiento de precisión "la primera vez"*, Update international, inc.

Esta sección de la hoja de datos proporciona espacio para anotar tres grupos de lecturas del indicador del dial del comparador de carátula, se observa que para cada grupo de lecturas, hay espacio para anotar tanto las lecturas tomadas del indicador del dial del blanco como el indicador del dial de la mira debajo de su respectivo símbolo. (Blanco al lado izquierdo y mira al lado derecho).

Como se puede observar, existe una casilla para anotar el hundimiento de bancada; este fenómeno no se tiene en cuenta en la alineación realizada a los equipos, ya que la distancia entre estos es mínima por lo que la deflexión de la bancada es casi nula.

Como puede notarse hasta aquí, solo se ha nombrado la hoja de datos para el plano vertical, pero de igual forma existe para el plano horizontal que por lo general va al respaldo de esta hoja (ver tabla 7).

En la alineación de ambos planos se debe respetar las posiciones iniciales y finales en cuanto al sentido de giro del dial, para evitar errores en la medición. En la alineación vertical la posición inicial del dial, haciendo una similitud con las posiciones de un reloj que indica la hora, sería las 12:00 y su posición final sería las 6:00, para obtener una rotación de 180°. De igual manera se hace en la alineación en el plano horizontal, donde la posición inicial sería a las 3:00 y su posición final a las 9:00.

Tabla 7. Hoja de datos del indicador inverso - horizontal

HOJA DE DATOS DEL INDICADOR INVERSO - Horizontal

Alineado por _____ Fecha _____ Lugar _____

Referencia No. _____ Máquina Blanco _____ Máquina Vista _____

Expansión Térmica:

Compensación (Cambio +/-)

Expansión Térmica:

Compensación (Cambio +/-)

Lecturas Deseadas
Finales de indicador

COMIENZO →

Multiplicado x 2 0

**Lecturas Deseadas
Finales de Indicador**

En los planos de los indicadores mida la distancia y dirección (+ o -) desde la Línea de Alineamiento Frío de Blanco a la Línea de Alineamiento Frío de Vista

← COMIENZO

+/-

Multiplicado x 2 0

**Lecturas Deseadas
Finales de Indicador**

Lecturas Horizontales	TIR <input style="width: 30px;" type="text"/> 0	TIR <input style="width: 30px;" type="text"/> 0	TIR <input style="width: 30px;" type="text"/> 0
	1/2 TIR <input style="width: 30px;" type="text"/>	1/2 TIR <input style="width: 30px;" type="text"/>	1/2 TIR <input style="width: 30px;" type="text"/>
	Trazado	Trazado	Trazado
	TIR <input style="width: 30px;" type="text"/> 0	TIR <input style="width: 30px;" type="text"/> 0	TIR <input style="width: 30px;" type="text"/> 0
	1/2 TIR <input style="width: 30px;" type="text"/>	1/2 TIR <input style="width: 30px;" type="text"/>	1/2 TIR <input style="width: 30px;" type="text"/>
	+/- <input style="width: 30px;" type="text"/> 1as Lecturas	+/- <input style="width: 30px;" type="text"/> 2as Lecturas	+/- <input style="width: 30px;" type="text"/> 3as Lecturas

Movimientos	1os Movimientos		2os Movimientos		3os Movimientos	
	Interior <input style="width: 30px;" type="text"/>	Exterior <input style="width: 30px;" type="text"/>	Interior <input style="width: 30px;" type="text"/>	Exterior <input style="width: 30px;" type="text"/>	Interior <input style="width: 30px;" type="text"/>	Exterior <input style="width: 30px;" type="text"/>

Fuente: del manual, *alineamiento de precisión "la primera vez"*, Update international, inc.

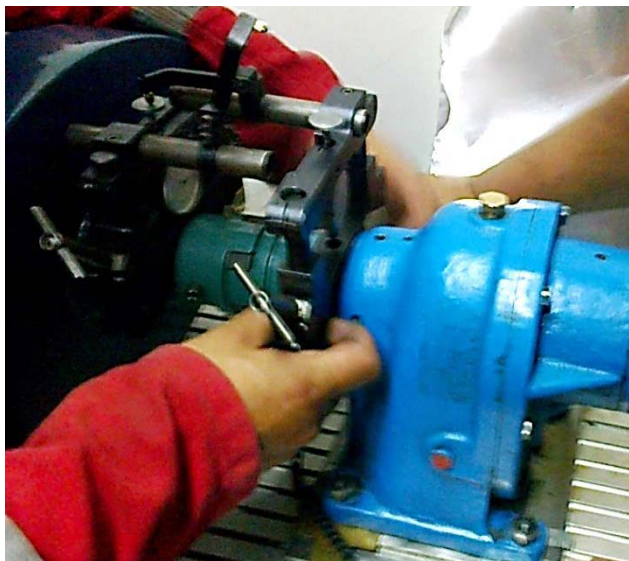
Debe tenerse especial cuidado que los diales de los comparadores giren correctamente en el momento de la lectura. Es importante distinguir la dirección correcta del recorrido del indicador si éste es positivo o negativo, según sea su sentido de giro, y simplemente puede pasarse por alto ya que la aguja tiende con facilidad a cambiar su sentido de giro durante la rotación de los ejes. También es importante notar si la aguja del dial realizó más de una revolución completa.

2.1.1.1 Alineación Vertical

En esta sección se explica referente a la alineación vertical, mostrando como ejemplo valores reales de un procedimiento aplicado. Esta alineación es la primera que se realiza para alinear los equipos. En primera instancia se ejecutó la alineación de los equipos generador y caja de engranajes. Como ya se dijo anteriormente uno de los equipos debe ser el blanco y el otro la mira, estos son el generador eléctrico y la caja reductora de engranajes, respectivamente. Recuerde que previamente el generador como elemento fijo, debió verificarse con anterioridad su horizontalidad respecto a la base que lo soporta.

En la figura 24 se observa el montaje del marco del equipo de alineación que soporta el comparador de caratula y el palpador de este, sobre los ejes de los equipos mencionados anteriormente.

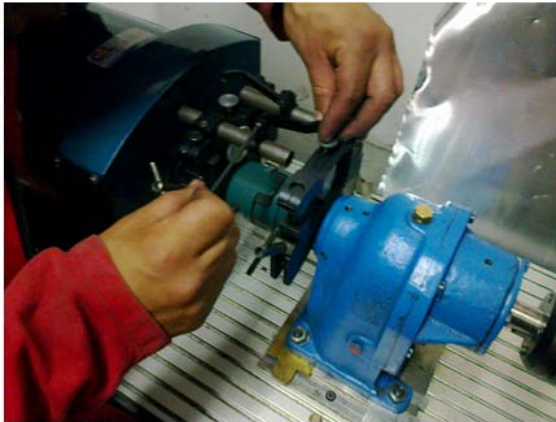
Figura 24. Montaje de equipo de alineación



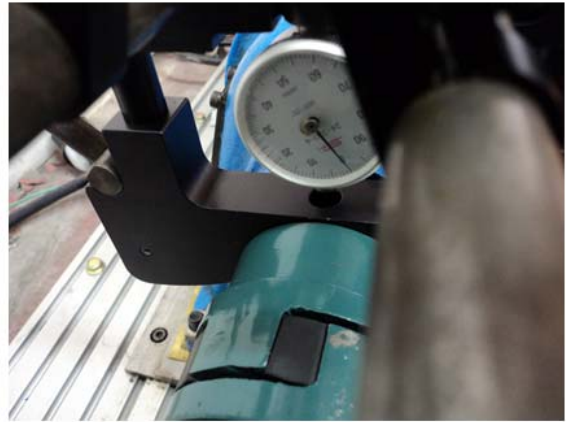
Fuente: Autores

A continuación se procede a ubicar el equipo de medición en la posición de las 12:00 y se calibra los comparadores de carátula con los palpadores hasta que el dial marque el valor de cero(ver figura 25).

Figura 25. Calibración de dial



a) Presionado el palpador para calibración



b) Vista del dial en la posición cero

Fuente: Autores

Posteriormente se procede a realizar la primera medición, partiendo de la posición de las 12:00 y finalizando en la posición de las 6:00, recordando que se debe observar constantemente el sentido de giro de las agujas de los comparadores durante el recorrido entre los dos puntos. Estando ubicado en la posición de las 6:00, se anota la lectura total TIR (del inglés, *Total Indicator Reading*) de cada indicador para obtener la desviación o diferencia de altura de los equipos, y para eso se hace uso del espejo como se ve en la figura 26.

Figura 26. Medición de la lectura total TIR



a) Toma de lectura total TIR



b) Vista del dial en su desviación

Fuente: Autores

En la figura 26 b), se observa el valor de desviación de la mira (caja de engranajes) que es de - 0.010 in, y es negativo debido a que el sentido de giro de la aguja del dial fue en sentido contrario a las manecillas del reloj. De igual manera se observa el dial del blanco (generador) que es de -0.019 in de desviación (ver figura 27).

Figura 27.Lectura de desviación del dial ubicado en el generador



Fuente: Autores

Para poder determinar los puntos de trazado o solución gráfica según las lecturas del indicador del dial se diligencia el siguiente formato (ver tabla 8).

Tabla 8.Formato de lectura vertical

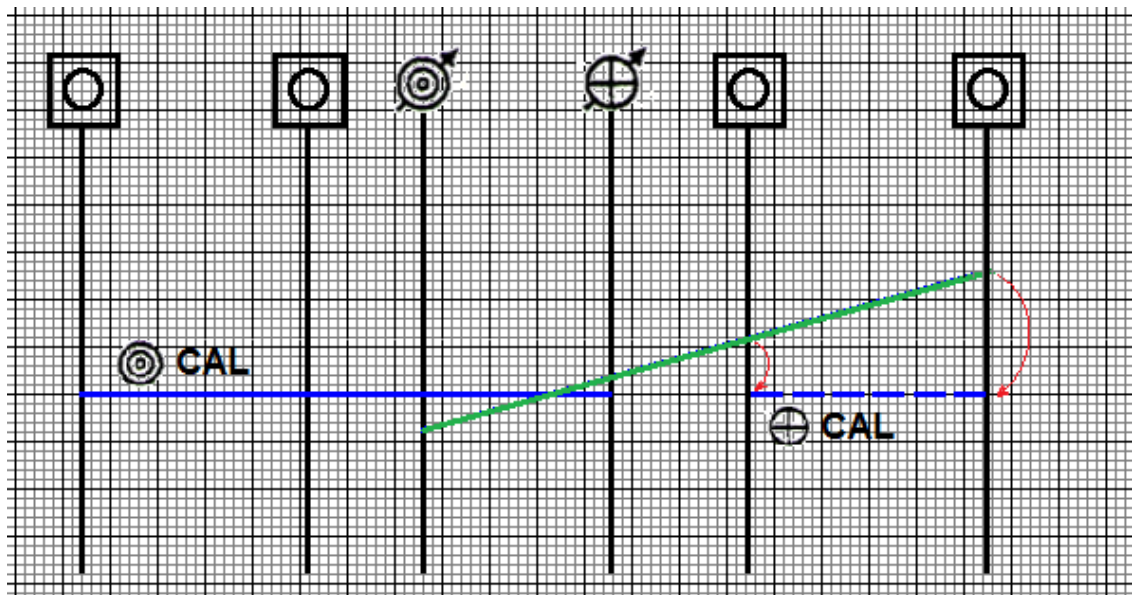
Lecturas Verticales	1as Lecturas	
	HUNDIMIENTO	HUNDIMIENTO
+ 0.0	+ 0.0	
TIR - 0.019	TIR - 0.010	
1/2 TIR - 0.0095	1/2 TIR - 0.005	
Trazado	+/- 0.005 Trazado	

Fuente: Autores

Por convención del método de alineación se puede observar que el valor total del TIR se divide por 2 y además para el equipo denominado mira presenta cambio de signo.

Luego se realiza la solución gráfica haciendo uso de papel milimetrado, donde se dibuja las medidas a escala.

Figura 28. Solución gráfica alineación vertical



FUENTE. Autores

El cuadro más pequeño corresponde a dos milésimas de pulgada en el papel milimetrado. Como se puede observar en la figura 28 están dibujados los soportes de los equipos y los diales (Blanco y Mira). Al lado izquierdo se ubica el equipo que será el blanco y al lado derecho el equipo que se desea mover (la mira). Las líneas azules continua y punteada son la referencia y es a donde se pretende llegar para obtener la alineación vertical; la línea punteada indica cual es el equipo a mover.

Para trazar la línea verde es necesario ubicar dos puntos que se encuentran sobre las líneas verticales blanco y la mira. El primer punto se halla sobre la línea vertical donde está el “blanco”, a 0.0095 in por debajo de la línea de referencia ya que es

un valor negativo y el segundo punto sobre la línea vertical de la “mira”, a 0.005 in por encima de la línea de referencia ya que es un valor positivo. Con lo anterior se deduce que el signo cambia la ubicación del punto. Con la ubicación de los puntos en el plano se procede a unirlos por medio de una línea para luego proyectarlos hasta cortar las dos líneas verticales que representa los soportes de la caja de engranajes.

Como se observa en el plano las bases de la caja de engranajes están por encima de la línea de referencia lo que indica que se debe bajar el equipo y esto se logra retirando galgas o laminas Shim, las cuales fueron ubicadas con anterioridad. Las bases delanteras de la caja de engranajes como se divisa tiene una altura de 1,2 mils y las traseras una altura de 2,6 mils.

Si el efecto de desviación vertical hubiese sido contrario al obtenido, es decir, la línea de desalineación estuviese trazada por debajo de la línea de referencia se tendría que adicionar galgas para elevar el equipo.

Luego de bajar el nivel de altura del equipo y aproximarlos a la línea de referencia, se debe verificar nuevamente la desviación actual con los comparadores de carátula. En caso que el resultado no sea el óptimo se debe construir una nueva solución gráfica y realizar el mismo procedimiento hasta encontrar la más adecuada.

Es necesario tener en cuenta diversas consideraciones que pueden afectar el proceso como: fenómeno de pata coja, ubicación incorrecta las galgas, usode calibre inadecuado y una aplicación de par excesivo en los tornillos lo cual produce aplastamiento de las galgas.

De igual manera se realiza el procedimiento para la alineación vertical de los siguientes dos equipos siendo el blanco la caja reductora de engranajes y la mira el motor eléctrico de inducción.

2.1.1.2 Alineación Horizontal

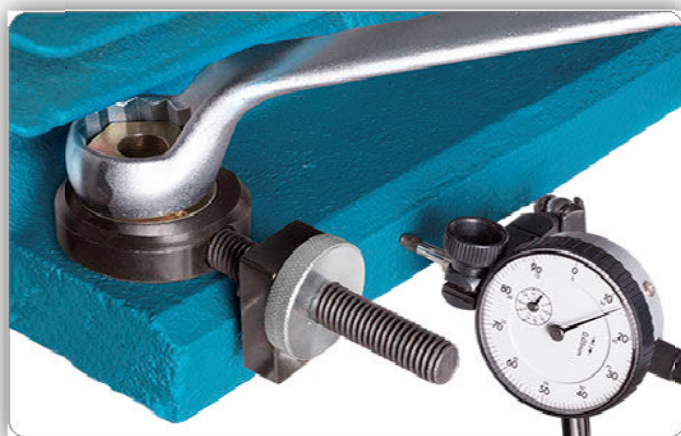
Continuando con el ejemplo mostrado en la alineación vertical de los equipos generador – caja reductora de engranajes se pretende realizar la alineación horizontal.

Al igual que en la alineación vertical se elabora el montaje del equipo de alineación sobre los ejes. Se debe recordar que el punto de partida en el recorrido de rotación del comparador en este caso es desde las 3:00 hasta las 9:00 con referencia en las manecillas del reloj.

Para este caso se debe hacer uso de dos comparadores de caratula más, que se ubican en las bases delanteras y traseras del equipo a mover (mira), y sirve como instrumento de ayuda para observar el desplazamiento de corrección requerido,(ver figura 29).

Al obtener la desviación por parte de los comparadores de carátula, se plasma en el papel milimetrado para hallar la solución gráfica y ejecutarla como se hizo en la alineación vertical. La corrección de desviación en esta alineación no se hace con láminas si no, desplazando de un lado a otro el equipo la distancia requerida.

Figura 29. Posición de comparador de caratula para alineación horizontal.



Fuente: Autores

Finalizado este paso se puede afirmar que los equipos en lo que a montaje mecánico respecta se encuentran listos,procediendo a elaborar las conexiones eléctricas para avanzar a la operación y posterior caracterización del módulo.

EQUIPO DE ALINEACIÓN

Para la alineación de los equipos que conforman el módulo de vibraciones mecánicas se implementó el método de comparador inverso donde es necesario hacer uso de diversos instrumentos de medición que se describirán a continuación(ver figura 30).

Figura 30.Equipo completo de alineación



Fuente: Autores

0.2.1 Marco de alineación

Es aquel que va sujetado sobre el eje del equipo que se desea alinear, la sujeción se realiza tensionando una cadena que abraza el eje y le da firmeza al marco, este a su vez soporta el comparador de caratula y el palpador. El equipo posee dos marcos(ver figura31).

Figura 31. Marco de alineación con palpador



Fuente: Autores

0.2.2 Comparador de caratula

Se encarga de arrojar la lectura de desviación y es utilizado con frecuencia en diferentes aplicaciones como: la alineación horizontal, vertical, nivelación de equipos, entre otros. Este instrumento de medición es muy sensible y ante cualquier manipulación indebida se puede descalibrar o en el peor de los casos dañarse, por tanto se recomienda tener especial cuidado. También es importante limpiar frecuentemente con glicerina o líquido penetrante los mecanismos internos del reloj para evitar que suciedades se incrusten en generando obstrucciones entre ellos y así no se obtienen lecturas erróneas al momento de la medición (ver figura32).

En la figura 32 a) se observa el comparador de caratula marca Spi referencia 24 – 320 – 4 el cual posee una resolución de 1 mils con un rango y alcance de 0.250 in. La figura 32 b) muestra el comparador de caratula marca Mitutoyo y posee una resolución de 10 μ m con un rango y alcance de 10 mm.

Figura 32. Comparadores de carátula



a) Comparador de carátula Spi 24 – 320 – 4 b) Comparador de carátula Mitutoyo 2046S

Fuente: Autores

2.2.3 Base magnética

Esta se encarga de soportar los comparadores de caratula y su base magnética hace que se adhiera fácilmente a superficies metálicas, para esta aplicación solo se usa al momento de realizar la alineación horizontal (Ver figura 33).

Figura 33. Base magnética



Fuente: Autores

2.2.4 Láminas Shim

Estas láminas son usadas para compensar una diferencia de altura entre un equipo y otro, permitiendo la alineación vertical entre estos. Se consiguen en el mercado de diversos calibres y materiales como: acero inoxidable, bronce, latón y cobre. Una desventaja es su alto costo (ver figura 34).

Figura 34. Laminas Shim



Fuente: Autores

MONTAJE DE CONEXIONES ELÉCTRICAS

Elaborar correctamente las conexiones eléctricas es sinónimo de preservar los equipos y ofrecer seguridad al personal que se encuentre operándolo. Durante el desarrollo de las pruebas se obtienen corrientes de 12 A a 220 V siendo peligroso para el personal que se encuentre manipulándolo, por tal motivo se debe tener precaución a la hora de realizar las pruebas. Se muestra a continuación las conexiones eléctricas de los equipos que componen el módulo.

0.3.1 Conexión eléctrica Motor eléctrico-variador de velocidad

El motor eléctrico posee una conexión trifásica a 220 V y va conectado directamente al variador de velocidad, cabe resaltar que el motor opera únicamente cuando se enciende el variador de velocidad y se determina su frecuencia de operación (ver figura 35).

Figura 35. Conexión eléctrica motor-variador de velocidad



a) Conexión motor-variador

b) Conexión variador a la red

Fuente. Autores.

0.3.2 Conexión eléctrica Generador eléctrico- Banco de resistencias

Los cables que conectan el banco de resistencias con el generador eléctrico son de cobre suave, cableado flexible (bunchado) conformado por alambres entre los calibres 32 AWG al 26 AWG color naranja y blanco posee conexión tipo pinza, resiste 600 V, 75 ° C y cumple con el certificado de conformidad RETIE 1869 (ver figura 36).

Figura 36. Cables TFF 16 AWG Cv 600 V y 75 ° C Procables Colombia



a) Cables para conexión

b) Conexión Banco-Generador

Fuente. Autores

3. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE FRENADO

La finalidad del módulo de vibraciones mecánicas es dejarlo al servicio del laboratorio de vibraciones mecánicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira para futuras investigaciones. Para lograrlo es necesario implementar el sistema de carga con su respectiva caracterización.

Para desarrollar la caracterización se elaboran pruebas con diferentes condiciones de operación, como por ejemplo, ensayos a máxima velocidad angular en los que se variará la carga con el banco de resistencias, o pruebas en vacío en las que se desea operar el sistema sin ninguna carga.

Se obtienen los resultados mediante tres etapas de pruebas, las cuales se nombran a continuación y donde finalmente se comparan entre sí en el análisis de resultados.

En la primera etapa de pruebas se trabaja el módulo de vibraciones mecánicas con todos los equipos disponibles (motor eléctrico, caja de engranajes, generador eléctrico y banco de resistencias), arrojando resultados poco favorables, ya que existía elevadas pérdidas de potencia debido a la baja frecuencia angular del generador eléctrico. Por tal motivo se decide acoplar directamente el motor eléctrico con el generador para observar el comportamiento de éste bajo condiciones de operación nominales, siendo ésta la segunda etapa de las pruebas. De igual manera se encontraron grandes pérdidas de potencia en el generador, por lo cual se procede a hacer uso de un equipo especializado para determinar la calidad de la energía descartando problemas en la red eléctrica, conexiones erróneas de los equipos, señales de interferencias capturadas por el variador de frecuencia, entre otros. Esta es la tercera y última etapa del desarrollo de las pruebas para la determinación del comportamiento del módulo de vibraciones mecánicas, con los resultados de esta prueba se pretende definir las correcciones necesarias al momento de operar el sistema acoplado.

3.1 INSTRUMENTOS PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS

3.1.1 Pinza amperimétrica

Este dispositivo es el encargado de medir la corriente eléctrica que circula por un cable conductor y consiste en introducirlo en el interior de la pinza y, por medio de la ley de Faraday el instrumento arroja la lectura de magnitud de corriente. Este elemento es construido por la empresa Tech modelo TM-151 y permite medir valores de hasta 1000 A de corriente alterna (AC), posee una resolución de 0.1 A. También mide otras variables como voltaje en AC y resistividad eléctrica, (ver figura 37).

Figura 37. Pinza amperimétrica



Fuente: Autores.

A continuación se muestra algunas especificaciones técnicas de la pinza:

Tabla 9. Datos técnicos pinza amperimétrica

Dígitos en pantalla	4
Voltaje máximo DC	1000 V

Voltaje máximo AC	750 V
Corriente máxima AC	200/1000 A
Resistencia interna	200/20k Ω
Prueba de aislamiento	20/2000 $\Omega \cdot m$

Fuente: disponible online, <http://www.bestronusa.com/detail/index.cfm?nPID=7444>

3.1.2 Multímetro

Este instrumento eléctrico portátil permite medir magnitudes eléctricas activas en equipos tales como: corrientes, tensiones, resistividad eléctrica, continuidad y capacitancias ya sea en corriente alterna o continua, los hay análogos y digitales como el usado en la práctica.

El multímetro utilizado para la realización de las pruebas es elFluke 289 digital y fue usado en la práctica para la medición de tensiones, la resistividad del banco de resistencias y para verificar la continuidad en las conexiones de los equipos, (ver figura 38).

Figura 38. Multímetro Fluke 289



Fuente: Autores

Figura 39. Ficha técnica multímetro FLUKE 289

Function	Range and Resolution	Basic Accuracy
DC volts AC volts	50.000 mV, 500.00 mV, 5.0000 V, 50.000 V, 500.00 V, 1000.0 V	0.025 % 0.4 % (true-rms)
DC current AC current	500.00 μ A, 5000.0 μ A, 50.000 mA, 400.00 mA, 5.0000 A, 10.000 A	0.15 % 0.7 % (true-rms)
Temperature (excluding probe)	-200.0 °C to 1350.0 °C (-328.0 °F to 2462.0 °F)	1.0 %
Resistance	50.000 Ω , 500.00 Ω , 5.0000 k Ω , 50.000 k Ω , 500.00 k Ω , 5.0000 M Ω , 50.00 M Ω , 500.0 M Ω	0.05 %
Capacitance	1.000 nF, 10.00 nF, 100.0 nF, 1.000 μ F, 10.00 μ F, 100.0 μ F, 1000 μ F, 10.00 mF, 100 mF	1.0 %
Frequency	99.999 Hz, 999.99 Hz, 9.9999 kHz, 99.999 kHz, 999.99 kHz	.005 %

Fuente: disponible online: http://www.transcat.com/PDF/Fluke_289_Spec.pdf

3.1.3 Tacómetro

El dispositivo mostrado en la figura 40 es el encargado de medir la velocidad de un equipo y puede medirse de manera mecánica, acoplando directamente el tacómetro al extremo del eje del equipo (ver figura 47 a) o por medio del láser, el cual mide la frecuencia angular al apuntar éste sobre el eje, y para que él pueda sensar es necesario instalarle una marca al eje como referencia, como se muestra en la figura 47 b.

Figura 40. Tacómetro



Fuente: Autores

3.2 PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE FRENADO

En la presente sección se explican detalladamente los pasos y el orden seguido durante el proceso de la elaboración de pruebas en el módulo de vibraciones mecánicas.

También se describe el desarrollo de cada una de las etapas seguidas durante las prácticas experimentales. Como se explicó en la introducción de éste capítulo cada etapa es consecuencia de la anterior, siempre con el objetivo de determinar correctamente el comportamiento de cada equipo que conforma el módulo de vibraciones mecánicas.

3.2.1 Etapa 1: Pruebas con el conjunto Motor – Reductor – Generador

Esta primera etapa consiste en instalar todos los equipos disponibles del módulo de vibraciones mecánicas para así realizar una serie de pruebas preliminares, adquiriendo datos y conociendo el comportamiento del mismo bajo condiciones de operación previamente determinadas.

Uno de los objetivos es seleccionar el agente generador de carga para el módulo de vibraciones mecánicas, por tal motivo se desarrollaron pruebas con el banco resistivo del Laboratorio de máquinas eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, siendo ésta la base para el dimensionamiento y construcción del nuevo equipo.

El motor eléctrico, la caja de engranajes y generador eléctrico son tres equipos que vienen interconectados entre sí como lo muestra la figura 41, y junto con el banco de resistencias son los equipos principales para la elaboración de esta etapa.

Figura 41. Módulo de vibraciones mecánicas completo



Fuente: Autores

Para definir una metodología de trabajo es importante considerar los siguientes criterios: primero, se debe conocer los equipos en cuanto a su buen funcionamiento y su máxima capacidad de operación, segundo, se requiere establecer límites

iniciales y finales bajo los cuales se desarrollaran las pruebas, y por último se necesita identificar qué tipo de variables físicas son necesarias obtener mediante medición para conseguir los resultados.

3.2.1.1 Máxima capacidad de operación de los equipos

En el capítulo 1, se describen las características técnicas de los equipos que conforman el módulo, y son éstas las que indican la máxima capacidad a la que pueden operar sin afectar sus partes internas.

- El motor eléctrico de inducción disponible, posee valores nominales de 1800 min^{-1} y una potencia de consumo de 2 hp (1429 W). La frecuencia angular es posible modificarse por medio del variador de velocidad y no afectará el funcionamiento de éste, claro está que no es debido trabajar con velocidades inferiores al 25 % de la base, puesto que la refrigeración sería defectuosa. Pero la potencia si podría afectar el comportamiento del equipo ya que, un valor superior al nominal significa altas corrientes que podrían quemar el embobinado del motor.
- La caja de engranajes posee dos escalones (cuatro ruedas dentadas) y para este caso se usa como reducción de frecuencia rotacional, la configuración con la cual posee una relación $i = 2,52$. La velocidad rotacional y potencia máxima recomendadas para este dispositivo son 1800 min^{-1} y 3 Hp (2238 W) respectivamente, también se debe tener en cuenta que el tipo de lubricante empleado es SAE 90 a 140 y el nivel de lubricación corresponde a 150 ml.
- El generador eléctrico asíncrono utilizado tiene como valores nominales una frecuencia angular de 1800 min^{-1} y una potencia de generación de 2000 W. El voltaje y la intensidad de excitación máximos son de 40 V y 2,0 A respectivamente. En este caso la velocidad de rotación que se le transmite al generador es menor a su nominal (710 min^{-1}) debido al dispositivo de reducción, lo que significa que es posible que este no opere óptimamente; sin embargo, se ejecutaron las pruebas bajo esta condición para observar su comportamiento.

En cuanto a la potencia no habrá problemas por daños, ya que el motor está por debajo de ésta y nunca la podrá superar.

- El banco de resistencias, como se mencionó anteriormente posee una gran variedad de magnitudes de resistividad eléctrica al hacer uso de las combinaciones posibles. Este dispositivo se encuentra diseñado para disipar 2200 W de potencia y soportar hasta 16 A de corriente eléctrica, posee un sistema de ventilación para disipar el calor generado por las resistencias eléctricas. Para evitar daños en los selectores de tres posiciones, los cuales permiten las combinaciones, se interpone entre este último y las resistencias una capa de aislante térmico, debido a las altas temperaturas que se presentan. También posee una lámina de Dacron blanco de 0,25 mm de espesor que funciona como aislante eléctrico y evita algún posible accidente por descarga.
- El variador de velocidad usado para cambiar la frecuencia de rotación opera con valores de entrada máximos permitidos de 240 V y 7,9 A y a la salida de 230-240 V y 7,0 A de tensión y corriente. Es importante evitar trabajar por encima de estos valores para no afectar la vida útil del equipo y causar daños; a medida que aumenta la carga en el módulo así mismo incrementa la corriente de consumo del motor y, por ende, la que fluye a través del variador.

3.2.1.2 Condiciones iniciales y finales de operación

Para la elaboración de cada prueba es vital definir límites dentro de los cuales se obtendrán datos, para describir el comportamiento del sistema debido a cada condición.

El procedimiento empleado para la recolección de datos fue trabajar tres pruebas cada una con una velocidad angular determinada, la cual es gobernada por el motor eléctrico. Este método se planteó de tal modo que, se realizara pruebas a 1800 min^{-1} , a 1600 min^{-1} y por último a 1400 min^{-1} , con el fin de observar el patrón de comportamiento bajo estas velocidades.

Otro parámetro importante para el desarrollo de las prácticas son los valores de resistencias necesarios para obtener resultados positivos, por lo cual es indispensable disponer de varias magnitudes para obtener el rango de operación apropiado (es decir, encontrar los valores máximos y mínimos de resistividad que generarán carga al módulo). El valor máximo de carga encontrado estará ligado al valor más pequeño de resistencia y es el que condiciona finalmente el funcionamiento de los equipos. Por tanto para cumplir dichos requerimientos se implementa un banco de resistencias eléctricas con un amplio rango de combinaciones, para este fin se usó el banco base³.

La tabla 10 muestra las posibles combinaciones de carga utilizadas en cada prueba.

Tabla 10. Condiciones de operación

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	1800 min ⁻¹	1600 min ⁻¹	1400 min ⁻¹
Resistencias (Ω)	en vacío	en vacío	en vacío
	252	252	252
	210	210	210
	168	168	168
	126	126	126
	84	84	84
	56	56	56
	50,4	50,4	50,4
	42	42	42
	35	35	35
	33,6	33,6	33,6
	31,5	31,5	31,5
	28	28	28
	21	21	21
	18,66	18,66	18,66
14	14	14	

³ Banco de resistencias eléctricas facilitado por la facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

	12,6	12,6	12,6
	10,5	10,5	10,5
	8,4	8,4	8,4
	7	7	7
	3,5	3,5	3,5

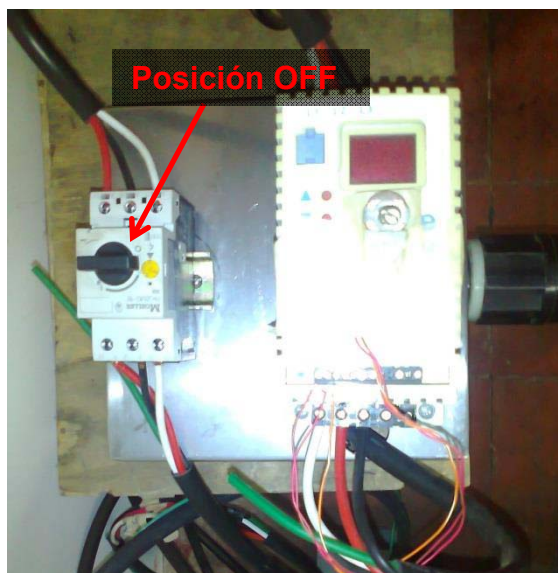
Fuente: Autores

3.2.1.3 Instalación de las conexiones eléctricas

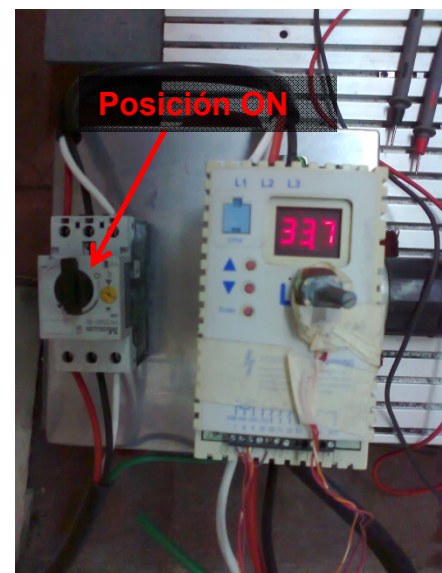
Inicialmente para una óptima elaboración experimental es necesario instalar y verificar las conexiones eléctricas para evitar daños por cortos circuitos, accidentes y lecturas erróneas de las variables. Este es un tema en el que la seguridad es lo primordial tanto de los equipos como de la persona que lo opera.

Lo primero que se debe hacer es verificar que el interruptor de seguridad que está acoplado al modulador de frecuencia se encuentre abierto, para evitar que el motor eléctrico se encienda inesperadamente una vez que el enchufe se conecte a la red eléctrica como se observa a continuación, (ver figura 42).

Figura 42. Posiciones del interruptor



a) Posición abierta del interruptor



b) Posición cerrada del interruptor

Fuente: autores

Luego, se verifica que el enchufe del motor esté conectado correctamente al modulador de frecuencia. Se recomienda que durante todo el proceso de instalación de las conexiones eléctricas no se conecte el enchufe principal a la red. Ahora se procede a la instalación entre el generador eléctrico y la fuente de excitación. Esta última, se conecta con las escobillas que permiten el paso de flujo de corriente al embobinado que contiene el rotor del generador, como se observa a continuación en la figura 43.

Figura 43. Conexión eléctrica de la excitación



Fuente: autores

Los cables verde y negro corresponden al positivo y negativo de la fuente de excitación respectivamente, y dicha conexión siempre debe respetarse porque de lo contrario podría dañar el embobinado del rotor y/o la fuente de excitación.

En la figura 43 se observan los bornes de salida de potencia, los cuales se conectan al banco de resistencias (ver figura 44). Aquí no existen problemas de polaridad puesto que la corriente producida es alterna, sin embargo, se deben

tener altas precauciones de seguridad por las grandes magnitudes de corriente generadas.

Finalmente en cuanto corresponde a conexiones eléctricas, se tiene al banco de resistencias, el cual se encarga de disipar la potencia entregada por el generador en forma de calor y de suministrarle carga a módulo a medida que se varía la magnitud de resistividad eléctrica de éste (ver figura 44).

Figura 44. Conexión banco de resistencias



Fuente: Autores

3.2.1.4 Metodología de trabajo y recolección de datos

Una vez sintonizada una velocidad de operación, se procede a realizar la prueba pertinente.

Paso 1: El proceso es iniciado al ajustar el voltaje de los bornes del generador eléctrico mediante la fuente de excitación con un valor aproximado de 50 V, para lograr alcanzar la máxima magnitud de tensión en el generador la cual corresponde a 98 V aproximadamente. El voltaje de excitación no debe exceder los 40 V, pero se aplicó esta magnitud debido a que se intentó obtener una tensión

generada de 110 V, y se asume este riesgo debido a que se hizo en un corto espacio de tiempo y que la robustez del generador eléctrico lo permite (ver figura 45).

Figura 45. Ajuste de voltaje en la salida de generador con la fuente de excitación



a) Ajuste fuente de excitación



b) Potencia generada

Fuente: Autores

El ajuste de voltaje en la salida del generador siempre debe realizarse en vacío o sin carga, para así tomar el punto de partida.

Cuando el generador se encuentra operando a una frecuencia de rotación dada, y se le conecta la fuente de excitación al rotor, en los bornes de éste, se genera una tensión la cual puede ser afectada por la variación de alguna de las dos condiciones anteriores, es decir, si el voltaje de excitación aumenta, también lo hace la tensión generada, siempre y cuando la frecuencia de rotación permanezca constante, y si disminuye la excitación también lo hace el voltaje generado. En caso de que se presente una caída de velocidad rotacional, entonces decrece la tensión generada y esto se puede compensar aumentando el voltaje de la fuente de excitación.

Paso 2: una vez ajustado el voltaje inicial, se activa la primera configuración de resistencia en el banco de carga, correspondiente a 252 Ω (ver figura 46).

Figura 46. Selectores del banco de resistencias



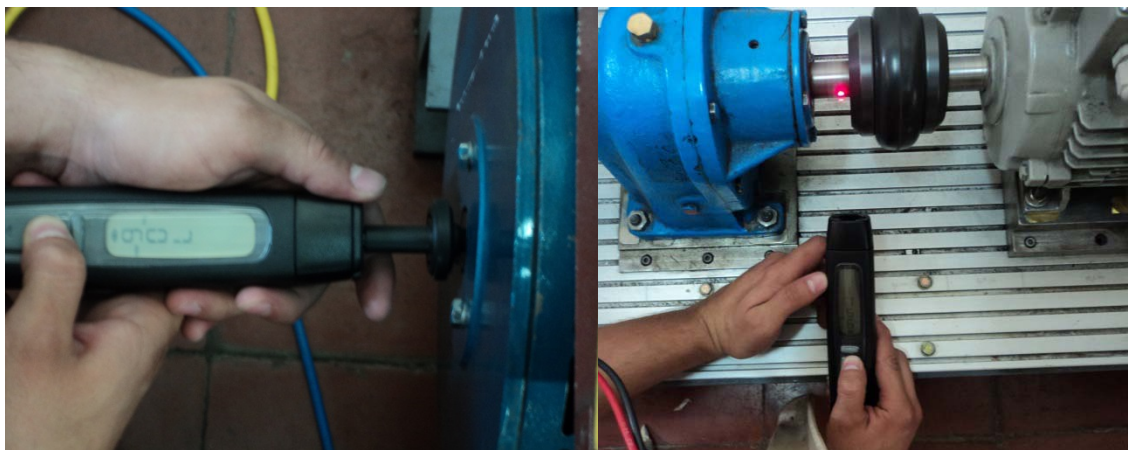
Fuente: Autores

Paso 3: Con esta disposición se procede a medir las variables físicas de cada uno de los equipos presentes en el módulo de vibraciones, y para esto se hace uso de los instrumentos de medida mencionados en la sección 3.1.

Las variables a medir son:

- 1) Velocidad angular del motor eléctrico
- 2) Velocidad angular del generador eléctrico
- 3) Corriente y voltaje de consumo del motor eléctrico
- 4) Corriente y voltaje producida por el generador
- 5) Corriente y voltaje entregado por la fuente de excitación

Figura 47. Medición de la frecuencia angular del motor eléctrico y generador eléctrico

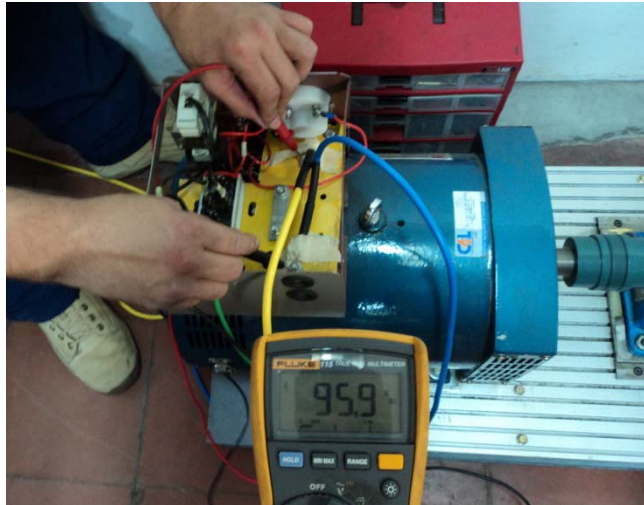


a) Medición mecánica generador

b) Medición con láser motor

Fuente: Autores

Figura 48. Medición del voltaje del generador



Fuente: Autores

Figura 49. Medición de voltaje y corriente de la fuente de excitación



Fuente: autores

Luego, se continúa con la configuración del banco de carga a 210Ω , y se sigue con la medición de las variables nuevamente. Los *pasos 2 y 3* se repiten hasta completar todas las combinaciones posibles de resistividad eléctrica(ver tabla 3).

Los pasos anteriores corresponden a la frecuencia de operación de 1800 min^{-1} , posteriormente se elaboran las pruebas a 1600 min^{-1} y 1400 min^{-1} siguiendo en orden los pasos mencionados anteriormente.

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de cada una de las pruebas se exponen en la sección 3.3.

3.2.2 Etapa 2: Prueba del módulo de vibraciones sin la caja de engranajes

En los resultados de la página 83 perteneciente a las pruebas realizadas de la sección 3.2.1, es claro ver la pérdida excesiva de potencia por parte del generador eléctrico. Teóricamente, la potencia eléctrica consumida por el motor eléctrico debería conservarse y ser la misma que la entregada por el generador, pero en la realidad, esto no sucede porque en el proceso de transmisión y conversión de energías existen pérdidas (o transformación de potencia en forma calor debido a la fricción entre materiales o del medio).

La etapa 2 consiste en configurar el módulo de tal manera que el motor esté acoplado directamente con el generador eléctrico, para realizar pruebas a 1800 min^{-1} (siendo esta la velocidad angular nominal de ambos), debido a que el generador en la etapa 1, trabajó a velocidades muy por debajo de la nominal presentándose pérdidas de potencia considerables (ver figura 50).

Figura 50. Prueba sin caja de engranajes



Fuente. Autores

Como se puede observar en la figura 50, los equipos usados no presentan diferencia respecto a la etapa uno, por tal motivo la máxima capacidad de operación es la misma.

3.2.2.1 Condiciones de operación (módulo sin caja de engranajes)

En este caso las condiciones de operación se rigieron en tres procedimientos distintos a la misma velocidad nominal. El primer procedimiento consiste en sostener una tensión generada de 120 V por medio de la excitatriz (ya que la tensión en los bornes cae conforme aumenta la carga resistiva), el segundo procedimiento se mantiene constante la excitación del rotor y de igual forma se toma como punto de partida 120 V, por último, se pretende aumentar la tensión en los bornes a 220 V para tomarla como punto de partida, por tanto el voltaje de excitación debió ser el máximo permitido correspondiente a 40 V DC (Ver tabla de resultados 17, 18 y 19).

Las pruebas mencionadas se ejecutaron bajo las siguientes cargas resistivas:

Tabla 11. Condiciones de operación sin caja de engranajes

Prueba	Resistencia[Ω]									
	1800 min ⁻¹	252	210	168	126	84	56	50.4	42	35
	31.5	28	21	18.7	14	12.6	10.5	8.4	7	3.5

Fuente: Autores

Ahora, en la instalación de las conexiones eléctricas se presenta la misma situación que la etapa 1, por tanto se realiza del mismo modo.

3.2.2.2 Metodología de trabajo y recolección de datos

La etapa 2, como se nombró a comienzo de la sección, se divide en tres procedimientos experimentales distintos, en donde el voltaje de la excitatriz cumple un papel fundamental. A continuación se exponen las dos situaciones con sus respectivos pasos.

- **Procedimiento 1, tensión generada de 120 V y voltaje de excitación constante**

Al igual que el procedimiento descrito en la etapa 1, aquí se desea explicar los pasos empleados en la primera prueba, ya que se procede de manera similar para las demás.

Esta prueba consiste en mantener el voltaje de excitación constante a una frecuencia de operación dada y, como consecuencia, la tensión de los bornes decaerá a medida que la carga aumente. Este fenómeno sucede debido a que el sistema se frena causado por la corriente circundante en el estator el cual, como lo indica la ley de Faraday, generaría un campo magnético opuesto al inducido por la excitatriz.

Paso 1: primero se establece la velocidad de rotación a 1800 min^{-1} (ver tabla 11) y se determina la tensión en los bornes del generador funcionando en vacío correspondiente a 120 V, por medio de la excitatriz donde se ajusta a 11,71 V, recuerde que este valor se mantendrá constante durante toda la prueba (ver figura 51).

Figura 51. Ajuste de la tensión generada por medio del voltaje dc de excitación



Fuente: Autores

Paso 2: Se procede a ajustar los valores de resistencia eléctrica en el banco el cual corresponde a 252Ω .

Paso 3: Habiendo aplicado la carga al sistema se procede a medir las variables físicas en cada uno de los equipos que conforman el módulo de vibraciones. Con la ayuda de los instrumentos de medición las variables a medir son:

- 1) Frecuencia angular del motor eléctrico
- 2) Corriente y voltaje de consumo del motor eléctrico
- 3) Corriente y voltaje producida por el generador
- 4) Corriente y voltaje entregado por la fuente de excitación

Se continúa con la configuración del banco de carga a 210Ω , y se sigue con la medición de las variables nuevamente. Los *pasos 2 y 3* se repiten hasta completar todas las combinaciones posibles.

- **Procedimiento 2, tensión generada de 120 V y voltaje de excitación variable**

En el procedimiento 1, el voltaje de excitación permanecía constante y la tensión generada decrecía conforme subía la carga resistiva. Como se explicó con anterioridad, la tensión en los bornes es posible compensarla aumentando el voltaje de la excitatriz, lo cual se requirió realizar esta práctica con fines de observar el comportamiento del sistema.

Los pasos para esta prueba es similar a los descritos en el procedimiento 1, pero con la diferencia de que el voltaje de la excitatriz se aumente progresivamente una vez se aplique la carga, con el fin de compensar la tensión en los bornes y mantenerla constante lo máximo posible.

- **Procedimiento 3, tensión generada de 220 V y voltaje de excitación constante**

Respecto al procedimiento 1 difiere únicamente en la magnitud de tensión aplicada por la fuente excitatriz que es de 40 V DC, causando un aumento en el voltaje generado llegando a 220 V en vacío y por ende las potencia generadas en

los bornes son mayores; los pasos para el desarrollo de la prueba no difiere respecto a los dos procedimientos anteriores.

3.2.3 Etapa 3: Evaluación del módulo de vibraciones con el equipo de análisis de calidad de energía

Esta es la etapa final de la recolección de datos y con la ayuda del equipo de análisis de calidad de energía, durante el periodo de tiempo que esté operando el módulo de vibraciones mecánicas, se validarán los resultados obtenidos por las pruebas anteriores. El equipo usado para la elaboración de la práctica es el FLUKE 434 PowerQualityAnalyzer, este posee una gran cantidad de herramientas las cuales permiten determinar corrientes, voltajes, potencias activas y reactivas, frecuencias y gráficas de estas variables respecto al tiempo (ver figura 52).

Figura 52. Equipo para análisis de calidad de energía



Fuente: disponible online <http://www.fluke.com/fluke/coes/products/>

En los resultados mostrados en la sección 3.3.3 se observa pérdidas excesivas en la potencia entregada por el generador síncrono, lo cual da un indicio de que su funcionamiento no fue el más apropiado, por tanto, fue indispensable desarrollar más pruebas para analizarlas con el equipo especializado, el cual fue facilitado por la facultad de Ingeniería Eléctrica de Universidad Tecnológica de Pereira.

Las pruebas elaboradas en la etapa 3 son de dos tipos, donde la primera prueba se desarrolló con la caja de engranajes acoplada y aprovechado la disposición durante la segunda etapase ejecutó la segunda parte de esta prueba, operando el módulo sin acoplar la caja de engranajes; ambas sosteniendo el voltaje de excitación con los valores nominales correspondiente a 40 V.

Para la construcción y el desarrollo de estas pruebas pertenecientes a la tercera etapa, el procedimiento de elaboración es el mismo respecto a las dos etapas anteriores en cuanto a conexiones eléctricas, condiciones de operación, metodología de trabajo y recolección de datos, y al manejo del límite de operación de los equipos para darle buen uso a éstos. Como se nombró anteriormente en lo único que cambia, es en el uso del equipo de análisis de calidad de energía y la condición de ajuste de la excitatriz.

Tabla 12. Resumen de pruebas

ETAPA	CARACTERISTICAS	VELOCIDAD DE OPERACIÓN	CONDICIÓN DE EXCITACIÓN
PRIMERA	CAJA DE ENGRANAJES ACOPLADA	1800 min ⁻¹	60 V
		1600 min ⁻¹	
		1400 min ⁻¹	
SEGUNDA	CAJA DE ENGRANAJES DESACOPLADA	1400 min ⁻¹	11,71 V
			Variable para obtener 120 V generados
			40 V
TERCERA	CAJA DE ENGRANAJES ACOPLADA	1800 min ⁻¹	40 V
	CAJA DE ENGRANAJES DESACOPLADA		

Fuente. Autores

3.3 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS

En esta unidad se exponen los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, como lo describe la sección 3.2, conjunto con las variables indirectas calculadas por expresiones matemáticas. Cada resultado es discriminado respecto a la etapa y condiciones de operación que le corresponda.

3.3.1 Resultados de pruebas en vacío

Las pruebas de vacío permiten conocer el máximo valor de tensión en los bornes del generador respecto al voltaje de excitación suministrado al rotor. A continuación se mostrará dos tablas, las cuales se consignaron los valores arrojados por las pruebas, en la tabla 13 se observa los resultados de la prueba en vacío en donde el generador operó a una velocidad muy inferior a su nominal, debido a que se instaló la caja de engranajes. En la tabla 14 se puede apreciar el comportamiento del generador bajo condiciones nominales y para lograr esto se acopla el generador eléctrico directamente al motor.

Tabla 13. Comportamiento del generador en pruebas en vacío, con caja de engranajes

Fuente de excitación		Motor	Generador	
Voltaje (V)	Corriente (A)	RPM(min^{-1})	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)
0	0	1793	709	3,24
5	0,256	1794	709	21,1
10	0,562	1793	709	41,71
15	0,877	1793	709	57,33
20	1,18	1793	709	68,3
25	1,502	1793	709	75,8
30	1,809	1793	709	81,5
35	2,0375	1791	709	85,8
40	2,3225	1791	709	89,3
45	2,5935	1791	709	92,4
50	2,8665	1791	709	94,8
55	3,1215	1790	708	97,1
60	3,201	1790	708	97,7

Fuente: Autores

Se puede observar claramente en la tabla 13, que el voltaje generado cuando se aplica el voltaje nominal de excitatriz (40 V) es de 89,3 V, esto debido a la velocidad del generador que es de 709 min^{-1} y cuando excedemos el voltaje de excitación logramos una tensión mayor en los bornes de 97,7 V, pero recordemos que no debe operar a estos valores.

En la tabla 14, se ve claramente que el máximo valor de tensión generado corresponde al voltaje nominal de excitación y es el que está subrayado con la franja amarilla. Esta prueba corresponde también a la velocidad nominal del generador, lo cual permite alcanzar un máximo de tensión en los bornes de 220 V, lo indicado en la placa técnica del equipo. Por otra parte, en este caso no fue posible obtener valores por debajo de la franja amarilla que podría dañarse el equipo por su elevada tensión.

Tabla 14. Comportamiento del generador en pruebas en vacío, sin caja de engranajes

Fuente de excitación		Generador	Motor
Voltaje (V)	Corriente (A)	Voltaje(V)	RPM (min^{-1})
0	0	8,603	1795
5	0,3105	61,21	1795
10	0,6145	111,32	1793
15	0,9295	150,07	1792
20	1,2395	177,6	1790
25	1,5445	195,65	1789
30	1,863	209,7	1787
35	2,157	220,03	1784
40	2,476	229,17	1784

Fuente

3.3.2 Resultados de las pruebas primera etapa

En las siguientes tres tablas se presentan los resultados obtenidos durante las tres pruebas correspondientes a la primera etapa, las cuales se desarrollaron a diferentes frecuencias de operación de motor eléctrico. Se puede observar las

variables obtenidas con los instrumentos de medición y las obtenidas mediante expresiones matemáticas.

Como se puede observar las tablas 15, 16 y 17 muestran las magnitudes medidas durante el desarrollo de las prácticas y los valores calculados por expresiones matemáticas. La franja amarilla representa los valores máximos recomendados para trabajar, ya que en este punto se llega a la potencia nominal del motor eléctrico.

Para hacer una ilustración de cómo fueron calculados cada uno de los valores adjuntados en las tablas, se muestra a continuación un ejemplo con la carga resistiva a 252Ω de la tabla 15, y éste será válido para todas las demás.

Como bien saben los motores eléctricos necesita de una potencia eléctrica (o potencia de consumo) para realizar su movimiento mecánico y para equipos trifásicos está regido bajo la siguiente ecuación,

$$P_{electrica} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi$$

Dónde:

- V = Voltaje [V]
- I = Corriente [A]
- $\cos\varphi$: Factor de potencia

De los valores pintados en amarillo tenemos que,

- $V = 213,5 \text{ V}$
- $I = 4,3 \text{ A}$
- $\cos\varphi = 0,8$, valor obtenido de la ficha técnica del motor eléctrico.

Por tanto la potencia eléctrica es:

$$P_{electrica} = 1272,1 \text{ W}$$

El otro valor que sigue es la potencia mecánica, la cual debe ser menor a la potencia eléctrica debido a las pérdidas que se presenta en el sistema. Por tanto para evaluarla se hace uso de la eficiencia mecánica del motor eléctrico y por lo general es suministrada por el fabricante. Este rendimiento es equivalente al 69,9 %, lo que significa que,

$$P_{Mecá.motor} = P_{eléctrica} * \eta_m$$

$$P_{Mecá.motor} = 889,2 \text{ W}$$

Ya para el caso de par suministrado por el motor eléctrico se requiere de dos valores fundamentales como la potencia mecánica y la velocidad del mismo, y se encuentra relacionado en la siguiente expresión:

$$T_{motor} = \frac{P_{mecá.motor} [\text{W}] \cdot 60}{N_{motor} [\text{min}^{-1}] \cdot 2\pi}$$

Donde,

$P_{mecánica}$ = Potencia mecánica motor eléctrico [W]

N = Velocidad angular motor eléctrico [min^{-1}]

Entonces tomando los valores de la tabla se obtiene,

$$T_{motor} = 4,75 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Ahora, para el cálculo de la potencia eléctrica generada por parte del generador eléctrico se obtiene de la multiplicación directa entre los voltajes y corrientes medidas en los bornes, ya que el factor de potencia para esta máquina corresponde a 1.

$$P_{eléctrica} = V \cdot I$$

$$P_{eléctrica} = 48,88 \text{ W}$$

En el cálculo de la potencia mecánica que entra en el generador (o potencia en el eje) se tiene en cuenta solo la pérdida de potencia que sufre el sistema debido a la caja de engranajes. Para esto se tomó de referencia la tabla 7.4 del libro de Ocampo diseño de accionamientos mecánicos la cual presenta la eficiencia de una transmisión por ruedas dentadas cilíndricas en baño de aceite, donde ésta es

$$\eta_{rod} = 0,95$$

Por tanto se toma la potencia mecánica obtenida en el motor eléctrico y se multiplica por la eficiencia de la caja de engranajes

$$P_{mecá, gene} = 844,7 \text{ W}$$

Al conocer la potencia mecánica que se le entrega al eje que acopla al generador eléctrico se procede a determinar el par que se le aplica a éste.

$$T_{gene} = \frac{P_{mecá, Generador} [\text{W}] \cdot 60}{N_{Generador} [\text{min}^{-1}] \cdot 2\pi}$$

Donde,

$P_{mecánica}$ = Potencia mecánica en el Generador eléctrico [W]

N = Velocidad angular generador eléctrico [min^{-1}]

Entonces tomando los valores de la tabla se obtiene,

$$T_{gene} = 11,41 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Nota aclaratoria:

En las tablas 15, 16 y 17, se puede observar que los valores de excitación no fueron consignados en éstas, debido que a que las pruebas se iniciaron con el máximo voltaje de excitación posible (valores por encima de 40 V DC, valor nominal) y a medida que se aumentaba la carga fue indispensable disminuir la excitación por las altas corrientes DC que requería el rotor, pero estos no seguían un orden consecutivo.

Tabla 15. Resultados obtenidos primera etapa a 1800 rpm

R (Ω)	Variables medidas						Variables calculadas					
	Motor eléctrico			Generador eléctrico			Motor eléctrico			Generador eléctrico		
	RPM (min ⁻¹)	Voltaje (V)	Corriente (A)	RPM (min ⁻¹)	Voltaje (V)	Corriente (A)	P _{Eléctrica} (W)	P _{mecánica} (W)	Par (N - m)	P _{Eléctrica} (W)	P _{mecánica} (W)	Par (N - m)
vacío	1790	212,8	3,91	709	97,3	0,48	1152,9	805,9	4,30	46,704	765,6	10,31
252	1787	213,5	4,3	707	94	0,520	1272,1	889,2	4,75	48,88	844,7	11,41
210	1787	211,6	4,28	707	93,7	0,56	1254,9	877,2	4,69	52,472	833,3	11,26
168	1787	213,6	4,4	707	93,4	0,72	1302,3	910,3	4,86	67,248	864,8	11,68
126	1785	213,8	4,58	706	93	0,92	1356,8	948,4	5,07	85,56	901,0	12,19
84	1783	214	4,98	705	92	1,23	1476,7	1032,2	5,53	113,16	980,6	13,28
56	1780	213,5	5,46	704	90,7	1,83	1615,3	1129,1	6,06	165,981	1072,6	14,55
50,4	1778	213,4	5,77	703	90,2	2,02	1706,2	1192,6	6,41	182,204	1133,0	15,39
42	1777	213,1	6,05	702	89,4	2,39	1786,4	1248,7	6,71	213,666	1186,3	16,14
35	1774	211,8	6,6	701	88,3	2,82	1937,0	1353,9	7,29	249,006	1286,2	17,52
33,6	1773	211,8	6,55	701	88	2,93	1922,3	1343,7	7,24	257,84	1276,5	17,39
31,5	1772	213,5	6,82	701	87,5	3,09	2017,6	1410,3	7,60	270,375	1339,8	18,25
28	1770	213,1	6,91	700	86,7	3,46	2040,4	1426,2	7,69	299,982	1354,9	18,48
21	1763	212,8	7,85	697	84	3,54	2314,7	1618,0	8,76	297,36	1537,1	21,06
18,66	1758	211,7	8,34	696	84	5,15	2446,5	1710,1	9,29	432,6	1624,6	22,29
14	1751	212,7	9,46	692	79,4	6,46	2788,1	1948,9	10,63	512,924	1851,4	25,55
12,6	1748	211,9	9,86	691	77,2	7,02	2895,1	2023,7	11,06	541,944	1922,5	26,57
10,5	1740	211,8	10,65	689	73,8	7,95	3125,5	2184,8	11,99	586,71	2075,5	28,77
8,4	1732	211,5	11,68	685	68,6	9,28	3423,0	2392,7	13,19	636,608	2273,0	31,69
7	1732	212	11,52	685	61,78	10,09	3384,1	2365,5	13,04	623,3602	2247,2	31,33
3,5	1742	212	10,51	688	36,56	12	3087,4	2158,1	11,83	438,72	2050,2	28,46

Fuente: Autores

Tabla 16.Resultados obtenidos primera etapa a 1600 rpm

R (Ω)	Variables medidas						Variables calculadas					
	Motor eléctrico			Generador eléctrico			Motor eléctrico			Generador eléctrico		
	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Corriente (A)	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Corriente (A)	P _{Eléctrica} (W)	P _{Mecánica} (W)	Par (N - m)	P _{Eléctrica} (W)	P _{Mecánica} (W)	Par (N - m)
vacío	1600	212,7		632		0	0,0	0,0	0,00	0	0,0	0,00
252	1600	212,7	3,82	632	86,5	0,460	1125,9	787,0	4,70	39,79	747,6	11,30
210	1588	212,7	3,89	625	85,4	0,55	1146,5	801,4	4,82	46,97	761,3	11,63
168	1588	212,6	4	628	84,6	0,61	1178,3	823,7	4,95	51,606	782,5	11,90
126	1596	212,9	4,18	633	84,1	0,76	1233,1	861,9	5,16	63,916	818,8	12,35
84	1596	212,7	4,27	630	82,5	1,12	1258,5	879,7	5,26	92,4	835,7	12,67
56	1592	212,8	4,47	630	81,2	1,66	1318,0	921,3	5,53	134,792	875,2	13,27
50,4	1592	212,9	4,48	629	80,6	1,82	1321,6	923,8	5,54	146,692	877,6	13,32
42	1590	213,2	4,77	629	80,1	2,14	1409,1	985,0	5,92	171,414	935,7	14,21
35	1588	213	4,83	628	79,2	2,54	1425,5	996,4	5,99	201,168	946,6	14,39
33,6	1587	213	4,82	628	78,9	2,63	1422,6	994,4	5,98	207,507	944,7	14,36
31,5	1587	213,3	4,87	627	78,6	2,81	1439,4	1006,1	6,05	220,866	955,8	14,56
28	1585	213,4	5,05	627	77,7	3,11	1493,3	1043,8	6,29	241,647	991,6	15,10
21	1581	213,3	5,31	625	75,6	4,07	1569,4	1097,0	6,63	307,692	1042,2	15,92
18,66	1579	213,1	5,46	624	74,6	4,49	1612,2	1126,9	6,82	334,954	1070,6	16,38
14	1572	213,2	5,96	622	71,4	5,79	1760,7	1230,7	7,48	413,406	1169,2	17,95
12,6	1560	213,6	6,02	618	70	6,39	1781,8	1245,4	7,62	447,3	1183,2	18,28
10,5	1560	213,1	6,45	617	67,2	7,28	1904,6	1331,3	8,15	489,216	1264,7	19,57
8,4	1560	213,3	6,89	617	62,3	8,59	2036,4	1423,4	8,71	535,157	1352,3	20,93
7	1559	213,2	6,95	616	57,3	9,32	2053,2	1435,2	8,79	534,036	1363,4	21,14
3,5	1550	212,8	6,93	614	35,95	11,97	2043,4	1428,3	8,80	430,3215	1356,9	21,10

Fuente: Autores

Tabla 17. Resultados obtenidos primera etapa a 1400 rpm

R (Ω)	Variables medidas						Variables calculadas					
	Motor eléctrico			Generador eléctrico			Motor eléctrico			Generador eléctrico		
RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Corriente (A)	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Corriente (A)	$P_{\text{Eléctrica}}$ (W)	$P_{\text{mecánica}}$ (W)	Par (N - m)	$P_{\text{Eléctrica}}$ (W)	$P_{\text{mecánica}}$ (W)	Par (N - m)	
vacío	1399	214,5	4,87	553	76,3	0,43	1447,5	1011,8	6,91	32,809	961,2	16,60
252	1398	214,6	5,24	553	74,7	0,640	1558,2	1089,2	7,44	47,808	1034,7	17,87
210	1398	214,7	5,11	553	74,3	0,77	1520,2	1062,6	7,26	57,211	1009,5	17,43
168	1397	213,9	5,44	550	74	0,81	1612,4	1127,0	7,70	59,94	1070,7	18,59
126	1396	214,5	5,47	552	73,6	0,95	1625,8	1136,4	7,77	69,92	1079,6	18,68
84	1394	214,5	5,49	551	72,7	1,17	1631,7	1140,6	7,81	85,059	1083,6	18,78
56	1392	215,3	5,73	550	71,7	1,4	1709,4	1194,9	8,20	100,38	1135,1	19,71
50,4	1391	215,3	5,89	550	71,3	1,67	1757,2	1228,3	8,43	119,071	1166,8	20,26
42	1390	215,6	6,08	550	70,7	1,96	1816,4	1269,6	8,72	138,572	1206,2	20,94
35	1389	215,8	6,45	549	70,3	2,39	1928,7	1348,2	9,27	168,017	1280,7	22,28
33,6	1388	215,6	6,31	549	69,7	2,5	1885,1	1317,7	9,07	174,25	1251,8	21,77
31,5	1387	214	6,44	548	69,4	2,57	1909,6	1334,8	9,19	178,358	1268,1	22,10
28	1386	215,3	6,56	548	68,7	2,83	1957,0	1368,0	9,43	194,421	1299,6	22,65
21	1381	215,7	7,12	546	66,9	3,62	2128,0	1487,5	10,29	242,178	1413,1	24,71
18,66	1379	215,5	7,34	545	65,9	4,81	2191,8	1532,0	10,61	316,979	1455,4	25,50
14	1374	216	8,13	543	63,1	5,1	2433,3	1700,9	11,82	321,81	1615,8	28,42
12,6	1372	215,6	8,28	542	61,6	5,59	2473,6	1729,0	12,03	344,344	1642,6	28,94
10,5	1367	215,8	8,48	541	59,3	6,42	2535,7	1772,5	12,38	380,706	1683,8	29,72
8,4	1363	214,6	9,37	539	55,02	7,45	2786,2	1947,6	13,64	409,899	1850,2	32,78
7	1359	215,6	9,7	537	51,54	8,4	2897,8	2025,6	14,23	432,936	1924,3	34,22
3,5	1349	215,6	10,97	532	34,63	11,4	3277,2	2290,8	16,22	394,782	2176,2	39,06

Fuente: Autores

3.3.3 Resultados de las pruebas segunda etapa

Los resultados concernientes a las pruebas de la etapa 2 son consignados en la tablas 18, 19 y 20, donde todas fueron ejecutadas a 1800 rpm, es decir, con valores nominales.

Al igual que la sección anterior éstas poseen colores distintivos para diferenciar de las variables obtenidas por medio de las pruebas y las adquiridas por medios matemáticos. Los cálculos para estas expresiones son las mismas consignadas en la sección 3.3.2.

Para estas pruebas, a diferencia de las pruebas de la primera etapa, si fueron consignados los valores de la excitación, donde las tablas 18 y 20 muestra las magnitudes de la excitatriz constante durante toda la prueba y la tabla 19 deja observar el comportamiento progresivo del voltaje de excitación con el fin de sostener la tensión de generación.

Tabla 18. Resultados obtenidos segunda etapa a 1800 rpm, procedimiento 1

R (Ω)	Variables medidas							Variables calculadas					
	Motor eléctrico			Generador eléctrico		Excitatriz		Motor eléctrico			Generador eléctrico		
	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Corriente (A)	P _{Eléctrica} (W)	P _{Mecánica} (W)	Par (N - m)	P _{Eléctrica} (W)	P _{mecánica} (W)	Par (N - m)
vacío	1793	218	1,3	124,8	0	11,71	0,68	392,7	274,5	1,46	0	274,5	1,46
252	1789	218,5	1,5	123,8	0,4	11,71	0,75	454,1	317,4	1,69	49,52	317,4	1,69
210	1782	218,5	1,6	124,6	0,5	11,71	0,755	484,4	338,6	1,81	62,3	338,6	1,81
168	1784	217,5	1,7	125,3	0,6	11,71	0,755	512,3	358,1	1,92	75,18	358,1	1,92
126	1784	217,8	1,7	120,3	0,9	11,71	0,733	513,0	358,6	1,92	108,27	358,6	1,92
84	1782	218,3	1,9	117,2	1,4	11,71	0,738	574,7	401,7	2,15	164,08	401,7	2,15
56	1772	217,8	2,2	112	2,1	11,71	0,743	663,9	464,1	2,50	235,2	464,1	2,50
50,4	1768	218,6	2,2	110,5	2,4	11,71	0,745	666,4	465,8	2,52	265,2	465,8	2,52
42	1768	217,7	2,4	110,6	2,9	11,71	0,738	724,0	506,1	2,73	320,74	506,1	2,73
35	1766	218,5	2,5	100,6	3,1	11,71	0,741	756,9	529,1	2,86	311,86	529,1	2,86
33,6	1762	217,9	2,4	95,7	3,1	11,71	0,728	724,6	506,5	2,75	296,67	506,5	2,75
31,5	1742	218,5	2,4	96,6	3,4	11,71	0,736	726,6	507,9	2,78	328,44	507,9	2,78
28	1739	218,3	2,5	93	3,7	11,71	0,737	756,2	528,6	2,90	344,1	528,6	2,90
21	1732	218,2	2,6	81,85	4,1	11,71	0,741	786,1	549,5	3,03	335,585	549,5	3,03
18,66	1727	218,1	2,6	77,1	4,5	11,71	0,752	785,7	549,2	3,04	346,95	549,2	3,04
14	1721	217,1	2,5	64,4	4,9	11,71	0,747	752,1	525,7	2,92	315,56	525,7	2,92
12,6	1715	218	2,6	59,1	4,8	11,71	0,743	785,4	549,0	3,06	283,68	549,0	3,06
10,5	1713	217,8	2,4	51,1	5	11,71	0,737	724,3	506,3	2,82	255,5	506,3	2,82
8,4	1710	218,1	2,3	42,6	5,3	11,71	0,749	695,1	485,9	2,71	225,78	485,9	2,71
7	1707	218,7	2,2	36,6	5,3	11,71	0,744	666,7	466,0	2,61	193,98	466,0	2,61
3,5	1700	219,3	2	18,9	5,5	11,71	0,741	607,7	424,8	2,39	103,95	424,8	2,39

Fuente: Autores

Tabla 19. Resultados obtenidos segunda etapa a 1800 rpm, procedimiento 2

R (Ω)	Variables medidas							Variables calculadas					
	Motor eléctrico			Generador eléctrico		Excitatriz		Motor eléctrico			Generador eléctrico		
	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Corriente (A)	P _{Eléctrica} (W)	P _{mecánica} (W)	Par (N - m)	P _{Eléctrica} (W)	P _{mecánica} (W)	Par (N - m)
vacío	1794	214,18	0,9	120,6	0	10,67	0,662	267,1	186,7	0,99	0	186,7	0,99
252	1786	214,05	1,1	120,38	0,4	10,84	0,685	326,3	228,1	1,22	48,152	228,1	1,22
210	1787	213,57	1,1	120,6	0,5	10,84	0,687	325,5	227,5	1,22	60,3	227,5	1,22
168	1786	214,83	1,2	120,09	0,6	10,89	0,693	357,2	249,7	1,34	72,054	249,7	1,34
126	1784	215,14	1,3	120,02	0,8	11,15	0,707	387,5	270,9	1,45	96,016	270,9	1,45
84	1783	215,54	1,5	120,09	1,4	11,58	0,741	448,0	313,1	1,68	168,126	313,1	1,68
56	1774	214,61	1,8	120	2,2	12,59	0,808	535,3	374,2	2,01	264	374,2	2,01
50,4	1772	214,8	2,1	120,03	2,5	13,07	0,827	625,0	436,9	2,35	300,075	436,9	2,35
42	1769	214,1	2,2	120,05	3	13,65	0,874	652,7	456,2	2,46	360,15	456,2	2,46
35	1761	211,54	2,5	120,06	3,7	14,57	0,932	732,8	512,2	2,78	444,222	512,2	2,78
33,6	1758	211,71	2,6	120,03	3,8	14,85	0,955	762,7	533,1	2,90	456,114	533,1	2,90
31,5	1755	209,81	2,6	120,02	3,9	15,2	0,975	755,9	528,4	2,87	468,078	528,4	2,87
28	1749	210,28	3	120,08	4,6	16,16	1,03	874,1	611,0	3,34	552,368	611,0	3,34
21	1742	209,87	3,9	120,06	6,1	19,06	1,221	1134,1	792,8	4,35	732,366	792,8	4,35
18,66	1725	210,11	4,2	120,06	6,6	20,37	1,306	1222,8	854,7	4,73	792,396	854,7	4,73
14	1673	209,69	6	120,04	9	25,39	1,62	1743,3	1218,6	6,96	1080,36	1218,6	6,96
12,6	1641	211,34	6,9	120,04	10,2	28,54	1,775	2020,6	1412,4	8,22	1224,408	1412,4	8,22
10,5	1630	213,65	6,8	110,07	11,1	29,24	1,831	2013,1	1407,1	8,24	1221,777	1407,1	8,24
8,4	1634	213,94	6,8	94,04	11,7	29,47	1,842	2015,8	1409,1	8,23	1100,268	1409,1	8,23
7	1648	213,69	6,2	81,6	12,3	29,26	1,818	1835,8	1283,2	7,44	1003,68	1283,2	7,44
3,5	1708	215,11	4,4	41,02	11,6	26,96	1,67	1311,5	916,7	5,13	475,832	916,7	5,13

Fuente: Autores

Tabla 20. Resultados obtenidos segunda etapa a 1800 rpm, procedimiento 3

R (Ω)	Variables medidas							Variables calculadas					
	Motor eléctrico			Generador eléctrico		Excitatriz		Motor eléctrico			Generador eléctrico		
	RPM (min^{-1})	Voltaje (V)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Corriente (A)	P _{Eléctrica} (W)	P _{mecánica} (W)	Par (N - m)	P _{Eléctrica} (W)	P _{mecánica} (W)	Par (N - m)
vacío	1784	215,98	1,6	229,79	0	40,139	2,46	478,8	334,7	1,79	0	334,7	1,79
252	1773	216,76	2,4	224,71	0,7	40	2,43	720,8	503,9	2,71	157,297	503,9	2,71
210	1771	216,57	2,4	223,38	0,8	40,2	2,42	720,2	503,4	2,71	178,704	503,4	2,71
168	1768	215,31	2,6	222,14	1	40,2	2,41	775,7	542,2	2,93	222,14	542,2	2,93
126	1760	215,5	2,9	219,54	1,4	40,2	2,39	866,0	605,3	3,28	307,356	605,3	3,28
84	1751	215,63	3,5	215,53	2,1	40,2	2,38	1045,7	731,0	3,99	452,613	731,0	3,99
56	1733	216,16	4,4	209,81	3,4	40,2	2,38	1317,9	921,2	5,08	713,354	921,2	5,08
50,4	1726	216	4,6	207,34	3,8	40,2	2,37	1376,8	962,4	5,32	787,892	962,4	5,32
42	1714	215,6	5,1	203,38	4,4	40,2	2,37	1523,6	1065,0	5,93	894,872	1065,0	5,93
35	1693	216,31	5,9	197,28	5,4	40,2	2,37	1768,4	1236,1	6,97	1065,312	1236,1	6,97
33,6	1690	216,68	6	195,9	5,5	40,2	2,36	1801,4	1259,2	7,12	1077,45	1259,2	7,12
31,5	1658	216,56	6,2	193,47	5,8	40,2	2,36	1860,5	1300,5	7,49	1122,126	1300,5	7,49
28	1657	215,3	6,8	188,91	6,5	40,2	2,35	2028,6	1418,0	8,17	1227,915	1418,0	8,17
21	1625	215,72	8	177,6	7,9	40,2	2,35	2391,3	1671,5	9,82	1403,04	1671,5	9,82
18,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Autores

3.3.4 Resultados de las pruebas tercera etapa

Como se nombró anteriormente con el fin de confirmar los resultados obtenidos con los equipos de medición en las dos etapas previas se hizo uso del equipo de medición de calidad de energía, no se anexan los resultados obtenidos debido a que el equipo se configuró para registrar valores como corriente, voltaje, potencia, frecuencia, factor de potencia entre otros, cada medio segundo y cada prueba registra una duración aproximada de 11 minutos, por lo cual se obtiene aproximadamente 650 datos para cada variable física.

Para esta prueba se carga el sistema de igual manera que en las dos etapas previas, se realiza en el módulo de vibraciones cuando tiene la caja de engranajes acoplada y la segunda sin acoplar.

Posteriormente se presenta las gráficas de los resultados obtenidos en esta prueba, exponiendo el comportamiento del módulo para diferentes condiciones de carga.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se elabora el estudio detallado de los resultados obtenidos para conocer el comportamiento del módulo frente a las condiciones de operación aplicadas anteriormente y una manera de hacer esto es mediante la construcción de gráficas y se realiza etapa por etapa.

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PRIMERA ETAPA

Para el análisis de los resultados es indispensable traducir los valores de las tablas descritas anteriormente en el plano cartesiano, donde se relacionen las variables más relevantes, como es el caso de las resistencias eléctricas, el par mecánico existente en la entrada del generador, la corriente que fluye por el conjunto resistivo y la potencia consumida del módulo de vibraciones mecánicas.

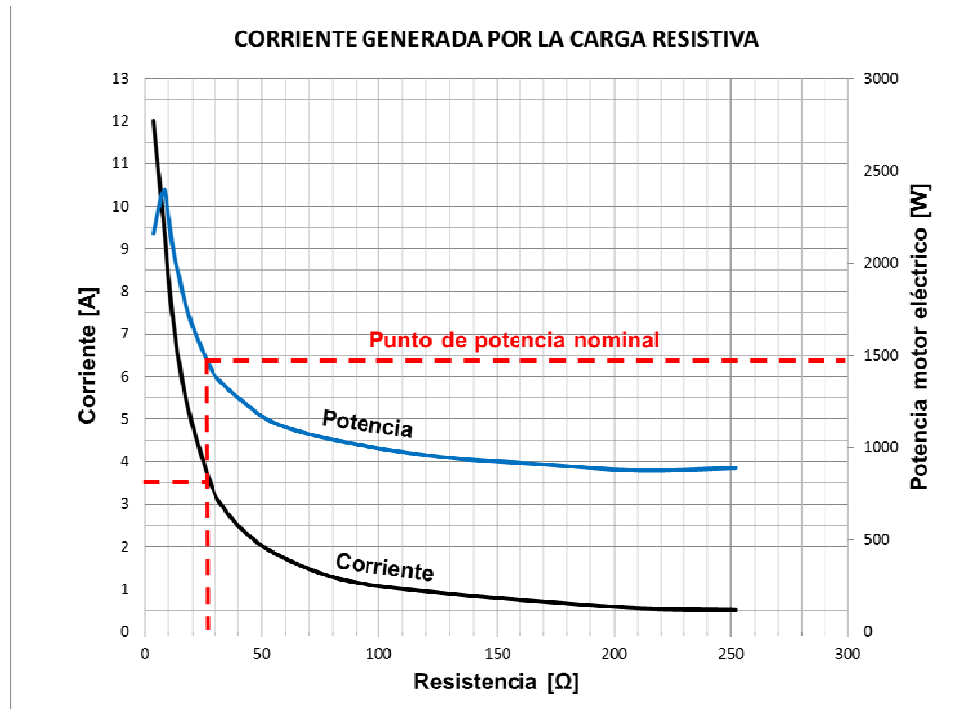
Las resistencias eléctricas son las que condicionan el funcionamiento del módulo y ese es el propósito del proyecto, lograr caracterizarlo para una serie de cargas resistivas aplicadas.

El uso de un sistema resistivo trae como consecuencia la alteración de otras variables como es el caso de la corriente, la cual aumenta progresivamente conforme disminuye la resistencia aplicada. También sucede lo mismo con el par de entrada al generador, porque éste crece significativamente para vencer el par eléctrico existente en el interior del generador (par producido por el campo magnético presente en el estator y en sentido opuesto al movimiento giratorio del rotor), producido por el aumento de corriente.

4.1.1 Gráficas de la primera etapa a 1800 min^{-1}

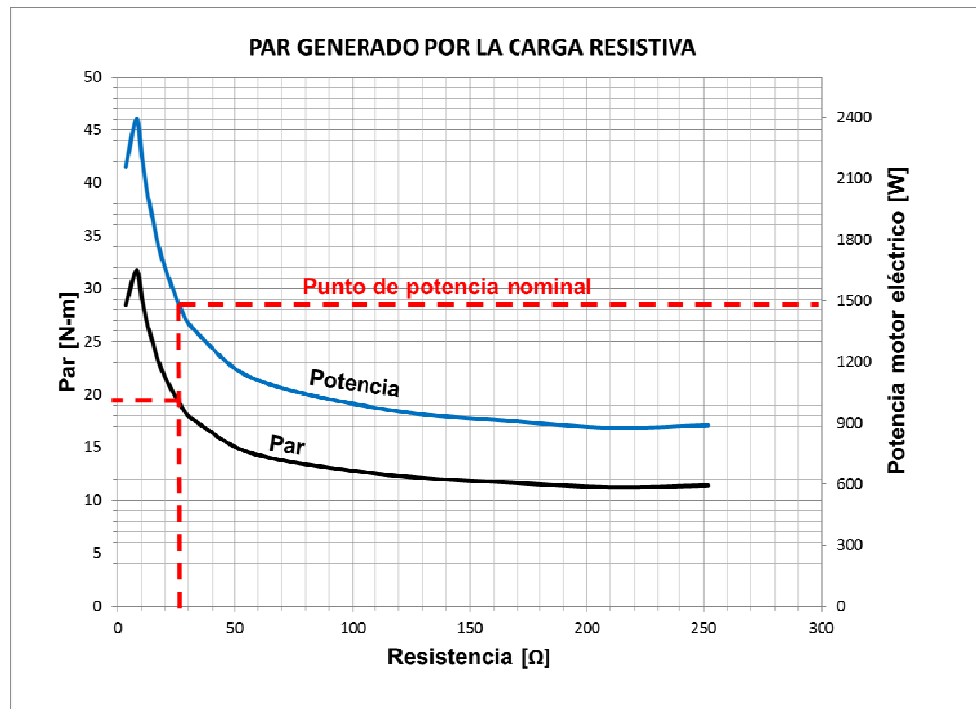
A continuación se expondrá el comportamiento del módulo de vibraciones mecánicas correspondiente a la prueba de la primera etapa a 1800 min^{-1} .

Figura 53. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1800 min⁻¹ - Corriente vs Resistencia



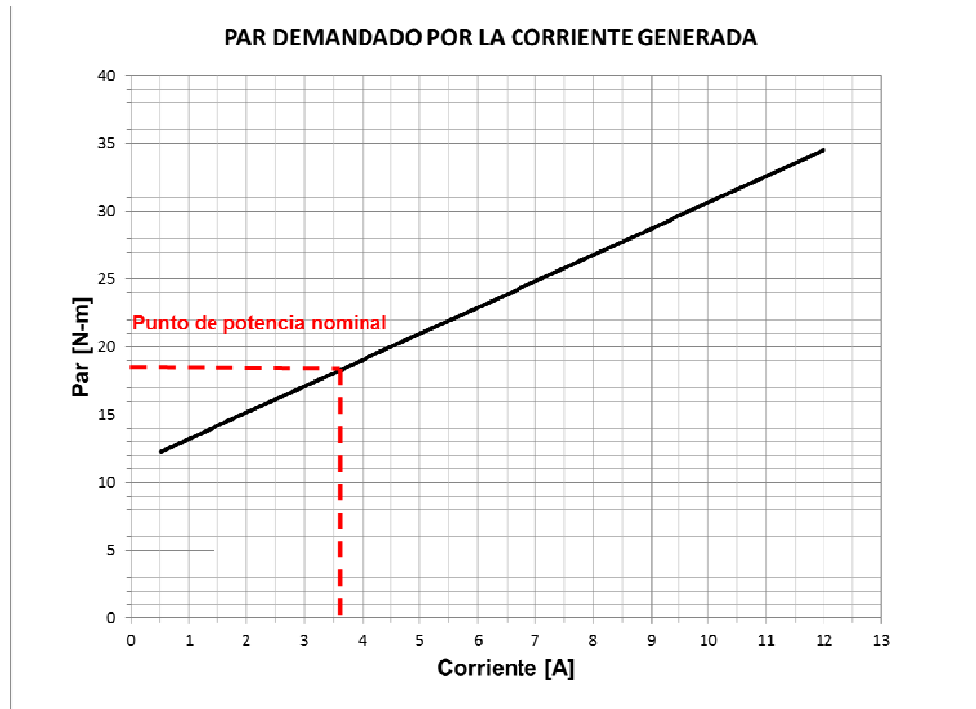
Fuente: Autores

Figura 54. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1800 min⁻¹ - Par vs Resistencia



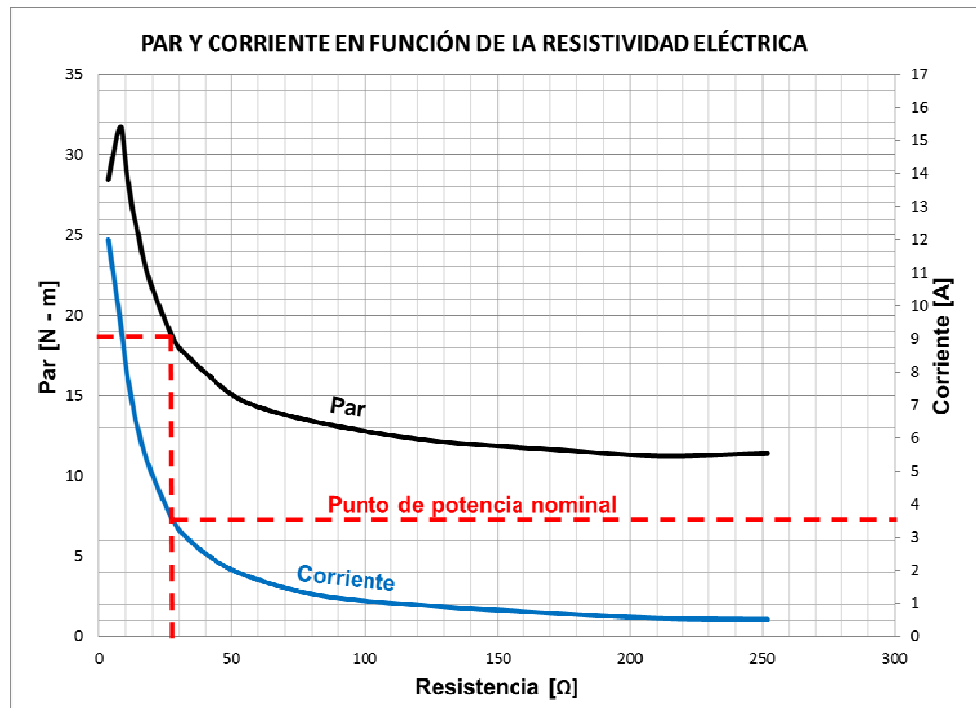
Fuente: Autores

Figura 55. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1800 min⁻¹ - Par vs Corriente



Fuente: Autores

Figura 56. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1800 min⁻¹ - Par y corriente vs Resistencia



Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 53 la corriente permanece relativamente constante hasta el 60% de la carga resistiva, es decir hasta los 100 Ω , pero una vez superado este valor la corriente presenta un incremento considerable en los 50 Ω en adelante, lo que corresponde a más del 80 % de la carga.

De la figura 53, se puede observar una línea punteada, la cual indica el límite de operación del motor eléctrico, es decir, hasta donde se recomienda operar el equipo. Si se parte desde la carga aplicada, la cual se puede manipular, y se proyecta una línea paralela al eje Y cortando las curvas, se puede conocer los valores de potencia mecánica entregada por el motor eléctrico y la corriente eléctrica generada.

También se puede divisar en la línea azul, la cual corresponde a la curva de potencia del motor, una caída cuando el valor de resistencia es mínimo y esto sucede a que existe una disminución de potencia en el generador eléctrico, causado por la disminución de la tensión generada (ver tabla 15).

En la figura 54 se visualiza el diagrama de par y potencia vs resistencia y, al igual que el diagrama de la figura 53 el par presenta el mismo comportamiento respecto a la variación de carga resistiva, donde éste también aumenta considerablemente cuando se aplica más del 80 % de la carga neta del banco resistivo. La caída del par cuando se aplica magnitudes pequeñas de resistencia sucede debido al par eléctrico generado por el flujo de corriente en el generador eléctrico.

En la figura 55 se puede observar que el gráfico del comportamiento del par demandado por la corriente eléctrica generada, presenta una relación lineal, esto debido a que ambas variables físicas poseen el mismo comportamiento cuando se varía la aplicación de la carga resistiva. De igual manera se utiliza la línea punteada para delimitar la potencia nominal del motor eléctrico.

Finalmente en la figura 56 se consigna las curvas de las figuras 53 y 54 en una sola, con el fin de dar una mejor comprensión. Al mismo tiempo se representa con la línea punteada los valores de par y corriente a potencia nominal.

Como se pudo observar para esta primera prueba, siempre se resaltó la potencia nominal y esto se hizo porque el motor es el ente generador de potencia, lo cual limita funcionamiento del módulo, es decir, la máxima potencia mecánica que entrega es de 1492 W lo que significa que no es aconsejable superar este valor.

A continuación se presenta las expresiones matemáticas que modela el sistema y a su vez describe el comportamiento de éste, para la prueba de la primera etapa a 1800 min^{-1} , esto se logra mediante una regresión potencial de los puntos que describen las curvas.

Las ecuaciones matemáticas obtenidas se encuentran en función de la carga resistiva aplicada al módulo, al variar esta magnitud física se puede obtener la corriente generada, el torque en la entrada del generador y la potencia mecánica demanda por el motor, igualmente se presenta una ecuación mediante una regresión lineal del torque en función de la corriente generada, estas son:

$$I_{1800} = 49,88 \cdot R^{-0,820} \text{ [A]}$$

$$T_{1800} = 50,89 \cdot R^{-0,288} \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

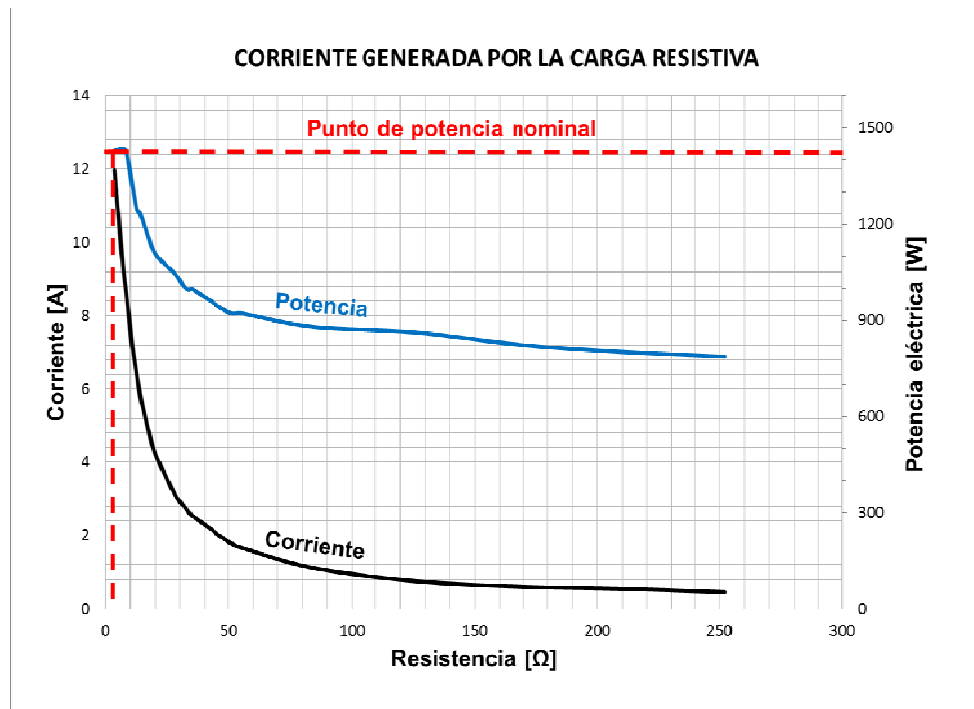
$$P_{1800} = 3798,50 \cdot R^{-0,279} \text{ [W]}$$

$$T_{1800} = 1,94 \cdot I + 11,29 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

4.1.2 Gráficas de la primera etapa a 1600 min^{-1}

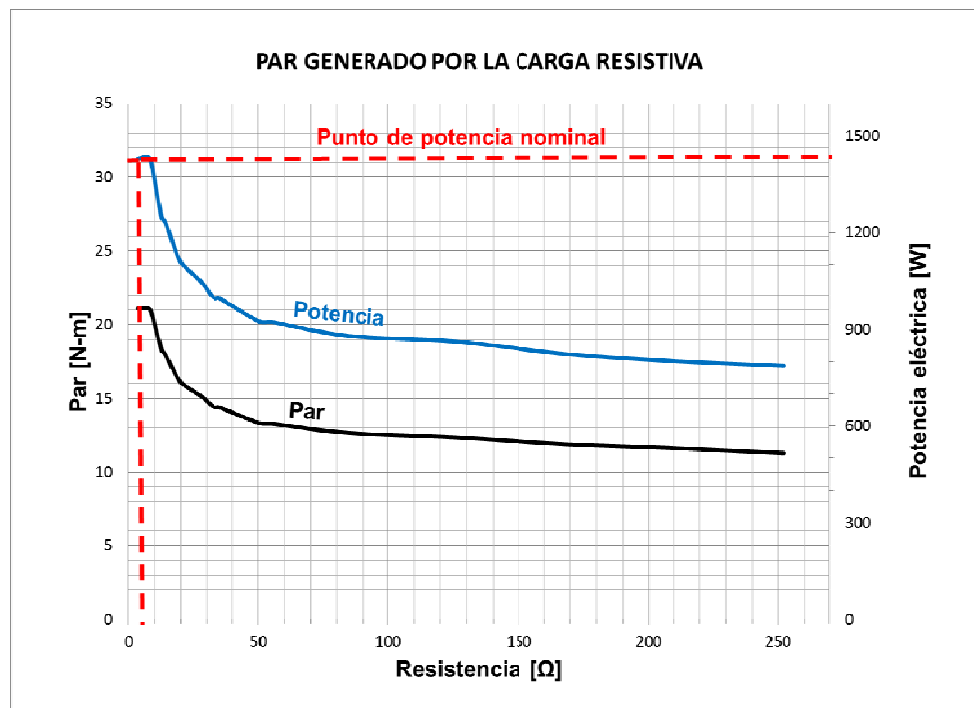
A continuación se presenta el comportamiento del módulo a 1600 min^{-1} .

Figura 57. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1600 min⁻¹ – Corriente vs resistencia eléctrica



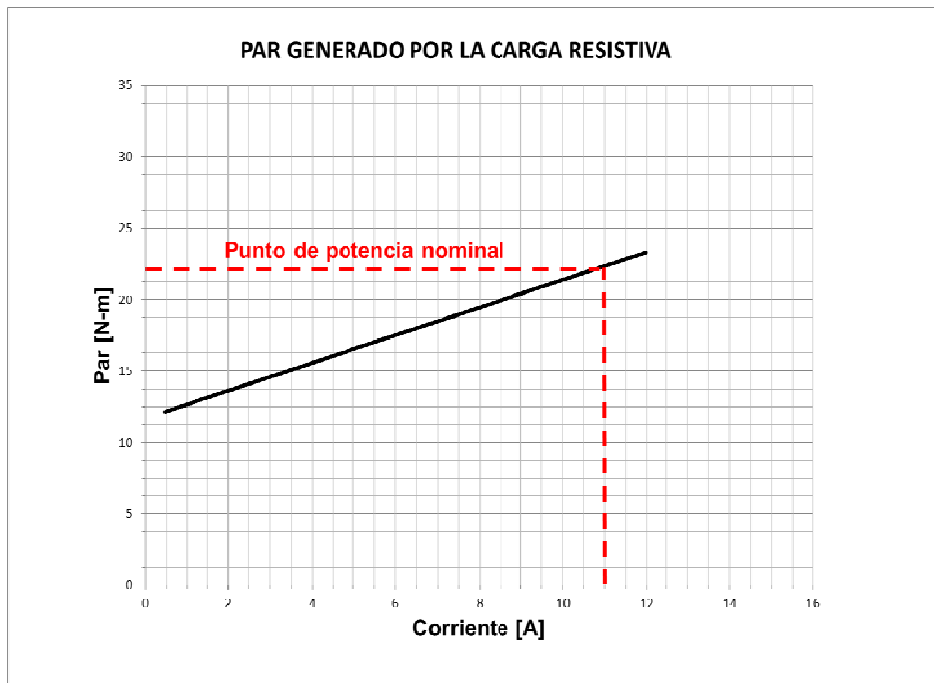
Fuente: Autores

Figura 58. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1600 min⁻¹ – Par vs Resistencia eléctrica



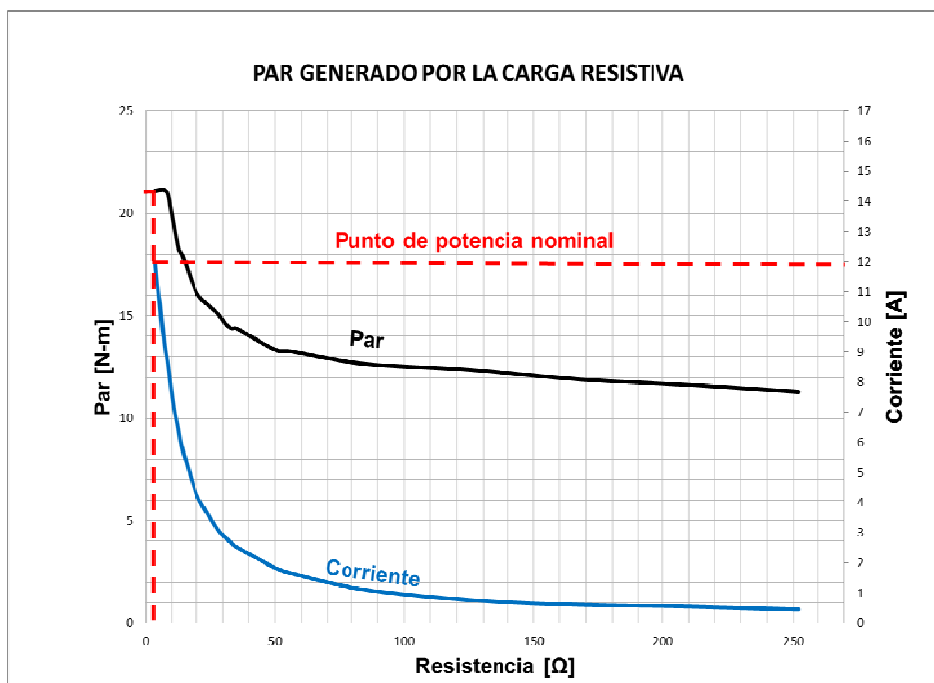
Fuente: Autores

Figura 59. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1600 min⁻¹ – Par vs Corriente eléctrica



Fuente: Autores

Figura 60. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1600 min⁻¹ – Par y Corriente vs Resistencia eléctrica



Fuente: Autores

El comportamiento del módulo trabajando a 1600 min^{-1} respecto a la prueba elaborada a velocidad nominal presenta una diferencia representativa, y es que opera por debajo del punto de potencia nominal, es decir, que no se obtuvieron valores por encima de esta referencia como se puede ver en las figuras 57, 58, 59 y 60.

Claramente se puede observar en la figura 58 el incremento de corriente y potencia cuando el modulo se encuentra cargado en un 80 % de la carga resistiva total, a tal punto de casi intersectarse sobre el punto de potencia nominal e inferior al 60 % de carga resistiva aplicada, se comporta casi constante la magnitud de estas dos variables.

Se puede observar en la figura 58 la similitud en el comportamiento de las curvas de potencia y par, también se observa como éstas no sobrepasan el punto de potencia nominal.

El par respecto a la corriente generada presenta un comportamiento lineal como se puede observar en la figura 59 y no presenta cambio respecto al comportamiento obtenido en la prueba a velocidad nominal.

En la figura 60 se muestra la consigna de las gráficas 57 y 58 para esta prueba a 1600 min^{-1} y se puede observar como el par sobresale tomando algunos valores de potencia por encima de la nominal.

Consecutivamente se presentan las ecuaciones matemáticas que describen la conducta del módulo de vibraciones mecánicas, haciendo uso de la regresión potencial de los puntos de las curvas obtenidas en las gráficas y las variables físicas ya conocidas, del mismo modo en que se obtuvieron para la prueba a velocidad nominal.

$$I_{1600} = 48,20 \cdot R^{-0,837} \text{ [A]}$$

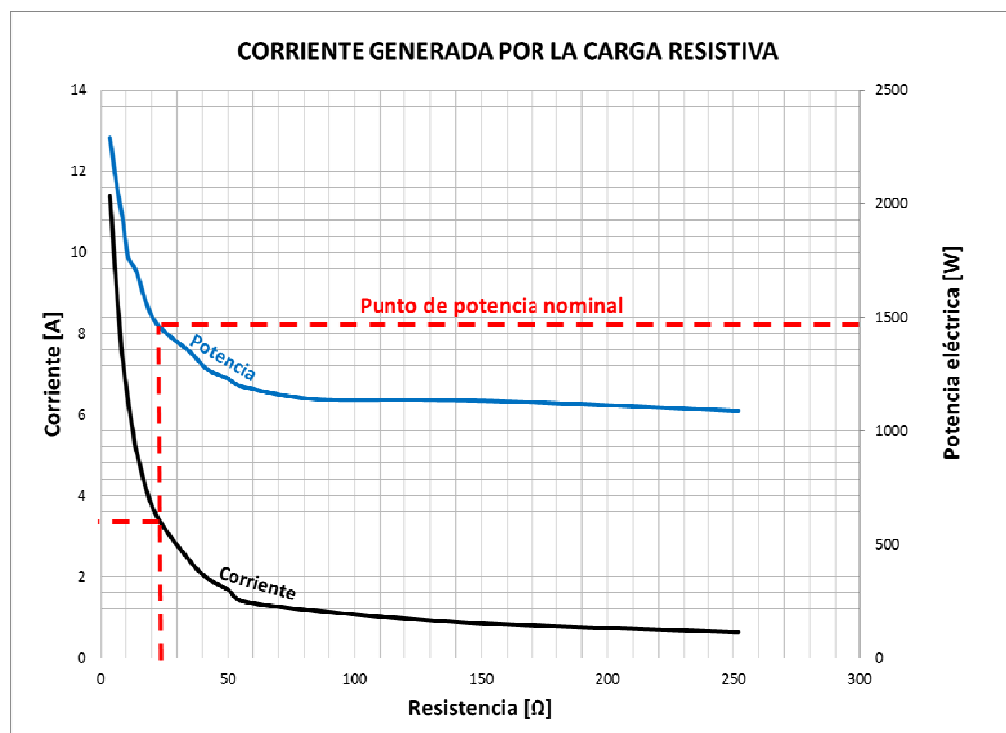
$$T_{1600} = 27,45 \cdot R^{-0,169} \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

De igual manera se presenta Una regresión lineal para determinar el par en el generador debido a la corriente generada.

4.1.3 Gráficas de la primera etapa a 1400 min^{-1}

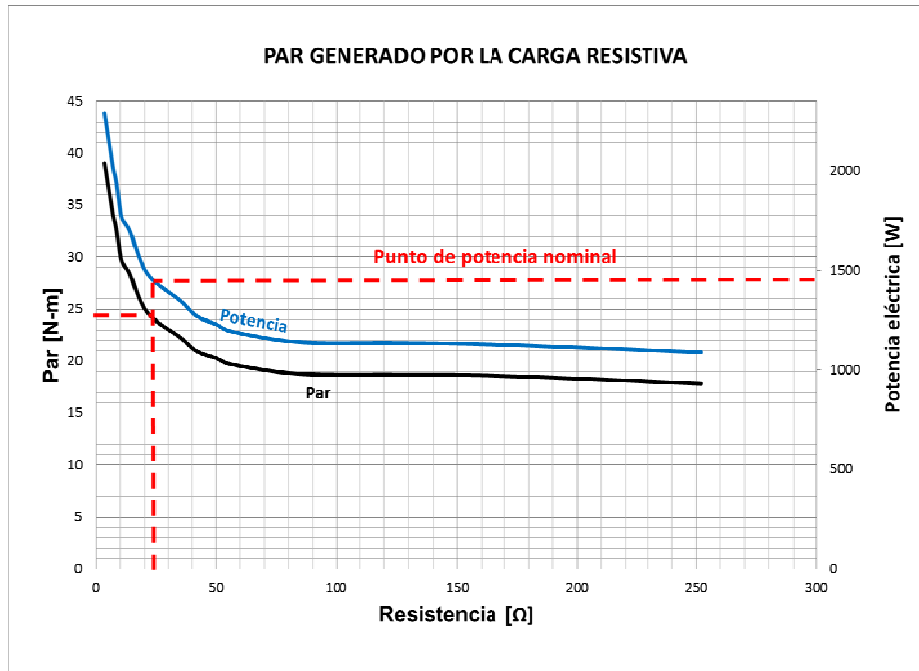
Por último se tiene la prueba a 1400 min^{-1} dentro de la primera etapa, a continuación se presentan sus respectivas gráficas y ecuaciones que describen el comportamiento del módulo de vibraciones mecánicas.

Figura 61. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1400 min^{-1} – Corriente vs Resistencia eléctrica



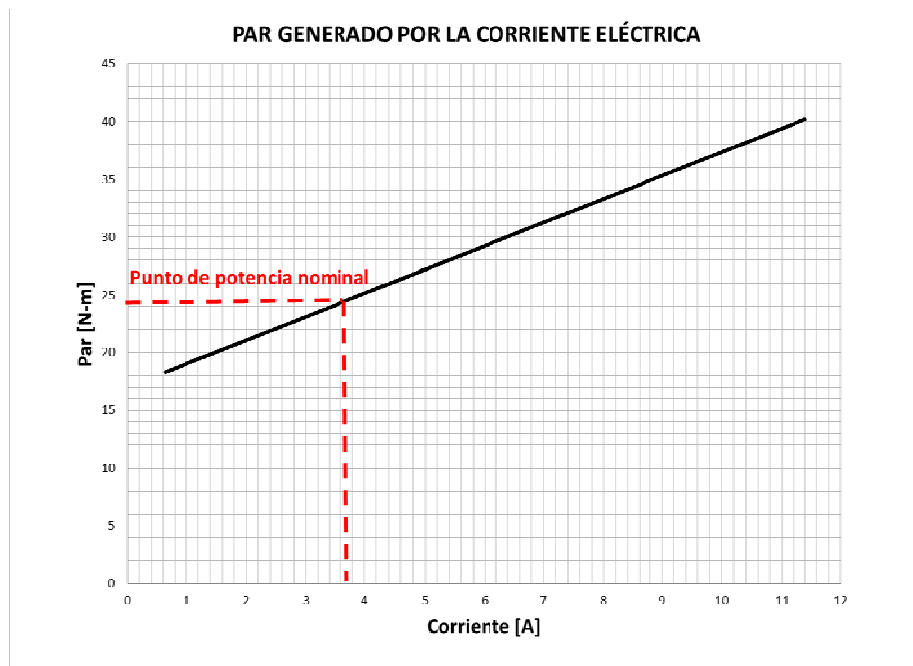
Fuente: Autores

Figura 62. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1400 min⁻¹ – Par vs Resistencia eléctrica



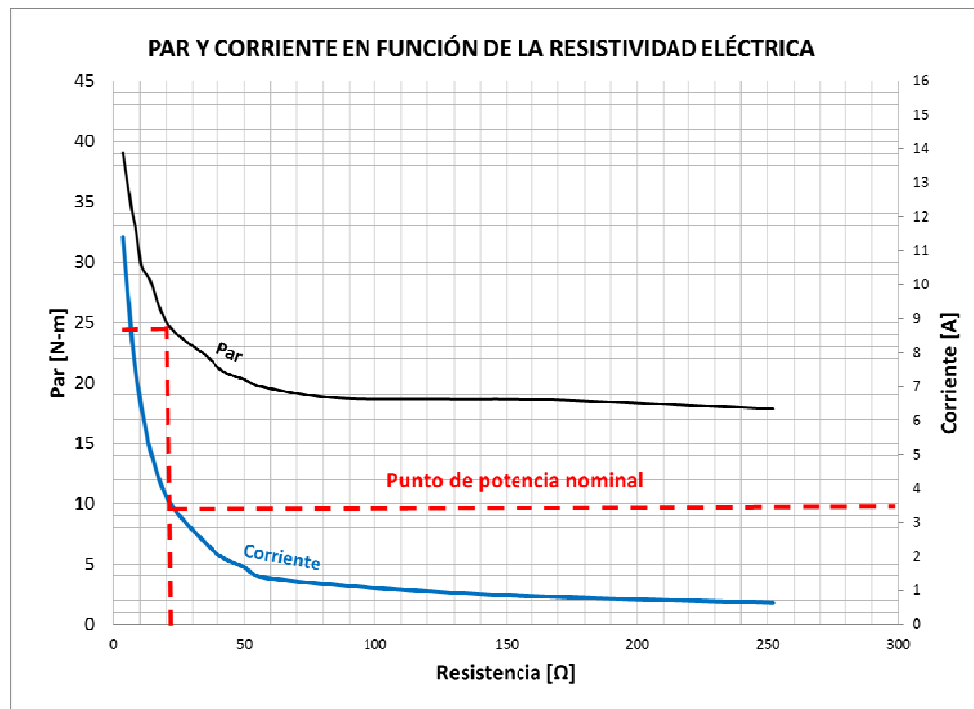
Fuente: Autores

Figura 63. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1400 min⁻¹ – Par vs Corriente eléctrica



Fuente: Autores

Figura 64. Gráfica pruebas 1^{ra} etapa a 1400 min⁻¹ – Par y Corriente vs Resistencia eléctrica



Fuente: Autores

El comportamiento de las gráficas correspondientes a las figuras 61, 62, 63 y 64 es completamente similar al de las gráficas obtenidas con las pruebas a 1800 min⁻¹ y a 1600 min⁻¹, claro está las magnitudes obtenidas durante la operación son completamente diferentes para las tres pruebas que conforman la primera etapa.

Haciendo uso de las regresiones potenciales y lineales se obtiene las ecuaciones matemáticas que describen las pruebas a 1400 min⁻¹, éstas son:

Finalmente se emplea la regresión lineal para determinar el par a la salida del generador debido a la corriente generada.

$$T_{1400} = 2,03 \cdot I + 17,01 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

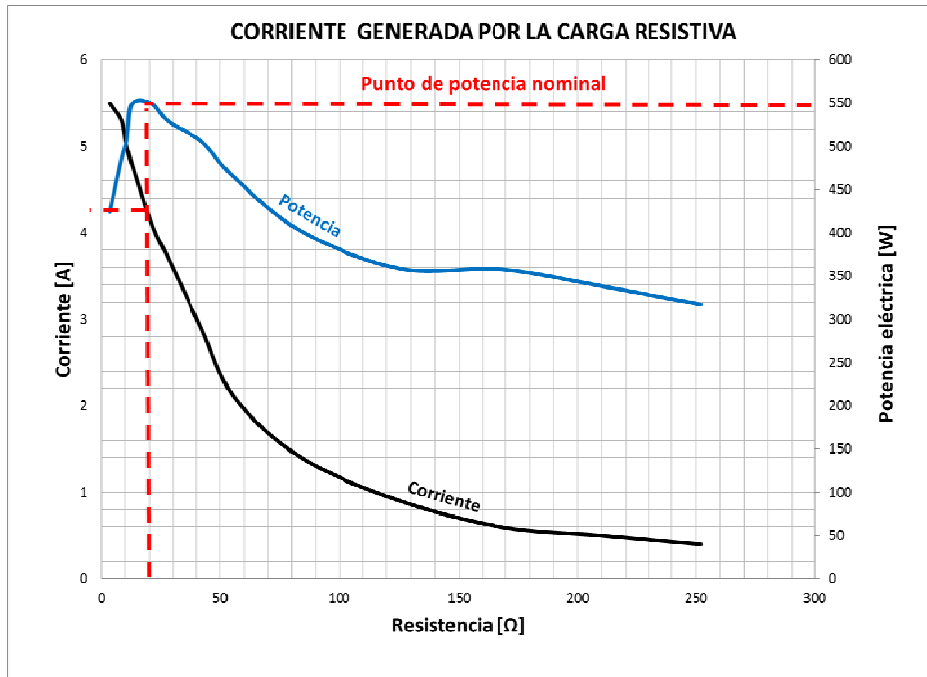
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGUNDA ETAPA

Una vez obtenidos y analizados los resultados de la primera etapa, se procede a realizar las pruebas correspondientes a la segunda etapa, cuya finalidad es operar el generador eléctrico en condiciones nominales y ésta se desprende en tres procedimientos, los cuales difieren únicamente en la manera en que se excita el generador eléctrico. De igual modo haciendo uso de variables físicas como voltajes, corrientes y velocidades de operación se construirá las gráficas y ecuaciones matemáticas correspondientes para definir el comportamiento de éste ante estas nuevas condiciones de operación.

4.2.1 Gráficas de la segunda etapa, procedimiento 1

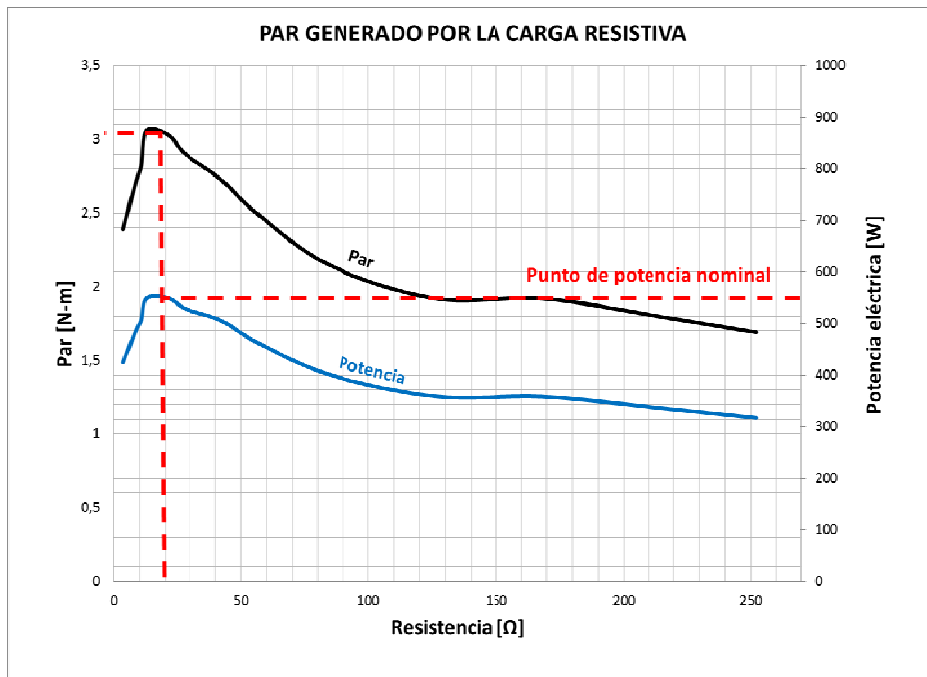
La condición de operación de esta prueba es: Voltaje de excitación igual 11,71 V, el cual es constante para generar aproximadamente 120 V y éste caerá por la acción de aumentar la carga.

Figura 65. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 1 – Corriente vs Resistencia eléctrica



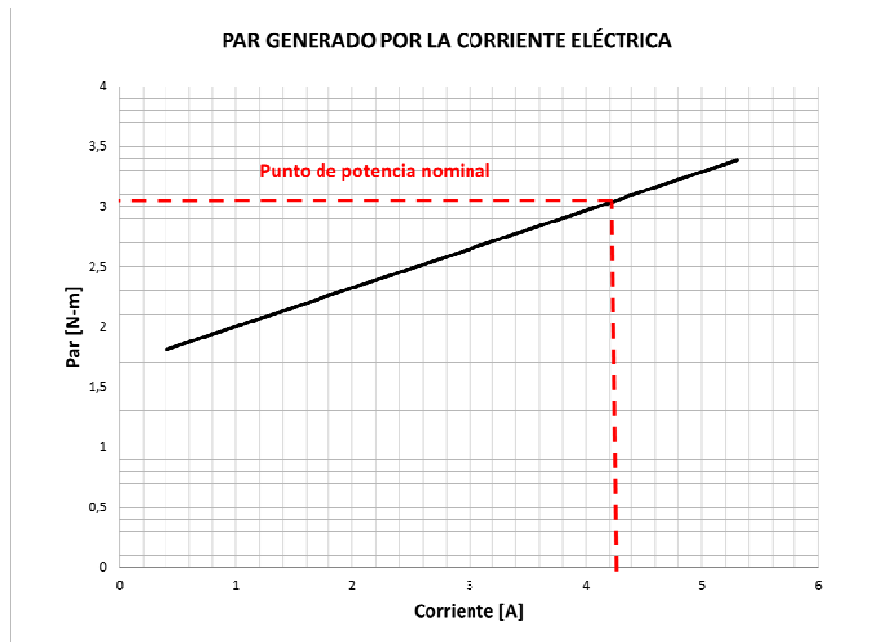
Fuente: Autores

Figura 66. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 1 – Par vs Resistencia eléctrica



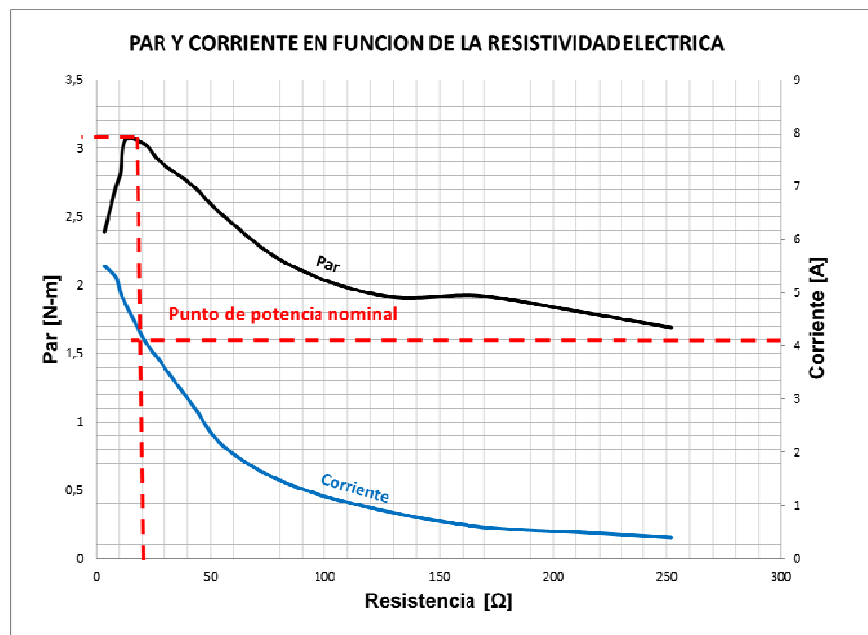
Fuente: Autores

Figura 67. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 1 – Par vs corriente eléctrica



Fuente: Autores

Figura 68. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 1 – Par y corriente vs resistencia eléctrica



Fuente: Autores

En la figura 65 correspondiente a la gráfica de la corriente generada por la carga resistiva, se puede observar claramente cual baja es la potencia consumida por el motor eléctrico, la cual se encuentra alrededor de los 550 W, esto debido a que la excitación no es lo suficientemente grande para generar potencia y ayudar a cargar el sistema, además de que no basta solo con la potencia mecánica entregada por el motor, es decir, no opera a condiciones nominales respecto a la excitatriz.

Otra variable que se ve afectada a causa de la excitatriz es el par en el sistema, en la figura 66 se puede ver que es de aproximadamente 3 N·m, magnitud muy baja si se compara con los obtenidos en la primera etapa, de igual manera se debe tener en cuenta que la caja reductora es causante principal del aumento del par en la transmisión de potencia.

En la figura 67 correspondiente al par en función de la corriente se puede observar que la relación sigue siendo lineal, con una magnitud de corriente generada muy baja, debido a la caída de tensión generada a causa de la fuente de excitación.

Finalmente se tiene la figura 68 en la cual se consignan las gráficas de las figuras 65 y 66, se observa que el comportamiento de las dos curvas es muy similar cuando aumenta la carga resistiva aplicada, lo cual sucedía también en la primera etapa, esta muestra claramente el incremento en la corriente y en el par cuando el sistema se encuentra cargado en un 60 % de su carga total, 20% más prematuro respecto a las condiciones de la primera etapa.

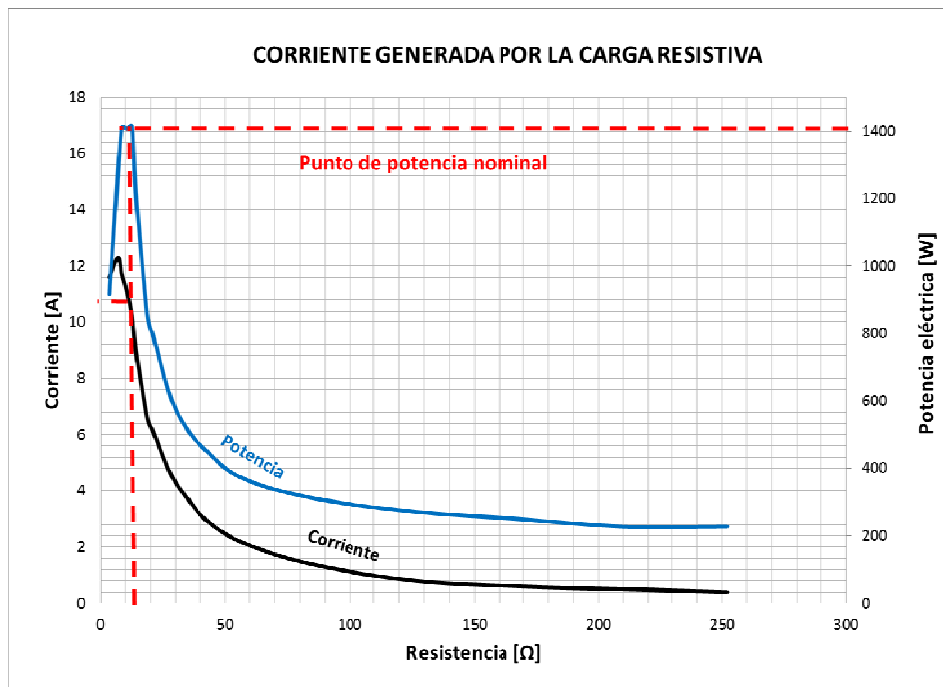
En definitiva el factor principal que afecta los resultados en esta prueba es la magnitud de la excitación, es muy baja y por tal motivo el generador eléctrico no opera bajo condiciones nominales así se encuentre sometido a 1800 min^{-1} , el valor nominal y máximo permitido para excitar el equipo es de 40 V y 2 A de voltaje y corriente respectivamente. A continuación se presentan las expresiones matemáticas que representan el comportamiento del módulo haciendo uso de las regresiones potenciales y lineales.

Se emplea la regresión lineal para determinar el par a la salida del generador debido a la corriente generada.

4.2.2 Gráficas de la segunda etapa, procedimiento 2

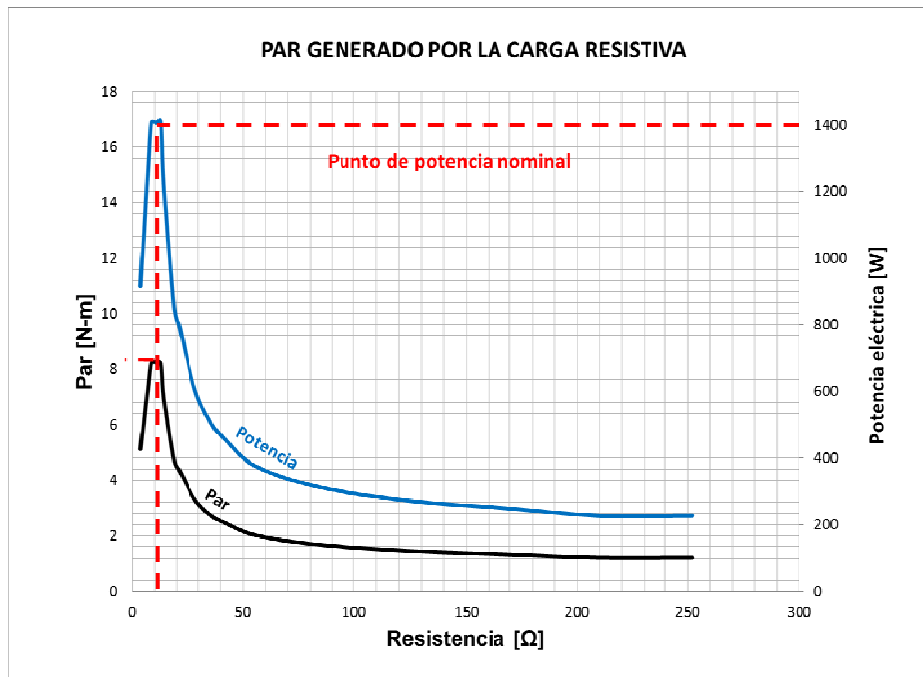
Se presenta a continuación el análisis de los resultados del procedimiento dos, cuya condición de operación consiste en variar la fuente de excitación para obtener 120 V generados de manera constante e intentar sostenerlo hasta donde lo permita la fuente que este valor no decrezca.

Figura 69. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 2 – Corriente vs Resistencia eléctrica



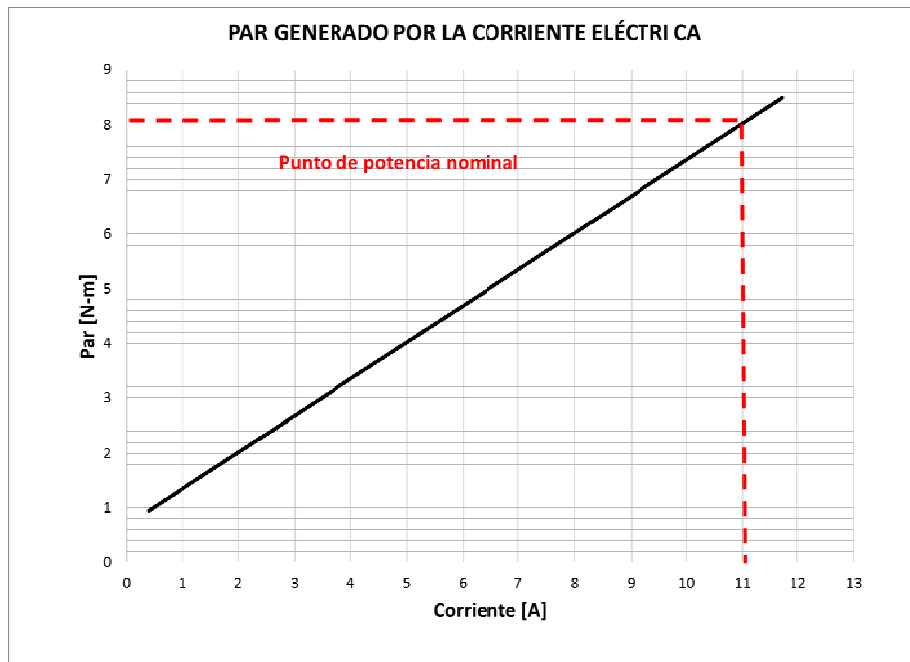
Fuente: Autores

Figura 70. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 2 – Par vs Resistencia eléctrica



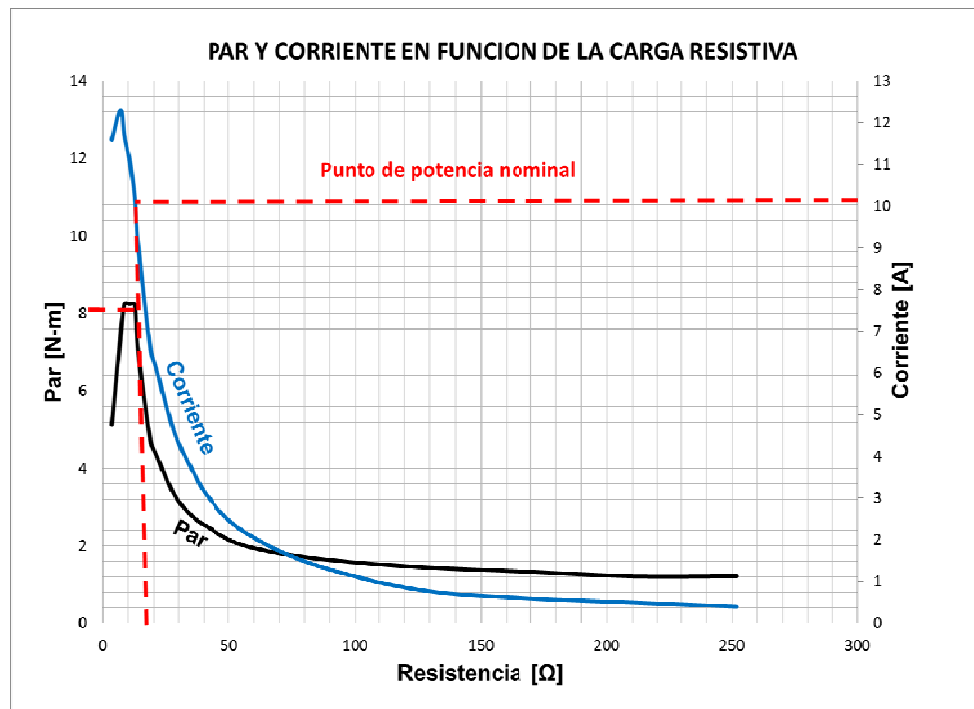
Fuente: Autores

Figura 71. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 2 – Par vs corriente eléctrica



Fuente: Autores

Figura 72. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 2 – Par y corriente vs resistencia eléctrica



Fuente: Autores

Como se puede ver en la figura 69 el módulo bajo estas condiciones demanda una mayor potencia respecto al procedimiento 1 de la etapa en curso, la potencia y la corriente presentan un incremento considerable cuando el módulo se encuentra cargado resistivamente en un 80 %, este último resultado similar a los obtenidos en la primera etapa, pero alejado del procedimiento 1 de la etapa en curso.

Tanto en la figura 70 como en la figura 69 se presentan caídas súbitas de potencia y por ende de par cuando se trata de sobrepasar en el módulo la potencia nominal demandada por el motor, esto se debe gracias a la caída de tensión generada. Existe un momento cuando la tensión generada cae y no se logra sostener sólo con la excitatriz, debido a situaciones como elevaciones de corriente en el motor o por que la fuente de excitación no permite elevar el voltaje de excitación, no se persiste en el sostenimiento para preservar los equipos.

En la figura 71 correspondiente al par en función de la corriente, se obtuvo una relación lineal, característica hasta el momento en la totalidad de las pruebas realizadas.

En la figura 72 se observa la gráfica del torque y la corriente en función de la carga resistiva, posee un incremento importante de estas dos variables cuando el modulo se encuentra cargado en un 80 %. Tampoco se está operando el módulo en condiciones nominales de excitación por ende las pérdidas de potencia generada.

Posteriormente haciendo uso de las regresiones potenciales y lineales se procede a determinar las ecuaciones que rigen el comportamiento del módulo para esta prueba, éstas son:

$$I = 83,39 \cdot R^{-0,927} \text{ [A]}$$

$$T = 20,70 \cdot R^{-0,531} \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$P = 3460,60 \cdot R^{-0,508} \text{ [W]}$$

Se emplea finalmente la regresión lineal para determinar el torque a la salida del generador debido a la corriente generada.

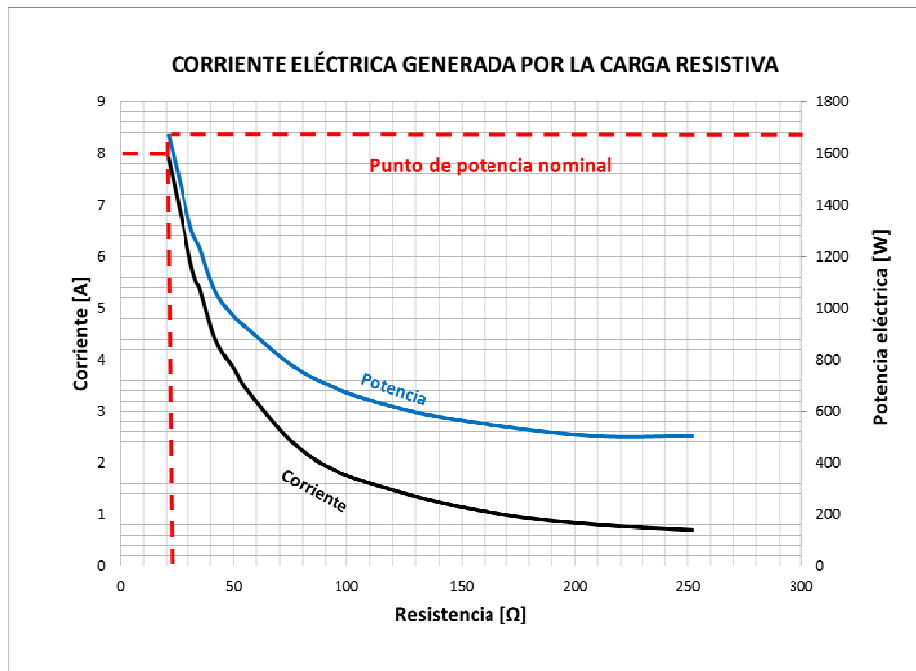
$$T = 0,70 \cdot I + 0,68 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

4.2.3 Gráficas de la segunda etapa, procedimiento 3

Se llega a la última prueba de la etapa en curso, la cual consiste en operar el generador eléctrico en condiciones nominales tanto de excitación como de frecuencia de operación es decir 40 V y 1800 min⁻¹ respectivamente.

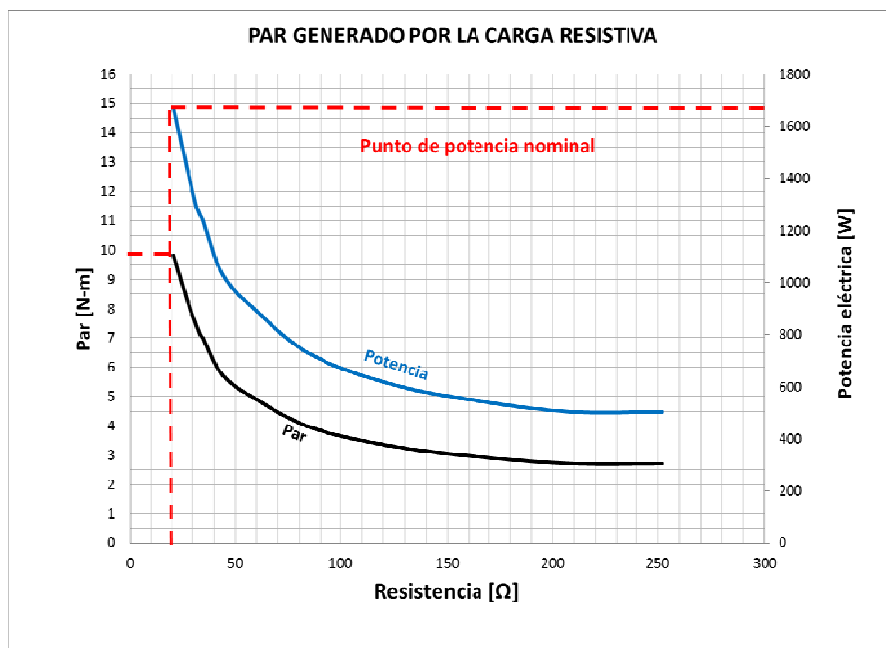
A continuación se presentan las gráficas obtenidas y sus respectivas expresiones matemáticas que las describen y rigen su comportamiento.

Figura 73. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 3 – Corriente vs Resistencia eléctrica



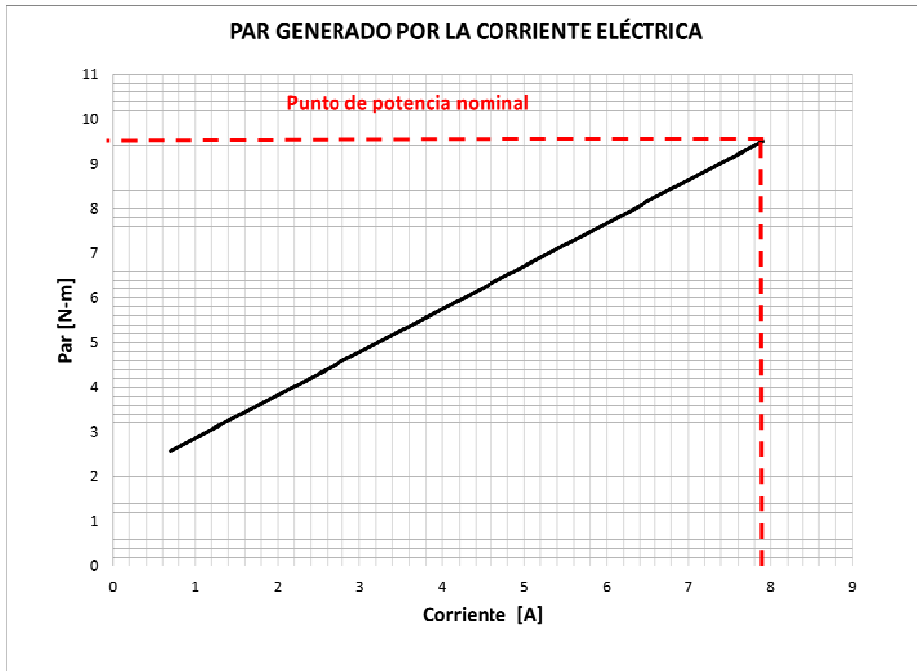
Fuente: Autores

Figura 74. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 3 – Torque vs Resistencia eléctrica



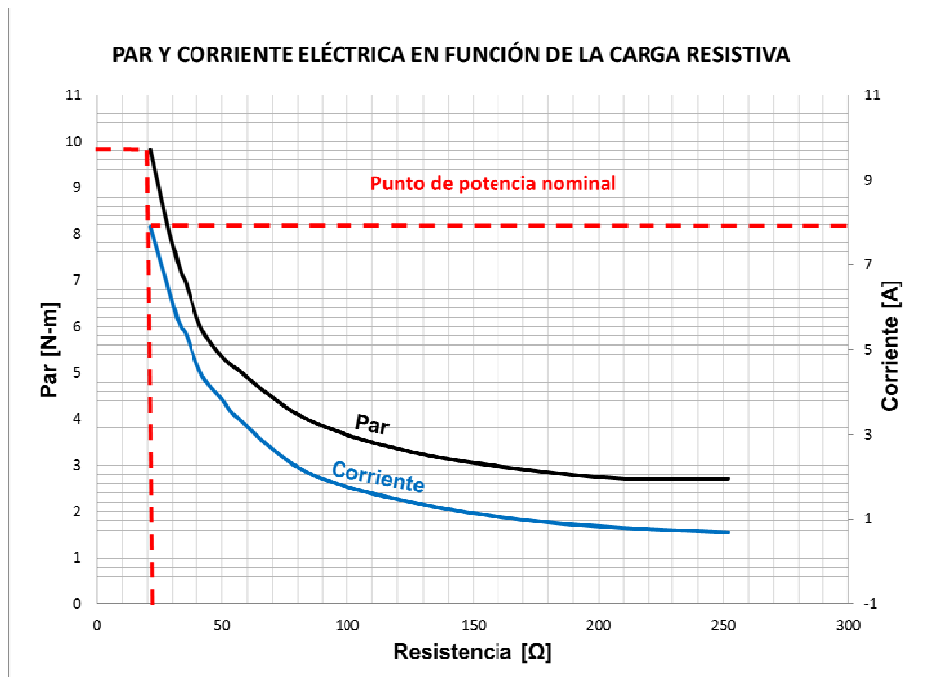
Fuente: Autores

Figura 75. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 3 – Par vs corriente eléctrica



Fuente: Autores

Figura 76. Gráfica pruebas 2^{da} etapa a 1800 min⁻¹ procedimiento 3 – Par y corriente vs resistencia eléctrica



Fuente: Autores.

Claramente se observa en las figuras 73, 74, 75 y 76 un claro comportamiento del módulo cuando se encuentra en plena carga, operando a potencia y par del motor eléctrico. Las potencias de operación obtenidas en esta prueba son mucho mayores que las de los dos procedimientos anteriores de la etapa en curso, esto se debe a las condiciones de operación aplicadas en esta prueba las cuales son nominales. Por lo cual se puede decir que en caso de operar con la caja reductora de engranajes con una relación $i=1$ se aplique las condiciones de operación nominales 40 V de excitación y 1800 min^{-1} para tener confiabilidad en la operación del módulo.

A continuación se presentan las ecuaciones que rigen el comportamiento del módulo para esta condición de operación, estas son:

$$I = 199,04 \cdot R^{-1,025} \text{ [A]}$$

$$T = 46,07 \cdot R^{-0,534} \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$P = 7249 \cdot R^{-0,502} \text{ [W]}$$

Se emplea finalmente la regresión lineal para determinar el par a la salida del generador debido a la corriente generada.

$$T = 0,96 \cdot I + 1,90 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

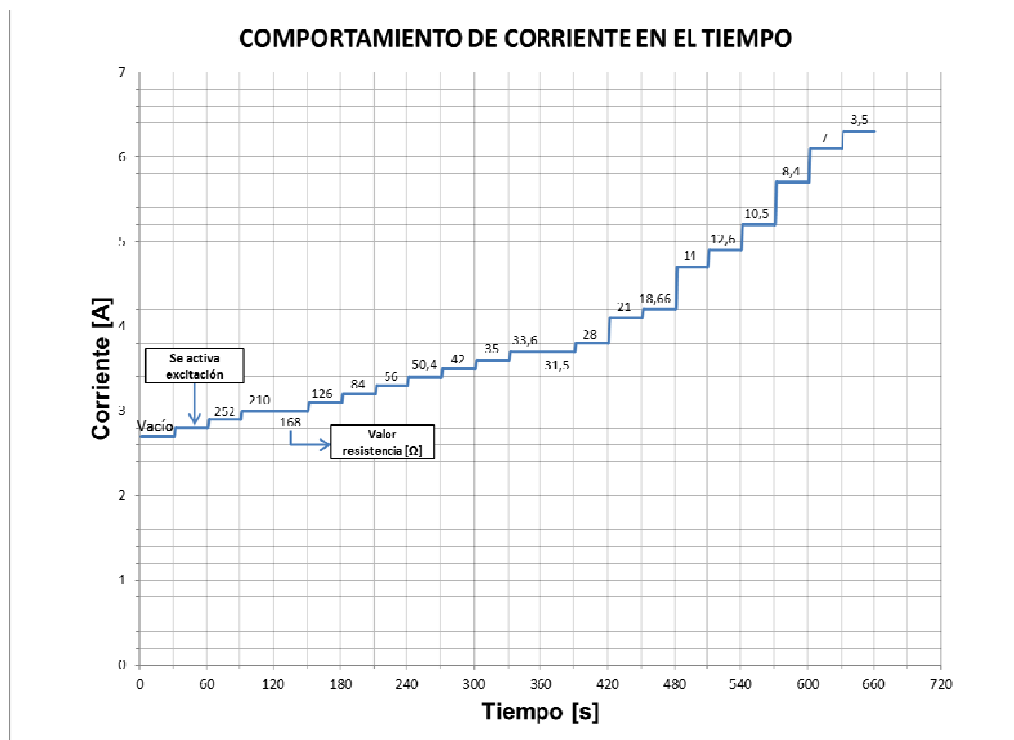
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS TERCERA ETAPA

Se divide en dos procedimientos, el primero con la caja de engranajes acoplada y el segundo sin acoplar ésta. Luego se presentará el comportamiento de variables físicas como voltaje, corriente y potencia en función del tiempo y se podrá ver la variación de estas a medida que se carga resistivamente el módulo.

4.3.1 Gráficas tercera etapa, caja de engranajes acoplada

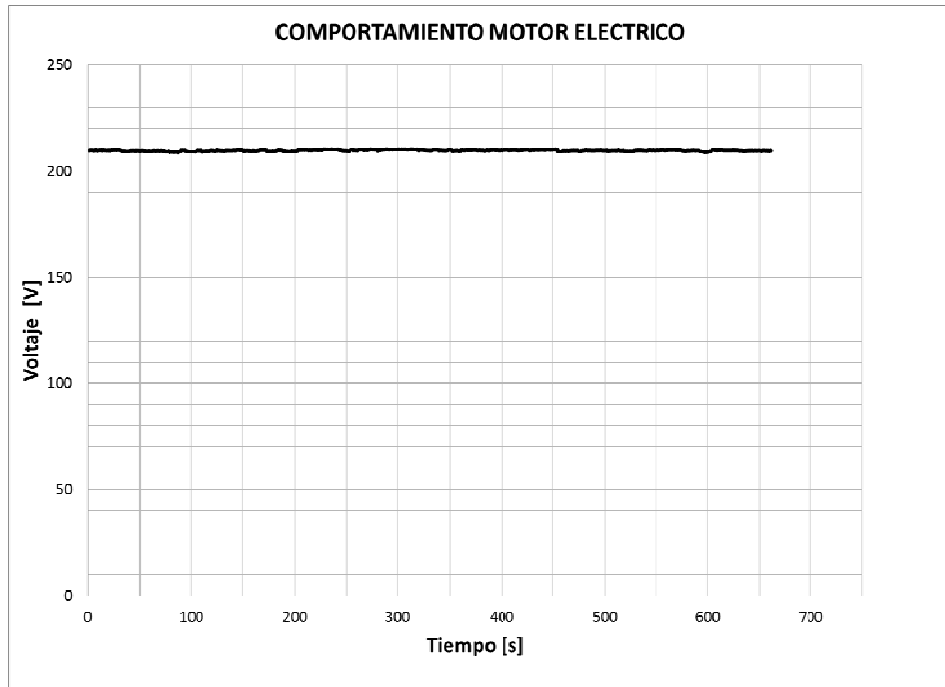
A continuación se presenta el comportamiento del módulo de vibraciones mecánicas, cuyas variables físicas fueron arrojadas por el equipo de calidad de energía. Las condiciones de operación de este procedimiento son semejantes a las empleadas en la etapa uno, con velocidad de operación de 1800 min^{-1} .

Figura 77. Comportamiento de la corriente del motoreléctrico



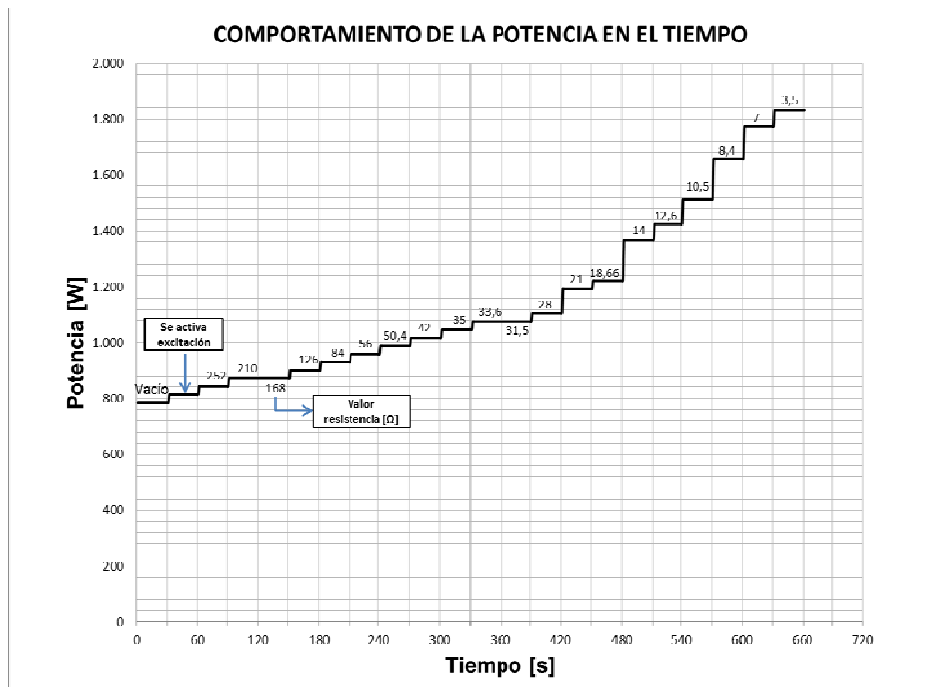
Fuente: Autores

Figura 78. Comportamiento del voltaje del motor eléctrico



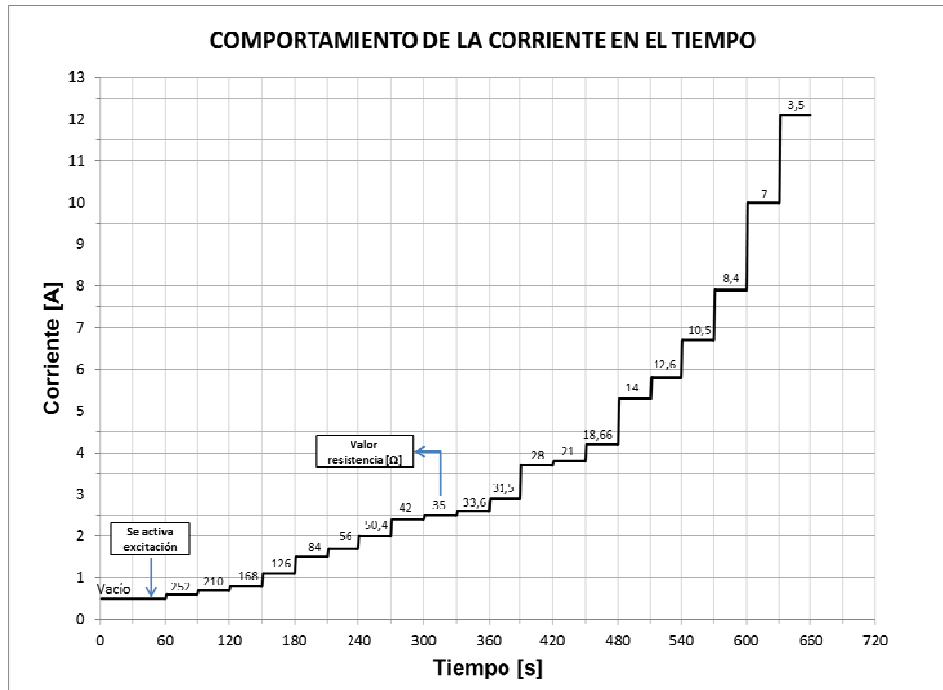
Fuente: Autores

Figura 79. Comportamiento de la potencia eléctrica del motor



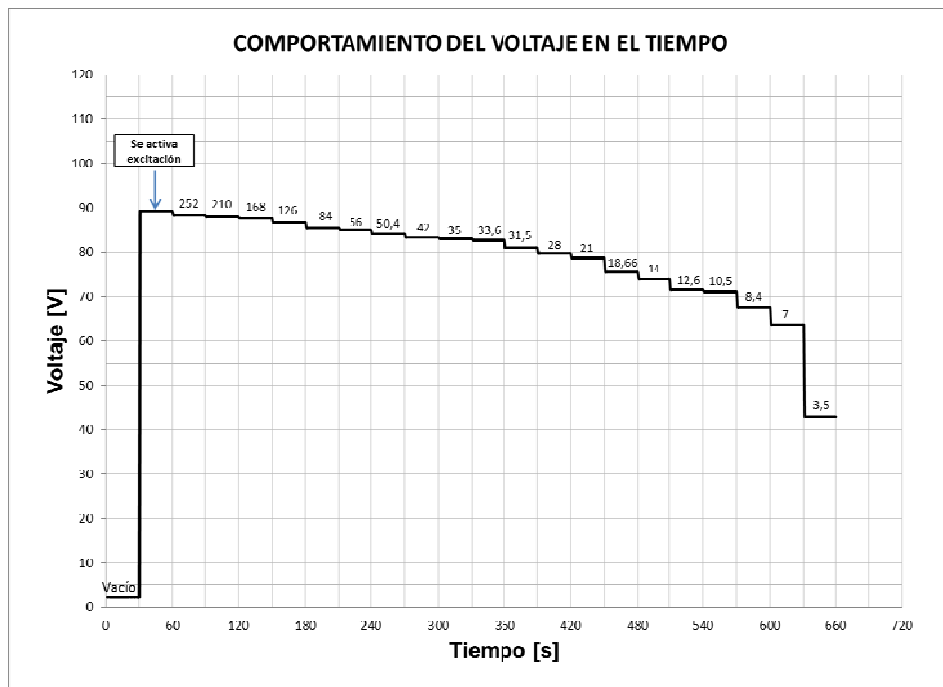
Fuente: Autores

Figura 80. Comportamiento de la corriente del generador eléctrico



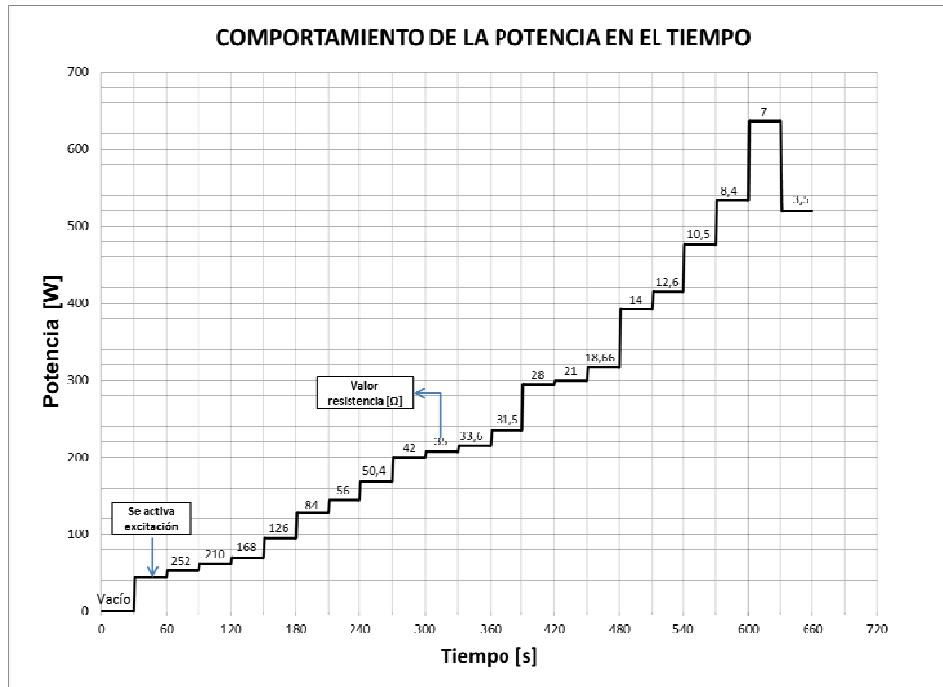
Fuente: Autores

Figura 81. Comportamiento del voltaje del generador eléctrico



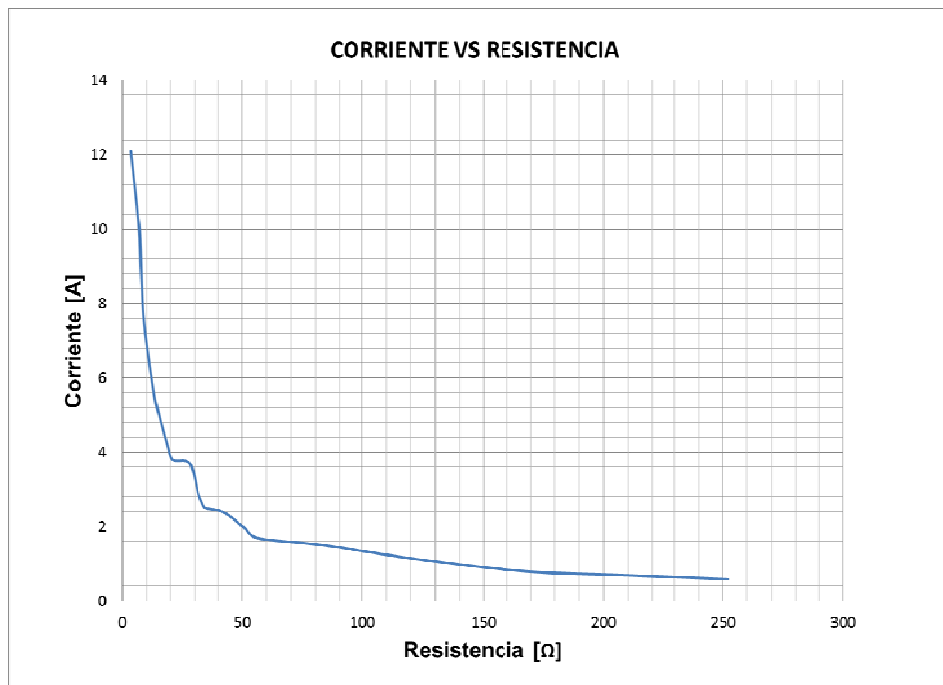
Fuente: Autores

Figura 82. Comportamiento de la potencia del generador



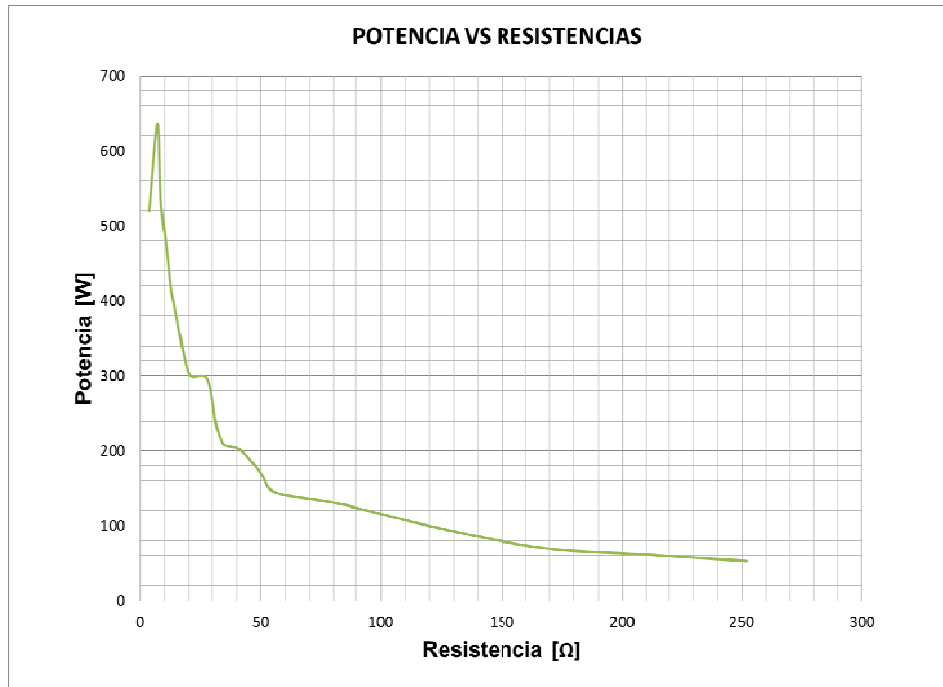
Fuente: Autores

Figura 83. Corriente del generador en función de la carga resistiva



Fuente: Autores

Figura 84. Potencia generada en función de la carga resistiva



Fuente: Autores

En la figura 77 se puede observar notoriamente el incremento en la corriente de consumo del motor eléctrico a medida que aumenta la carga resistiva, iniciando en vacío se aplica cada carga durante 30 segundos aproximadamente, por ende el comportamiento en forma de escala ascendente. Este comportamiento también se puede visualizar en las tablas 15, 16, 17, 18, 19 y 20 correspondiente a los resultados obtenidos de las dos etapas antepuestas.

El voltaje de consumo del motor eléctrico no presenta variaciones significativas tal como lo muestra la figura 78, propio del comportamiento del módulo de vibraciones mecánicas en las etapas 1 y 2.

Si la corriente de consumo incrementa, aunque el voltaje se encuentre casi constante, se debe presentar un aumento escalonado en la potencia consumida por el motor eléctrico tal como se puede observar en la figura 79.

De igual manera al aumentar la carga resistiva se presenta un comportamiento ascendente en la corriente eléctrica generada y una disminución en el voltaje

generado como lo muestra la figura 80 y 81 respectivamente, este comportamiento corresponde a las pruebas anteriores que comprenden las dos primeras etapas.

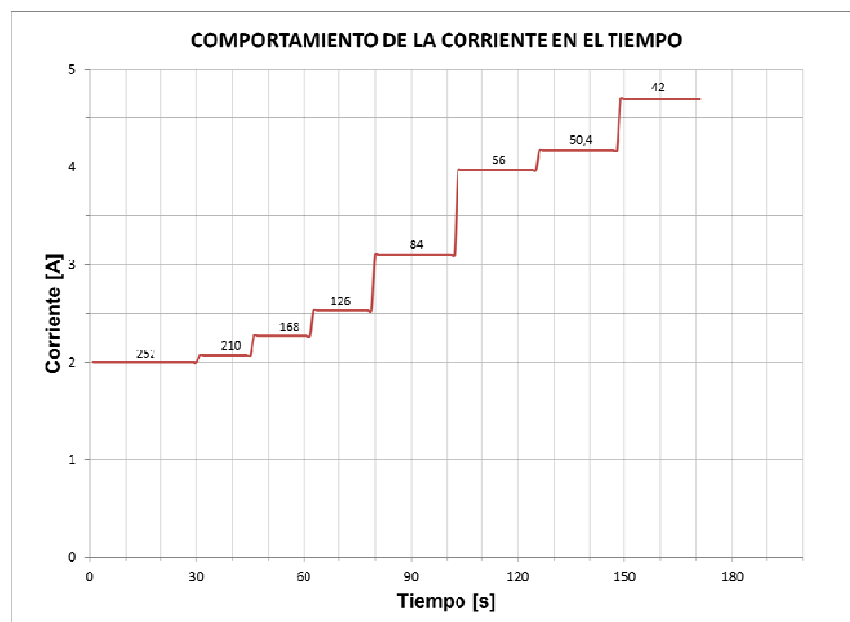
La potencia generada respecto al tiempo a medida que se aplica mayor carga resistiva presenta un incremento afín con los resultados de las pruebas anteriores pertenecientes a las etapas previas, esto se puede ver en la figura 82.

En las figuras 83 y 84, se puede observar el comportamiento de la corriente y la potencia generadas son semejantes a los obtenidos en las dos etapas anteriores. En la figura 84 se presenta una pérdida súbita de potencia generada, cuando se encuentra el módulo sometido a plena carga, esto debido a la caída de la tensión generada ante la imposibilidad de compensar con la fuente de excitación.

4.3.2 Gráficas tercera etapa, caja de engranajes sin acoplar

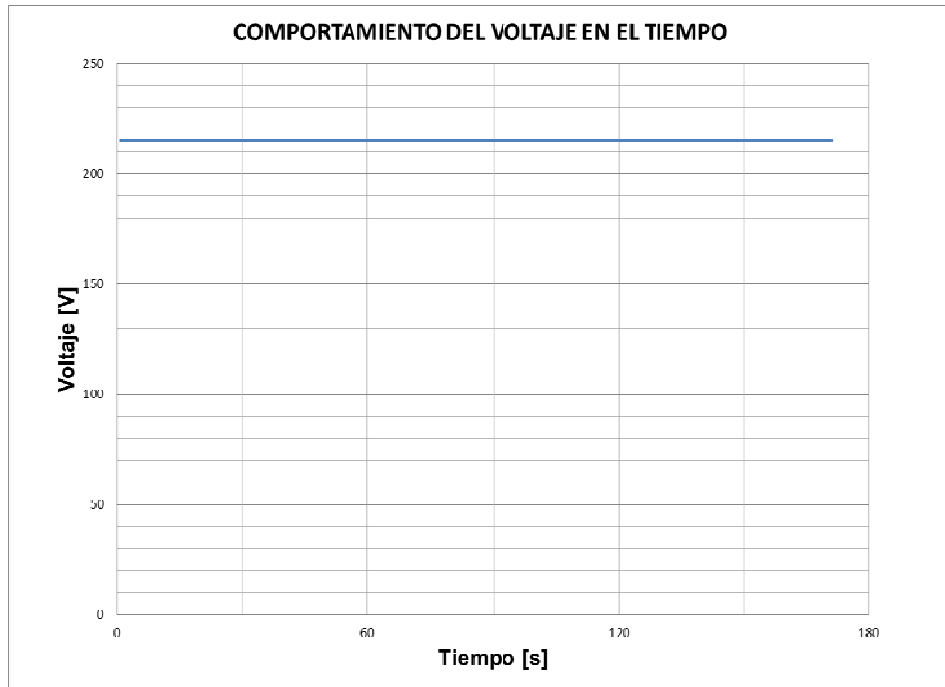
Tras elaborar la prueba anterior, se procede a desacoplar la caja de engranajes y realizar las mediciones pertinentes para esta configuración con el equipo de calidad de energía.

Figura 85. Comportamiento de la corriente del motor eléctrico



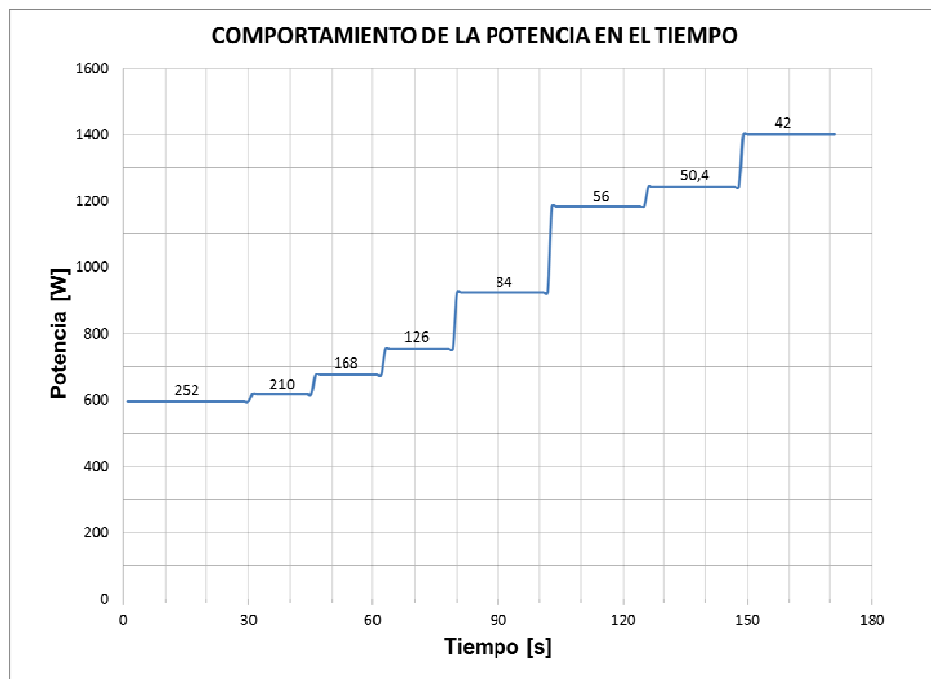
Fuente: Autores

Figura 86. Comportamiento del voltaje del motor eléctrico



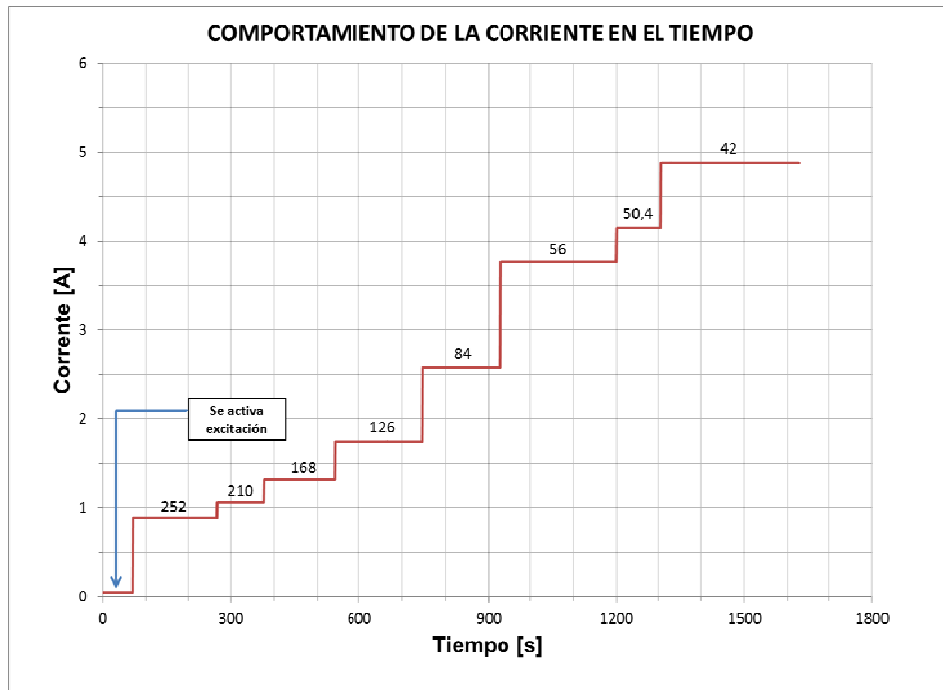
Fuente: Autores

Figura 87. Comportamiento de la potencia del motor eléctrico



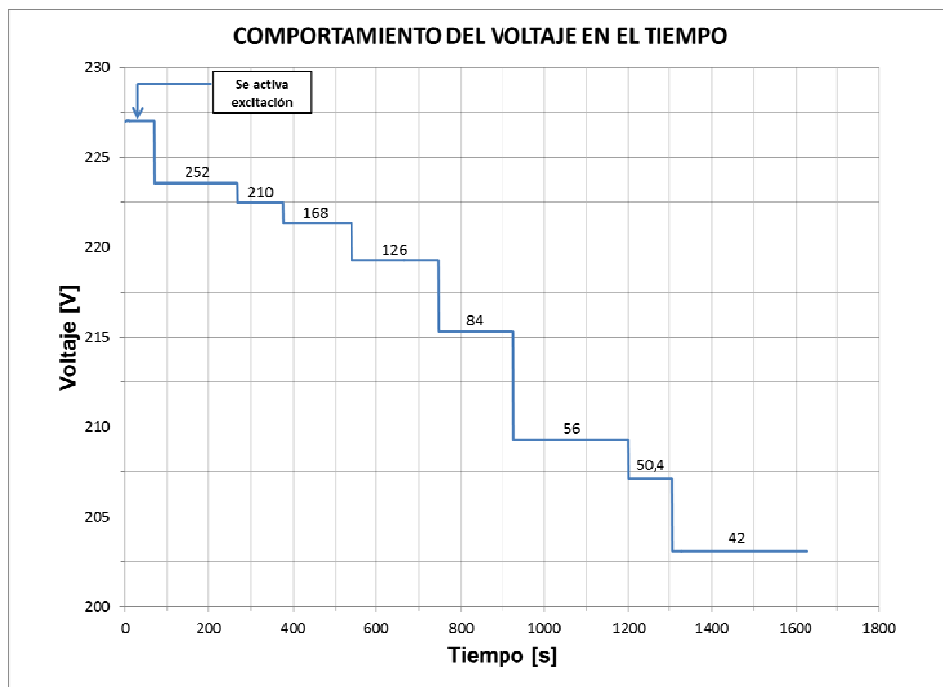
Fuente: Autores

Figura 88. Comportamiento de la corriente eléctrica generada



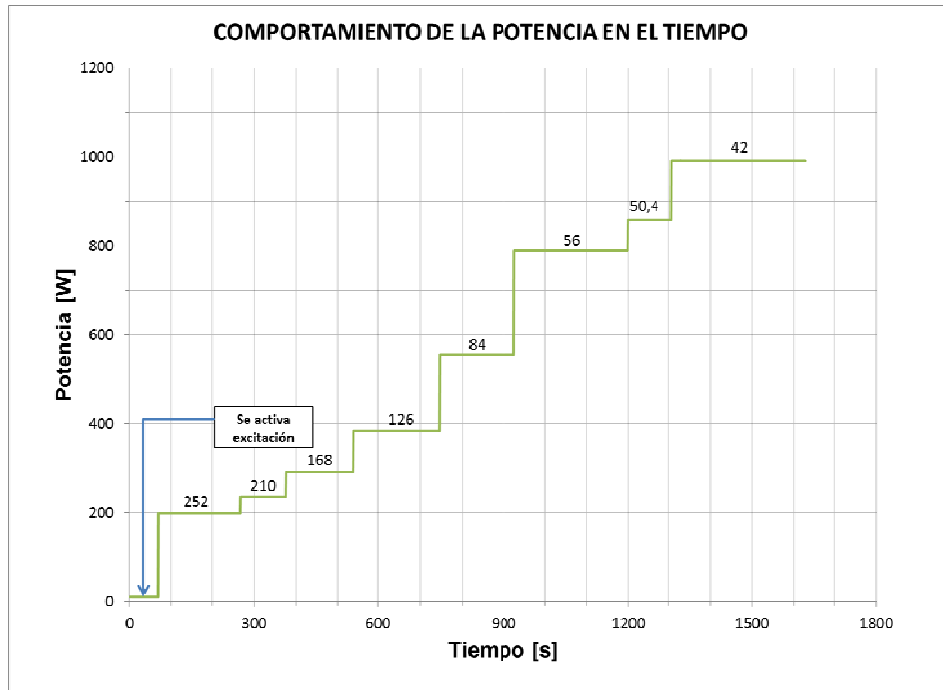
Fuente. Autores

Figura 89. Comportamiento de la corriente eléctrica generada



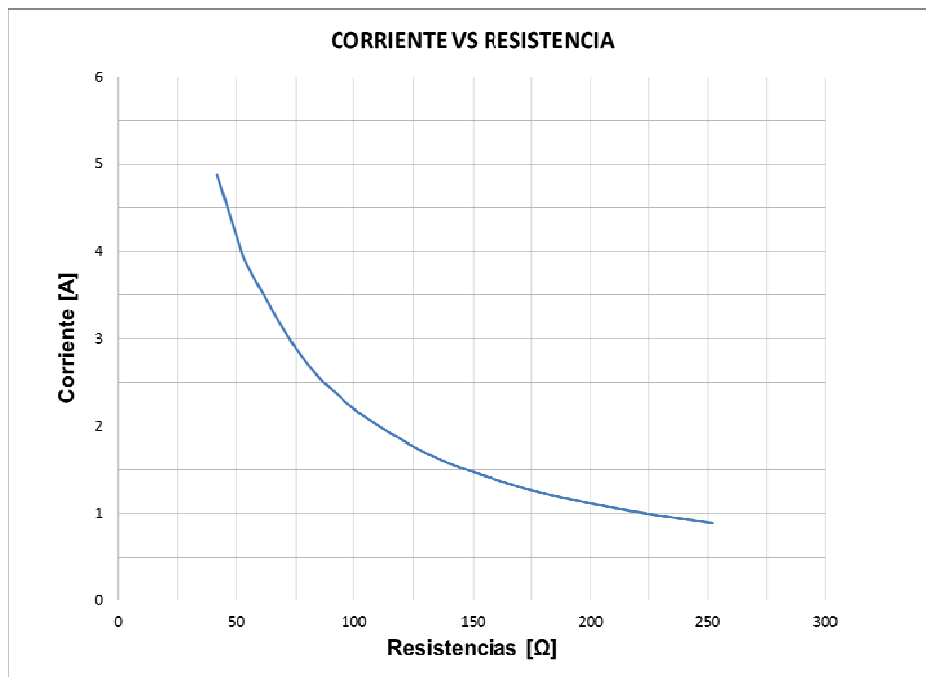
Fuente: Autores

Figura 90. Comportamiento de la potencia eléctrica generada



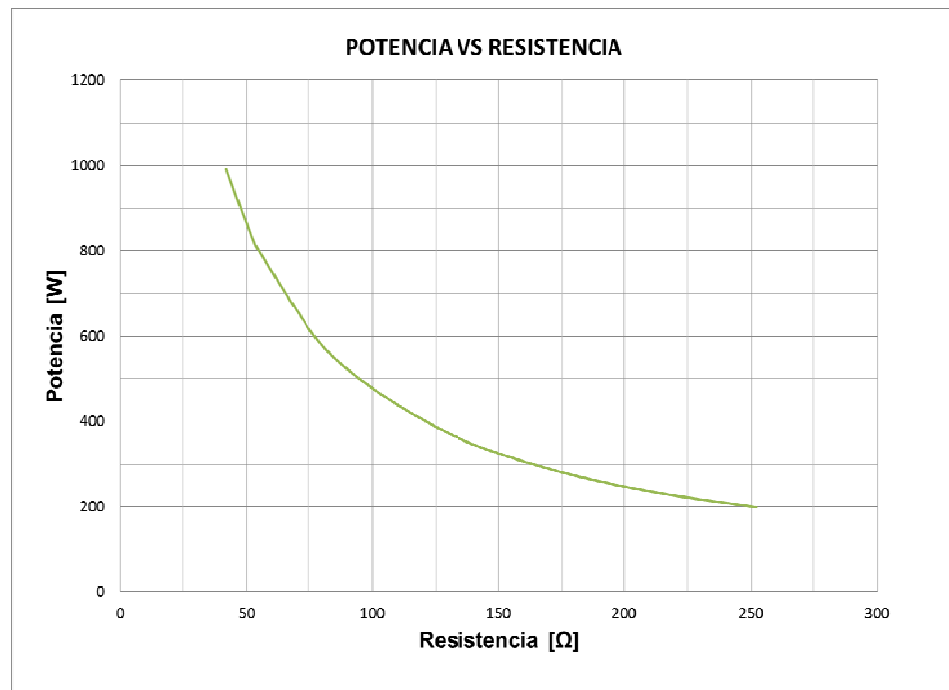
Fuente. Autores

Figura 91. Comportamiento de la corriente eléctrica generada en función de la carga resistiva



Fuente: Autores

Figura 92. Comportamiento de la potencia eléctrica generada en función de la carga resistiva



Fuente: Autores

Para esta prueba el periodo de duración de cada carga aplicada no corresponde a 30 segundos, como en la prueba anterior. Se inicia la prueba con carga resistiva de 252 Ω y se opera el motor hasta la potencia de 1400 W consumidos al aplicar 42 Ω de carga con la finalidad de obtener en el comportamiento dentro de este rango. Esto se puede observar en las figuras 85, 87, 88, 89 y 90.

La corriente del motor eléctrico presenta un comportamiento creciente a medida que aumenta la carga resistiva, este comportamiento también se presenta en las dos etapas previas (ver figura 85), lo cual significa que el sistema es frenado puesto que el motor requiere más corriente eléctrica para mover el eje.

El voltaje de consumo del motor eléctrico no presenta variaciones significativas respecto al tiempo cuando aumenta la carga resistiva en el módulo como se puede mostrar en la figura 86.

Debido al incremento en la corriente eléctrica de consumo en el motor, la potencia se comporta de igual manera a medida que se incrementa la carga (ver figura 87).

En el generador eléctrico se presenta el comportamiento característico de este durante las pruebas y es que a medida que aumenta la carga aplicada, aumenta la corriente y disminuye la tensión en los bornes lo cual deriva en un incremento de la potencia, tal como se puede ver en las figuras 88, 89 y 90 respectivamente.

En las figuras 91 y 92 se observa el comportamiento de la corriente y la potencia generadas en función de la carga resistiva aplicada. Comportamiento afín con las etapas previas.

Según los resultados y el comportamiento obtenidos con el equipo de análisis de calidad de energía, se comprueba de que los resultados adquiridos en las dos etapas anteriores son correctos.

5. CONCLUSIONES

- La selección del generador eléctrico y el banco resistivo cumplió con el objetivo requerido, ya que logra frenar el módulo de vibraciones mecánicas paulatinamente conforme aumenta el valor de la carga aplicada. Obteniendo un comportamiento definido del sistema gracias al amplio rango de cargas resistivas.
- Se hizo el montaje de los equipos mecánicos con la respectiva alineación haciendo uso de comparadores de caratula y aplicando el método de alineación inverso. Obteniendo un correcto funcionamiento de estos en conjunto, evitando vibraciones mecánicas no deseadas por desalineación.
- Se adquiere el nuevo banco resistivo, cumpliendo con características tales como, tamaño apropiado, refrigeración en el interior debido al calentamiento de las resistencias, aislamiento térmico para proteger los selectores y material de las resistencias.
- Se realizaron las pruebas correspondientes a las etapas 1, 2 y 3, con estas se obtuvo el comportamiento del módulo bajo distintas condiciones de operación alterando velocidades y magnitud de excitación, analizando variables físicas como voltajes, corrientes, potencias y velocidades mediante curvas.
- Teniendo las gráficas que describen el comportamiento del módulo de ruedas dentadas, se obtiene las expresiones matemáticas que rigen el comportamiento de este mediante regresiones potenciales y lineales empleando Microsoft Excel.
- La selección del generador eléctrico se realizó teniendo en cuenta que la potencia nominal de éste fuese mayor a la del motor, para frenar el módulo de ruedas dentadas cumpliendo con este objetivo, caso contrario se tiene para la generación de energía eléctrica.

- La excitatriz que energiza el rotor del generador cumple un papel vital en el desarrollo de las pruebas, puesto que al aumentar el voltaje de excitación trae como consecuencia el aumento de tensión y de corriente en los bornes del generador, contribuyendo a frenar el sistema.
- La potencia del motor eléctrico, como se pudo observar en los resultados, es el ente que limita el desarrollo de las pruebas, es decir, no debe trabajarse valores por encima de la potencia nominal porque las altas corrientes afectan su embobinado, por tal motivo, cuando se realizaron las pruebas tuvo que trabajar en función de éste parámetro.
- Para las tres etapas, se logró establecer por medio de gráficos que el par en el eje de generador, la corriente generada y la potencia mecánica del motor en función de la resistencia tiene un comportamiento de orden potencial, mientras que el par en función de la corriente se presenta un comportamiento de orden lineal.
- La velocidad angular a la que trabaja el generador (710 min^{-1}) y la utilización de un modulador de frecuencia trae como consecuencia que el módulo no opere en condiciones óptimas afectando su rendimiento, sin embargo, fue posible caracterizar el módulo de vibraciones mecánicas asumiendo rendimientos constantes.
- En la gráficas, de los procedimientos 1 y 2 de las pruebas de la segunda etapa, corriente vs resistencia, par vs resistencia y potencia vs resistencia las curvas presentan un decrecimiento en los valores mínimos de resistencia eléctrica aplicada y esto es debido a que en estos puntos el módulo está por fuera de los valores recomendados (nominales), lo cual hace que el comportamiento tienda a decaer.
- El uso del equipo de análisis de calidad de energía permitió ratificar los resultados obtenidos en las primeras dos etapas.

6. RECOMENDACIONES

- Aunque en las pruebas realizadas durante las tres etapas se excedió la potencia nominal del motor, se aconseja que no se opere en este rango en las prácticas de laboratorio, ya que al trabajar en este rango es posible que se dañen los equipos.
- Se aconseja cambiar la relación de la caja de engranajes de $i = 2,52$ a $i = 1$, ya que así permite que el generador opere a la velocidad nominal.
- Se propone cambiar el modulador de frecuencia por uno de mayor calidad, puesto que el actual genera cambios en el rendimiento del motor.
- Siempre que se realicen prácticas sobre el módulo se recomienda usar una fuente de excitación regulada, para que el voltaje mantenga constante durante las exigencias del trabajo.
- Antes de realizar las pruebas, verificar que todas las conexiones eléctricas del módulo se encuentren en óptimas condiciones, porque un error puede generar daños en los equipos y en el peor de los casos llegar a ser fatal.
- Al momento de alinear los equipos del módulo, se recomienda en primera instancia, elevar el generador eléctrico por medio de láminas Shim una altura mínima de 2,3 milímetros, para que luego no se presenten inconvenientes al momento de alinear el motor eléctrico respecto a la caja de engranajes, ya que éste es el equipo con mayor altura en el módulo.

BIBLIOGRAFÍA

OROZCO G., Álvaro Ángel, QUINTERO R, Héctor Fabio. CASTELLANOS Germán. HENAO CASTAÑEDA, Edison. LÓPEZ L, Juan Fernando. *Identificación en línea de modos tempranos de fallas dinámicas en máquinas rotativas*. Pereira: Publiprint Ltda, 2011. pág. 216.

ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. s.l. : Limusa S.A., 2004. pág. 252.

CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. s.l. : McGraw - Hill Interamericana, 2005. pág. 746.

DÍAZ GONZÁLEZ, Gúzman y BARBÓN ÁLVAREZ, Arsenio. *Variación de la velocidad de los motores eléctricos*. Oviedo : Servicios de publicaciones Universidad de Oviedo, 2002. pág. 309. I.S.B.N: 84 - 8317 - 298 - 4.

e - ducativa. [En línea] [Citado el: 18 de Noviembre de 2013.] http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1106/html/31_generadores.html.

YIHUA. YIHUA. [En línea] [Citado el: 5 de Julio de 2012.] http://www.yihua.cn/es/productDetail_150.html.

SIEMENS. SIEMENS. [En línea] [Citado el: 23 de Junio de 2012.] www.siemens.com.

INVERTERDRIVE SUPERMARKET. [En línea] [Citado el: 21 de febrero de 2013.] <http://www.inverterdrive.com/file/Lenze-AC-Tech-SMD-Manual>.

UPDATE INTERNATIONAL, INC. *La manera correcta la primera vez, alineamiento de precisión*. DENVER : UPDATE INTERNATIONAL, INC.

OCAMPO GIL, Luis Hernando. *Diseño de accionamiento y transmisiones de máquinas*. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 1993.